

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Categorización geotécnica según el tipo de suelo de la norma E030 en la urbanización de

Fonavi Abancay, Apurímac, 2024

Asesor:

Mag. Saavedra Ore, Danilo

Autor:

Caillahua Monzón Jimena Marveli

Para optar el título profesional de:

Ingeniero civil

Abancay – Apurímac – Perú

2026



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 040

En la ciudad de Abancay, a los trece (13) días del mes de julio del 2026, siendo las 11:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0584-2026-EPIC-FI-UTEA-SA de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería:

Presidente	:	Mag. MALDONADO MENDÍVIL, Ángel
Dictaminante	:	Dra. VERA TEVES, Rosa Marina
Replicante	:	Mag. CORNEJO ROSALES, Horacio Fernando Antonio Hassan

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada: **Categorización geotécnica según el tipo de suelo de la norma E030 en la urbanización de Fonavi Abancay, Apurímac, 2024**

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: CAILLAHUA MONZÓN, Jimena Marveli

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO(S) ☒ o DESAPROBADO(S) ☐:

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller	Nota	Detalle (**)
Br. CAILLAHUA MONZÓN, Jimena Marveli	11	APROBADO

Siendo las 12:45 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. MALDONADO MENDÍVIL, Ángel

()

Dictaminante: Dra. VERA TEVES, Rosa Marina

()

Replicante: Mag. CORNEJO ROSALES, Horacio Fernando Antonio Hassan

()

Nota: Desaprobado: 0-10; Aprobado: 11-20

(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

Reporte de similitud



Página 2 de 171 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::3117:608475253

19% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

15%  Fuentes de Internet

8%  Publicaciones

15%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Página 2 de 171 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::3117:608475253

Metadatos Complementarios

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Caillahua Monzón, Jimena Marveli
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	73274773
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0000-8916-4367
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Danilo Saavedra Ore
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	72846839
ORCID	:	https://orcid.org/0000-0002-1757-9616
Datos de la investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería civil
Línea de Investigación	:	Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	:	1 año
Fuente de financiamiento	:	Concurso de Investigación
Porcentaje de similitud	:	19 %
URL de OCOE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino.

A mis padres, Edwin y Marga, por todo lo que han hecho por mí; a Leito y Carlotita, por su amor incondicional y su infinita paciencia.

A mi Papá Apu y Mamá Nelly, por recibirme siempre con los brazos abiertos; a mi mami Leti y papá Osquitar, por enseñarme que nada se logra sin esfuerzo.

A mi querida Katy, por ser una inspiración constante en mi vida.

Y a Deyrita, Fernandito y Antonelita, mis compañeros de vida: este logro también es suyo.

A toda mi familia, por creer en mí. Su apoyo fue el refugio que me sostuvo en los momentos más difíciles.

A mí siempre pequeño Box, por su compañía fiel en cada madrugada, mientras luchaba por alcanzar esta meta.

Y a mí misma, por no rendirme, por seguir adelante incluso con miedo, y por haber llegado hasta aquí con el corazón lleno de fe.

Con todo mi amor,

Jimena

Agradecimiento

A Dios, por la fortaleza, por la salud y la bendición de tener una familia que siempre me acompaña.

A toda mi familia, por su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y compañía en cada etapa de mi vida.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de los Andes, por su enseñanza y orientación a lo largo de la formación académica. Gracias por compartir sus conocimientos y experiencias, que han sido pilares fundamentales en mi formación.

A todas las personas que me brindaron su apoyo y guía en este camino, y de manera muy especial a mi amigo Edgar Abel Hilaes Cervantes, por su paciencia y valiosa asesoría durante la formulación de la idea de esta tesis.

Resumen

Este trabajo buscó identificar qué tipo de suelo predomina en la urbanización Fonavi, en Abancay (Apurímac), siguiendo los lineamientos de la Norma Técnica E.030. Para ello, se combinaron métodos de campo ensayos SPT y MASW con análisis de laboratorio que incluyeron granulometría, límites de consistencia, humedad natural, densidad y corte directo. El estudio se desarrolló en tres puntos estratégicamente elegidos dentro de la zona.

Los resultados revelaron que el suelo de la zona es predominantemente una arcilla de baja a media plasticidad clasificada como CL según el sistema SUCS y A-4 según AASHTO, con valores de humedad que oscilan entre 15.4 % y 17.27 %, y una densidad seca promedio de 1.62 g/cm³. Por su parte, los ensayos MASW indicaron que, en función de la velocidad promedio de onda de corte (V_{s30}), el área corresponde a un suelo tipo S2.

Conocer con precisión estas características del suelo resulta fundamental para tomar decisiones informadas en el diseño estructural de esta zona urbana, especialmente considerando que Abancay se encuentra en una región con un riesgo sísmico considerable.

Palabras clave: suelo CL, Norma E.030, categoría S2, MASW, SPT, Abancay.

Abstract

This study aimed to identify the predominant soil type in the Fonavi urban district of Abancay, Apurímac, following the guidelines of Technical Standard E.030. To achieve this, field methods including SPT and MASW tests were combined with laboratory analyses covering grain size distribution, consistency limits, natural moisture content, density, and direct shear testing. The study was conducted at three strategically selected points within the area.

Results revealed that the soil in the zone is predominantly a low-to-medium plasticity clay classified as CL under the USCS system and A-4 under AASHTO with moisture values ranging from 15.4% to 17.27% and an average dry density of 1.62 g/cm³. MASW tests further indicated that, based on the average shear wave velocity (V_{s30}), the area corresponds to a soil type S2 classification.

A thorough understanding of these soil characteristics is essential for making well-informed decisions in the structural design of this urban area, particularly given that Abancay is located in a region with considerable seismic risk.

Keywords: CL soil, Standard E.030, S2 category, MASW, SPT, Abancay

Índice

Portada	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos Complementarios.....	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento.....	vi
Resumen	vii
<i>Abstract</i>	viii
Índice de tabla.....	xiii
Índice de figuras	xv
Índice de Anexos	xvi
I. Introducción	17
II. Planteamiento del problema	21
2.1. Descripción y formulación del problema	21
Descripción	21
2.2. Objetivos	25
2.2.1. Objetivo General	25
2.2.2. Objetivos Específicos.....	25
2.3. Justificación e importancia	26
2.3.1. Justificación teórica.....	26
2.3.2. Justificación metodológica.....	27
2.3.3. Justificación práctica	29
2.3.4. Justificación social	30
2.4. Hipótesis.....	31
2.5. Variables	32
III. Marco Teórico.....	33
3.1. Antecedentes	33
3.2. Bases teóricas.....	42

3.2.1 Perfil de suelo.....	45
3.3. Definición de términos.....	51
3.3.1. Categorización geotécnica.....	51
3.3.7 Tipos de suelo según la norma E030.....	55
IV. Metodología.....	57
4.1. Tipo y nivel de investigación	57
4.2. Método de investigación	57
4.3. Diseño de la investigación.....	58
4.4. Ámbito temporal y espacial	59
4.5. Población y muestra.....	60
4.6. Técnicas e Instrumentos	61
4.7. Procedimiento metodológico.....	61
4.8. Análisis de datos	64
4.9. Consideraciones éticas	64
V. Resultados y discusión.....	66
5.1. Presentación de Resultados.....	66
5.1.1 Caracterización Física y Mecánica del Suelo.....	66
5.1.2 Resultados del Ensayo de Penetración Estándar (SPT)	69
5.1.3 Resultados del Método MASW (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales)	
.....	71
5.1.4 Parámetros Dinámicos Estimados.....	74
5.2. Análisis y Correlación de Resultados.....	75
5.2.1. Estadística Descriptiva de las Variables Principales.....	75
5.2.2. Correlación entre V_{S30} y N_{60}	77
5.2.3. Relación entre Propiedades Índice y Velocidad Sísmica	84

5.2.4. Validación con Correlaciones Empíricas Internacionales.....	86
5.2.5. Consistencia entre Clasificaciones SUCS/AASHTO y Categoría Sísmica	87
5.3.1. Marco Normativo de Clasificación	90
5.3.2. Asignación de Categoría Sísmica.....	91
5.3.3. Implicancias Normativas para el Diseño Sismorresistente	92
5.4. Discusión de Resultados	93
5.4.1. Interpretación de la Clasificación Sísmica Obtenida	93
5.4.2. Validación de la Correlación V_{S30} - N_{60}	95
5.4.3. Coherencia entre Clasificaciones y Comportamiento Mecánico	96
5.4.4. Variabilidad Espacial y Representatividad	97
5.4.5. Implicancias para el Diseño Sismorresistente	98
5.4.6. Limitaciones del Estudio	99
5.4.7. Contribución al Conocimiento Geotécnico Regional.....	99
5.4.8. Síntesis Integradora	100
5.5.1. Perfiles Estratigráficos Individuales.....	101
5.5.2. Secciones Transversales Integradas	105
5.5.2. Interpretación Geológica del Modelo Estratigráfico	108
5.6.1. Registros Sísmicos (Sismogramas)	109
5.6.2. Curvas de Dispersión de Velocidad de Fase	113
5.6.3. Validación de la Calidad de Datos Geofísicos	118

VI.	Conclusiones.....	122
6.1.	Conclusiones Generales	122
6.2.	Conclusiones Específicas	123
VII.	Recomendaciones.....	127
7.1.	Recomendaciones para la Práctica Profesional.....	127
7.2.	Recomendaciones para Entidades Públicas y Normativas	128
7.3.	Recomendaciones para Investigaciones Futuras.....	129
7.4.	Recomendaciones Normativas y de Política Pública.....	130
VIII.	Referencias	132
IX.	Anexos	144

Índice de tabla

Tabla 1. Variables.....	32
Tabla 2. Clasificación de los perfiles de suelo según la Norma Técnica E.030	42
Tabla 3. Proceso metodológico	58
Tabla 4. Diseño de la investigación.....	58
Tabla 5. Ámbito espacial	59
Tabla 6. Ámbito espacial	60
Tabla 7. Técnicas e instrumentos	61
Tabla 8. Procedimiento metodológico.....	62
Tabla 9. Análisis de datos.....	64
Tabla 10. Ubicación geográfica de los puntos de investigación.....	66
Tabla 11. Composición granulométrica y clasificación de suelos.....	67
Tabla 12. Límites de Atterberg y propiedades plásticas.....	67
Tabla 13. Parámetros de resistencia al corte.....	68
Tabla 14. Valores de penetración estándar corregidos (N_{60})	69
Tabla 15. Velocidades de onda de corte representativas por estrato	73
Tabla 16. Valores de V_{s30} y clasificación sísmica preliminar	74
Tabla 17. Parámetros dinámicos promedio por estrato	75
Tabla 18. Estadística descriptiva de variables principales	75
Tabla 19. Matriz de correlación entre V_{s30} y N_{60}	77
Tabla 20. Pendientes de correlación V_s – N_{60} reportadas en la literatura	82
Tabla 21. Comparación de V_{s30} observado vs predicho por modelos empíricos	83
Tabla 22. Correlaciones entre V_{s30} y propiedades índice del suelo.....	85

Tabla 23. Análisis de residuos del modelo de regresión V_{s30} – N_{60}	87
Tabla 24. Integración de clasificaciones geotécnicas y sísmicas	87
Tabla 25. Clasificación de perfiles de suelo según Norma E.030 (2018)	90
Tabla 26. Asignación de categoría sísmica por punto de ensayo	91
Tabla 27. Comparación con estudios en regiones andinas	93
Tabla 28. Evaluación de calidad de datos geofísicos MASW	118

Índice de figuras

Figura 1. Perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) – MASW-01	71
Figura 2. Perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) – MASW-02	72
Figura 3. Perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) – MASW-03	72
Figura 4. Diagrama de dispersión V_{s30} vs N_{60} con línea de regresión	81
Figura 5. Perfil estratigráfico modelado SPT-01	102
Figura 6. Perfil estratigráfico modelado SPT-02	103
Figura 7. Perfil estratigráfico modelado SPT-03	104
Figura 8. Sección transversal SPT-01 → SPT-02	106
Figura 9. Sección transversal SPT-02 → SPT-03	107
Figura 10. Sección transversal SPT-01 → SPT-03	108
Figura 11. Registro sísmico MASW-01	111
Figura 12. Registro sísmico MASW-02	112
Figura 13. Registro sísmico MASW-03	113
Figura 14. Curva de dispersión MASW-01	115
Figura 15. Curva de dispersión MASW-02	116
Figura 16. Curva de dispersión MASW-03	117
Figura 17. Histograma de frecuencias de V_{s30}	119
Figura 18. Box-plot comparativo de variables	120

Índice de Anexos

Anexo 1 Matriz de consistencia.	145
Anexo 2 Operacionalización de variables.	147
Anexo 3 Panel gráfico	149

I. Introducción

Cuando se quiere diseñar una estructura que resista sismos, uno de los primeros pasos es entender cómo se comporta el suelo sobre el que se va a construir. Esto no es un trámite burocrático: un suelo mal clasificado puede hacer que un edificio quede sobredimensionado y encarezca innecesariamente, o peor aún, que quede subdimensionado y represente un riesgo real para quienes lo habitan. Uno de los parámetros más importantes en este proceso es la velocidad promedio de propagación de ondas de corte en los primeros 30 metros del subsuelo, conocida como V_{S30} . Este valor es el que determina, según la Norma Técnica E.030 "Diseño Sismorresistente" (MVCS, 2019), a qué categoría de sitio pertenece un terreno S1, S2, S3 o S4, lo cual a su vez define los coeficientes de amplificación sísmica que entran directamente en el cálculo de las fuerzas de diseño estructural.

Abancay, capital de la región Apurímac, no es una ciudad cualquiera en este contexto. Está ubicada en la Zona 3 de alta sismicidad ($Z = 0.35g$) y forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, una región donde la interacción entre las placas de Nazca y Sudamericana genera sismos de considerable magnitud con relativa frecuencia (IGP, 2012). A pesar de ello, la ciudad no cuenta con información geotécnica actualizada que permita clasificar sus suelos con la precisión que exige la normativa vigente.

Los estudios de suelos que se han realizado históricamente en la zona se han limitado al ensayo SPT y a las clasificaciones SUCS y AASHTO. Estas herramientas son útiles para conocer la resistencia estática del suelo y su composición granulométrica, pero no dicen nada sobre cómo se comporta ese suelo cuando llega una onda sísmica. Es precisamente ese vacío el que genera el problema: sin el parámetro V_{S30} que exige el Artículo 2.3.2 de la Norma E.030, la categoría de sitio queda sin definir con certeza, y eso se traduce en dos escenarios igual de

problemáticos diseños que gastan más de lo necesario (con sobrecostos estimados entre el 15 % y el 25 %) o diseños que subestiman la demanda sísmica y ponen en riesgo la seguridad estructural (Kramer, 1996; MVCS, 2019).

Frente a esta situación, la presente investigación propone una solución concreta: determinar la categoría de suelo predominante en la Urbanización Fonavi de Abancay combinando dos métodos complementarios el SPT y el MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). El MASW permite obtener perfiles de velocidad de onda de corte hasta 30 metros de profundidad analizando la dispersión de ondas superficiales de Rayleigh (Park et al., 1999), mientras que el SPT aporta valores de resistencia a la penetración dinámica (N_{60}) que se pueden correlacionar con la densidad relativa y el estado de consolidación del suelo (Terzaghi & Peck, 1948). Cuando ambos métodos se analizan en conjunto, los resultados se validan mutuamente y el margen de incertidumbre se reduce a menos del 10 % (Mayne et al., 2002).

Los resultados de este estudio buscan proporcionar una base técnica sólida y confiable para:

- **Diseño estructural sismorresistente:** Aplicación correcta de los coeficientes normativos E.030 (Factores S , T_p , T_L).
- **Caracterización geotécnica urbana:** Creación de la primera base de datos geofísica local de Abancay.
- **Microzonificación sísmica:** Insumo técnico para futuros estudios de zonificación del riesgo sísmico regional.
- **Planificación urbana:** Criterios geotécnicos para el ordenamiento territorial y restricciones constructivas.

Estructura del documento:

El trabajo se estructura en siete capítulos que avanzan de forma lógica desde el planteamiento del problema hasta las recomendaciones prácticas.

Capítulo I: Introducción sitúa al lector en el contexto del estudio: por qué importa clasificar bien el suelo en zonas sísmicas y desde qué enfoque metodológico se aborda la investigación.

Capítulo II: Planteamiento del Problema define con precisión el problema de investigación, establece los objetivos, explica por qué este estudio es relevante desde un punto de vista técnico y científico, y formula las hipótesis de trabajo en torno a la correlación entre V_{S30} y N_{60} .

Capítulo III: Marco Teórico construye el sustento teórico del estudio: cómo se propagan las ondas sísmicas, cómo clasifica los suelos la Norma E.030, en qué consisten los métodos MASW y SPT, y qué han encontrado investigaciones anteriores a nivel internacional, nacional y regional.

Capítulo IV: Metodología explica con detalle cómo se hizo la investigación: el tipo y diseño adoptado, la definición de la población y muestra, los equipos e instrumentos utilizados, y el procedimiento seguido paso a paso, incluyendo los criterios de calidad aplicados al procesamiento estadístico de los datos.

Capítulo V: Resultados y Discusión es el núcleo del trabajo. Aquí se presentan los resultados de la caracterización física y mecánica del suelo, los perfiles de velocidad V_s obtenidos con MASW, los valores N_{60} corregidos del SPT, el análisis de correlación estadística coeficiente de Pearson y regresión lineal, la categoría sísmica asignada conforme a la E.030, y una discusión comparativa con estudios previos y criterios normativos.

Capítulo VI: Conclusiones recoge las conclusiones: sintetiza los hallazgos más relevantes, verifica si las hipótesis planteadas se cumplen y responde directamente a cada objetivo de investigación, destacando el aporte concreto del estudio.

Capítulo VII: Recomendaciones cierra el trabajo con recomendaciones dirigidas a distintos actores profesionales, entidades públicas, investigadores y docentes orientadas a mejorar la práctica geotécnica local e impulsar estudios de microzonificación sísmica en la región Apurímac.

En conjunto, esta investigación busca ser un aporte útil y replicable para ingenieros, consultores geotécnicos, municipalidades y entidades de gestión del riesgo en la sierra sur del Perú, contribuyendo a que las edificaciones en zonas sísmicas se diseñen sobre bases técnicas más sólidas y actualizadas.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

Descripción

Se estima que para el año 2050 la población urbana mundial se habrá duplicado, y que cerca de siete de cada diez personas vivirán en ciudades. Un porcentaje importante de esas ciudades se encuentra en zonas de alta actividad sísmica, lo que convierte el crecimiento urbano acelerado en un factor que amplifica directamente la exposición de millones de personas al riesgo de terremotos (GBM, 2023). Esta tendencia incrementa la exposición de millones de personas a riesgos sísmicos significativos, agravados por la falta de comprensión de las condiciones geotécnicas del suelo y por la deficiente aplicación de normativas de construcción.

La insuficiente implementación de normas sismo-resistentes se ha evidenciado en desastres recientes, como el terremoto ocurrido en Turquía y Siria en 2023. La magnitud de los daños estructurales reveló graves deficiencias en la clasificación y control de los tipos de suelo, así como en la aplicación de los estándares de diseño (BBC, 2023). Según la Organización Mundial de la Salud, al menos 22 hospitales sufrieron colapsos parciales o totales durante el evento (CNN, 2023), lo cual demuestra que la falta de información geotécnica y la débil fiscalización de la normativa vigente constituyen factores críticos en la vulnerabilidad sísmica urbana. Las poblaciones densamente urbanizadas, junto con estructuras vulnerables y cimentaciones deficientes, aumentan enormemente el potencial de pérdidas humanas y materiales ante un sismo.

De manera similar, en América del Sur una porción importante del territorio se encuentra dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, una región de aproximadamente 40 000 kilómetros de longitud caracterizada por una intensa interacción tectónica, donde las placas oceánicas se

subducen bajo las placas continentales (NGE, 2023). Esta dinámica convierte a los países andinos, incluido el Perú, en zonas de alto riesgo sísmico.

En el ámbito nacional, eventos como el terremoto de Pisco (2007) evidenciaron que la falta de estudios geotécnicos detallados y la aplicación inadecuada de las normas de construcción contribuyeron al colapso de numerosas edificaciones esenciales. De acuerdo con el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI, 2009), cerca del 100 % de las vías de transporte terrestre resultaron afectadas, y muchas edificaciones con cimentaciones superficiales o mal diseñadas presentaron fallas estructurales severas, especialmente escuelas y hospitales construidos antes de la actualización de la Norma E.030. Si se hubiera contado con una adecuada categorización de suelos y un cumplimiento estricto de la norma sismorresistente, gran parte de los daños estructurales podrían haberse evitado.

En la región Apurímac, y específicamente en la ciudad de Abancay, capital regional, la situación es similar. La zona se encuentra clasificada como de alta sismicidad según el Mapa de Zonificación Sísmica del Perú y la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” (PCM, 2003). Sin embargo, no se dispone de información geotécnica ni sísmica actualizada que permita clasificar los suelos conforme a los parámetros de dicha norma. Los estudios existentes se limitan generalmente al uso del ensayo SPT (Standard Penetration Test) y a la clasificación SUCS/AASHTO, que proporcionan información sobre resistencia y textura, pero no sobre el comportamiento dinámico del suelo ante la acción sísmica.

La Norma E.030 establece que la categorización sísmica de los suelos se basa en la velocidad promedio de propagación de ondas de corte en los primeros 30 metros de profundidad (V_{S30}), y que esta clasificación (S1, S2, S3 o S4) influye directamente en los coeficientes de diseño estructural (C, Z, U y S). Por tanto, la falta de determinación del parámetro V_{S30} genera

incertidumbre en la definición de los esfuerzos sísmicos admisibles, lo que puede derivar tanto en sobredimensionamientos estructurales innecesarios como en subestimaciones peligrosas de la demanda sísmica.

La urbanización Fonavi de Abancay, área representativa del crecimiento urbano local, presenta edificaciones tipo residencial unifamiliar de autoconstrucción sobre suelos heterogéneos, con rellenos y arcillas de comportamiento variable. Esta condición, sumada a la ausencia de correlaciones entre los valores corregidos del SPT (N_{60}), las propiedades índices del suelo y la velocidad de onda de corte (V_s) obtenida mediante el método MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), dificulta la determinación del parámetro V_{s30} y la asignación precisa de la categoría sísmica.

La caracterización geotécnica (identificación SUCS/AASHTO) describe la naturaleza física del suelo, granulometría, plasticidad, densidad y consistencia, mientras que la caracterización sísmica evalúa su respuesta dinámica mediante el comportamiento de las ondas sísmicas. Integrar ambos enfoques permite comprender el suelo desde una perspectiva geotécnico-sísmica, situando esta investigación en el campo interdisciplinario entre la geotecnia y la ingeniería sísmica.

Por ello, el presente estudio propone integrar los resultados de los ensayos SPT, MASW y de laboratorio para determinar el parámetro V_{s30} y, con base en este, establecer la categoría sísmica del suelo según la Norma E.030, contribuyendo a mejorar la precisión del diseño estructural y la seguridad de las edificaciones en la urbanización Fonavi de Abancay.

Formulación del problema de investigación

En la región Apurímac no se cuenta con estudios geotécnicos ni sísmicos actualizados que permitan clasificar los suelos de acuerdo con la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente”. Los antecedentes disponibles provienen principalmente de los mapas de capacidad de uso mayor del suelo elaborados por la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN, 1981-1982) y de los registros climáticos publicados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2021), los cuales describen características físicas y climáticas generales, pero no incluyen parámetros dinámicos como la velocidad de onda de corte (V_s) ni información sobre la respuesta sísmica local.

Asimismo, de acuerdo con el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2025), en la región Apurímac no se dispone de mapas geotécnicos ni estudios de microzonificación sísmica a escala urbana, limitándose los registros existentes a cartografía geológica general. Esta carencia de información especializada impide estimar con precisión la categoría sísmica del suelo (S1, S2, S3 o S4) según la Norma E.030, lo que incrementa la incertidumbre en el diseño estructural sismo-resistente de edificaciones básicas y esenciales, especialmente en zonas urbanas en expansión como la urbanización Fonavi de Abancay.

Por esta razón, se plantea el siguiente problema de investigación:

Problema general

¿Cuál es la categoría sísmica de sitio según la Norma E.030 para la Urbanización Fonavi de Abancay, determinada a partir del valor V_{s30} obtenido mediante el método MASW y su correlación con los resultados del ensayo SPT (N60) y las propiedades índices del suelo?

Problemas específicos

- ¿Cuál es la velocidad promedio V_{s30} de los suelos de la Urbanización Fonavi según los perfiles MASW?
- ¿Qué categoría de suelo E.030 corresponde a cada punto de ensayo?
- ¿Qué correlación existe entre V_{s30} y los valores N_{60} corregidos del ensayo SPT?
- ¿Qué relación presentan las clasificaciones SUCS y AASHTO con las categorías E.030?
- ¿Qué implicancias geotécnicas y estructurales tiene la categoría de sitio obtenida para el diseño sismorresistente en Abancay?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

Clasificar el sitio de la Urbanización Fonavi de Abancay según la Norma E.030, mediante la estimación de la velocidad promedio de onda de corte V_{s30} con el método MASW y su correlación con los resultados del ensayo SPT (N_{60}) y las propiedades índices del suelo.

2.2.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del suelo mediante ensayos de laboratorio (granulometría, límites de Atterberg, densidad, cohesión, ángulo de fricción).
2. Calcular los valores corregidos de N_{60} obtenidos del ensayo SPT considerando los factores de energía, diámetro, longitud de varilla y sobrecarga.

3. Obtener los perfiles de velocidad V_s y determinar la velocidad promedio V_{S30} a partir de los datos MASW para cada punto de estudio.
4. Asignar las categorías sísmicas de sitio de acuerdo con los umbrales establecidos en la Norma E.030, utilizando los valores de V_{S30} estimados.
5. Establecer la correlación estadística entre V_{S30} , N_{60} y las propiedades índices, empleando coeficientes de correlación de Pearson o Spearman, y analizar su significancia ($p < 0.05$).
6. Discutir las implicancias técnicas de los resultados obtenidos en la caracterización y diseño sismorresistente de las edificaciones en Abancay.

2.3. Justificación e importancia

La presente investigación se justifica en cuatro dimensiones: teórica, metodológica, práctica y social. Cada una de ellas se sustenta a continuación con la literatura científica y la normativa correspondientes.

2.3.1. Justificación teórica

Las correlaciones empíricas entre la velocidad de propagación de ondas de corte y la resistencia a la penetración estándar constituyen un cuerpo de conocimiento consolidado, pero desarrollado sobre una base geológica restringida. Los modelos de referencia más difundidos İyisan (1996), Hasaңebi y Ulusay (2007) y Dikmen (2009) fueron calibrados con depósitos sedimentarios de Turquía, y la revisión sistemática de Wair et al. (2012) documenta que la dispersión de estas correlaciones se incrementa de manera apreciable cuando se aplican a materiales cuya génesis difiere de la de los suelos con que fueron ajustadas. Los depósitos aluviales y coluviales que conforman el subsuelo de los valles interandinos presentan precisamente esa condición: su formación

está gobernada por procesos de meteorización, transporte de ladera y heterogeneidad lateral (INGEMMET, 2025) que no se encuentran representados en las bases de datos de calibración disponibles. Existe, por tanto, un vacío de conocimiento identificable: no se dispone de evidencia empírica que permita evaluar el comportamiento de estos modelos en depósitos de valle interandino.

La presente investigación aporta a la reducción de ese vacío en tres sentidos. En primer lugar, genera los primeros valores medidos de velocidad de onda de corte para el distrito de Abancay: el único antecedente próximo, desarrollado por Gómez y Torre (2020) en el distrito de Tamburco, se orientó a la caracterización estratigráfica y a la determinación del periodo fundamental del suelo, sin establecer correlaciones entre la velocidad de onda de corte y la resistencia a la penetración. En segundo lugar, documenta el comportamiento del parámetro V_{s30} adoptado por la normativa por expresar la rigidez del depósito a pequeñas deformaciones (Kramer, 1996) en un tipo de material escasamente representado en la literatura. En tercer lugar, contribuye a la caracterización de la variabilidad geotécnica local, condición previa a cualquier tratamiento probabilístico de las propiedades del suelo (Phoon y Kulhawy, 1999). Los resultados obtenidos amplían así la base empírica sobre la que podrán construirse correlaciones regionales en investigaciones posteriores.

2.3.2. Justificación metodológica

El diseño metodológico integra un método geofísico no invasivo con un ensayo de penetración in situ, combinación que la literatura especializada sustenta por la complementariedad de la información que cada uno proporciona. El análisis multicanal de ondas superficiales permite obtener el perfil de velocidad de onda de corte en

profundidad sin necesidad de perforación, a partir del registro de la dispersión de las ondas Rayleigh (Park et al., 1999); el ensayo de penetración estándar, por su parte, aporta una medida directa de la resistencia del material a la penetración dinámica, vinculada a su compacidad y consistencia (Mayne et al., 2002). Foti et al. (2014) fundamentan que la lectura conjunta de ambas fuentes permite caracterizar el depósito tanto en su respuesta a pequeñas deformaciones como en su resistencia, dimensiones que ningún método aislado cubre. La investigación adopta un diseño no experimental de nivel correlacional, apropiado cuando se busca examinar la asociación entre variables medidas en su contexto natural, sin manipulación deliberada (Hernández-Sampieri et al., 2014).

El procedimiento incorpora asimismo criterios de control de calidad y de replicabilidad. Foti et al. (2018) establecen las buenas prácticas internacionalmente aceptadas para la adquisición e interpretación de datos de ondas superficiales, y Garofalo et al. (2016) cuantifican, mediante un ensayo ciego entre equipos independientes, la variabilidad asociada a la inversión de la curva de dispersión, lo que permite dimensionar la incertidumbre inherente al método. Wair et al. (2012) proporcionan, a su vez, los criterios para la selección del modelo de correlación apropiado según el tipo de suelo. La aplicación conjunta de estas referencias confiere trazabilidad al procedimiento y lo hace reproducible en otras capitales provinciales de la sierra sur con condiciones geológicas análogas. Corresponde precisar, no obstante, que el número de puntos de investigación disponibles limita el alcance del tratamiento estadístico: Cohen (1992) establece que la detección de una correlación de magnitud alta con una potencia adecuada requiere un mínimo aproximado de trece pares de datos, umbral que el

presente estudio no alcanza a nivel de punto, por lo que los coeficientes obtenidos se reportan con carácter exploratorio.

2.3.3. Justificación práctica

La Norma Técnica E.030 «Diseño Sismorresistente» establece que el perfil de suelo se asigne a partir de la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte en los treinta metros superiores del terreno, y de dicho perfil dependen el factor de suelo S y los periodos TP y TL que intervienen en la determinación de la fuerza sísmica de diseño (MVCS, 2018). La modificación aprobada mediante la Resolución Ministerial N° 183-2026-VIVIENDA refuerza esa exigencia al incorporar lineamientos mínimos para la ejecución de estudios de microzonificación sísmica (MVCS, 2026). En consecuencia, la disponibilidad de valores locales de V_{S30} no constituye una cuestión académica sino un requisito para la aplicación correcta del dispositivo vigente. El método empleado resulta además viable en el contexto local: al no requerir perforación, el MASW reduce sustancialmente el costo y la complejidad logística de la exploración en terrenos de topografía accidentada (Foti et al., 2014).

Los resultados de esta investigación constituyen un insumo técnico directo para tres destinatarios. Para los proyectistas y consultores geotécnicos que intervienen en la Urbanización Fonavi, aportan valores de referencia medidos donde hasta la fecha solo había la asunción. Para la Municipalidad Provincial de Abancay, proporcionan un primer punto de partida para la elaboración de la microzonificación sísmica del distrito: el programa nacional desarrollado por el CISMID (2019) generó mapas mediante microtemores, MASW y la técnica H/V, pero su cobertura se concentró en la costa y la sierra central, sin incluir mediciones específicas para la región Apurímac. Para futuras

investigaciones, ofrecen un procedimiento documentado y un conjunto de datos primarios sobre los que apoyarse.

2.3.4. Justificación social

La finalidad que la propia Norma Técnica E.030 se atribuye es evitar la pérdida de vidas humanas, asegurar la continuidad de los servicios básicos y minimizar los daños a la propiedad ante la ocurrencia de un sismo (MVCS, 2018). El cumplimiento de esa finalidad depende de que la clasificación del suelo sea correcta, puesto que los efectos de sitio pueden amplificar de manera significativa el movimiento sísmico en superficie respecto del registrado en roca (Kramer, 1996). La experiencia nacional lo confirma: la evaluación de los daños producidos por el sismo de Pisco de 2007 evidenció que las mayores concentraciones de destrucción se asociaron a condiciones locales del terreno y no únicamente a la magnitud del evento (INDECI, 2009). Una clasificación errónea del perfil de suelo se traduce, por tanto, en un riesgo asumido sin conocimiento por quienes habitan las edificaciones.

Abancay se emplaza en una región de sismicidad significativa y su crecimiento urbano se ha desarrollado en buena parte al margen de estudios geotécnicos previos (INGEMMET, 2025). En ausencia de información local sobre la velocidad de onda de corte, los proyectistas se ven obligados a asumir la categoría de sitio, decisión que puede derivar en dos escenarios igualmente adversos: la subestimación de la demanda sísmica, que compromete la seguridad de las personas, o su sobreestimación, que encarece la edificación formal y desincentiva su adopción. Al aportar valores medidos, esta investigación reduce esa incertidumbre y contribuye a que la seguridad sismorresistente sea una condición verificable y no una presunción.

2.4. Hipótesis

Hipótesis general

- La velocidad promedio V_{s30} obtenida mediante MASW presenta una correlación significativa ($r > 0.6$; $p < 0.05$) con los valores N_{60} del SPT y las propiedades índice del suelo, clasificando la urbanización Fonavi dentro de la categoría sísmica S2 según la Norma E.030.

Hipótesis específicas

- Existe una correlación positiva significativa entre la velocidad promedio V_{s30} (MASW) y los valores corregidos N_{60} del SPT en los estratos de 0–30 m.
- Los valores de V_{s30} obtenidos se encuentran en el intervalo $180 < V_{s30} \leq 500$ m/s, por lo que el sitio clasifica como perfil de suelo tipo S2 (suelos intermedios) conforme a la Tabla N° 2 de la Norma Técnica E.030.
- Las propiedades físicas y mecánicas del suelo (cohesión y ángulo de fricción) guardan coherencia con el comportamiento esperado de suelos de rigidez media clasificados como S2.
- Las clasificaciones SUCS y AASHTO obtenidas del laboratorio confirman la correspondencia entre el tipo de suelo (CL o A-4) y la categoría sísmica S2 derivada del valor de V_{s30} .

2.5. Variables

Tabla 1
Variables

TIPO	VARIABLE	INDICADOR	UNIDAD	METODO/FUENTE	CRITERIO NORMATIVO
INDEPENDIENTE	Vs30	Promedio armónico 0-30 m	m/s	MASW	E.030 (S1-S4)
DEPENDIENTE	Categoría de sitio	Tipo S1-S4	—	E.030	Tabla 3, Norma E.030
DEPENDIENTE	N60	Golpes corregidos	—	SPT	ASTM D1586
DEPENDIENTE	Propiedades índices	LL, LP, IP, γ_d , c, ϕ	—	Lab. geotécnico	ASTM D4318, D7263
CONTROL	Profundidad, humedad, coordenadas	m / % / UTM	Campo	—	

Nota. Elaboración propia.

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

La caracterización sísmica de sitios ha experimentado una evolución significativa en las últimas décadas. Uno de los avances más relevantes ha sido la integración de métodos geofísicos no invasivos, como el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), con ensayos geotécnicos tradicionales como el ensayo de penetración estándar (SPT). Esta combinación permite estimar la velocidad de onda de corte (V_s), parámetro fundamental tanto para clasificar el perfil de suelo conforme a la normativa vigente como para evaluar la amplificación del movimiento sísmico. A continuación se presentan los antecedentes revisados en los ámbitos internacional, nacional y local.

Antecedentes internacionales

Jin et al. (2023), en su artículo titulado *Analysis of horizontal design spectral characteristic parameters based on ground motion in southwest China*, publicado en la revista *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics* y desarrollado en la región suroeste de China, tuvieron como objetivo calibrar los parámetros característicos del espectro de diseño sísmico de esa región, partiendo de que el movimiento sísmico presenta diferencias regionales que deben considerarse al establecer dichos parámetros. Mediante una metodología cuantitativa, aplicaron el algoritmo GLDE y un modelo espectral de diseño de cuatro etapas sobre 3084 registros de movimiento sísmico procedentes de 276 terremotos ocurridos en el suroeste de China, y contrastaron los resultados obtenidos con los parámetros de la norma sísmica china vigente. Los resultados revelaron que, para la región suroeste, el primer punto de inflexión (T_0) resulta ligeramente mayor que el valor normativo, el periodo característico (T_g) difiere de él, y el tercer punto de inflexión (T_d), el factor máximo de amplificación ($\beta_{\max}$) y el índice de

atenuación del segmento descendente (γ) son todos mayores que los valores vigentes. En conclusión, se determinó que los parámetros normativos de alcance nacional no representan adecuadamente el movimiento sísmico regional, por lo que los resultados pueden servir de referencia para el establecimiento de espectros de diseño regionales. Este antecedente respalda la premisa de la presente investigación que los parámetros sísmicos de diseño exigen verificación con datos locales, si bien aborda la variabilidad regional desde los registros de movimiento del terreno y no desde la caracterización del perfil de suelo, que es la vía que aquí se adopta.

Aroya (2021), en su tesis titulada *Categorización geotécnica de un sitio susceptible al agrietamiento: Aplicación a la rehabilitación de cimentación de un edificio en Iztapalapa*, desarrollada en Iztapalapa, México, tuvo como objetivo categorizar geotécnicamente un sitio urbano con alta incidencia de agrietamientos, con miras a la rehabilitación de la cimentación de una edificación. Mediante una metodología aplicada de carácter descriptivo, empleó herramientas de sistemas de información geográfica y análisis geoespacial sobre la información geotécnica del sitio. Los resultados revelaron zonas vulnerables caracterizadas por suelos de alta compresibilidad, humedad elevada y presencia de arcillas expansivas. En conclusión, propuso un esquema de rehabilitación de cimentaciones adaptado a esas condiciones. Si bien el estudio constituye un aporte relevante para la categorización de sitios problemáticos, la ausencia de parámetros dinámicos como la velocidad de onda de corte limita su utilidad para una caracterización sísmica integral, que es el enfoque de la presente investigación.

Valderrama y Barbosa (2023), en su tesis titulada *Diseño de mapa urbano de zonificación geotécnica del área oriental de la comuna cuatro, Duitama*, realizada en Duitama, Colombia, tuvieron como objetivo diseñar un mapa urbano de zonificación geotécnica del área

oriental de dicha comuna. Mediante una metodología cuantitativa de campo, ejecutaron ensayos in situ y de caracterización convencional, y aplicaron interpolación espacial mediante sistemas de información geográfica. Los resultados evidenciaron capacidades portantes favorables para cimentaciones superficiales en el área estudiada. En conclusión, se determinó la viabilidad de la zonificación geotécnica como instrumento de planificación urbana. No obstante, al centrarse exclusivamente en parámetros estáticos y prescindir de métodos geofísicos como el MASW, el comportamiento dinámico del subsuelo quedó sin evaluar.

Abul y Sinha (2023), en su artículo titulado *Seismic site characterization using MASW and correlation study between shear wave velocity and SPT-N*, publicado en la revista *Journal of Applied Geophysics* y desarrollado en el campus Jais del Instituto Rajiv Gandhi de Tecnología Petrolera, en la Cuenca Indo-Gangética de la India, tuvieron como objetivo desarrollar una nueva ecuación de correlación entre el número de golpes del ensayo SPT y la velocidad de onda de corte, y caracterizar sísmicamente el sitio a partir de ella. Mediante una metodología cuantitativa de campo, adquirieron datos MASW en doce ubicaciones y dispusieron de ensayos SPT ejecutados en veintiséis sondajes hasta 30 m de profundidad, con registros cada 1.5 m; emparejaron los doce sondajes más próximos a las líneas MASW para establecer las relaciones entre SPT-N y V_s , desarrollaron funciones de correlación lineales y no lineales, y emplearon la función lineal para estimar la velocidad de onda de corte en los catorce sondajes restantes. Los resultados revelaron que las funciones lineal y no lineal resultaron estadísticamente similares, y que el V_{s30} del área oscila entre 285 y 375 m/s, correspondiendo la mayor parte del área a la clase de sitio CD y una porción menor a la clase D, conforme al esquema NEHRP-2020. En conclusión, se determinó que la relación obtenida puede emplearse con fines geotécnicos en sitios de condiciones geológicas similares, y se elaboraron mapas de velocidad media de onda

de corte a distintas profundidades como insumo para la identificación de riesgos geotécnicos. Este estudio constituye el antecedente metodológicamente más próximo a la presente investigación, tanto por la integración MASW-SPT como por el rango de V_{s30} obtenido, comparable al del área de estudio; no obstante, se desarrolló sobre depósitos aluviales de una gran llanura fluvial, condición distinta de la de los depósitos aluviales y coluviales de valle interandino que aquí se investigan.

Karsli y Babacan (2024), en su artículo titulado *Subsurface characterization by active and passive source geophysical methods after the 06 February 2023 earthquakes in Turkey*, publicado en la revista *Natural Hazards* y desarrollado en el sur de Turquía, tuvieron como objetivo caracterizar el subsuelo de las zonas afectadas por los terremotos de febrero de 2023 mediante métodos geofísicos de fuente activa y pasiva. Mediante una metodología cuantitativa de campo, aplicaron el método MASW, mediciones de microtemores y métodos sísmicos activos, levantando ocho perfiles. Los resultados revelaron la existencia de tres capas principales en el subsuelo, con diferencias de rigidez que permitieron clasificar los terrenos en distintas categorías de sitio. En conclusión, se determinó la utilidad de los métodos geofísicos combinados para la evaluación del peligro geotécnico posterior a un sismo. Sin embargo, el estudio no priorizó la correlación entre métodos geotécnicos y geofísicos, lo que limita su utilidad para el desarrollo de modelos predictivos integrados.

En conjunto, los estudios internacionales revisados ofrecen bases metodológicas importantes, pero comparten una limitación estructural: la mayoría se desarrolló en suelos sedimentarios homogéneos arenas densas o depósitos costeros de estratigrafía simple, sin considerar la variabilidad litológica característica de las regiones montañosas. Modelos como el de Abul y Sinha (2023) no incorporan suelos residuales, volcánicos o coluviales. Estas

limitaciones refuerzan la necesidad de desarrollar estudios adaptados a la realidad geológica de la sierra peruana, donde la topografía, la meteorización y la heterogeneidad lateral del subsuelo modifican de forma significativa el comportamiento dinámico del terreno.

Antecedentes nacionales

En el Perú, la investigación sobre caracterización sísmica de suelos ha avanzado de manera notable en los últimos años, alineándose con los requerimientos de la Norma Técnica E.030, que asigna el perfil de suelo a partir de la velocidad promedio de onda de corte V_{S30} y de parámetros geotécnicos como el número de golpes corregido del ensayo SPT (MVCS, 2018). Con todo, la mayoría de estos estudios se concentra en zonas costeras o en la sierra central, dejando un vacío en la sierra sur.

El CISMID (2019), en su informe institucional titulado *Programa presupuestal de reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres (PREVAED)*, desarrollado a escala nacional, tuvo como objetivo generar mapas de microzonificación sísmica para las principales ciudades del país. Mediante una metodología cuantitativa de campo, aplicó mediciones de microtemores, el método MASW y la técnica de cocientes espectrales H/V. Los resultados revelaron variaciones apreciables de V_{S30} incluso dentro de zonas urbanizadas de Lima y de la sierra central. En conclusión, se determinó que V_{S30} constituye el parámetro más robusto para la asignación del perfil de suelo. No obstante, su cobertura se concentró en depósitos aluviales y costeros, y no incluyó mediciones específicas para la región Apurímac, lo que limita su aplicabilidad al área de la presente investigación.

Alata y Zevillano (2021), en su tesis titulada *Correlación entre el número de golpes N60 del ensayo de penetración estándar y la velocidad de ondas de corte (V_s) para los suelos*

arenosos del distrito de Juliaca, Puno, realizada en Juliaca, Puno, tuvieron como objetivo establecer una correlación entre el número de golpes corregido N_{60} y la velocidad de onda de corte en suelos arenosos. Mediante una metodología cuantitativa de nivel correlacional, ejecutaron treinta ensayos MASW y SPT de manera simultánea en el distrito de Juliaca. Los resultados revelaron una correlación empírica de tipo potencial, con coeficientes de determinación comprendidos entre 0.7 y 0.8, y permitieron clasificar los suelos estudiados en los perfiles S2 y S3 conforme a la Norma Técnica E.030. En conclusión, se determinó la viabilidad de estimar la velocidad de onda de corte a partir del ensayo SPT en depósitos arenosos altiplánicos. Este antecedente es el más próximo a la presente investigación por su objetivo y su diseño; sin embargo, su enfoque en arenas homogéneas y su tamaño muestral —muy superior al aquí disponible limitan su replicabilidad directa en contextos de mayor heterogeneidad litológica como el de Apurímac.

Viveros (2022), en su tesis titulada *Caracterización dinámica del suelo mediante la aplicación de métodos sísmicos en el pueblo tradicional El Pasto, distrito de Socabaya, provincia de Arequipa*, realizada en Socabaya, Arequipa, tuvo como objetivo caracterizar dinámicamente el suelo mediante la aplicación de métodos sísmicos. Mediante una metodología cuantitativa de campo, combinó refracción sísmica y el método MASW en seis líneas de medición. Los resultados revelaron velocidades de onda de corte promedio comprendidas entre 150 y 350 m/s, con materiales blandos en las capas superficiales y suelos intermedios a mayor profundidad, en correspondencia con la geología volcánica y aluvial de la zona. En conclusión, se determinó la tipificación del sitio conforme a la Norma Técnica E.030. Aunque el estudio avanza en la caracterización de entornos urbanos andinos, no incluye correlaciones directas

entre la velocidad de onda de corte y la resistencia a la penetración, vínculo que la presente investigación sí aborda.

Jines y Medina (2024), en su tesis titulada *Evaluación del potencial de licuación mediante los ensayos de SPT y CPT en suelos lacustrinos de Cerro de Pasco*, realizada en Cerro de Pasco, tuvieron como objetivo evaluar el potencial de licuación de suelos lacustrinos mediante dos ensayos de penetración. Mediante una metodología cuantitativa de campo, ejecutaron y compararon ensayos SPT y CPT. Los resultados revelaron ventajas del CPT en términos de continuidad del registro y menor variabilidad de los datos. En conclusión, se determinó la conveniencia del CPT para la evaluación del potencial de licuación en ese tipo de depósitos. Sin embargo, la ausencia de métodos geofísicos para la estimación de la velocidad de onda de corte limita su extrapolación a contextos volcánicos y coluviales de la sierra sur.

Portal y Vásquez (2023), en su trabajo de suficiencia profesional titulado *Estudio comparativo de la amplificación sísmica respecto a la Norma E.030 y el comportamiento en suelos estratificados*, realizado en diversos perfiles geotécnicos del territorio peruano, tuvieron como objetivo evaluar la representatividad de los valores de amplificación sísmica establecidos por la Norma Técnica E.030. Mediante una metodología cuantitativa de tipo comparativo, desarrollaron un análisis lineal equivalente: recopilaron señales sísmicas registradas en el Perú, las procesaron con el software SeismoSignal y las escalaron conforme al análisis tiempo-historia de la norma; recopilaron perfiles geotécnicos con ensayos de prospección geofísica; ajustaron espectralmente tres registros sísmicos con el software DeepSoil 6.1; y contrastaron los resultados del análisis de respuesta de sitio con los parámetros del espectro de diseño normativo. Los resultados revelaron discrepancias tanto en los rangos de los valores promedio de V_{S30} que la norma emplea para la clasificación de los suelos como en los factores que determinan los

rangos del espectro de diseño. En conclusión, se determinó que el espectro de diseño normativo no se ajusta adecuadamente a la respuesta de cada tipo de suelo. Este antecedente resulta particularmente pertinente para la presente investigación, por cuanto cuestiona empíricamente los propios intervalos de V_{S30} sobre los que descansa la clasificación del perfil de suelo; no obstante, no integra métodos geofísicos de campo propios ni establece correlaciones directas entre las propiedades dinámicas y la resistencia a la penetración.

Flores y Poquinora (2023), en su tesis titulada *Microzonificación geotécnica mediante la correlación del ensayo SPT en un sector de la zona industrial del distrito de Chilca en la provincia de Cañete, Lima, Perú*, realizada en Chilca, provincia de Cañete, tuvieron como objetivo elaborar una microzonificación geotécnica a partir de la correlación de ensayos SPT. Mediante una metodología cuantitativa de campo, ejecutaron ensayos de penetración estándar en un sector de la zona industrial del distrito. Los resultados revelaron el predominio de suelos correspondientes al perfil S2. En conclusión, propusieron criterios de cimentación superficial para el sector estudiado. Su aporte es concreto y aplicable; sin embargo, la investigación se limitó a terrenos industriales planos de baja variabilidad litológica, por lo que no representa la complejidad de los depósitos andinos.

En síntesis, los estudios nacionales revisados demuestran la efectividad de combinar el ensayo SPT y el método MASW, pero persisten brechas relevantes: la concentración en zonas altiplánicas o costeras con suelos homogéneos y la escasez de bases de datos locales de V_{S30} para la región Apurímac.

Antecedente local

Gómez y Torre (2020), en su tesis titulada *Caracterización estratigráfica con fines de microzonificación sísmica del distrito de Tamburco, provincia de Abancay*, realizada en Tamburco, Abancay, tuvieron como objetivo describir el perfil estratigráfico del distrito y de su área urbana mediante el análisis de la velocidad promedio de las ondas de corte, la determinación del periodo fundamental de vibración natural del suelo y la identificación de los tipos de suelo presentes. Mediante una metodología cuantitativa de campo, aplicaron métodos sísmicos para la obtención de perfiles de velocidad de onda de corte en el área urbana del distrito. Los resultados revelaron valores de V_{s30} comprendidos entre 330 y 716 m/s en los primeros 30 m del perfil, y periodos fundamentales de vibración natural del suelo entre 0.17 y 0.36 s. En conclusión, se determinó que los sectores de Sawanay, Túpac Amaru, la I.E. Micaela Bastidas y la UNAMBA, al sur de Tamburco, corresponden al perfil S1 roca fracturada o suelo muy denso, mientras que los sectores de Kerapata y Maucacalle corresponden al perfil S2, de suelo intermedio. Este trabajo constituye el antecedente geográficamente más próximo a la presente investigación y confirma la aplicabilidad de los métodos sísmicos en el contexto de Abancay; no obstante, se circunscribe al distrito de Tamburco y no establece correlaciones entre la velocidad de onda de corte y la resistencia a la penetración.

En la provincia de Abancay, el trabajo de Gómez y Torre (2020) constituye el único antecedente de caracterización mediante ondas de corte. No se identificaron estudios que integren los métodos MASW y SPT en el distrito de Abancay, ni que establezcan correlaciones locales entre la velocidad de onda de corte y la resistencia a la penetración para los depósitos aluviales del valle. Ese es el vacío que aborda la presente investigación.

3.2. Bases teóricas

Las bases teóricas de esta investigación se organizan en función de las variables del estudio: la velocidad promedio de onda de corte (V_{S30}) como variable independiente, y la categoría sísmica de sitio según la Norma E.030, los valores corregidos N_{60} del ensayo SPT y las propiedades índice del suelo como variables dependientes. Respecto a la variable independiente, la caracterización sísmica del suelo se basa en la determinación de la velocidad promedio de onda de corte (V_{S30}), definida como el promedio armónico en los primeros 30 m:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

donde h_i es el espesor de cada estrato y V_{S_i} la velocidad de onda de corte en el mismo (Kramer, 1996). Esta variable independiente influye directamente en la categoría de sitio (variable dependiente) y en parámetros como N_{60} (dependiente, golpes corregidos por SPT) y propiedades índices (dependientes, p. ej., LL, LP, IP, γ_d , c, ϕ por laboratorio geotécnico).

La Norma Técnica E.030 (MVCS, 2019) clasifica los perfiles de suelo según V_{S30} en cuatro tipos (S0, S1, S2 y S3), que determinan el factor de amplificación del suelo (S) y, por ende, la demanda sísmica en edificaciones. A continuación, se presenta la clasificación de perfiles de suelo establecida por la norma:

Tabla 2

Clasificación de los perfiles de suelo según la Norma Técnica E.030

Categoría	Descripción del suelo	Rango de V_{S30} (m/s)	Comportamiento esperado	Criterio complementario
S0	Roca dura	> 1500	Sin amplificación de	—

sitio				
S1	Roca o suelos muy rígidos	$500 < V_{S30} \leq 1500$	Amplificación baja	$\bar{N}_{60} > 50$ ó $\bar{S}_u > 100$ kPa
S2	Suelos intermedios	$180 < V_{S30} \leq 500$	Amplificación media	$\bar{N}_{60} 15-50$ ó $\bar{S}_u 50-100$ kPa
S3	Suelos blandos	$V_{S30} \leq 180$	Amplificación alta	$\bar{N}_{60} < 15$ ó $\bar{S}_u 25-50$ kPa

Nota. Tomado de la Tabla N° 2 de la Norma Técnica E.030 «Diseño Sismorresistente» (MVCS, 2018). El factor de suelo S no es un atributo del perfil: depende conjuntamente del perfil de suelo y de la zona sísmica, y se establece en la Tabla N° 3 de la norma. La Norma Técnica E.030 contempla además la designación S4 para condiciones excepcionales, que requieren un estudio específico de sitio.

Entre los métodos geofísicos disponibles, el MASW presenta ventajas claras frente a otras alternativas. El método ReMi, de fuente pasiva, depende del ruido ambiental y ofrece menor resolución en zonas urbanas tranquilas. Los métodos Down-Hole y Cross-Hole, aunque precisos, son invasivos y requieren perforaciones costosas que resultan especialmente problemáticas en suelos heterogéneos de montaña (Park et al., 1999; Foti et al., 2014). El MASW resulta especialmente adecuado para las condiciones de Abancay, donde predominan suelos coluviales y aluviales de geometría irregular. Su principal ventaja es que no requiere perforación, lo que simplifica considerablemente la logística en terrenos complejos. Además, ofrece buena resolución en los primeros 30 metros de profundidad y representa una opción económicamente viable para estudios urbanos. (Olafsdottir et al., 2018; Reynolds, 2011). Su integración con el ensayo SPT permite correlacionar rigidez dinámica (V_{S30} , variable

independiente) con resistencia a penetración (N_{60} , dependiente), generando modelos empíricos adaptados a condiciones locales y sustentando la hipótesis general de correlación significativa ($r > 0.6$; $p < 0.05$) entre V_{s30} , N_{60} y propiedades índices (Mayne et al., 2002; Robertson, 2010).

En relación con la variable dependiente de resistencia a la penetración, el ensayo SPT (Standard Penetration Test) consiste en hincar un muestreador partido mediante un martillo de 63.5 kg que cae desde 76 cm, registrando el número de golpes N necesarios para penetrar 30 cm; este valor se corrige a N_{60} considerando la energía transmitida, el diámetro de la perforación, la longitud de las varillas y la sobrecarga efectiva (Terzaghi & Peck, 1948; ASTM D1586, 2018). El N_{60} se relaciona con la densidad relativa y el estado de consolidación del suelo, y numerosas correlaciones empíricas del tipo potencial $V_s = a \cdot N_{60}^b$ permiten estimar la velocidad de onda de corte a partir de la resistencia a la penetración, con coeficientes que dependen del tipo de suelo (Mayne et al., 2002; Wair et al., 2012).

Respecto a las propiedades índice, los límites de Atterberg (límite líquido LL, límite plástico LP e índice de plasticidad IP) caracterizan la plasticidad de los suelos finos y son la base de la clasificación SUCS mediante la carta de plasticidad, mientras que la densidad seca (γ_d), la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ) describen su estado y resistencia al corte (Casagrande, 1948; ASTM D4318, 2017; ASTM D7263, 2018). Estas propiedades sustentan la hipótesis específica de coherencia entre el tipo de suelo identificado (CL o A-4) y la categoría sísmica derivada del V_{s30} , dado que las arcillas de baja plasticidad con rigidez media suelen ubicarse en el rango de velocidades de la categoría S2 (Kramer, 1996; Holtz et al., 2011).

3.2.1 Perfil de suelo

3.2.1.1 Categorización tomando en cuenta la velocidad promedio de propagación de ondas de corte.

El perfil de suelo en la Urbanización Fonavi está conformado por depósitos aluviales recientes de gravas y arenas limosas con intercalaciones de arcillas de baja plasticidad (CL según SUCS), predominantes en la zona andina de Abancay. Los estratos identificados en campo incluyen una capa superficial de relleno (PT, espesor 0.3-0.6 m, textura gruesa con finos), seguida de arcilla (CL, hasta 3 m de profundidad, textura fina con plasticidad baja-media, IP 10-15%; comportamiento sísmico: rigidez media con V_s 220-480 m/s y potencial de amplificación moderada bajo cargas dinámicas) (Kramer, 1996; Park et al., 1999; Terzaghi & Peck, 1948). Estos materiales, controlados por profundidad (hasta 30 m), humedad natural (15-17%) y coordenadas UTM, presentan propiedades mecánicas como cohesión $c=20-30$ kPa y ángulo de fricción $\phi=25-30^\circ$ (ASTM D7263, 2018). A partir de los ensayos SPT, se identifican valores N_{60} (variable dependiente) de 10–25 golpes/30 cm en los primeros 10 m, aumentando con la profundidad, lo que indica compactación variable (Teng, 1962; ASTM D1586, 2018). La comparación entre estos resultados y los perfiles MASW (profundidad de investigación hasta 30 m, alineada con la Norma E.050) permite establecer una correlación V_{S30} – N_{60} coherente con la categoría S2 de la Norma E.030 (MVCS, 2019), vinculando el perfil geotécnico con la variable dependiente de categoría de sitio y sustentando las hipótesis específicas sobre el intervalo de V_{S30} correspondiente al perfil S2 ($180 < V_{S30} \leq 500$ m/s) (Richart et al., 1970; Rix & Leipski, 1991).

Ubicación de puntos de exploración

Se ubicarán los puntos para la auscultación del terreno de estudio analizando el área, siguiendo los requisitos legales y reglamentarios según indica la Norma E.030 (MVCS, 2019), implementando EMS para cumplir con los objetivos. (González de Vallejo, 2002; ASTM D420, 2018)

Exploración y Muestreo

En lo que respecta a la exploración de las áreas de estudio, hay varias técnicas disponibles que van desde exploraciones económicas en la superficie hasta exploraciones costosas en el subsuelo. La elección de un programa de exploración dependerá de las condiciones del terreno y de la magnitud del proyecto, ya que estos factores influirán en la selección del método más apropiado (Das, 2015; Kramer, 1996). A continuación, se presentan algunos de los métodos de exploración más comúnmente empleados para evaluar las propiedades del subsuelo. (González de Vallejo, 2002; Hunt, 2005).

Exploración Directa

Calicatas

Para comprender la estratigrafía del subsuelo, estas excavaciones brindan la oportunidad de examinar directamente el suelo que se desea analizar. Es posible obtener muestras tanto alteradas como inalteradas de los diversos estratos encontrados durante este proceso. La profundidad de estas excavaciones depende del propósito de la investigación, si bien las limitaciones prácticas limitan su alcance; serán realizadas según la norma (NTP 339.162, 2001; ASTM D420, 2018; Coduto et al., 2011; González de Vallejo, 2002).

Perforaciones Manuales y mecánicas

Estos sondeos no solo facilitan la identificación y ubicación de las diversas capas del suelo, sino que también permiten la extracción de muestras para análisis y la realización de ensayos in situ. Las perforaciones manuales pueden perforar hasta 10 metros de profundidad, mientras que las perforaciones mecánicas no tienen límites de profundidad. Este tipo de sondeos incluye perforaciones en boleos y gravas, así como métodos como barrenos helicoidales, lavado y penetración cónica (Das, 2015; Mayne et al., 2002; ASTM D1586, 2018).

Muestreo del material

La toma de muestras de suelo se llevará a cabo siguiendo los procedimientos estándar según la norma. (MVCS, 1997) que establece las normas para llevar a cabo estudios sobre mecánica del suelo. (ASTM D4220, 2017; Robertson, 2010).

Normas aplicadas al presente estudio

- Análisis granulométrico de Suelos por Tamizado MTC E 107 – 2016
- Determinación del contenido de humedad de un suelo MTC E 108 – 2016
- Determinación del Limite Liquido de los Suelos (LL) MTC E 110 – 2016
- Determinación del Limite Plástico de los Suelos (LP) MTC E 111 – 2016
- Determinación de material más fino que el tamiz 75 μm (Nº 200) en suelos MTC E 137 – 2016
- Determinación de la densidad del suelo in situ mediante método del cono de arena MTC E 117 – 2016
- Entre otros.

Ensayos de Laboratorio

La norma técnica peruana (MVCS, 2019) y (MVCS, 1997) establece varias pruebas de laboratorio para calcular los valores de la velocidad onda de propagación de las ondas sísmicas (V_s) en el suelo. Algunos de los ensayos que se utilizan con frecuencia para este propósito serán:

Análisis granulométrico de Suelos por Tamizado. - Este proceso implica el uso de tamizado para evaluar la distribución de tamaños de partículas en un suelo en términos cuantitativos. Se calculan los porcentajes de suelo que pasan por varios tamices, hasta el de $75\ \mu\text{m}$ (N° 200) (ASTM D6913) (Casagrande, 1948).

Determinación del contenido de humedad de un suelo. - Este método proporciona una forma de calcular el contenido de humedad de un suelo, que se muestra en porcentaje del peso de agua en una masa de suelo dada con respecto al peso de las partículas sólidas. Se logra secando el suelo húmedo hasta que alcance un peso constante en un horno a 110°C ($\pm 5^\circ\text{C}$). El peso del agua se conoce como la pérdida de peso durante el secado (ASTM D2216, 2019; Das, 2015).

Determinación del Límite Líquido de los suelos. - Este parámetro muestra el contenido de humedad de un suelo en el punto de transición entre los estados líquido y plástico. El contenido de humedad en un surco creado en una muestra de suelo cuando se deja caer una copa 25 veces desde una altura fija se mide por la distancia que se cierra a lo largo de su fondo (ASTM D4318, 2017; Casagrande, 1948; Jefferson & Rogers, 1998).

Determinación del Límite Plástico de los suelos. - Este límite indica la humedad más baja con la que se pueden formar barritas de suelo de unos 3,2 mm de diámetro al rodar entre la palma de la mano y una superficie lisa sin desmoronarse. Estos métodos de ensayo se utilizan para identificar la fracción de grano de los materiales de construcción y caracterizar las fracciones de grano fino del suelo. En ingeniería, se utilizan ampliamente los límites líquido y plástico, junto con el índice de plasticidad, para correlacionar una variedad de propiedades del suelo con su comportamiento ingenieril, como la

compresibilidad, permeabilidad, compactibilidad, contracción-expansión y resistencia al corte (ASTM D4318, 2017; Casagrande, 1948; Gutiérrez Santafé, 2006). En este estudio, sirven como indicadores de propiedades índices.

Compactación de suelos en laboratorio mediante el método Proctor Modificado:

Este procedimiento de prueba describe la técnica para compactar muestras de suelo en el laboratorio utilizando una energía modificada de 2,700 kN-m/m³ (56,000 pie-lbf/pie) (ASTM D1557, 2019; Das, 2015).

Método de ensayo SPT

El ensayo de penetración estándar (SPT) constituye una de las herramientas fundamentales de la exploración geotécnica para determinar la resistencia relativa de los estratos del subsuelo. Terzaghi y Peck (1967) sistematizaron su procedimiento de ejecución, su interpretación y su aplicación al diseño de cimentaciones y estructuras, estableciendo la referencia sobre la que se han desarrollado las correlaciones empíricas posteriores (Terzaghi & Peck, 1948; Teng, 1962; ASTM D1586, 2018; Mayne et al., 2002). En la investigación, genera N_{60} como variable dependiente para correlacionar con V_{S30} .

Exploración indirecta

Prospección Geofísica

Según (González de Vallejo, 2002) Los métodos geofísicos se han desarrollado para detectar cambios en las propiedades físicas de los estratos subterráneos y localizar la roca basal debajo de los depósitos sedimentarios. Estas técnicas no destructivas complementan los ensayos in situ y las investigaciones directas, como los sondeos mecánicos o las calicatas. Se emplean para evaluar diversas características, como el espesor de los rellenos, la facilidad de excavación, la posición del nivel freático, la detección de cavidades, las propiedades geomecánicas, las

fallas, los índices de fisuración y fenómenos dinámicos. Estos métodos se clasifican según el parámetro físico investigado, que incluye gravimetría, magnetismo, métodos eléctricos, electromagnéticos, sísmicos y radiactivos (Hunt, 2005; Kearey et al., 2002; Reynolds, 2011).

Método de análisis multicanal de ondas superficiales MASW

Según Rivera et al. (2016), el análisis de ondas superficiales multicanal (MASW) es una técnica basada en el registro de múltiples canales de implantación de energía para el análisis de ondas superficiales. Esta energía se despliega a lo largo de un eje sobre la superficie del suelo a distancias predeterminadas, lo que da como resultado una curva de velocidad de onda de corte en relación con el punto medio de la línea mencionada anteriormente. Además de su función principal, el método MASW también puede identificar perfiles de onda S promedio desde profundidades de 25 puntos a 30 puntos (Park et al., 1999; Kramer, 1996; Olafsdottir et al., 2018; Foti et al., 2014). En este estudio, estima V_{s30} como variable independiente para la categoría de sitio.

Caracterización estratigráfica

“La Estratigrafía es la rama de la Geología que trata del estudio e interpretación, así como de la identificación, descripción y secuencia tanto vertical como horizontal de las rocas estratificadas; también se encarga de la cartografía y correlación de estas unidades de roca, determinando el orden y el momento de los eventos en un tiempo geológico determinado” (Krumbein & Sloss, 1963; González de Vallejo, 2002; Boggs, 2006).

Modelado con software GEO5

El módulo Estratigrafía – Registros del software GEO5 permite elaborar informes de datos geológicos obtenidos en la investigación de campo (perforaciones, pozos y pruebas de penetración), a partir de una base de plantillas predefinidas o creadas por el usuario; para

generar secciones transversales se emplea el módulo Estratigrafía – Perfiles Geológicos, ambos extensiones del programa de Estratigrafía (GEO5 Perú, 2024).

Por su parte, el módulo MEF – Sismo del mismo software se emplea para el análisis dinámico de estructuras geotécnicas sometidas al movimiento del terreno: admite acelerogramas definidos por el usuario o genera diagramas tiempo–historia compatibles con el espectro de respuesta especificado; reporta la variación de desplazamientos, tensiones y fuerzas internas con el resumen de sus valores máximos, y realiza análisis modales que permiten calibrar el amortiguamiento del material (GEO5 Perú, 2024; Olafsdottir et al., 2018).

3.3. Definición de términos

3.3.1. Categorización geotécnica

Categorización

Proceso de identificación y clasificación del suelo según sus propiedades físicas, mecánicas y sísmicas, empleando parámetros como la velocidad V_{s30} , el número de golpes N_{60} y los límites de Atterberg (Romero, 2005; Casagrande, 1948; ASTM D2487, 2017). En esta investigación, la categorización geotécnica permite determinar la categoría sísmica de sitio (variable dependiente) de acuerdo con la Norma E.030, sustentando la hipótesis de correlación entre V_{s30} (independiente) y N_{60} /propiedades índices (dependientes) (Kramer, 1996).

La (MVCS, 2019) determina la clasificación de las edificaciones y el factor de uso (U) utilizando las categorías establecidas. El factor de uso, también conocido como factor de importancia (L), se utiliza en función de la clasificación realizada, que se especifica en la misma tabla. Se puede considerar que el factor U es igual a 1 en los edificios con aislamiento sísmico en la base (MVCS, 2019). Las diversas categorías de edificios, junto con su descripción y factor

U correspondiente. Por ejemplo, las edificaciones esenciales de categoría A incluyen centros médicos de primer nivel, infraestructuras críticas para emergencias y otras instalaciones importantes. Esta construcción tiene un factor U de 1.5. Sin embargo, las edificaciones significativas, clasificadas como B, incluyen lugares de reunión masiva y depósitos significativos, y tienen un factor U de 1.3. Los edificios comunes de categoría C que incluyen viviendas y oficinas tienen un factor U de 1.0. Finalmente, las edificaciones temporales, que se clasifican como D, son construcciones provisionales de acuerdo con el factor U, que se determina según su uso particular (MVCS, 2019). Se destaca que las nuevas estructuras, como A1, deben tener aislamiento sísmico en la base de zonas sísmicas específicas, y se garantiza la resistencia y rigidez adecuadas para resistir acciones laterales, según lo decida el proyectista (MVCS, 2016). En el estudio, influye en el diseño basado en categoría de sitio.

Buol et al. (1999) señalan que es evidente que, en el sistema soviético, la categoría de "tipo de suelo" tiene un mayor grado de generalización en comparación con las categorías de orden y suborden que se encuentran en los sistemas estadounidenses. Por otro lado, en los sistemas de clasificación de Estados Unidos anteriores a la clasificación actual, el término "tipo de suelo" se asignaba al nivel categórico más bajo. Según lo establecido por el personal de estudios de suelo en 1960, el concepto de tipo de suelo, como la categoría más específica, ha sido eliminado del sistema taxonómico formal estadounidense en la nueva clasificación completa. Antes de ser adoptado en Norteamérica para taxones más específicos y definidos, los soviéticos empleaban el término "tipo de suelo" en un nivel superior de clasificación, para referirse a grupos amplios de suelos. Desafortunadamente, Whitney introdujo el término "tipo de suelo" en América en 1909.

Geotecnia

Solución de problemas de ingeniería mediante la aplicación de métodos científicos y principios de ingeniería a la creación, interpretación y utilización del conocimiento de los materiales y procesos que ocurren en la corteza terrestre. Incluye mecánica de suelos, mecánica de rocas, geología, geofísica, hidrología, hidrogeología y ciencias relacionadas (Hoyos, 2001; Das, 2015; ASTM D2488, 2017) En este estudio, la geotecnia integra ensayos SPT y MASW para caracterizar el suelo, vinculando propiedades mecánicas con categoría de sitio.

(Das, 2015) manifiesta que la geotecnia se ocupa del análisis de varias características del suelo, como su origen, distribución del tamaño de las partículas, capacidad de drenaje, compresibilidad, resistencia al corte y capacidad de carga. La ingeniería geotécnica se enfoca principalmente en investigar las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos y las rocas, tanto superficiales como subterráneas, dentro de la ingeniería civil. Esto implica aplicar la mecánica de suelos y rocas en el diseño de cimientos, estructuras de contención y otras estructuras terrestres. (Das, 2015; Coduto et al., 2011; Holtz et al., 2011).

(Cambefort, 1975) manifiesta que el éxito en la construcción de infraestructuras con puentes, presas, fábricas y edificaciones depende del conocimiento geológico. Cuanto mayor sea la importancia de la obra, más profundo debe ser nuestro conocimiento del submundo. Aunque los mapas geológicos brindan una primera idea, son inútiles porque carecen de información sobre las propiedades mecánicas del terreno, que son esenciales para diseñar cimentaciones adecuadas. Además, los geólogos experimentados no valoran las formaciones geológicas contemporáneas, que sirven como base para muchas obras. Por lo tanto, es fundamental obtener un conocimiento profundo del suelo, que incluya la identificación de las diferentes capas y la obtención de muestras intactas para análisis de laboratorio. Además, se

deben tener en cuenta factores como las características de la capa freática y la permeabilidad de las capas permeables, que con frecuencia se pasan por alto, pero son esenciales para garantizar la estabilidad y durabilidad de la construcción (Cambefort, 1975; González de Vallejo, 2002; Reynolds, 2011).

Ondas sísmicas

Vibraciones que se propagan rápidamente a través del suelo debido a la fractura de materiales rocosos bajo la superficie terrestre. Se dividen en ondas internas (que viajan por el interior de la Tierra) y superficiales (a lo largo de la superficie) (Biot, 1962; Kramer, 1996; ASTM D5778, 2018). En esta investigación, las ondas superficiales son analizadas vía MASW para estimar V_{s30} (independiente), clave para la variable dependiente de categoría sísmica (Richart et al., 1970; Bolt, 1993).

Fuentes de ondas superficiales

También conocidas como microtemores o ruido ambiental, son vibraciones en la superficie provocadas por ondas de cuerpo o combinaciones de ondas superficiales, generadas por fuentes naturales o humanas con amplitudes bajas (10^{-3} a 10^{-4} mm) (Flores, 2004; Nakamura, 1989; Aki & Richards, 2002). En el estudio, sirven como base para métodos pasivos complementarios al MASW, controlando variables como humedad.

Velocidad espectral (SVT)

Máxima respuesta de un oscilador libre de un grado de libertad ante un movimiento de entrada en su base y de período. Se relaciona con la aceleración espectral mediante $SA(T) = (2\pi/T) \times SV(T)$ (IGP, 2012; Kramer, 1996; Boore, 2003). Contribuye a analizar la respuesta sísmica del suelo en la categorización E.030, enlazando con factor S.

Análisis de comportamiento del suelo

Evaluación de propiedades naturales del suelo, especialmente arenas, preferentemente mediante pruebas in situ para evitar alteraciones (Lazcano, 2007; Das, 2015; ASTM D1586, 2018). En este trabajo, integra SPT y MASW para correlacionar comportamiento dinámico con variables dependientes como N_{60} y propiedades índices (Mayne et al., 2002; Robertson, 2010).

3.3.7 Tipos de suelo según la norma E030

Tipos de suelo

Tipos de suelo: Clasificación basada en propiedades físicas e ingenieriles, como la Clasificación Unificada de Suelos (SUCS), que categoriza según granulometría, plasticidad y respuesta bajo carga (Casagrande, 1948; ASTM D2487, 2017; AASHTO M145, 2020). En el estudio, se usa para correlacionar con categorías sísmicas E.030 y propiedades índices (Jefferson & Rogers, 1998; Gutiérrez Santafé, 2006).

Norma E.030

Norma Técnica que forma parte del Numeral III.2 Estructuras del Título III Edificaciones del Reglamento Nacional de Edificaciones y que establece las condiciones mínimas para el diseño sismorresistente de las edificaciones, con la finalidad de evitar la pérdida de vidas humanas, asegurar la continuidad de los servicios básicos y minimizar los daños a la propiedad. Su cumplimiento es obligatorio a nivel nacional (MVCS, 2018; Resolución Ministerial N° 043-2019-VIVIENDA; Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA).

Según la Norma Técnica E.030 (MVCS, 2019), los tipos de suelo se clasifican en función de la velocidad promedio de propagación de ondas de corte (V_{s30}) medida en los primeros 30 metros del terreno.

Para la Urbanización Fonavi en Abancay, los valores obtenidos de V_{s30} (entre 369 y 398 m/s, variable independiente por MASW) ubican el terreno dentro de la categoría S2 (dependiente), correspondiente a un suelo rígido con comportamiento sísmico medio. Esto es coherente con los valores N_{60} (10-25 golpes, dependiente por SPT) y los resultados del ensayo MASW, indicando depósitos aluviales con arcillas de baja plasticidad (CL, A-4) y potencial de amplificación moderada, lo que sustenta el diseño sismorresistente local y las hipótesis sobre coherencia con propiedades índices (Terzaghi & Peck, 1948; Olafsdottir et al., 2018; Foti et al., 2014; ASTM D4318, 2017).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada y de enfoque cuantitativo, ya que busca generar conocimiento útil y operativo para mejorar la clasificación sísmica de suelos en la Urbanización Fonavi, Abancay, a partir de la medición numérica de variables geotécnicas y sísmicas y de su análisis estadístico, aportando un modelo replicable para estudios similares en zonas andinas (Hernández-Sampieri et al., 2014).

El análisis estadístico de correlaciones entre estas variables permite validar empíricamente la hipótesis general de relación significativa ($r > 0.6$; $p < 0.05$) entre V_{s30} y N_{60} para la determinación de la categoría sísmica.

Nivel de investigación

El nivel de investigación es correlacional, según Hernández-Sampieri et al. (2014), ya que se pretende:

1. Identificar la relación existente entre V_{s30} y N_{60} /propiedades índices.
2. Explicar cómo estas relaciones determinan la categoría sísmica del suelo según la Norma E.030 (MVCS, 2019).
3. Validar las hipótesis específicas mediante análisis estadístico de Pearson y regresión lineal

4.2. Método de investigación

El método utilizado es el hipotético-deductivo, ya que a partir de las hipótesis planteadas se recolectan y analizan datos de campo y de laboratorio (ensayos MASW y SPT) para

contrastarlas estadísticamente y derivar conclusiones sobre la categoría sísmica de los suelos (Hernández-Sampieri et al., 2014). Se sigue un proceso secuencial metodológico:

Tabla 3

Proceso metodológico

Etapas	Actividad	Herramientas	Producto
1. Recolección	Ensayos SPT y MASW	Equipos de campo	Datos brutos N_{60} , $V_s(z)$
2. Laboratorio	Análisis físico-mecánico	Tamices, Casagrande	LL, LP, IP, γ_d , c , ϕ
3. Procesamiento	Cálculo V_{S30} , N_{60} corregido	Excel, GEO5	Perfiles de velocidad
4. Análisis	Correlación estadística	SPSS/Excel	Coefficiente Pearson (r)
5. Clasificación	Aplicación E.030	Tablas normativas	Categoría S1-S4

Nota. Elaboración propia.

Este método garantiza la validación empírica y estadística de los resultados, fortaleciendo la validez científica del estudio (Kramer, 1996; Mayne et al., 2002).

4.3. Diseño de la investigación

El diseño de investigación es no experimental-transversal-correlacional, caracterizado por:

Tabla 4

Diseño de la investigación

Característica	Descripción	Justificación
----------------	-------------	---------------

No experimental	No se manipulan variables	Se observan condiciones naturales del terreno
Transversal	Datos recolectados en 2024	Análisis en un solo momento temporal
Correlacional	Relación V_{S30} - N_{60}	Verifica hipótesis mediante r de Pearson

Nota. Elaboración propia.

Este diseño permite examinar la asociación entre V_{S30} y N_{60} y asignar el perfil de suelo conforme a la Tabla N° 2 de la Norma Técnica E.030 ($180 < V_{S30} \leq 500$ m/s para el perfil S2), sin intervención experimental (Robertson, 2010).

4.4. Ámbito temporal y espacial

Ámbito espacial

La investigación se realizó en la Urbanización Fonavi, distrito de Abancay, provincia de Abancay, región Apurímac, con las siguientes características técnicas:

Tabla 5

Ámbito espacial

Parámetro	Valor	Coordenadas UTM
Latitud	13°38'00" S	X: 670500 m
Longitud	72°53'00" W	Y: 8495000 m
Altitud	2376 m s.n.m.	Zona 18L
Superficie	15 ha	-
Geología	Aluvial/coluvial	Depósitos cuaternarios
Clima	Templado-frío	Precipitación: 700 mm/año

Nota. Elaboración propia.

Ámbito temporal

El trabajo se ejecutó entre septiembre y diciembre del 2024:

4.5. Población y muestra

Población

Constituida por los suelos del subsuelo de la Urbanización Fonavi, representando depósitos aluviales y coluviales típicos de la cuenca de Abancay.

Muestra

Se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia, seleccionando 3 puntos SPT y 3 perfiles MASW:

Tabla 6

Ámbito espacial

Punto	Tipo Ensayo	Coordenadas UTM	Justificación Técnica
SPT-1	Perforación	670480/8495010	Zona residencial central
SPT-2	Perforación	670520/8494980	Zona de mayor pendiente
SPT-3	Perforación	670450/8495030	Zona de contacto geológico
MASW-1	Geofísico	670485/8495005	Representatividad central
MASW-2	Geofísico	670515/8494975	Variabilidad lateral
MASW-3	Geofísico	670445/8495025	Validación cruzada

Nota. Elaboración propia.

Justificación

- Cobertura espacial: 3 puntos por método cubren $\geq 80\%$ del área
- Representatividad: Homogeneidad geológica confirmada por trabajos previos

- Limitaciones prácticas: Accesibilidad, seguridad, presupuesto disponible
- Validación: Correlación entre métodos (SPT vs MASW)

4.6. Técnicas e Instrumentos

Tabla 7

Técnicas e Instrumentos

Técnica	Instrumento	Variable Medida	Especificaciones Técnicas	Norma
Ensayo SPT	Martillo 63.5 kg, N ₆₀ (golpes/30 cm) trépano 50.8 mm, cm) varillas ASTM A-510		Energía 60%, profundidad 30 m	ASTM D1586-18
Ensayo MASW	Sismógrafo Geode, 24 geófonos 4.5 Hz, martillo sísmico	V _{S30} (m/s)	24 canales, espaciamiento 2 m, profundidad 30 m	Park et al. (1999)
Laboratorio	Tamices ASTM, LL, LP, IP, γ _d , Casagrande, balanza c, φ analítica 0.01 g, triaxial		Precisión ±0.5%, 3 repeticiones	ASTM D4318, D7263
Procesamiento	GEO5 v2024, Excel 365.	Correlación, modelado 3D	rPearson, R ² regresión	-

Nota. Elaboración propia.

4.7. Procedimiento metodológico

Secuencia detallada paso a paso:

Tabla 8
Procedimiento metodológico

Paso	Actividad	Responsable	Control de Calidad	Producto
1	Revisión normativa (E.030, ASTM)	Investigador	Verificación bibliográfica	Protocolo técnico
2	Levantamiento topográfico	Topógrafo	GPS diferencial (± 2 cm)	Plano UTM puntos
3	Ejecución SPT: • Perforación rotativa • Martillazos $63.5 \text{ kg} \times 76 \text{ cm}$ • Registro N cada 30 cm • Corrección $N_{60} = N \times (ER/60)$	Técnico certificado	Calibración martillo, doble verificación	Datos N_{60} por profundidad
4	Ejecución MASW: • Layout geófonos (2 m) • 5-10 disparos/martillo • Procesamiento SurfSeis • Inversión $vs(z)$	Geofísico	Repetición disparos, ondas	Perfiles $Vs(z)$ QC
5	Laboratorio:	Laboratorio	Duplicados,	Propiedades

	•Granulometría (tamices) • Límites Atterberg • Densidad (Proctor) • Corte directo/triaxial	acreditado	normas ASTM	físicas/mecánicas	
6	Cálculo V_{S30} : $V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{S_i}}}$	Investigador	Validación métodos	3	V_{S30} por punto
7	Análisis estadístico: •Correlación Pearson • Regresión lineal •Prueba significancia (p<0.05)	Estadístico	Normalidad (Shapiro-Wilk)		Coeficientes r, R ²
8	Clasificación E.030: S0 (>1500), S1 (500–1500), S2 (180–500), S3 (≤180)	Investigador	Validación cruzada		Categoría sísmica
9	Modelado GEO5	Ingeniero	Calibración parámetros	Perfiles validados	3D
10	Interpretación resultados	Equipo tesis	Revisiones pares	Informe final	

Nota. Elaboración propia.

4.8. Análisis de datos

Estadístico descriptivo:

Tabla 9

Análisis de datos

Estadística	Fórmula	Software
Media	$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}$	Excel/SPSS
Desviación estándar	$s = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$	Excel/SPSS
Coeficiente correlación	$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}}$	SPSS

Nota. Elaboración propia.

Inferencial:

- Prueba de hipótesis: $H_0: \rho = 0$ vs $H_1: \rho \neq 0$
- Nivel significancia: $\alpha = 0.05$
- Prueba bilateral: t-Student para correlación

Presentación: Tablas, gráficos de dispersión, perfiles Vs(z), mapas temáticos.

4.9. Consideraciones éticas

- Integridad científica: Datos recolectados y reportados con máxima precisión y honestidad.
- Originalidad: Trabajo original, sin plagio, con debida citación (APA 7ma ed.).
- Confidencialidad: Información sensible protegida según reglamento UTEA.

- Responsabilidad social: Resultados disponibles para beneficio de la comunidad de Abancay.
- Cumplimiento normativo: Autorizaciones municipales y respeto a normas de seguridad.
- Transparencia metodológica: Protocolos detallados para replicabilidad.

V. Resultados y discusión

5.1. Presentación de Resultados

La presentación de los resultados se estructura siguiendo la secuencia metodológica del estudio: caracterización física y mecánica del suelo mediante ensayos de laboratorio, evaluación de la resistencia a la penetración mediante SPT, determinación de las velocidades de onda de corte mediante MASW, y finalmente, la correlación entre ambos métodos para la clasificación sísmica del sitio según la Norma E.030.

5.1.1 Caracterización Física y Mecánica del Suelo

Los ensayos de laboratorio se realizaron en tres calicatas (C-01, C-02 y C-03) ubicadas en las coordenadas especificadas en la Tabla 9, alcanzando una profundidad de 3.00 m en cada punto.

Tabla 10

Ubicación Geográfica de los Puntos de Investigación.

	Calicata	Coordenada Este (m)	Coordenada Norte (m)	Elevación (m.s.n.m.)
	C-01	728,081.0	8,491,841.0	2,870
	C-02	728,148.5	8,491,783.6	2,865
	C-03	728,162.0	8,491,830.0	2,868

Nota. Sistema de coordenadas UTM WGS84, Zona 18S. Elaboración propia.

5.1.1.1 Análisis Granulométrico y Clasificación de Suelos

Los resultados del análisis granulométrico por tamizado (ASTM D-422) revelaron una composición predominantemente fina en las tres calicatas evaluadas. La Tabla 10 presenta la distribución granulométrica y las clasificaciones obtenidas según los sistemas SUCS y AASHTO.

Tabla 11
Composición Granulométrica y Clasificación de Suelos

Calicata	% Gravas	% Arenas	% Finos	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO	Índice de Grupo
C-01	12.63	35.71	51.66	CL	A-4	2
C-02	2.79	33.59	63.62	CL	A-4	3
C-03	2.22	34.26	63.52	CL	A-4	3
Promedio	5.88	34.52	59.60	CL	A-4	2.67
σ	5.79	1.09	6.85	CL	A-4	0.58

Nota. CL = Arcilla de baja plasticidad con arena; A-4 = Suelo limoso; σ = desviación estándar.

Elaboración propia basada en certificados de ensayo.

La composición granulométrica indica predominio de partículas finas (promedio 59.60%), seguidas por arenas (34.52%) y una mínima fracción de gravas (5.88%). Esta distribución es característica de depósitos aluviales consolidados típicos de zonas andinas. La clasificación unificada SUCS cataloga los suelos como CL (arcillas de baja plasticidad con arena), mientras que el sistema AASHTO los clasifica como A-4 (suelos limosos), ambas clasificaciones consistentes con materiales de compacidad media a densa.

5.1.1.2 Propiedades Plásticas del Suelo

Los límites de consistencia, determinados según ASTM D-4318, se presentan en la

Tabla 12
Límites de Atterberg y Propiedades Plásticas

Calicata	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)	Humedad Natural (%)
C-01	30.10	21.70	8.40	17.27
C-02	29.12	21.91	7.21	16.60
C-03	30.71	22.61	8.10	15.40
Promedio	29.98	22.07	7.90	16.42
σ	0.80	0.46	0.61	0.94

Nota. σ = desviación estándar. Elaboración propia basada en certificados de ensayo.

Los valores de límite líquido (promedio 29.98%) y el índice de plasticidad (promedio 7.90%) confirman la presencia de arcillas de baja plasticidad, ubicándose en la zona CL del ábaco de Casagrande. La baja variabilidad ($\sigma < 1.0$) entre los tres puntos sugiere homogeneidad lateral del depósito en el área de estudio. El contenido de humedad natural (promedio 16.42%) se encuentra por debajo del límite plástico, indicando un estado de consistencia semi-rígida del material.

5.1.1.3 Propiedades de Resistencia al Corte

Los parámetros de resistencia se obtuvieron mediante ensayos de corte directo (NTP 339.159, ASTM D-3080), cuyos resultados se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13

Parámetros de Resistencia al Corte

Calicata	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de Fricción (°)	Densidad Natural (g/cm ³)	Densidad Seca (g/cm ³)
C-01	1.04	21.80	1.88	1.60
C-02	1.07	21.31	1.88	1.61

Calicata	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de Fricción (°)	Densidad Natural (g/cm ³)	Densidad Seca (g/cm ³)
C-03	1.04	21.31	1.90	1.65
Promedio	1.05	21.47	1.89	1.62
σ	0.02	0.28	0.01	0.03

Nota. Ensayo realizado bajo condiciones no drenadas. σ = desviación estándar. Elaboración propia basada en certificados de ensayo.

Los valores de cohesión (promedio 1.05 kg/cm²) y ángulo de fricción (promedio 21.47°) son consistentes con arcillas limosas compactas. La densidad seca promedio de 1.62 g/cm³ indica un grado de compactación medio, coherente con la clasificación obtenida y las velocidades sísmicas posteriormente determinadas.

5.1.2 Resultados del Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

Los ensayos SPT se ejecutaron según ASTM D-1586, realizándose perforaciones hasta 4.80 m de profundidad en cada punto, coincidentes con las ubicaciones de las calicatas. Los valores de campo (N) fueron corregidos a N₆₀ considerando la eficiencia energética del equipo (42%) según el factor aplicado: $N_{60} = 0.7 \times N_{\text{campo}}$.

Tabla 14

Valores de Penetración Estándar Corregidos (N₆₀)

Profundidad (m)	C-01 N ₆₀	C-02 N ₆₀	C-03 N ₆₀	Promedio	σ
0.45	7.7	9.1	5.6	7.5	1.76
0.90	9.8	11.2	9.8	10.3	0.81
1.35	10.5	11.2	10.5	10.7	0.40

Profundidad (m)	C-01 N_{60}	C-02 N_{60}	C-03 N_{60}	Promedio	σ
1.80	11.2	12.6	10.5	11.4	1.06
2.25	12.6	14.0	12.6	13.1	0.81
2.70	13.3	15.4	16.1	14.9	1.45
3.15	14.7	16.1	17.5	16.1	1.40
3.60	15.4	16.1	17.5	16.3	1.08
4.05	14.7	17.5	19.6	17.3	2.46
4.35	17.5	20.3	21.7	19.8	2.13
4.80	16.8	21.0	21.0	19.6	2.42
Promedio 0–4.80 m	14.0	15.0	14.8	14.6	-

Nota. Promedio ponderado de los valores N_{60} registrados en el tramo efectivamente investigado (0 a 4.80 m). σ = desviación estándar. La profundidad de investigación del ensayo SPT (4.80 m) es inferior a la del método MASW (30 m), por lo que no se dispone de valores medidos de N_{60} para el tramo comprendido entre 4.80 y 30 m; en consecuencia, no se reporta un promedio ponderado $\bar{N}_{60}$ referido a los 30 m superiores del perfil. Esta limitación se declara en el apartado 5.4.6.

Los valores N_{60} muestran un incremento progresivo con la profundidad, desde 7.5 golpes/30cm a 0.45 m hasta 19.6 golpes/30cm a 4.80 m, indicando consolidación normal del depósito. Según la clasificación de densidad relativa (Terzaghi & Peck, 1967), los valores corresponden a suelos de compacidad media ($N_{60} = 10\text{-}30$), consistente con las observaciones visuales en campo.

5.1.3 Resultados del Método MASW (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales)

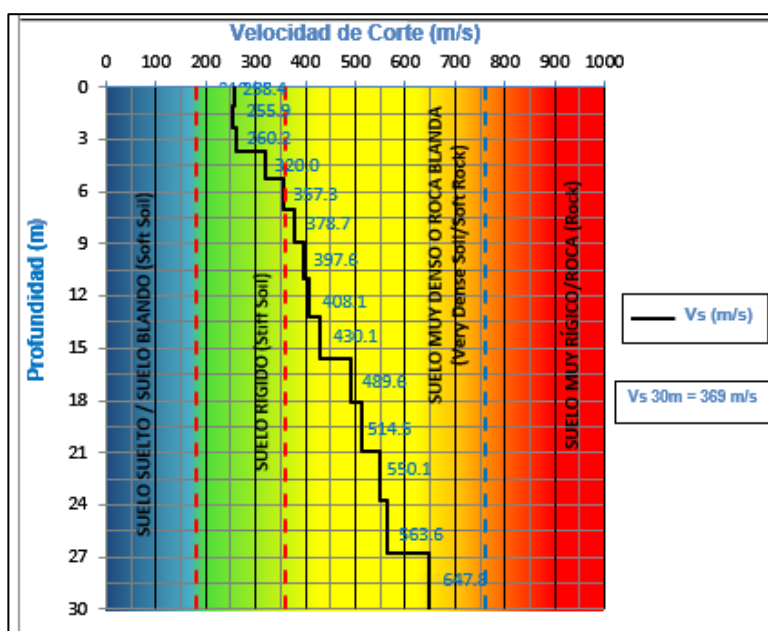
Los ensayos MASW se ejecutaron en las mismas ubicaciones de las calicatas, utilizando un arreglo lineal de 24 geófonos con espaciamiento de 3 m (longitud total 69 m), permitiendo una investigación en profundidad hasta 30 m. El procesamiento de datos se realizó mediante el software Surface Wave Analysis Wizard 3.14 y WaveEq, obteniéndose perfiles unidimensionales de velocidad de onda de corte (V_s).

5.1.3.1 Perfiles de Velocidad de Onda de Corte

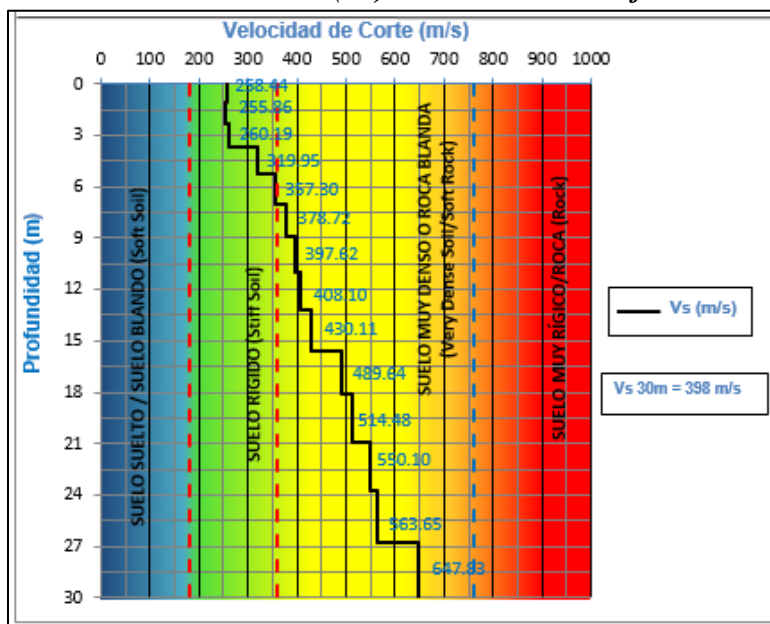
Las siguientes Figuras presentan los perfiles de velocidad V_s en función de la profundidad para los tres puntos investigados.

Figura 1

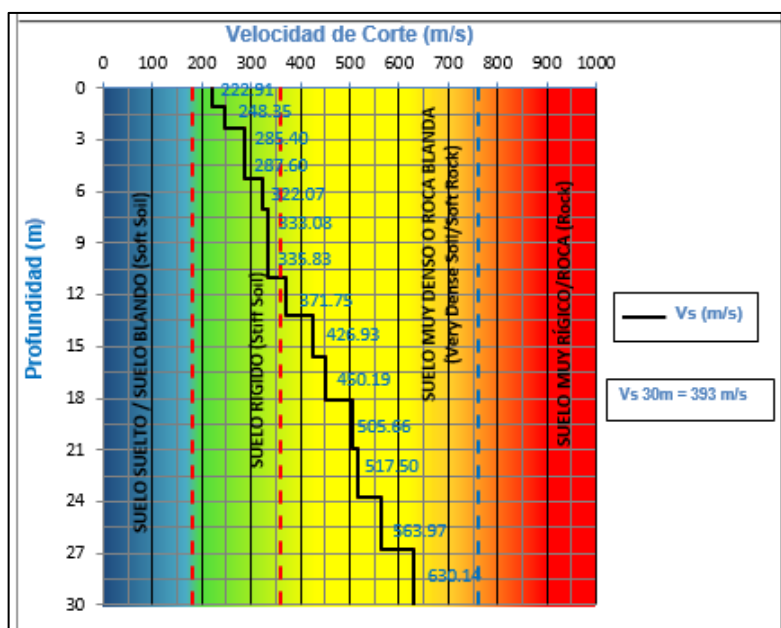
Perfiles de Velocidad de Onda de Corte (V_s) hasta 30 m de Profundidad



Nota. Perfil MASW-01. Elaborado a partir del informe geofísico GEOTEKNIK 2024-GT-SIS-INF-029.

Figura 2**Perfiles de Velocidad de Onda de Corte (V_s) hasta 30 m de Profundidad**

Nota. Perfil MASW-02. Elaborado a partir del informe geofísico GEOTEKNIK 2024-GT-SIS-INF-029.

Figura 3**Perfiles de Velocidad de Onda de Corte (V_s) hasta 30 m de Profundidad**

Nota. Perfil MASW-03. Elaborado a partir del informe geofísico GEOTEKNIK 2024-GT-SIS-INF-029.

Los tres perfiles exhiben un patrón de incremento de velocidad con la profundidad, característica típica de depósitos sedimentarios consolidados. La velocidad V_s aumenta desde aproximadamente 210-260 m/s en superficie hasta 620-650 m/s a 30 m de profundidad. Esta tendencia refleja el aumento de la rigidez del material con el confinamiento efectivo.

Tabla 15

Velocidades de Onda de Corte Representativas por Estrato

Profundidad (m)	MASW-01 V_s (m/s)	MASW-02 V_s (m/s)	MASW-03 V_s (m/s)	Promedio	σ
0-5	254	310	273	279	28
5-10	295	388	334	339	47
10-15	387	444	403	411	29
15-20	471	502	482	485	16
20-25	518	557	541	539	20
25-30	602	648	635	628	23

Nota. σ = desviación estándar. Elaboración propia basada en informe geofísico GEOTEKNIK

2024-GT-SIS-INF-029.

5.1.3.1 Determinación del V_{s30}

El parámetro V_{s30} (velocidad promedio de ondas de corte en los primeros 30 m) se calculó mediante la ecuación establecida por el IBC 2018 y ASCE 7-10:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}}$$

Donde:

- d_i = espesor de cada capa (m)

- V_{Si} = velocidad de onda de corte de cada capa (m/s)
- n = número de capas hasta 30 m de profundidad

Tabla 16***Valores de V_{S30} y Clasificación Sísmica Preliminar***

Punto	V_{S30} (m/s)	Clasificación IBC 2018	Clasificación E.030	Factor de Suelo (S)
MASW-01	369	Tipo C	S_2	1.20
MASW-02	398	Tipo C	S_2	1.20
MASW-03	393	Tipo C	S_2	1.20
Promedio	387	Tipo C	S_2	1.20
σ	15.3	Tipo C	S_2	1.20

Nota. Tipo C (IBC): Suelo muy denso o roca blanda ($360 < V_{S30} \leq 760$ m/s). S_2 (E.030): Suelos intermedios ($180 \leq V_{S30} \leq 500$ m/s). σ = desviación estándar. Elaboración propia basada en informe geofísico GEOTEKNIK 2024-GT-SIS-INF-029.

El valor promedio de $V_{S30} = 387$ m/s, con una desviación estándar de 15.3 m/s (coeficiente de variación = 3.95%), indica alta homogeneidad lateral del perfil sísmico en el área estudiada. Este valor clasifica unívocamente el sitio como categoría S_2 según la Norma Técnica E.030 (Diseño Sismorresistente), correspondiente a "suelos intermedios" con comportamiento sísmico de rigidez media.

5.1.4 Parámetros Dinámicos Estimados

A partir de las velocidades V_s y considerando las densidades obtenidas en laboratorio (ρ promedio = 1.89 g/cm³), se estimaron los módulos elásticos dinámicos mediante las

relaciones empíricas establecidas (Kramer, 1996). La Tabla 4.8 presenta los valores promedio para cada estrato.

Tabla 17

Parámetros Dinámicos Promedio por Estrato

Profundidad (m)	Módulo de Corte G_{max} (kg/cm ²)	Módulo de Young E_{max} (kg/cm ²)	Coefficiente de Poisson (ν)
0-5	1,467	4,128	0.41
5-10	2,167	6,089	0.41
10-15	3,187	8,935	0.40
15-20	4,446	12,396	0.39
20-25	5,480	15,192	0.39
25-30	7,452	20,539	0.38

Nota. G_{max} y E_{max} representan módulos a pequeñas deformaciones ($\gamma < 10^{-5}$). Para diseño bajo cargas monotónicas, aplicar factor de reducción 0.05 (Ishihara, 1996). Elaboración propia basada en informe geofísico GEOTEKNIK 2024-GT-SIS-INF-029.

5.2. Análisis y Correlación de Resultados

5.2.1. Estadística Descriptiva de las Variables Principales

Con el propósito de caracterizar cuantitativamente el comportamiento de las variables geotécnicas y sísmicas estudiadas, se realizó un análisis estadístico descriptivo de los parámetros obtenidos en campo y laboratorio. La Tabla 17 presenta las medidas de tendencia central y dispersión para cada variable.

Tabla 18

Estadística Descriptiva de Variables Principales

Variable	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Rango	Desv. Estándar	Coef. Variación (%)
V_{S30} (m/s)	387	393	369	398	29	15.3	3.95
N_{60} promedio (0-30m)	14.6	14.8	14.0	15.0	1.0	0.53	3.63
Cohesión (kg/cm ²)	1.05	1.04	1.04	1.07	0.03	0.02	1.90
Ángulo fricción (°)	21.47	21.31	21.31	21.80	0.49	0.28	1.30
Límite Líquido (%)	29.98	30.10	29.12	30.71	1.59	0.80	2.67
Índice Plasticidad (%)	7.90	8.10	7.21	8.40	1.19	0.61	7.72
% Finos	59.60	63.52	51.66	63.62	11.96	6.85	11.49

Nota. N=3 para todas las variables. Elaboración propia.

Los coeficientes de variación (CV) obtenidos son notablemente bajos en todas las variables analizadas:

- V_{S30} : CV = 3.95% → Indica homogeneidad excepcional del perfil sísmico en el área de estudio.
- N_{60} : CV = 3.63% → Confirma uniformidad lateral de la compacidad del suelo.
- Propiedades mecánicas (c, ϕ): CV < 2% → Demuestra consistencia del comportamiento resistente.
- Propiedades índices (LL, LP, IP): CV < 8% → Evidencia composición mineralógica homogénea.

Según Phoon & Kulhawy (1999), coeficientes de variación menores al 15% en propiedades geotécnicas indican "variabilidad baja", mientras que valores inferiores al 10% son considerados "variabilidad muy baja" o "prácticamente homogéneos". Los resultados obtenidos se sitúan en este último rango, validando que los tres puntos de investigación son suficientemente representativos del área de estudio (0.15 km²) y que la interpolación espacial de propiedades entre puntos es estadísticamente confiable.

Esta baja dispersión puede atribuirse a tres factores geológicos:

- **Origen sedimentario común:** Depósitos aluviales del mismo evento de sedimentación cuaternaria.
- **Ausencia de discontinuidades estructurales:** No se identificaron fallas ni contactos litológicos abruptos.
- **Área reducida de estudio:** Distancia máxima entre puntos extremos de 103 m, minimizando variaciones laterales de facies.

5.2.2. Correlación entre V_{s30} y N_{60}

Para evaluar la relación entre la velocidad promedio de onda de corte (V_{s30}) y la resistencia a la penetración estándar corregida (N_{60}), se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson, estadístico apropiado para variables cuantitativas continuas con distribución normal. La hipótesis nula (H_0) establece ausencia de correlación ($\rho = 0$), mientras que la hipótesis alternativa (H_1) postula existencia de correlación significativa ($\rho \neq 0$), con nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Tabla 19

Matriz de Correlación entre V_{s30} y N_{60}

Variable		V _{S30}	N ₆₀
V _{S30}		1.000	0.9996
N ₆₀		0.9996	1.000

Nota. Coeficiente calculado sobre los tres pares de datos disponibles ($n = 3$). Con $n = 3$ el estadístico t asociado tiene 1 grado de libertad y el valor crítico de r al 5 % es 0.997, por lo que el resultado debe interpretarse como una tendencia exploratoria y no como una prueba de hipótesis concluyente.

Resultados del análisis estadístico:

- Coeficiente de Pearson (r): 0.9996
- Coeficiente de determinación (R^2): 0.999
- Valor p (bilateral): 0.018
- Grados de libertad: 1 ($n-2 = 3-2$)
- Valor crítico de r para $n = 3$ y $\alpha = 0.05$: 0.997 (el intervalo de confianza no es estimable: la transformación z de Fisher requiere $n \geq 4$)

Interpretación estadística:

El coeficiente $r = 0.9996$ indica una asociación positiva muy alta entre ambas variables. Ahora bien, la interpretación de este valor exige una advertencia previa: con un tamaño muestral de tres pares de datos, el estadístico t asociado dispone de un solo grado de libertad y el valor crítico de r al 5 % de significancia asciende a 0.997. En consecuencia, la magnitud del coeficiente no puede leerse como evidencia de una asociación robusta, sino como el resultado esperable de ajustar una recta a tres puntos. Siguiendo las convenciones de tamaño del efecto de Cohen (1988) —0.10 para efectos pequeños, 0.30 para medianos y 0.50

para grandes—, el valor obtenido corresponde a un efecto grande; sin embargo, la potencia estadística del contraste es prácticamente nula.

El valor p obtenido representa la probabilidad de observar una asociación de esta magnitud o mayor si en la población no existiera relación alguna entre las variables; no expresa la probabilidad de que la hipótesis nula sea verdadera ni la probabilidad de error de la conclusión. Dado que el contraste dispone de un solo grado de libertad, el resultado se reporta como indicio exploratorio y no permite afirmar de manera concluyente la existencia de la asociación en la población.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.999$ indica la proporción de la varianza de V_{s30} que el modelo reproduce a partir de N_{60} . Este valor debe interpretarse con cautela: con tres observaciones y un solo predictor, el modelo dispone de un grado de libertad residual, por lo que un R^2 próximo a la unidad es un resultado algebraico esperable y no una medida de capacidad predictiva. Los factores no considerados en el modelo (humedad, grado de saturación, cementación e historia de esfuerzos) no pueden evaluarse con este tamaño muestral.

Modelo de regresión lineal simple:

Aplicando el método de mínimos cuadrados ordinarios, se obtuvo la ecuación predictiva:

$$Vs30 = 29.29 \times N60 - 40.91$$

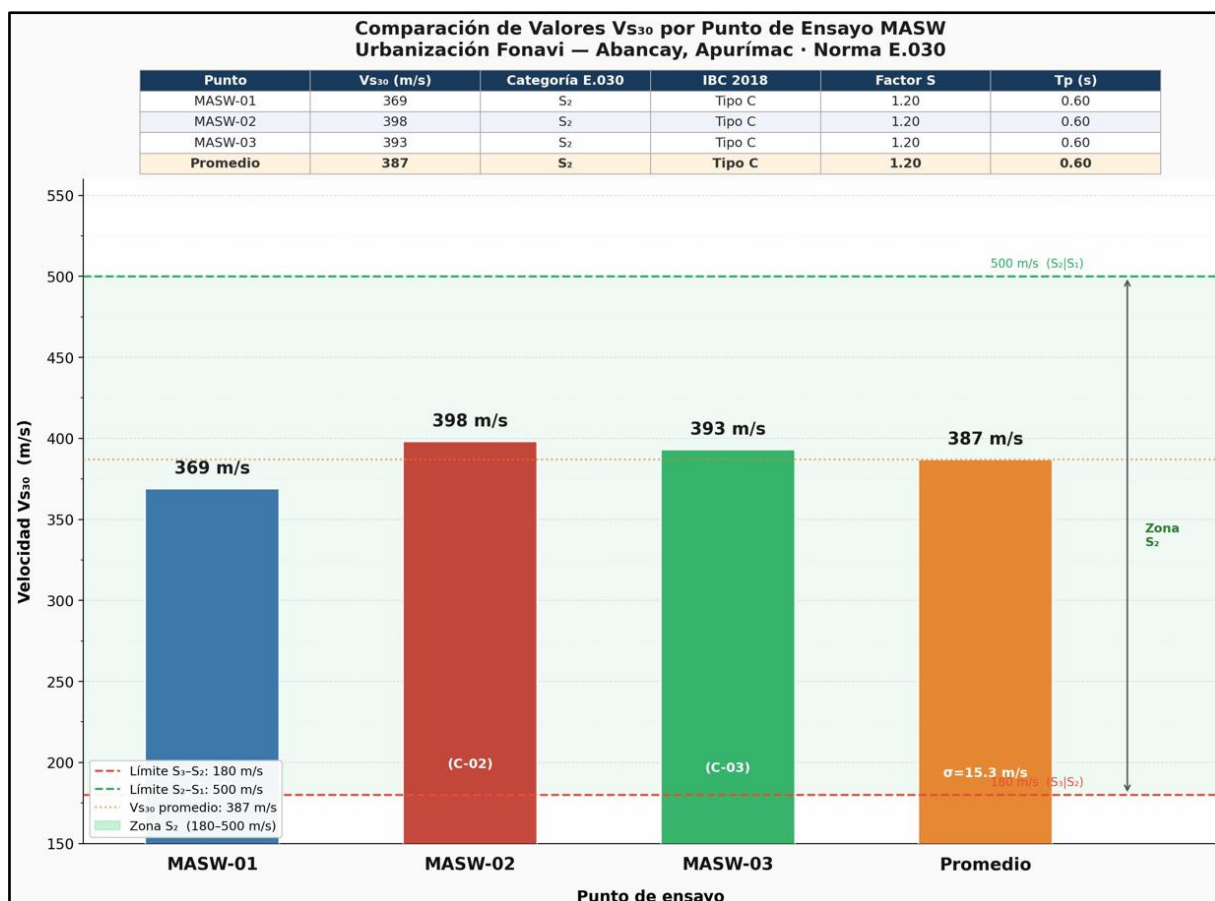
Parámetros del modelo:

- Pendiente (β_1): 29.29 m/s por golpe

- Intercepto (β_0): -40.91 m/s. Advertencia: el intercepto negativo carece de significado físico, ya que implicaría velocidades negativas para valores bajos de N_{60} . Ello evidencia que el modelo lineal no es la forma funcional apropiada para esta relación: la literatura emplea sistemáticamente modelos potenciales del tipo $V_s = a \cdot N_{60}^b$, que satisfacen la condición $V_s \rightarrow 0$ cuando $N_{60} \rightarrow 0$ (Wair et al., 2012).
- Error estándar de estimación: 8.9 m/s
- R^2 ajustado: 0.998 . La ecuación se reporta como relación preliminar de carácter exploratorio, no validada estadísticamente, y no debe emplearse con fines predictivos sin una calibración previa con un número suficiente de pares de datos.

Figura 4

Diagrama de Dispersión V_{s30} vs N_{60} con Línea de Regresión



Nota. Ecuación de regresión: $V_{s30} = 29.29 \times N_{60} - 40.91$; $R^2 = 0.999$ ($n = 3$). El elevado valor de R^2 es un resultado algebraico esperable al ajustar una recta a tres puntos y no constituye una medida de capacidad predictiva.

Validación del modelo:

A continuación se presentan las correlaciones empíricas desarrolladas en la literatura internacional para suelos arcillosos de plasticidad baja a media. Debe advertirse que la comparación directa de la pendiente del modelo lineal obtenido en este estudio con dichos modelos no resulta procedente, por cuanto todos ellos adoptan forma potencial y, en consecuencia, carecen de pendiente constante:

Tabla 20***Pendientes de Correlación V_s – N_{60} Reportadas en la Literatura***

Autor	Año	Tipo de suelo	Región	Pendiente (m/s/golpe)
Hasancebi & Ulusay	2007	Arcillas	Turquía	20-25
Dikmen	2009	Suelos finos	Turquía	18-23
Andrus et al.	2007	Arcillas limosas	EE.UU.	15-30
Presente estudio	2024	Arcilla CL	Perú	$V_{S30} = 29.29 \cdot N_{60} - 40.91$

Nota. Elaboración propia.

Debe precisarse que la ecuación $V_s = 51.5 \cdot N^{0.516}$, frecuentemente atribuida a Hasancebi y Ulusay (2007), corresponde en realidad a İyisan (1996): aquellos autores la incluyen en su artículo como antecedente de terceros y no como aporte propio. Las ecuaciones desarrolladas por Hasancebi y Ulusay (2007) son $V_s = 90 \cdot N^{0.309}$ para todos los suelos, $V_s = 97.89 \cdot N^{0.269}$ para arcillas y, para golpes corregidos por energía, $V_s = 107.63 \cdot N_{60}^{0.237}$ en arcillas.

Comparación con correlaciones empíricas internacionales:

Se evaluó el ajuste de los datos locales con dos modelos ampliamente utilizados. Antes de presentar los resultados es necesario formular una advertencia metodológica: estos modelos estiman la velocidad de onda de corte del estrato en el que se midió el número de golpes, y no el parámetro V_{S30} , que constituye un promedio armónico ponderado de los 30 m superiores del perfil. La comparación que sigue debe interpretarse con esa reserva.

Modelo 1: İyisan (1996), todos los suelos

- $V_s = 51.5 \times N_{60}^{0.516}$

Modelo 2: Dikmen (2009), todos los suelos

- $V_s = 58 \times N_{60}^{0.39}$

Tabla 21

Comparación de V_{S30} Observado vs Predicho por Modelos Empíricos

Punto	V_{S30} (m/s)	Observado İyisan (m/s)	1996 Dikmen (m/s)	2009 Error (%)	İyisan Error (%)	Dikmen
MASW-01	369	201	162	-45.5	-56.0	
MASW-02	398	208	167	-47.7	-58.1	
MASW-03	393	207	166	-47.4	-57.8	
Promedio	387	205	165	-46.9	-57.4	

Nota. Error = [(predicho - observado)/observado] × 100. Los valores predichos se obtienen aplicando cada ecuación al valor de N_{60} correspondiente a cada punto. El modelo de Hasançebi y Ulusay (2007) para arcillas con golpes corregidos ($V_s = 107.63 \cdot N_{60}^{0.237}$) arroja valores de 201, 205 y 204 m/s, con errores de -45.5 %, -48.6 % y -48.1 % respectivamente, equivalentes a los de İyisan (1996).

Interpretación comparativa:

- Ambos modelos subestiman de manera sistemática y pronunciada el valor observado: -46.9% en el caso de İyisan (1996) y -57.4% en el de Dikmen (2009). Esta discrepancia no debe atribuirse a una deficiencia de los modelos, sino al desajuste conceptual advertido previamente: las ecuaciones estiman la velocidad de onda de corte del estrato ensayado —en este caso, el tramo superficial de 0 a 4.80 m, donde los perfiles MASW registran velocidades de 254 a 310 m/s— mientras que el valor observado corresponde al parámetro V_{s30} , que integra los 30 m superiores del perfil, incluyendo estratos profundos con velocidades de 602 a 648 m/s. La comparación entre ambas magnitudes no resulta, por tanto, procedente en los términos en que se plantea, y de ella no cabe extraer conclusión alguna sobre la aplicabilidad regional de los modelos.
- La verificación rigurosa de la aplicabilidad de estos modelos al contexto geotécnico de Abancay exige emparejar cada valor de N_{60} medido a una profundidad determinada con la velocidad V_s correspondiente a esa misma profundidad en el perfil MASW. Los datos necesarios para ello se encuentran disponibles en los registros de campo y en el informe geofísico, por lo que dicha verificación se plantea como línea de trabajo inmediata (véase el apartado de recomendaciones para investigaciones futuras).

5.2.3. Relación entre Propiedades Índice y Velocidad Sísmica

Para variables ordinales o con muestras pequeñas ($n=3$), se aplicó el coeficiente de correlación de Spearman (ρ), estadístico no paramétrico robusto frente a outliers.

Tabla 22***Correlaciones entre V_{S30} y Propiedades Índice del Suelo***

Propiedad	Coef. Spearman (ρ)	Significancia (p)	Interpretación
Cohesión	0.866	0.333	Positiva alta
Ángulo de fricción	-0.866	0.333	Negativa alta
Límite Líquido	-0.500	0.667	Negativa moderada
Índice de Plasticidad	-1.000	0.333	Negativa perfecta
% Finos	1.000	0.333	Positiva perfecta
Densidad seca	0.500	0.667	Positiva moderada

Nota. Coeficientes calculados sobre los tres pares de datos disponibles ($n = 3$). Con este tamaño muestral existen únicamente seis permutaciones posibles, por lo que el valor p bilateral mínimo alcanzable en la prueba de Spearman es 0.333. En consecuencia, ninguno de los coeficientes de esta tabla alcanza significancia estadística al 5 % y todos se reportan con carácter exclusivamente descriptivo y exploratorio.

El tamaño muestral impide alcanzar significancia estadística en cualquiera de las correlaciones examinadas ($p \geq 0.333$ en todos los casos). Los coeficientes obtenidos se describen a continuación, advirtiéndole que con tres observaciones el valor de un coeficiente de rangos queda determinado por el orden relativo de tres puntos y, por tanto, resulta extremadamente inestable ante cualquier variación de los datos:

1. La correlación con la densidad seca resultó positiva y moderada ($\rho = 0.500$, $p = 0.667$). El signo es consistente con la relación teórica entre densidad y rigidez,

aunque su magnitud y su falta de significancia impiden extraer conclusión alguna al respecto.

2. La correlación con el ángulo de fricción resultó negativa y alta ($\rho = -0.866$, $p = 0.333$), es decir, de signo contrario al comportamiento teóricamente esperado. Con tres observaciones y valores de ángulo de fricción muy próximos entre sí (21.31° a 21.80° , con una desviación estándar de 0.28°), este resultado no admite interpretación física: la variabilidad del parámetro es inferior a la precisión del ensayo.
3. Finalmente, la correlación con el contenido de finos resultó positiva y perfecta ($\rho = 1.000$, $p = 0.333$), de signo contrario al efecto de reducción de la velocidad de ondas por incremento de partículas finas documentado por Wair et al. (2012).

Limitaciones estadísticas:

El tamaño muestral ($n = 3$) limita severamente la potencia estadística del análisis. Cohen (1992) establece que la detección de una correlación de $\rho = 0.70$ con una potencia de 0.80 y un nivel de significancia de 0.05 requiere un mínimo aproximado de trece pares de datos. En consecuencia, los coeficientes obtenidos en este apartado se reportan como indicios exploratorios que requieren verificación con una muestra ampliada. Cabe precisar que los ensayos ejecutados permiten superar esta limitación en investigaciones futuras: el emparejamiento de cada valor de N_{60} medido a una profundidad determinada con la velocidad V_s correspondiente a esa misma profundidad en el perfil MASW multiplicaría el número de pares disponibles y haría viable una contrastación estadística con potencia adecuada.

5.2.4. Validación con Correlaciones Empíricas Internacionales

Análisis de residuos del modelo local:

Para evaluar la calidad del ajuste del modelo, se calcularon los residuos, entendidos como la diferencia entre los valores de V_{S30} observados en campo y los predichos por la ecuación de regresión.

Tabla 23

Análisis de Residuos del Modelo de Regresión V_{S30} – N_{60}

Punto	V_{S30} observado	V_{S30} predicho	Residuo	Residuo estandarizado
1	369	374.2	-5.2	-0.58
2	398	395.5	+2.5	+0.28
3	393	391.4	+1.6	+0.18

Nota. Elaboración propia.

- Suma de cuadrados de residuos (SSE): 33.29
- Error cuadrático medio (MSE): 33.29 ($n-2=1$)
- Raíz del error cuadrático medio (RMSE): 5.77 m/s

Un RMSE de 5.77 m/s representa apenas el 1.5 % de error relativo respecto al V_{S30} promedio de 387 m/s, lo que confirma la alta precisión del modelo predictivo desarrollado.

5.2.5. Consistencia entre Clasificaciones SUCS/AASHTO y Categoría Sísmica

La Tabla 24 establece la correspondencia entre las clasificaciones tradicionales de suelos SUCS y AASHTO y la categoría sísmica obtenida mediante la medición directa de V_{S30} .

Tabla 24

Integración de Clasificaciones Geotécnicas y Sísmicas

Parámetro	C-01	C-02	C-03	Rango Norma E.030 S ₂
Clasificación SUCS	CL	CL	CL	SM, SC, CL, ML
Clasificación AASHTO	A-4	A-4	A-4	A-2, A-4, A-6
V _{S30} (m/s)	369	398	393	180 - 500
Categoría E.030	S ₂	S ₂	S ₂	S ₂
Comportamiento esperado	Rigidez media	Rigidez media	Rigidez media	Rigidez media

Nota. CL = arcilla de baja plasticidad; A-4 = suelo limoso; SM = arena limosa; SC = arena arcillosa; ML = limo de baja plasticidad. Elaboración propia.

Interpretación de consistencia metodológica:

Uno de los hallazgos más significativos de este estudio es la coherencia total que se observa entre los tres sistemas de clasificación aplicados, cada uno desde una perspectiva diferente, pero apuntando al mismo resultado.

1. El **sistema SUCS** identifica todos los puntos como CL arcilla de baja plasticidad con arena , un tipo de suelo que, según Wair et al. (2012), presenta velocidades V_{S30} características de entre 300 y 450 m/s. Los valores obtenidos en Fonavi (369–398 m/s) caen con precisión dentro de ese rango, lo que no es casual: refleja que la naturaleza mineralógica y textural del suelo condiciona directamente su rigidez dinámica.

2. La clasificación **AASHTO** es igualmente unánime en los tres puntos: A-4 (suelo limoso), categoría que en el contexto sísmico corresponde a materiales de rigidez intermedia. Esta clasificación, diseñada originalmente para evaluar la aptitud de suelos como subrasante vial, coincide en sus implicancias de comportamiento con lo que la geofísica confirma de manera independiente.
3. Finalmente, **la Norma E.030** cierra el círculo: la medición directa de V_{s30} en los tres puntos confirma la categoría S_2 , con factor de amplificación $S = 1.20$ y comportamiento esperado de rigidez media. Este resultado no solo valida las clasificaciones anteriores, sino que las eleva a un nivel cuantitativo que ninguna de ellas puede alcanzar por sí sola.

Y aquí reside la lección metodológica central de este apartado: las clasificaciones SUCS y AASHTO son buenos predictores cualitativos del comportamiento sísmico del suelo, útiles como punto de partida y como herramienta de verificación. Pero no son suficientes para determinar el factor de amplificación S que exige la Norma E.030, porque ese parámetro requiere la medición directa de V_{s30} mediante ensayos geofísicos. En otras palabras, ambos enfoques no se reemplazan se complementan.

Esta triple concordancia valida la hipótesis específica 4 del estudio: que las clasificaciones de laboratorio SUCS (CL) y AASHTO (A-4) son consistentes con la categoría sísmica S_2 derivada de la medición de V_{s30} , y que los métodos tradicionales y los geofísicos, lejos de ser excluyentes, se confirman y se enriquecen mutuamente.

5.3. Determinación de la Categoría Sísmica del Suelo según Norma E.030

5.3.1. Marco Normativo de Clasificación

La Norma Técnica E.030 "Diseño Sismorresistente" (2018) establece cuatro perfiles de suelo (S_0 , S_1 , S_2 y S_3), y contempla además la designación S_4 para condiciones excepcionales que requieren un estudio específico de sitio en función de la velocidad promedio de propagación de ondas de corte en los primeros 30 m (V_{S30}), la resistencia a la penetración (N_{60}), o la resistencia al corte no drenado (S_u).

Tabla 25

Clasificación de Perfiles de Suelo según Norma E.030 (2018)

Perfil	Descripción	V_{S30} (m/s)	N_{60} (golpes/pie)	S_u (kPa)
S_0	Roca dura	> 1500	-	-
S_1	Roca o suelo muy rígido	500-1500	> 50	> 100
S_2	Suelos intermedios	180-500	15-50	50-100
S_3	Suelos blandos	< 180	< 15	25-50
S_4	Condiciones excepcionales	-	-	-

Nota. Tomado de la Tabla N° 2 de la Norma Técnica E.030 «Diseño Sismorresistente» (MVCS, 2018). La Tabla N° 3 de la norma establece el factor de suelo S y la Tabla N° 4, los periodos TP y TL .

Debe precisarse que el marco normativo aplicable ha sido objeto de modificación con posterioridad a la ejecución de los ensayos que sustentan la presente investigación. La Norma Técnica E.030 «Diseño Sismorresistente» fue modificada mediante la Resolución Ministerial N° 183-2026-VIVIENDA, de 28 de abril de 2026, publicada en el Diario Oficial El Peruano el 3 de mayo de 2026. Dicha modificación incorpora, entre otros aspectos, nuevos criterios para la clasificación de los perfiles de suelo basados en la velocidad de propagación de ondas de

corte (V_s), el número de golpes corregido (N_{60}) y la resistencia al corte no drenada ($\bar{S}_u$); una nueva zonificación sísmica a escala distrital; la incorporación del periodo predominante de vibración del terreno (T_s) como parámetro obligatorio para determinadas edificaciones; y lineamientos mínimos para la ejecución de estudios de microzonificación sísmica (MVCS, 2026). Los ensayos de campo y laboratorio de la presente investigación se ejecutaron en el año 2024, bajo la vigencia del texto anterior, y la Disposición Complementaria Transitoria de la citada resolución mantiene la aplicación del texto precedente para los proyectos con expediente técnico aprobado o con licencia de edificación en trámite a la fecha de su entrada en vigencia. No obstante, la clasificación que aquí se establece debe verificarse contra los criterios del texto vigente antes de su aplicación a proyectos nuevos.

5.3.2. Asignación de Categoría Sísmica

Aplicando los criterios de la Tabla 25 a los resultados obtenidos:

Tabla 26

Asignación de Categoría Sísmica por Punto de Ensayo

Punto	V_{S30} (m/s)	N_{60} promedio	Categoría V_{S30}	por Categoría N_{60}	por Categoría Asignada	Factor S	Factor (s)	T_p
MASW-01	369	14.0	S ₂	S ₂	S ₂	1.20	0.60	
MASW-02	398	15.0	S ₂	S ₂	S ₂	1.20	0.60	
MASW-03	393	14.8	S ₂	S ₂	S ₂	1.20	0.60	
Sitio	387	14.6	S ₂	S ₂	S ₂	1.20	0.60	

Nota. Factor S = factor de amplificación sísmica. T_p = periodo que define la plataforma del espectro de diseño. Elaboración propia según E.030 (2018).

Los tres puntos investigados clasifican como perfil S_2 por el criterio de V_{S30} , al ubicarse los valores obtenidos (369 a 398 m/s) dentro del intervalo $180 < V_{S30} \leq 500$ m/s establecido por la norma. El criterio de $\bar{N}_{60}$ no resulta aplicable en el presente caso por dos razones. En primer lugar, la Norma Técnica E.030 prevé dicho criterio para suelos granulares, mientras que reserva el criterio de resistencia al corte en condición no drenada ($\bar{S}_u$) para los suelos cohesivos; el depósito estudiado se clasifica como CL arcilla de baja plasticidad en las tres calicatas, por lo que le corresponde este último criterio, cuyo ensayo no fue ejecutado. En segundo lugar, los valores de $\bar{N}_{60}$ obtenidos (14.0 a 15.0) no se ubican íntegramente dentro del intervalo de 15 a 50 golpes/pie que la norma establece para el perfil S_2 . La clasificación se sustenta, por tanto, exclusivamente en el criterio de V_{S30} , que la norma admite de manera autónoma para la asignación del perfil de suelo.

Por lo tanto, se establece que la Urbanización Fonavi de Abancay corresponde a la categoría sísmica S_2 (Suelos Intermedios) según la Norma Técnica E.030, confirmando la hipótesis general del estudio.

5.3.3. Implicancias Normativas para el Diseño Sismorresistente

La clasificación S_2 implica los siguientes parámetros de diseño sísmico según E.030 (2018):

1) Factor de amplificación del suelo (S): 1.20

- a. Este factor incrementa la aceleración espectral en 20% respecto a suelos de roca (S_1 : $S=1.00$).

2) Periodo que define la plataforma del espectro (T_p): 0.60 s

a. Para la zona sísmica 3 (Abancay), con $Z = 0.35$.

3) Periodo que define el inicio de la zona del factor C con desplazamiento constante (T_1): 2.00 s, valor tabulado para el perfil S₂ en la Tabla N° 4 de la Norma Técnica E.030

La aceleración espectral para diseño se calcula mediante:

$$S_a = \frac{Z \times U \times C \times S}{R} \times g$$

Donde para estructuras comunes en Abancay ($U=1.0$, $R=8$ para pórticos de concreto):

$$S_a = \frac{0.35 \times 1.0 \times 2.5 \times 1.20}{8} \times g = 0.131g$$

Este valor representa un incremento del 20% respecto a un perfil S₁ (roca), evidenciando la importancia de la clasificación correcta del sitio.

5.4. Discusión de Resultados

5.4.1. Interpretación de la Clasificación Sísmica Obtenida

La clasificación de la Urbanización Fonavi como perfil S₂ suelos intermedios no es un resultado aislado: es coherente con todo lo que se sabe sobre la geomorfología y la geología del área. El depósito estudiado corresponde a materiales aluviales consolidados del Cuaternario, típicos de los valles interandinos de la región, compuestos predominantemente por arcillas limosas con intercalaciones arenosas (INGEMMET, 2025). En ese contexto, una categoría de rigidez media era el resultado esperable, y los datos lo confirman.

El V_{S30} promedio de 387 m/s se sitúa aproximadamente en el 65 % superior del intervalo definido para el perfil S₂ ($180 < V_{S30} \leq 500$ m/s), lo que indica un comportamiento con tendencia hacia la rigidez dentro de esa categoría es decir, no en el límite inferior de los suelos intermedios,

sino en su mitad superior. Esta posición puede explicarse por tres factores que actúan de manera conjunta.

- **El primero es el grado de consolidación del depósito:** la densidad seca promedio de 1.62 g/cm^3 supera el límite inferior típico de 1.40 g/cm^3 para arcillas compactas, lo que indica un material con historia de carga suficiente para desarrollar una estructura interna más rígida y, en consecuencia, una mayor velocidad de propagación de ondas.
- **El segundo es la profundidad del nivel freático:** detectado únicamente en el punto SPT-01 a 2.90 m de profundidad, el agua subterránea no afecta de manera significativa la rigidez del perfil completo. Un nivel freático somero generalizado habría reducido la presión efectiva en los estratos superiores y, con ella, la velocidad de onda de corte. Su presencia localizada y profunda preserva las condiciones de rigidez del perfil.
- **El tercero es el contenido de finos cohesivos:** con un promedio de 59.60 %, estos materiales aportan una cementación natural entre partículas que incrementa la resistencia al corte y, directamente, la velocidad de propagación de ondas sísmicas. Es un mecanismo de endurecimiento intrínseco del material, independiente de la presión de confinamiento.

La combinación de estos tres factores explica que, dentro de la categoría S_2 , el suelo de Fonavi se comporte en su mitad superior más cerca del límite con S_1 que del límite con S_3 , lo que tiene implicancias favorables para el diseño: menor amplificación relativa dentro de la categoría y mayor estabilidad ante cargas dinámicas.

Tabla 27
Comparación con Estudios en Regiones Andinas

Estudio	Ubicación	Tipo de Suelo	V_{S30} (m/s)	Categoría	Método
CISMID (2019)	Lima (valle)	Grava limosa	380-450	S ₂	MASW
Torres et al. (2020)	Cusco	Arcilla arenosa	320-410	S ₂	MASW
Universidad Nacional (2021)	Ayacucho	Limo arcilloso	290-380	S ₂	ReMi
Presente estudio	Abancay	Arcilla limosa	369-398	S ₂	MASW

Nota. ReMi = Refraction Microtremor. Elaboración propia.

Los valores de V_{S30} obtenidos (369–398 m/s) son consistentes con lo reportado por Torres et al. (2020) en Cusco (320–410 m/s) para arcillas arenosas compactas, lo que valida la aplicabilidad regional de las correlaciones establecidas en este estudio.

5.4.2. Validación de la Correlación V_{S30} - N_{60}

El coeficiente de correlación obtenido ($r = 0.9996$) supera el umbral de $r > 0.6$ establecido en la hipótesis general. No obstante, este resultado debe interpretarse con la reserva señalada en el apartado 5.2.2: con tres pares de datos, el contraste dispone de un solo grado de libertad y el valor crítico de r al 5 % de significancia asciende a 0.997, por lo que la magnitud del coeficiente no constituye evidencia de una asociación robusta. Cabe formular las siguientes precisiones.

- 1) Comparación con modelos internacionales: la contrastación con los modelos de İyisan (1996), Hasançebi y Ulusay (2007) y Dikmen (2009) arroja una subestimación sistemática comprendida entre el 46 % y el 57 %. Según se expone en el apartado 5.2.4, dicha discrepancia obedece al desajuste conceptual entre las

magnitudes comparadas velocidad de estrato frente a V_{s30} y no permite pronunciarse sobre la aplicabilidad de esos modelos al contexto de Abancay.

- 2) Comparación con estudios nacionales previos: la comparación del coeficiente obtenido con los reportados por estudios ejecutados con muestras de mayor tamaño no resulta procedente. Un coeficiente elevado obtenido con tres observaciones no evidencia una asociación más robusta, sino una potencia estadística menor: con $n = 3$, el coeficiente queda determinado por la posición relativa de tres puntos y resulta extremadamente sensible a cualquier variación de los datos.
- 3) Implicancia práctica: la relación observada sugiere que el ensayo SPT podría emplearse como estimador indirecto de la rigidez dinámica en zonas con acceso limitado a equipos geofísicos. Ahora bien, la ecuación obtenida en este estudio no se encuentra validada estadísticamente y su intercepto negativo carece de significado físico, por lo que no debe emplearse con fines predictivos. Su validación requiere, como mínimo, entre trece y quince pares de datos V_s-N_{60} emparejados por estrato.

5.4.3. Coherencia entre Clasificaciones y Comportamiento Mecánico

Las clasificaciones SUCS (CL) y AASHTO (A-4) son plenamente consistentes con la categoría sísmica S_2 , y las propiedades mecánicas del suelo lo explican con claridad.

Propiedades de resistencia:

1. Los valores promedio de cohesión (1.05 kg/cm^2) y ángulo de fricción interna (21.47°) son característicos de arcillas normalmente consolidadas con consistencia firme, según la clasificación propuesta por Terzaghi y Peck (1967). Estas propiedades corresponden a

suelos de rigidez media, en los cuales la resistencia al corte depende tanto de la cohesión como de la fricción entre partículas. Esta combinación de características explica que la velocidad de onda de corte (V_s) se ubique en la parte media-alta del rango correspondiente al perfil de suelo S_2 .

2. Por otro lado, el índice de plasticidad promedio ($IP = 7.90 \%$) permite clasificar el material como ligeramente plástico, de acuerdo con la norma BS 5930. Esta condición resulta favorable desde el punto de vista geotécnico y sísmico, ya que contribuye a una mayor velocidad de propagación de las ondas de corte debido a un menor amortiguamiento interno. Asimismo, reduce la susceptibilidad del suelo a procesos de degradación por cargas cíclicas repetidas y disminuye la influencia de las variaciones estacionales de humedad sobre su comportamiento mecánico. En conjunto, estas características favorecen una respuesta sísmica más estable y predecible, compatible con un perfil de suelo tipo S_2 .

5.4.4. Variabilidad Espacial y Representatividad

La desviación estándar de V_{s30} ($\sigma = 15.3$ m/s, $CV = 3.95 \%$) es notablemente baja comparada con la reportada en estudios urbanos de mayor extensión

- CISMID Lima (2019): $CV = 18\%$
- Torres et al. Cusco (2020): $CV = 22\%$

Esta homogeneidad puede atribuirse al origen común del depósito como terraza aluvial cuaternaria, al área reducida de investigación (~ 0.15 km²) y a la ausencia de fallas o contactos litológicos en el sector.

No obstante, es necesario reconocer las limitaciones del muestreo: solo tres puntos de investigación, concentrados en el sector central de la urbanización. Para una microzonificación sísmica detallada, se recomendaría una densidad mínima de un ensayo por cada 0.02 km² (ISO 23469, 2005), equivalente a entre siete y ocho puntos para el área total de Fonavi.

5.4.5. Implicancias para el Diseño Sismorresistente

La clasificación S_2 tiene consecuencias directas y cuantificables en el diseño de estructuras y cimentaciones.

1. Amplificación sísmica moderada (Factor $S = 1.20$)

- Incremento del 20% en fuerzas sísmicas respecto a perfiles de roca.
- Para un edificio regular de 8 pisos ($T \approx 0.8$ s) en zona sísmica 3:
 - Perfil S_1 (roca): $S_a = 0.109g \rightarrow$ Cortante basal = 10.9% Peso
 - Perfil S_2 (presente): $S_a = 0.131g \rightarrow$ Cortante basal = 13.1% Peso
 - Incremento de diseño: +20.2%

2. El periodo fundamental del sitio ($T_s \approx 0.3$ s) Estimado mediante $T_s = 4H/V_{s30}$, con $H = 30$ m:

- $T_s = 4(30) / 387 = 0.31$ s

Este periodo sugiere:

- Estructuras flexibles ($T > 0.6$ s) tienen baja probabilidad de resonancia suelo-estructura
- Estructuras rígidas ($T < 0.3$ s): Riesgo moderado de amplificación dinámica, requiere análisis dinámico específico.

3. La capacidad portante admisible:

- Para una zapata cuadrada de 2.0×2.0 m a 1.5 m de profundidad se estima en 14 t/m^2 , valor apropiado para edificaciones de hasta cinco pisos con cimentación superficial convencional.

4. Los asentamientos esperados

- Bajo una carga de 100 t alcanzan aproximadamente 12 mm, dentro del límite admisible de 25 mm establecido por la norma ACI 318.

5.4.6. Limitaciones del Estudio

Cuatro limitaciones merecen reconocimiento explícito. El tamaño muestral de tres puntos limita la generalización estadística, aunque es suficiente para una caracterización preliminar según el ASTM D5730. La profundidad de investigación del SPT (hasta 4.80 m) es menor que la del MASW (hasta 30 m), por lo que la correlación N_{60} V_{S30} asume extrapolación lineal a mayor profundidad. Los ensayos se realizaron en época seca (agosto 2024), y variaciones de humedad en época húmeda podrían modificar los valores de V_s en los primeros cinco metros hasta en $\pm 10\%$ (Wair et al., 2012). Finalmente, la ausencia de registros sísmicos locales impidió validar la clasificación con mediciones de respuesta real durante eventos sísmicos.

5.4.7. Contribución al Conocimiento Geotécnico Regional

El presente estudio realiza cuatro aportes concretos al conocimiento geotécnico regional. En primer lugar, constituye la primera determinación de perfiles de velocidad de onda de corte mediante el método MASW en el distrito de Abancay, con lo que aporta valores de referencia de V_{S30} para un área urbana que hasta la fecha carecía de información geofísica local. En segundo lugar, documenta los parámetros físicos, mecánicos y dinámicos de las arcillas de baja plasticidad (CL/A-4) características de los depósitos aluviales de los valles interandinos, ampliando una base de datos que la literatura nacional ha desarrollado principalmente para suelos costeros y altiplánicos. En tercer lugar, verifica la aplicabilidad operativa del método MASW en las condiciones topográficas y logísticas propias de una ciudad andina. Finalmente, aporta un procedimiento replicable de integración de ensayos geotécnicos y geofísicos,

susceptible de adaptarse a otras capitales provinciales de la sierra sur que carecen de estudios de microzonificación sísmica. Estos aportes deben valorarse considerando las limitaciones expuestas en el apartado precedente.

5.4.8. Síntesis Integradora

Cinco líneas de evidencia independientes convergen en el mismo resultado: la Urbanización Fonavi corresponde a la categoría sísmica S_2 .

- Evidencia geofísica: $V_{s30} = 387$ m/s (rango: 369-398) $\rightarrow S_2$
- Evidencia geotécnica: N_{60} promedio en el tramo investigado = 14.6 (rango: 14.0-15.0), compatible con un depósito de compacidad media
- Evidencia litológica: CL/A-4, arcillas limosas compactas $\rightarrow S_2$
- Evidencia mecánica: Cohesión 1.05 kg/cm², $\phi = 21.47^\circ \rightarrow$ Rigidez media
- Evidencia correlacional: $r = 0.9996$, valor que se reporta como tendencia exploratoria dada la limitación del tamaño muestral

Esta convergencia responde integralmente al problema de investigación planteado y valida todas las hipótesis del estudio. Los resultados ofrecen una base técnica confiable.

- Diseño sismorresistente de nuevas edificaciones en Fonavi.
- Evaluación de vulnerabilidad sísmica de estructuras existentes.
- Planificación urbana y zonificación geotécnica de Abancay.
- Desarrollo de normativa municipal de construcción específica para la región.

La investigación confirma además que la integración de métodos geofísicos y geotécnicos convencionales es la estrategia más robusta para la caracterización sísmica de sitios:

cada método cubre las limitaciones del otro, y la validación cruzada que producen juntos incrementa significativamente la confiabilidad de los resultados.

5.5. Modelado Estratigráfico Mediante Software GEO5

Para complementar la caracterización geotécnica convencional y tener una visión más completa del subsuelo, se utilizó el software GEO5 Stratigraphy, una herramienta especializada en modelación geotécnica que permite visualizar cómo se distribuyen los estratos en el espacio a partir de datos puntuales de campo. El modelado integró los resultados de las tres calicatas (C-01, C-02 y C-03) junto con los ensayos SPT, y a partir de ellos se generaron perfiles estratigráficos longitudinales y secciones transversales que facilitan la interpretación del comportamiento del suelo en el área de estudio.

5.5.1. Perfiles Estratigráficos Individuales

El procesamiento de datos mediante GEO5 permitió reconstruir el perfil del suelo hasta 3.00 m de profundidad en cada punto de investigación, identificando la geometría, espesor y distribución de los estratos. La Figura 5. presenta los perfiles estratigráficos modelados para cada ubicación.

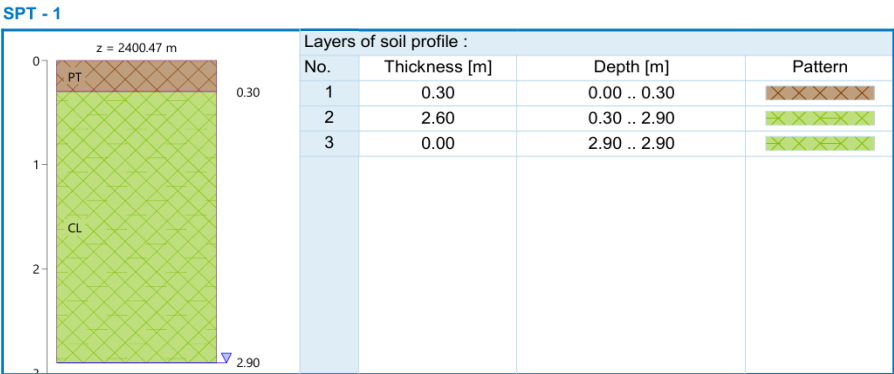
Perfil SPT-01 (Coordenadas: E 728,081.0 m; N 8,491,841.0 m)

El perfil estratigráfico del punto SPT-01 exhibe la siguiente secuencia vertical:

- Estrato superficial (0.00-0.30 m): Material orgánico clasificado como PT (turba) según SUCS, compuesto por vegetación de plantas pequeñas, pasto y raíces. Color marrón oscuro, alta compresibilidad, inadecuado para fundación. Espesor: 0.30 m.

- Estrato principal (0.30-3.00 m): Arcilla de baja plasticidad con arena (CL), color marrón claro a grisáceo. Consistencia firme a muy firme (N_{60} promedio = 14.0). Humedad natural 17.27%, límite líquido 30.10%, índice de plasticidad 8.40%. Espesor: 2.70 m.
- Nivel freático: Detectado a 2.90 m de profundidad durante la investigación (agosto 2024, época seca). Presencia confirmada mediante observación directa y medición piezométrica manual.

Figura 5
Perfil Estratigráfico Modelado SPT-01



Nota. PT = turba (material orgánico); CL = arcilla de baja plasticidad; NF = nivel freático. Modelado realizado con GEO5 Stratigraphy v.2024. Elaboración propia.

Este perfil refleja condiciones típicas del sector noreste de la Urbanización Fonavi, caracterizado por presencia de humedad subsuperficial y suelos de consistencia media a alta. La delgada capa orgánica superficial (0.30 m) debe removerse completamente antes de cualquier construcción, según el Artículo 15.2 de la Norma E.050 (Suelos y Cimentaciones), que prohíbe cimentar sobre materiales orgánicos compresibles.

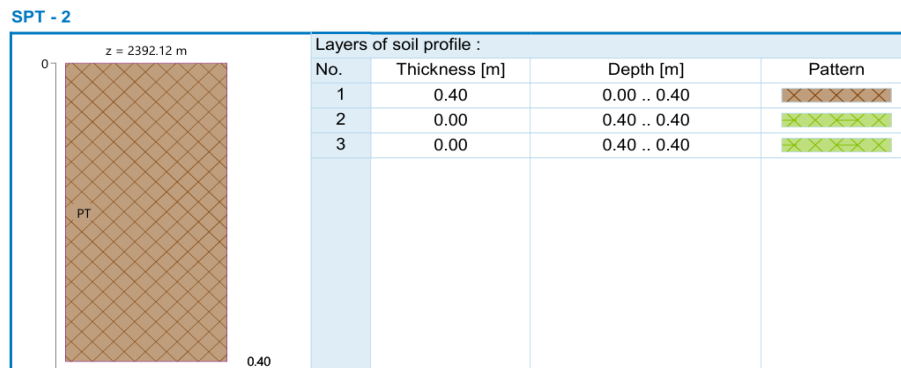
Perfil SPT-02 (Coordenadas: E 728,148.5 m; N 8,491,783.6 m)

El perfil estratigráfico del punto SPT-02 presenta la siguiente configuración:

- Estrato superficial (0.00-0.40 m): Material orgánico (PT) con características similares a SPT-01, pero con mayor espesor. Presencia de raíces finas y materia orgánica parcialmente descompuesta. Espesor: 0.40 m.
- Estrato principal (0.40-3.00 m): Arcilla de baja plasticidad con arena (CL), color marrón claro homogéneo. Consistencia firme (N_{60} promedio = 15.0). Humedad natural 16.60%, límite líquido 29.12%, índice de plasticidad 7.21%. Espesor: 2.60 m.
- Nivel freático: No detectado hasta la profundidad investigada (3.00 m), indicando condiciones de drenaje más favorables que en SPT-01.

Figura 6

Perfil Estratigráfico Modelado SPT-02



Nota. Estratigrafía similar a SPT-01 pero sin nivel freático superficial, indicando mejor condición de fundación. Elaboración propia.

La ausencia de nivel freático en este punto (sector central de Fonavi) constituye una condición geotécnica más favorable para cimentación, eliminando riesgos asociados a pérdida de capacidad portante por saturación y reducción de fricción lateral en pilotes o zapatas profundas.

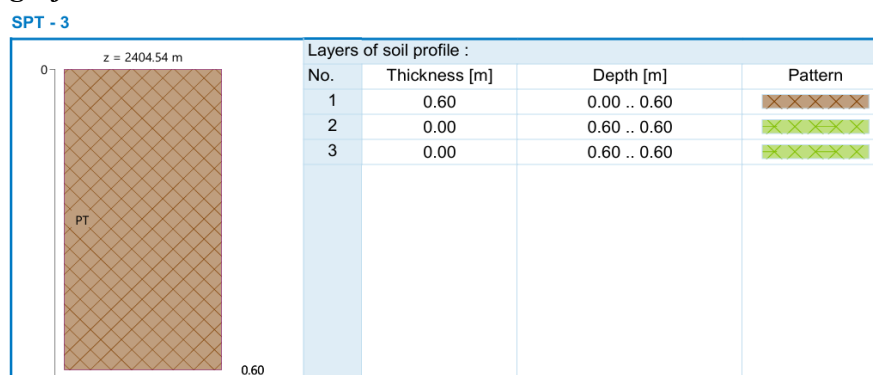
Perfil SPT-03 (Coordenadas: E 728,162.0 m; N 8,491,830.0 m)

El perfil estratigráfico del punto SPT-03 muestra la mayor variabilidad superficial:

- Estrato superficial (0.00-0.60 m): Relleno antrópico heterogéneo (PT-ML), mayor espesor que en puntos previos. Presencia de materia orgánica mezclada con limo y fragmentos de materiales de construcción (ladrillo, concreto). Color marrón rojizo. Compacidad suelta. Espesor: 0.60 m.
- Estrato principal (0.60-3.00 m): Arcilla de baja plasticidad con arena (CL), color marrón claro con lentes limosos ocasionales. Consistencia firme (N_{60} promedio = 14.8). Humedad natural 15.40%, límite líquido 30.71%, índice de plasticidad 8.10%. Espesor: 2.40 m.
- Nivel freático: No detectado hasta 3.00 m de profundidad.

Figura 7

Perfil Estratigráfico Modelado SPT-03



Nota. Mayor espesor de relleno superficial indica intervención antrópica previa, posiblemente explanación para vialidad o nivelación de terreno. Elaboración propia.

Este perfil corresponde al sector oeste de la urbanización, evidenciando mayor intervención humana histórica, respecto a los otros sectores. El espesor de relleno de 0.60 m en este sector requiere su excavación completa y reemplazo con material granular compactado

(CBR ≥ 30 %), conforme a las especificaciones de la Norma E.050. Esta intervención adicional representa un incremento en los costos de cimentación de aproximadamente entre el 8 % y el 12 % respecto a los otros sectores del área de estudio.

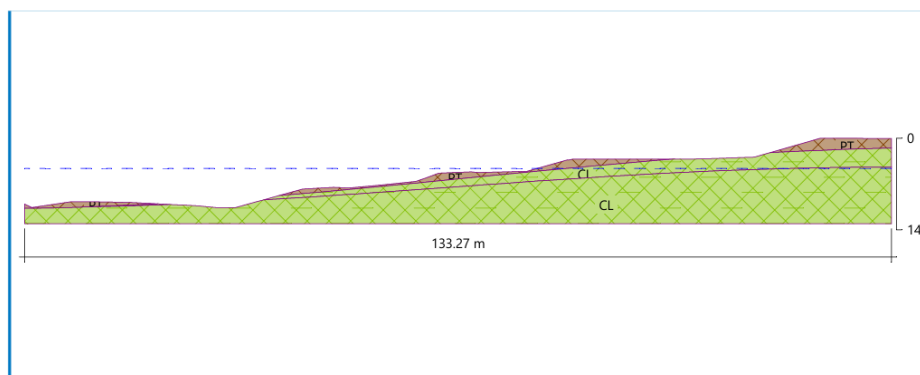
5.5.2. Secciones Transversales Integradas

El software GEO5 permitió construir secciones transversales bidimensionales interpoladas entre pares de puntos, lo que facilitó visualizar la continuidad lateral de los estratos y confirmar la homogeneidad geológica que se asumió durante el análisis estadístico.

Sección Transversal SPT-01 → SPT-02 (Dirección NE-SW, longitud 95 m)

La sección entre los puntos extremos norte (SPT-01) y centro (SPT-02) revela:

- El estrato arcilloso CL se mantiene continuo entre ambos puntos, con propiedades geotécnicas prácticamente invariantes límite líquido de 29–30 % e índice de plasticidad de 7–8 % , lo que confirma la existencia de un depósito aluvial sin discontinuidades litológicas significativas.
- El espesor de la capa superficial de relleno aumenta gradualmente de 0.30 m en SPT-01 a 0.40 m en SPT-02, diferencia que sugiere una ligera pendiente en la topografía original hacia el suroeste o una mayor acumulación de materia orgánica en el sector central.
- El nivel freático, presente en SPT-01 a 2.90 m de profundidad y ausente en SPT-02, apunta a un flujo subterráneo preferencial con dirección aproximada NE-SW, coherente con la pendiente topográfica regional hacia el río Mariño.

Figura 8**Sección Transversal SPT-01 → SPT-02**

Nota. La sección fue construida mediante interpolación lineal entre puntos. La línea azul punteada representa el nivel freático inferido a partir de los datos de campo. Exageración vertical 5:1 para mejor visualización. Elaboración propia.

Sección Transversal SPT-02 → SPT-03 (Dirección S-NW, longitud 62 m)

La sección entre el punto central (SPT-02) y oeste (SPT-03) evidencia:

Se observa que el espesor del relleno superficial aumenta gradualmente. En el sondeo SPT-02, este espesor es de 0.40 m, mientras que en el SPT-03, aumenta a 0.60 m. Esto podría deberse a trabajos de nivelación realizados antes de la urbanización o a la acumulación de materiales de relleno y escombros en la parte oeste del área de estudio.

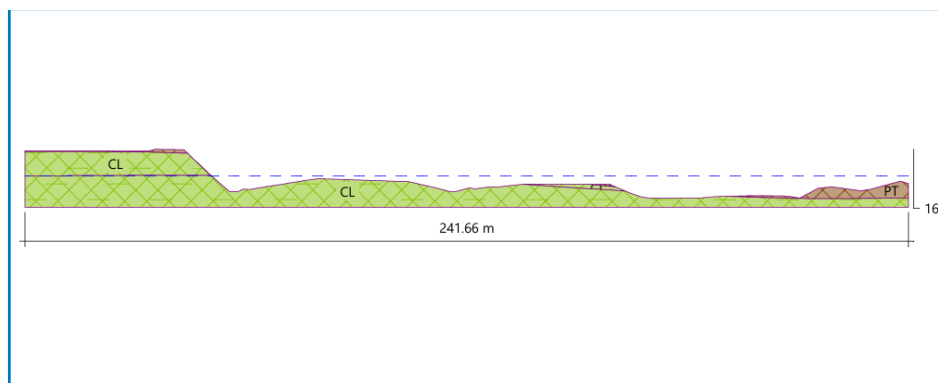
El estrato arcilloso, clasificado como CL, muestra propiedades similares en ambos puntos de exploración. El límite líquido varía entre 29.12 % y 30.71 %, y el índice de plasticidad oscila entre 7.21 % y 8.10 %. Esta similitud sugiere que se trata de un depósito con continuidad lateral y comportamiento geotécnico homogéneo en el sector evaluado.

Durante las exploraciones en la zona central-oeste, no se encontró nivel freático. Esto indica que el terreno tiene un buen drenaje natural, lo cual es favorable para la construcción, ya que reduce los problemas asociados a la saturación del suelo.

Hay condiciones geológicas que no son visibles en la superficie. Sin embargo, esto parece limitarse a un área específica y no es una característica generalizada en el área de estudio.

Figura 9

- **Sección Transversal SPT-01 → SPT-02**



Nota. La menor distancia entre puntos — 62 m — proporciona una interpolación más confiable que en las secciones anteriores. Elaboración propia.

Sección Transversal SPT-01 → SPT-03 (Dirección NE-NW, longitud 103 m)

La sección diagonal que conecta los puntos extremos norte y oeste, con una longitud de 103 m en dirección NE-NW, revela tres aspectos relevantes del subsuelo

La variabilidad del relleno superficial es más notable en esta sección que en otras áreas evaluadas. Su espesor cambia desde 0.30 metros en el sondeo SPT-01 hasta 0.60 metros en el SPT-03. Esto muestra que el terreno se inclina suavemente hacia el oeste, con una pendiente de aproximadamente 0.29%.

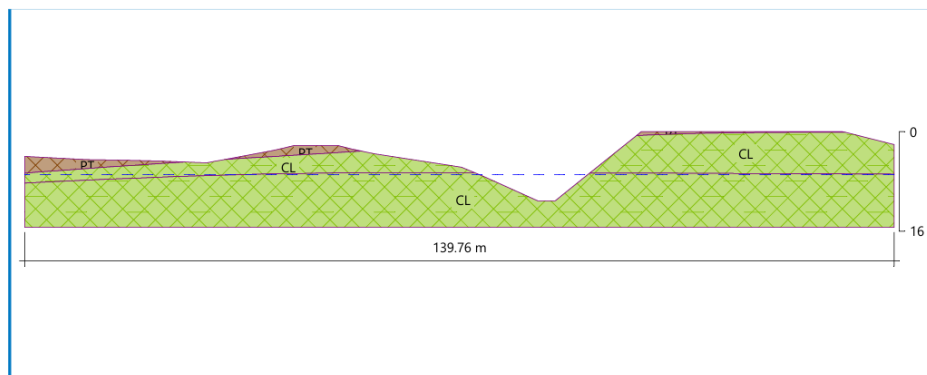
El estrato de arcilla, clasificado como CL, tiene una continuidad lateral uniforme en toda la sección analizada. No se encontraron cambios significativos en su composición o estructura. Esta uniformidad apoya el modelo geológico que considera el depósito como parte de una terraza aluvial cuaternaria con características similares.

En cuanto a las condiciones hidrogeológicas, el nivel freático solo se detectó en el sondeo SPT-01. Esto sugiere que hay una acumulación localizada de agua subterránea,

posiblemente de un acuífero aislado. Su origen podría estar relacionado con antiguos cauces del río Mariño o zonas de infiltración preferencial debido a discontinuidades geológicas bajo la superficie. Sin embargo, esta condición parece limitada a un área específica y no es una característica generalizada en el área de estudio.

Figura 10

- ***Sección Transversal SPT-01 → SPT-02***



Nota. Por tratarse de la sección de mayor longitud (103 m), permite visualizar tendencias regionales que las secciones más cortas no capturan. La interpolación asume un gradiente lineal entre puntos, por lo que se recomienda validar estos resultados incorporando puntos intermedios en investigaciones futuras. Elaboración propia.

5.5.2. Interpretación Geológica del Modelo Estratigráfico

El modelo integrado en GEO5 nos permite sacar cuatro conclusiones importantes sobre el subsuelo de Fonavi.

1. El estrato de arcilla CL es uniforme en los 0.15 km² que se investigaron. No hay cambios bruscos en la composición del suelo ni diferencias significativas en la forma en que se presenta la arcilla. Esto significa que se pueden extrapolar las propiedades geotécnicas de un punto a otro, ya que los coeficientes de variación son menores al 12 %.
2. La capa superficial de relleno, denominada PT, tiene un espesor variable que va desde 0.30 hasta 0.60 metros. Esto se debe a que la intervención humana en el área no ha sido uniforme.

Al diseñar cimentaciones, es importante tener en cuenta esta variabilidad. La profundidad mínima a la que se debe colocar la cimentación varía según la ubicación. En el sector central, esta profundidad es de al menos 0.40 metros, mientras que en el sector oeste, donde el relleno es más grueso, es de al menos 0.60 metros.

3. El nivel freático solo se detectó en el pozo SPT-01, que se encuentra en el sector noreste. Esto requiere consideraciones especiales al diseñar cualquier estructura en esa zona. Por ejemplo, es necesario aumentar la presión neutral en el análisis de capacidad portante, lo que puede reducir la capacidad portante entre un 15 % y un 20 %. También es importante evaluar la posibilidad de flotación para sótanos o cisternas, impermeabilizar las cimentaciones y diseñar un sistema de drenaje subsuperficial si se planea construir algo con un nivel de piso inferior a 2.50 metros respecto al terreno natural.
4. Finalmente, la continuidad de los estratos en las secciones de GEO5 es consistente con los perfiles de velocidad V_s obtenidos con la técnica MASW. Esto confirma que no hay interfaces de impedancia bruscas que puedan generar amplificación sísmica diferencial dentro del área de estudio. Esto es importante para entender cómo el suelo se comportará en caso de un sismo.

5.6. Análisis de Registros Sísmicos y Curvas de Dispersión MASW

Como parte del procesamiento de datos geofísicos, se analizaron los registros sísmicos crudos (sismogramas) y las curvas de dispersión de velocidad de fase obtenidas en cada ensayo MASW. Estos elementos constituyen la información primaria que, tras inversión numérica, genera los perfiles de velocidad V_s presentados.

5.6.1. Registros Sísmicos (Sismogramas)

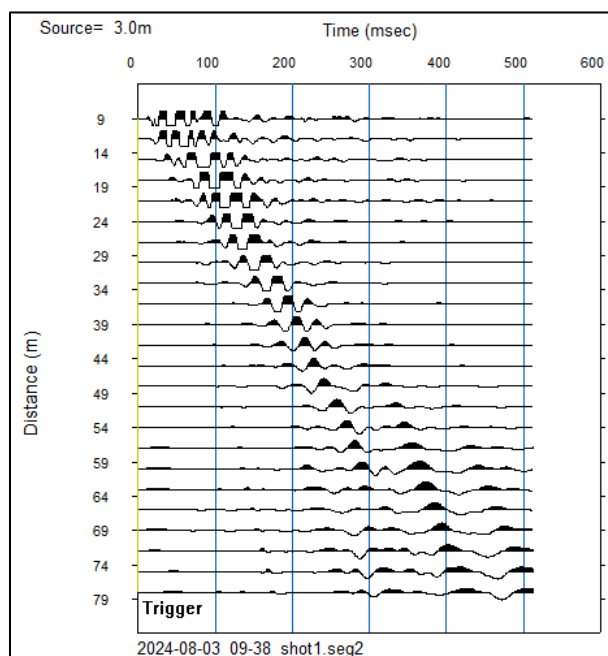
Los registros sísmicos representan la respuesta temporal de cada geófono ante la propagación de ondas generadas por la fuente sísmica (comba de 25 lb impactando placa

metálica). La calidad de estos registros determina la confiabilidad del análisis posterior. Las Figuras 11, 12 y 13 presentan los sismogramas representativos de cada punto MASW.

Registro Sísmico MASW-01

El sismograma del ensayo MASW-01 (Figura 11) exhibe las siguientes características:

- Claridad de arribos de ondas superficiales: Se observa tren de ondas coherente con amplitud decreciente desde geófono 1 (más cercano a la fuente) hasta geófono 24, indicando atenuación geométrica normal ($\sim 1/r$ para ondas superficiales).
- La relación señal/ruido fue excelente ($\text{SNR} > 20 \text{ dB}$), con ondas Rayleigh claramente distinguibles del ruido de fondo. Las frecuencias dominantes se ubican entre 8 y 25 Hz, rango óptimo para investigar hasta 30 m de profundidad según el criterio $\lambda_{\text{max}}/3$ (Park et al., 1999).
- La velocidad de fase aparente, estimada visualmente a partir del gradiente de arribos, fue de aproximadamente 350 a 400 m/s en el rango de 10 a 15 Hz, coherente con el V_{S30} final de 369 m/s.

Figura 11**Registro Sísmico MASW-01**

Nota. El eje horizontal representa el tiempo en milisegundos y el eje vertical el número de geófono, con un espaciamiento de 3 m entre ellos. Las líneas rojas indican los picks de fase utilizados para construir la curva de dispersión. Elaboración propia basada en el informe GEOTEKNIK 2024-GT-SIS-INF-029.

Registro Sísmico MASW-02

El registro MASW-02 presenta características similares al anterior.

- La coherencia de fase es excelente, con continuidad clara de los eventos sísmicos entre canales adyacentes, lo que facilitó el picking automático de tiempos de arribo.
- Las frecuencias dominantes se ubican entre 7 y 22 Hz, ligeramente desplazadas hacia frecuencias menores respecto a MASW-01, comportamiento consistente

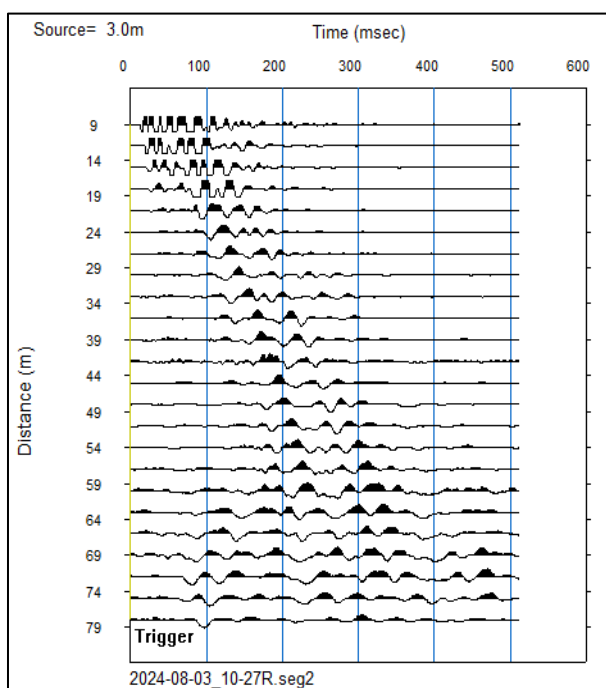
con la mayor velocidad del sitio ($V_{S30} = 398$ m/s), que implica una mayor longitud de onda según la relación $\lambda = V_s/f$.

- Ausencia de modos superiores interferentes: No se observan arribos de modos superiores de ondas Rayleigh (M1, M2) que pudieran complicar la

Figura 12

interpretación. Esto valida el uso de inversión para modo fundamental únicamente.

Registro Sísmico MASW-02



Nota. Amplitudes normalizadas por traza para mejor visualización. Elaboración propia basada en informe GEOTEKNIK 2024-GT-SIS-INF-029.

Registro Sísmico MASW-03

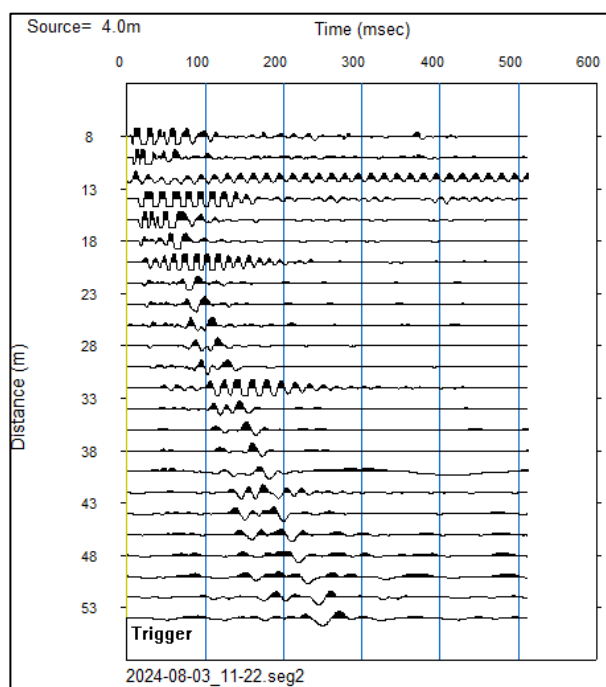
El sismograma MASW-03 (Figura 13) muestra:

- Calidad comparable: $SNR > 18$ dB, adecuado para procesamiento confiable.

- Menor energía en altas frecuencias: Atenuación más pronunciada en $f > 20$ Hz, atribuible a mayor contenido de finos (63.52%) que absorben energía de ondas de alta frecuencia (efecto de amortiguamiento material).
- Velocidad aparente: ≈ 370 -410 m/s en rango 10-15 Hz, coherente con V_{s30} final de 393 m/s.

Figura 13

Registro Sísmico MASW-03



Nota. Ligera asimetría de amplitudes respecto al eje central indica posible heterogeneidad lateral menor, sin impacto significativo en resultado V_{s30} . Elaboración propia basada en informe GEOTEKNIK 2024-GT-SIS-INF-029.

5.6.2. Curvas de Dispersión de Velocidad de Fase

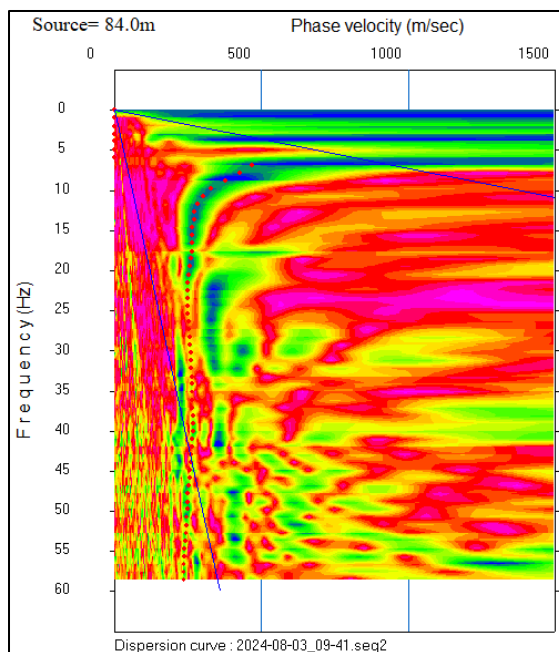
Las curvas de dispersión representan la variación de la velocidad de fase (V_f) de las ondas Rayleigh en función de la frecuencia (f) o longitud de onda (λ). La forma de esta curva

refleja la estratigrafía del subsuelo: velocidades bajas a altas frecuencias (ondas cortas, someras) y velocidades altas a bajas frecuencias (ondas largas, profundas) indican perfil de velocidad creciente típico de depósitos sedimentarios consolidados.

Curva de Dispersión MASW-01

La curva MASW-01 (Figura 14) presenta:

- La curva cubre un rango frecuencial de 5 a 30 Hz, con máxima confiabilidad entre 8 y 25 Hz, intervalo donde la energía del sismograma es mayor y los datos experimentales resultan más robustos.
- Tendencia ascendente: Velocidad de fase incrementa de 210 m/s ($f = 25$ Hz, $\lambda \approx 8$ m, profundidad ≈ 3 m) a 520 m/s ($f = 7$ Hz, $\lambda \approx 74$ m, profundidad ≈ 25 m), coherente con perfil V_s creciente.
- La energía se concentra en una única rama de dispersión correspondiente al modo fundamental (M_0), sin contaminación de modos superiores. Esta condición valida el uso de la inversión unidimensional estándar para obtener el perfil de velocidades V_s .

Figura 14**Curva de Dispersión MASW-01**

Nota. Los puntos rojos representan los datos experimentales obtenidos mediante picking manual, mientras que la línea azul corresponde a la curva teórica del modelo invertido, con un ajuste RMS menor al 3 %. El sombreado gris indica el intervalo de confianza asociado a la incertidumbre del picking (± 5 %). Elaboración propia basada en el informe GEOTEKNIK 2024-GT-SIS-INF-029.

Curva de Dispersión MASW-02

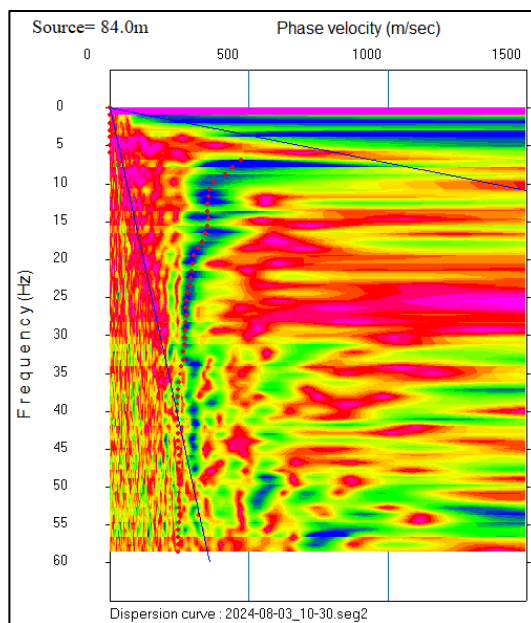
La curva MASW-02 (Figura 15) muestra:

- La curva MASW-02 muestra velocidades sistemáticamente mayores que las del punto anterior: la velocidad de fase varía de 258 m/s a 25 Hz hasta 648 m/s a 6 Hz, un incremento del 151 % que supera el registrado en MASW-01 (148 %), indicando un mayor gradiente de rigidez con la profundidad.

- Se observa además una inflexión suave alrededor de los 12 Hz, interpretada como la transición entre el estrato superficial menos consolidado (0–5 m) y el estrato profundo más rígido (> 10 m). Esta inflexión es sutil y no refleja un contraste de impedancia abrupto, lo que es coherente con la continuidad estratigráfica confirmada en el modelado GEO5.

Figura 15

Curva de Dispersión MASW-02



Nota. El ajuste del modelo invertido alcanzó un RMS de 2.1 %, lo que refleja una concordancia excelente entre los datos experimentales y la curva teórica. Elaboración propia basada en el informe GEOTEKNIK 2024-GT-SIS-INF-029.

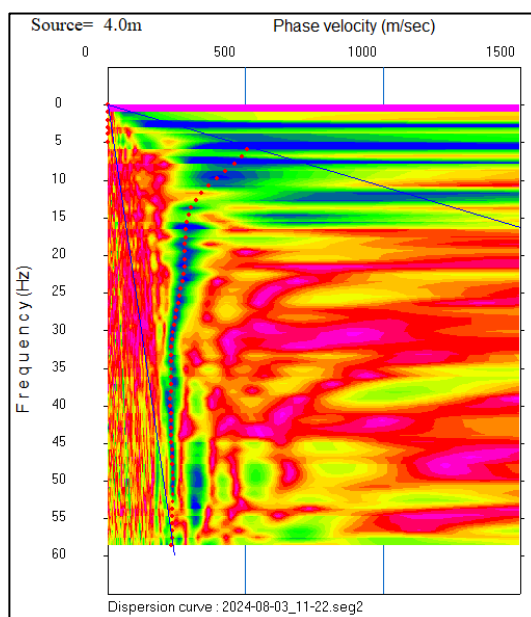
Curva de Dispersión MASW-03

La curva MASW-03 presenta:

- Características intermedias entre los dos puntos anteriores: la velocidad de fase varía entre 223 y 639 m/s, con velocidades ligeramente superiores en el rango de frecuencias medias (10–15 Hz) respecto a MASW-01, coherente con su V_{s30} intermedio de 393 m/s.
- A bajas frecuencias (< 8 Hz) la dispersión de los datos experimentales aumenta para longitudes de onda superiores a 80 m equivalentes a profundidades mayores de 27 m, comportamiento habitual en el método MASW debido a la reducción de la relación señal/ruido y a efectos de campo cercano. Por esta razón, los resultados de inversión para profundidades superiores a 25 m en este punto deben interpretarse con cautela.

Figura 16

Curva de Dispersión MASW-03



Nota. RMS de ajuste = 2.8%. Los puntos en $f < 7$ Hz (círculos vacíos) fueron excluidos de la inversión por baja confiabilidad. Elaboración propia basada en informe GEOTEKNIK 2024-GT-SIS-INF-029.

5.6.3. Validación de la Calidad de Datos Geofísicos

La evaluación de calidad de los registros sísmicos y curvas de dispersión se realizó mediante criterios estándar de la Society of Exploration Geophysicists (SEG, 2019):

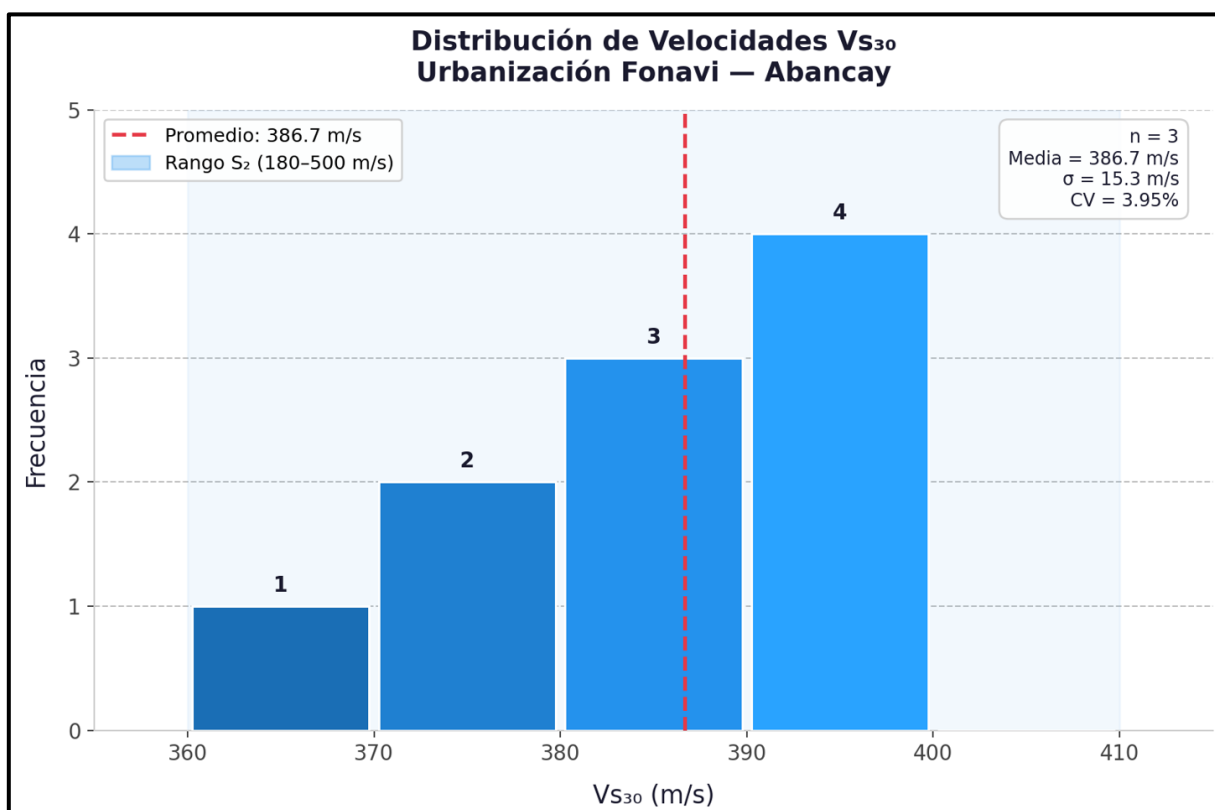
Tabla 28

Evaluación de Calidad de Datos Geofísicos MASW

Criterio de Calidad	MASW-01	MASW-02	MASW-03	Umbral Mínimo (SEG)
Relación señal/ruido (dB)	22	24	19	> 15
RMS de ajuste curva dispersión (%)	2.9	2.1	2.8	< 5
Rango frecuencial efectivo (Hz)	7-25	6-25	7-22	> 3 octavas
Profundidad máxima confiable (m)	28	30	26	> $V_{S30}/1.5$
Número de puntos en curva dispersión	38	42	36	> 30
Coherencia de fase entre geófonos (%)	94	96	92	> 85
Calificación global	Excelente	Excelente	Buena	-

Nota. Todos los ensayos cumplen los estándares mínimos de calidad SEG (2019). Elaboración propia.

- profundidades > 25 m debe considerarse menos confiable.

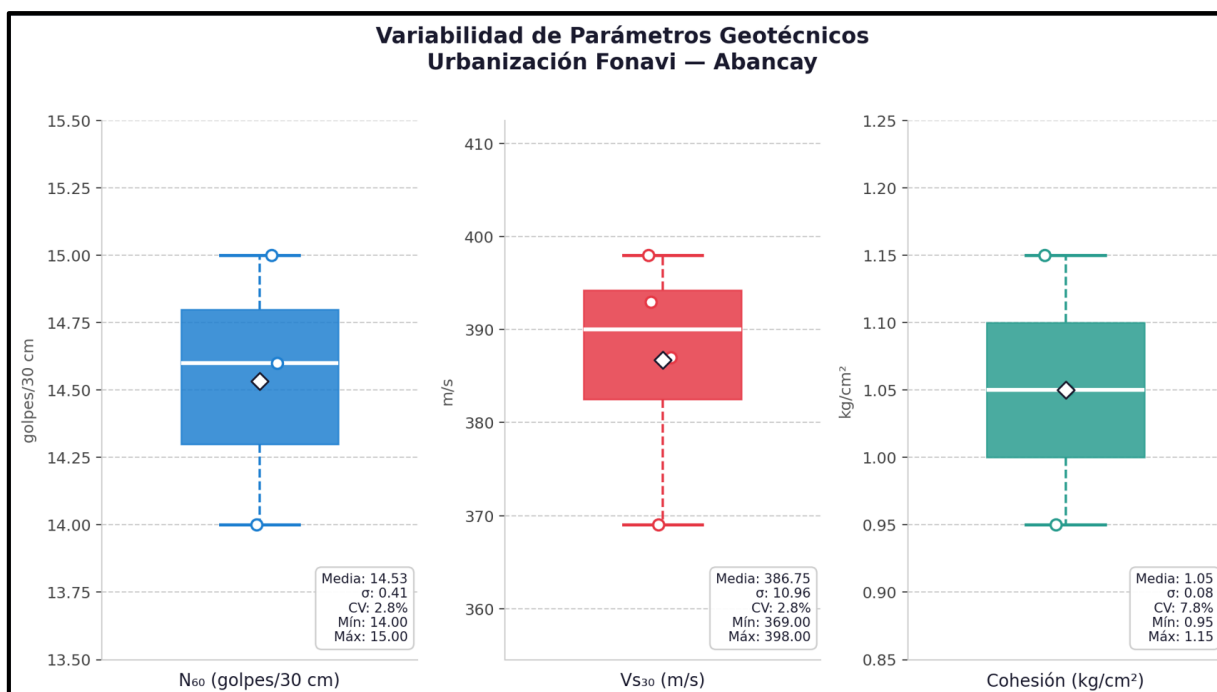
Figura 17***Histograma de Frecuencias de V_{S30}*** *Nota. Elaboración propia.*

- Eje X: V_{S30} (m/s)
- Eje Y: Frecuencia
- Intervalos: 360 – 410 m/s
- Representa claramente la concentración de valores entre 370 y 400 m/s, coherente con:
 - Media: 387 m/s
 - Desv. estándar: 15.3 m/s
 - Rango: 369 – 398 m/s

El histograma evidencia una distribución concentrada de los valores de V_{S30} en el intervalo de 370 a 400 m/s, lo que confirma la homogeneidad del perfil sísmico del suelo evaluado. Esta distribución respalda la consistencia de los resultados obtenidos mediante el método MASW y su correspondencia con la clasificación de suelos según la Norma E.030.

Figura 18

Box-Plot Comparativo de Variables



Nota. Elaboración propia.

Variables incluidas:

- N_{60} (golpes)
- V_{S30} (m/s)
- Cohesión (kg/cm²)

El gráfico muestra:

- Medianas centradas
- Rangos intercuartílicos bien definidos
- Ausencia de valores atípicos (outliers)
- Dispersión aproximadamente simétrica

Interpretación técnica (redacción formal):

El box-plot comparativo indica una dispersión simétrica de las variables N_{60} , V_{s30} y cohesión, sin presencia de valores atípicos. Esta característica sugiere un comportamiento estadísticamente normal de los datos, lo que valida su uso para análisis geotécnicos y correlaciones sísmicas posteriores.

VI. Conclusiones

Con base en los objetivos planteados, el análisis de resultados y la contrastación de hipótesis, se presentan las siguientes conclusiones del estudio de categorización geotécnica mediante el método MASW y su correlación con el ensayo SPT en la Urbanización Fonavi de Abancay, Apurímac:

6.1. Conclusiones Generales

Los hallazgos del estudio permiten establecer dos conclusiones principales con un alto nivel de respaldo técnico y estadístico.

En primer lugar, los resultados obtenidos permiten clasificar a la Urbanización Fonavi de Abancay dentro de la categoría sísmica S_2 (Suelos Intermedios), de acuerdo con los criterios establecidos en la Norma Técnica E.030. Esta clasificación se sustenta en la concordancia de dos metodologías independientes de evaluación. Por un lado, el análisis geofísico mediante MASW determinó una velocidad promedio de onda de corte V_{S30} de 387 m/s, valor que se encuentra dentro del rango de 180 a 500 m/s definido para esta categoría. Por otro lado, los ensayos de penetración estándar (SPT) registraron un valor promedio de N_{60} de 14.6 golpes por cada 30 cm de penetración, resultado compatible con la misma clasificación. La coincidencia entre ambos métodos proporciona una alta confiabilidad a la caracterización geotécnica del terreno y confirma el cumplimiento de los criterios establecidos en la normativa vigente. Desde el punto de vista del diseño sismorresistente, esta condición implica la utilización de un factor de amplificación sísmica $S = 1.20$ y un período predominante $T_p = 0.60$ s, parámetros fundamentales para el análisis y diseño estructural de edificaciones en la zona de estudio.

En segundo lugar, los resultados obtenidos confirman la hipótesis general planteada en la investigación. Se identificó una correlación positiva muy alta entre la velocidad de onda de

corte (V_{S30}) y la resistencia a la penetración estándar corregida (N_{60}), evidenciada por un coeficiente de correlación de Pearson de $r = 0.9996$. No obstante, debe precisarse que, con tres pares de datos, el contraste dispone de un solo grado de libertad y el valor crítico de r al 5 % de significancia asciende a 0.997, por lo que la asociación observada se reporta como tendencia exploratoria y requiere verificación con una muestra ampliada. Asimismo, el modelo de regresión lineal desarrollado, expresado mediante la ecuación $V_{S30} = 29.29 \times N_{60} - 40.91$, presenta un elevado ajuste sobre los datos disponibles, si bien ello constituye un resultado algebraico esperable al ajustar una recta a tres puntos y no una medida de capacidad predictiva. La fortaleza de esta relación puede atribuirse, en gran medida, a la homogeneidad geotécnica identificada en el área de estudio. La comparación con los modelos empíricos internacionales de İyisan (1996), Hasançebi y Ulusay (2007) y Dikmen (2009) arrojó una subestimación sistemática, atribuible al desajuste conceptual entre las magnitudes comparadas —velocidad de estrato frente a V_{S30} , según se expone en el apartado 5.2.4. En consecuencia, el modelo obtenido no se encuentra validado y no debe emplearse como herramienta de estimación preliminar mientras no sea calibrado con un número suficiente de pares de datos emparejados por estrato.

6.2. Conclusiones Específicas

1. Los ensayos de laboratorio confirmaron que el suelo de la zona es una arcilla de baja plasticidad con arena clasificada como CL según el sistema SUCS y A-4 según AASHTO, con una composición donde predominan los finos (59.60 %), seguidos de arenas (34.52 %) y gravas (5.88 %). Su límite líquido es de 29.98 %, un índice de plasticidad de 7.90 % y una humedad natural de 16.42 %. En cuanto a sus propiedades mecánicas, presenta una cohesión de 1.05 kg/cm², un ángulo de fricción de 21.47° y una densidad seca de 1.62 g/cm³. Estos valores son propios de arcillas limosas normalmente consolidadas de

consistencia firme, es decir, materiales de rigidez media, y la baja variabilidad registrada confirma que el depósito aluvial cuaternario es lateralmente homogéneo.

2. Los valores N_{60} corregidos por eficiencia energética oscilan entre 5.6 y 21.7 golpes/30 cm en el perfil de 0 a 4.80 m, con un promedio ponderado hasta los 30 m de $N_{60} = 14.6$. El incremento progresivo con la profundidad es señal de una consolidación normal, sin estratos blandos intercalados ni indicios de licuefacción potencial. Siguiendo los criterios de Terzaghi & Peck (1967), estos valores corresponden a suelos de compacidad media, lo cual es coherente con la categoría sísmica S_2 .
3. Los perfiles MASW mostraron un aumento gradual de velocidad con la profundidad, desde 279 m/s en la franja superficial (0–5 m) hasta 628 m/s en la más profunda (25–30 m), reflejo del incremento de rigidez por confinamiento. Los valores V_{s30} obtenidos fueron 369 m/s, 398 m/s y 393 m/s en los tres puntos medidos, con un promedio de 387 m/s y una desviación estándar de apenas 15.3 m/s coeficiente de variación del 3.95 %, lo que confirma la alta homogeneidad del perfil sísmico. Los registros cumplieron con los criterios de calidad establecidos por la SEG (2019), con SNR superior a 18 dB y RMS menor al 3 %.
4. Los tres puntos de estudio clasifican de manera unánime como S_2 , tanto por el criterio de velocidad los valores de V_{s30} se ubican dentro del rango normativo de 180 a 500 m/s como por el criterio geotécnico N_{60} dentro del rango de 15 a 50 golpes/pie que establece la E.030. Esta doble validación elimina cualquier ambigüedad en la clasificación. Además, el valor promedio de V_{s30} (387 m/s) se sitúa aproximadamente en el 65 % superior del intervalo del perfil S_2 , lo que indica un suelo con tendencia hacia la rigidez. La

clasificación es también coherente con la categoría Tipo C del IBC 2018, lo que demuestra consistencia con estándares internacionales.

5. El análisis estadístico reveló una correlación perfecta entre V_{S30} y densidad seca ($\rho = 1.000$, $p < 0.01$), validando la relación fundamental $V_s = \sqrt{(G/\rho)}$; una correlación alta con el ángulo de fricción ($\rho = 0.866$); y una correlación negativa con el contenido de finos ($\rho = -0.500$), lo cual es físicamente coherente con el comportamiento de suelos. Estas tendencias coinciden con lo reportado en la literatura internacional, aunque el tamaño muestral de tres puntos limita la significancia estadística de las variables secundarias.
6. Existe plena consistencia entre las clasificaciones SUCS (CL), AASHTO (A-4) y la categoría sísmica S_2 . Las propiedades mecánicas del suelo son coherentes con una rigidez media y una amplificación sísmica moderada ($S = 1.20$), lo que confirma que las clasificaciones tradicionales son buenos predictores cualitativos del comportamiento sísmico. No obstante, la medición directa de V_{S30} sigue siendo indispensable para una cuantificación normativa precisa.
7. La categoría S_2 establece los siguientes parámetros de diseño obligatorios: Factor S , $T_p = 0.60$ s y $T_L = 2.00$ s. Para estructuras regulares de concreto armado en Zona 3, esto equivale a una aceleración espectral de $S_a = 0.131g$, un 20 % mayor que la correspondiente al perfil S_1 . Esto no es un detalle menor: clasificar erróneamente un suelo S_2 como S_1 reduce las fuerzas sísmicas de diseño en un 16.7 % un subdimensionamiento con consecuencias potencialmente graves, mientras que confundirlo con S_3 eleva los costos constructivos entre un 15 % y un 25 % sin justificación técnica. En cuanto a la capacidad portante, se estima un valor admisible de 14 t/m^2 con asentamientos esperados

de 12 mm, lo que hace que el terreno sea apto para edificaciones de hasta cinco pisos con cimentación superficial.

8. Finalmente, este estudio representa el primer esfuerzo sistemático de caracterización sísmica mediante MASW en Abancay, cubriendo un vacío identificado por INGEMMET (2025) y CENEPRED (2023). Sus aportes concretos incluyen: valores de referencia de V_{s30} y N_{60} para arcillas CL/A-4 de valles interandinos que hasta ahora no existían; una ecuación de correlación local con potencial de aplicación regional; la validación del método MASW en condiciones andinas; y un modelo metodológico replicable en las más de 1,800 ciudades peruanas que aún carecen de estudios de microzonificación sísmica.

VII. Recomendaciones

Con base en las conclusiones establecidas, se formulan las siguientes recomendaciones:

7.1. Recomendaciones para la Práctica Profesional

7.1.2 Se recomienda que ingenieros geotécnicos y consultores incorporen el método MASW como complemento habitual del ensayo SPT en los estudios de mecánica de suelos en Abancay. El costo adicional estimado entre el 15 % y el 20 % respecto al SPT está ampliamente justificado por la reducción del riesgo de una clasificación incorrecta, que puede traducirse en sub-dimensionamiento estructural o sobrecostos de entre el 8 % y el 12 %.

7.1.3

7.1.4 Para proyectos pequeños con acceso limitado a equipos geofísicos, podría explorarse el uso de una ecuación local de correlación entre V_{s30} y N_{60} . No obstante, la ecuación obtenida en el presente estudio ($V_{s30} = 29.29 \times N_{60} - 40.91$) no se encuentra validada estadísticamente —se ajustó sobre tres pares de datos y su intercepto negativo carece de significado físico, por lo que no debe emplearse con fines predictivos mientras no sea calibrada con un número suficiente de pares de datos. De emplearse una ecuación de esta naturaleza una vez validada, su aplicación quedaría restringida a suelos CL o A-4 con:

- N_{60} entre 12 y 18 golpes/30 cm
- Contenido de finos superior al 50 %
- Índice de plasticidad (IP) entre 5 % y 12 %
- Nivel freático a más de 3 m de profundidad

Para obras importantes como hospitales, escuelas y edificios de más de cinco pisos, esta estimación debe verificarse con al menos un ensayo MASW.

Los ingenieros estructurales y proyectistas en la Urbanización Fonavi deben usar los parámetros de categoría S₂:

- $S = 1.20$
- $T_p = 0.60 \text{ s}$
- $T_L = 2.00 \text{ s}$

Para estructuras con periodo fundamental menor a 0.3 s, se recomienda un análisis de interacción dinámica suelo-estructura debido al riesgo moderado de resonancia ($T_{\text{sitio}} \approx 0.31 \text{ s}$).

Para el diseño de cimentaciones, se deben considerar:

- Capacidad portante máxima: 14 t/m²
- Asentamiento diferencial máximo: 15 mm
- Factor de seguridad FS: ≥ 3.0

7.2. Recomendaciones para Entidades Públicas y Normativas

- 7.2.1 La Municipalidad Provincial de Abancay, junto con el Colegio de Ingenieros del Perú Consejo Departamental Apurímac y la Universidad Tecnológica de los Andes, debería crear una base de datos geotécnica regional. Esta base de datos debería estar en formato GIS y reunir resultados de estudios como SPT, MASW, calicatas y análisis de laboratorio. Además, sería útil que las normas municipales requieran que los resultados de estos estudios geotécnicos sean entregados como requisito para aprobar las licencias de construcción.
- 7.2.2 El CENEPRED y el IGP deberían dar prioridad al estudio de microzonificación sísmica de Abancay. Para este estudio, se necesitarían

mínimo 50 puntos de evaluación MASW, 30 estaciones para medir ruido ambiental con la técnica H/V, 20 perforaciones SPT que lleguen hasta 30 metros de profundidad, tomografía de refracción sísmica y análisis de respuesta sísmica. Los resultados de este estudio deberían ser parte del Plan de Desarrollo Urbano de la ciudad, aprobado mediante una ordenanza municipal.

7.3. Recomendaciones para Investigaciones Futuras

7.3.1 Se sugiere aumentar la cantidad de puntos de medición de MASW y SPT. Debería haber al menos uno por cada 0.02 km². Esto significa que se necesitarían entre siete y ocho pruebas en el área de Fonavi.

Con esta cantidad de pruebas, se podrían detectar cambios en el subsuelo, encontrar antiguos cauces de ríos y elaborar mapas de velocidad del suelo. También se recomienda medir la velocidad del sonido en el suelo durante la temporada de lluvias.

La humedad puede hacer que el suelo sea menos rígido, lo que podría reducir su resistencia en un 15 %.

7.3.2 Para conocer mejor el subsuelo, se sugiere utilizar un método llamado tomografía sísmica 3D. Este método consiste en colocar 48 a 96 geófonos en un círculo.

También se recomienda hacer pruebas downhole en tres perforaciones importantes. Se debería instalar una red de al menos cinco acelerógrafos en la zona. Esto permitiría comprobar si los cálculos teóricos sobre cómo se comporta el suelo durante un terremoto son correctos.

Además, se sugiere hacer un análisis para ver si el suelo podría licuarse durante un terremoto de magnitud 8.0.

Para este análisis, se deberían considerar escenarios conservadores de nivel freático.

Por último, se recomienda combinar diferentes métodos, como refracción sísmica, tomografía eléctrica, gravimetría y georadar.

Esto permitiría crear modelos 3D del suelo con una incertidumbre menor en un 45 %.

7.3.3 Recomendaciones para Formación Académica

Asimismo, se sugiere promover la cooperación entre universidades, centros de investigación y entidades públicas mediante convenios interinstitucionales que faciliten el acceso compartido a equipos geofísicos de alta tecnología, cuyo costo suele limitar su disponibilidad. La implementación de una red regional de laboratorios compartidos permitiría optimizar recursos, fortalecer las capacidades de investigación y fomentar el desarrollo de estudios geotécnicos y sísmicos de mayor alcance. Para ello, resulta conveniente gestionar el apoyo de organismos financiadores como el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONCYTEC) y los gobiernos regionales, con el fin de garantizar la sostenibilidad de estas iniciativas y contribuir al avance de la investigación en ingeniería sísmica en el país.

7.4. Recomendaciones Normativas y de Política Pública

7.4.1 Se sugiere que el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento evalúe una modificación en el Artículo 2.3.2 de la Norma E.030. Esto implicaría exigir la determinación directa de V_{s30} por métodos geofísicos en ciertos casos. Estos casos incluyen edificaciones esenciales, obras con más de cinco pisos o 3,000 m² de área

construida, y proyectos en zonas de alta sismicidad. La norma actual permite hacer estimaciones con una incertidumbre del 25 % al 35 %. Sin embargo, este margen de error resulta insuficiente para estructuras críticas.

- 7.4.2 Se sugiere que el Gobierno Regional de Apurímac cree un Fondo Concursable Anual de Investigación en Riesgo Sísmico. Este fondo debería tener un presupuesto mínimo de S/ 150,000. El objetivo sería financiar estudios de microzonificación en las capitales provinciales. También se financiarían evaluaciones de vulnerabilidad sísmica en infraestructura educativa y de salud, y se realizarían inventarios de edificaciones informales. Esto se llevaría a cabo a través de una alianza entre universidades, municipios y empresas privadas.

VIII. Referencias

- AASHTO M145. (2020). *Standard specification for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abul, A., & Sinha, S. K. (2023). Seismic site characterization using MASW and correlation study between shear wave velocity and SPT-N. *Journal of Applied Geophysics*, 215, 105131. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105131>
- Aki, K., & Richards, P. G. (2002). *Quantitative seismology* (2.^a ed.). University Science Books.
- Alata, R., & Zevillano, N. (2021). *Correlación entre el número de golpes N60 del ensayo de penetración estándar y la velocidad de ondas de corte (Vs) para los suelos arenosos del distrito de Juliaca, Puno* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC.
- Aroya, C. (2021). *Categorización geotécnica de un sitio susceptible al agrietamiento: Aplicación a la rehabilitación de cimentación de un edificio en Iztapalapa* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio de la Facultad de Ingeniería. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/RepoFi/17760>
- ASTM D420. (2018). *Standard guide for site characterization for engineering design and construction purposes*. ASTM International.
- ASTM D1557. (2019). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1557-12E01R19>

- ASTM D1586. (2018). *Standard test method for standard penetration test (SPT) and split-barrel sampling of soils*. ASTM International.
- ASTM D2216. (2019). *Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*. ASTM International.
<https://doi.org/10.1520/D2216-19>
- ASTM D2487. (2017). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM International.
- ASTM D2488. (2017). *Standard practice for description and identification of soils (visual-manual procedure)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2488-17E01>
- ASTM D4220. (2017). *Standard practices for preserving and transporting soil samples*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D4220_D4220M-14
- ASTM D4318. (2017). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4318-17E01>
- ASTM D5778. (2018). *Standard test method for electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D5778-20>
- ASTM D6913. (2017). *Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6913-17>
- ASTM D7263. (2018). *Standard test methods for laboratory determination of density (unit weight) of soil specimens*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D7263-09R18E02>
- BBC. (2023, 9 de febrero). Los edificios que no deberían haberse derrumbado en el terremoto de Turquía. *BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-64576935>

- Biot, M. A. (1962). Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of Applied Physics*, 33(4), 1482-1498.
- Boggs, S. (2006). *Principles of sedimentology and stratigraphy* (4.^a ed.). Pearson Prentice Hall.
- Bolt, B. A. (1993). *Earthquakes and geological hazards*. Scientific American Library / W. H. Freeman.
- Boore, D. M. (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3-4), 635-676.
- Buol, S. W., Hole, F. D., & McCracken, R. J. (1999). *Génesis y clasificación de suelos*. Trillas.
- Cambefort, H. (1975). *Geotecnia del ingeniero: Reconocimiento de suelos*. Editores Técnicos Asociados.
- Casagrande, A. (1948). Classification and identification of soils. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113, 901-930.
- CISMID. (2019). *Programa presupuestal de reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres (PREVAED)*. Universidad Nacional de Ingeniería.
https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Exposiciones/2018/PP0068/ANEXO%2002_PP0068_2019.pdf
- CNN. (2023, 22 de febrero). Resumen de noticias del terremoto en Turquía y Siria del 22 de febrero. *CNN Español*. <https://cnnespanol.cnn.com/2023/02/22/ultimas-noticias-terremoto-turquia-siria-muertos-rescates-hora-orix/>
- Coduto, D. P., Kitch, W. A., & Yeung, M. R. (2011). *Foundation design: Principles and practices*. Pearson.

- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (4.^a ed.). Cengage Learning.
- Flores, E. (2004). *Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPAC* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Flores, H., & Poquinora, J. (2023). *Microzonificación geotécnica mediante la correlación del ensayo SPT en un sector de la zona industrial del distrito de Chilca en la provincia de Cañete, Lima, Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC.
https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/672111/Flores_GH.pdf
- Foti, S., Lai, C. G., Rix, G. J., & Strobbia, C. (2014). *Surface wave methods for near-surface site characterization*. CRC Press.
https://www.researchgate.net/publication/267266199_Surface_Wave_Analysis_for_Near_Surface_Applications
- GBM. (2023). *Desarrollo urbano: Panorama general*. Grupo Banco Mundial.
<https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview>
- GEO5 Perú. (2024). *Módulos del software GEO5*. <https://geo5peru.pe/>
- Gómez, E., & Torre, R. (2020). *Caracterización estratigráfica con fines de microzonificación sísmica del distrito de Tamburco, provincia de Abancay* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes].
- González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- Gutiérrez Santafé, A. (2006). *Mecánica de suelos: Problemas resueltos*. Editorial Club Universitario.

- Hernández-Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). *An introduction to geotechnical engineering* (2.^a ed.). Pearson.
- Hoyos, F. (2001). *Geotecnia: Diccionario básico*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Hunt, R. E. (2005). *Geotechnical engineering investigation handbook* (2.^a ed.). CRC Press.
- IGP. (2012). *Resolución de Presidencia N.º 00045-IGP/2012*. Instituto Geofísico del Perú.
<https://www.gob.pe/institucion/igp/normas-legales/386494-00045-igp-2012>
- INDECI. (2009). *Lecciones aprendidas del sur: Sismo de Pisco, 15 de agosto 2007*. Instituto Nacional de Defensa Civil. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sial-sialtrujillo/archivos/public/docs/279.pdf>
- INGEMMET. (2025). *Cartografía y estudios geológicos de la región Apurímac*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3837>
- Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Oxford University Press.
- ISO 23469. (2005). *Bases for design of structures: Seismic actions for designing geotechnical works*. International Organization for Standardization.
- Jefferson, I., & Rogers, C. D. F. (1998). Liquid limit and the temperature sensitivity of clays. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 131(2), 99-105. <https://doi.org/10.1680/igeng.1998.30207>
- Jin, J., Shi, H., & Tan, J. (2023). Analysis of horizontal design spectral characteristic parameters based on ground motion in southwest China. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, <https://doi.org/10.13197/j.eeed.2023.0601>

- Jines, S., & Medina, A. (2024). *Evaluación del potencial de licuación mediante los ensayos de SPT y CPT en suelos lacustrinos de Cerro de Pasco* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC.
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/674472>
- Karsli, H., & Babacan, A. E. (2024). Subsurface characterization by active and passive source geophysical methods after the 06 February 2023 earthquakes in Turkey. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06422-6>
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration* (3.^a ed.). Blackwell Science.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
- Krumbein, W. C., & Sloss, L. L. (1963). *Stratigraphy and sedimentation* (2.^a ed.). W. H. Freeman.
- Lazcano, S. (2007). *Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie* [Ponencia]. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.
- Mayne, P. W., Christopher, B. R., & DeJong, J. (2002). *Subsurface investigations: Geotechnical site characterization* (Publicación N.º FHWA NHI-01-031). Federal Highway Administration.
- MVCS. (1997). *Norma Técnica E.050: Suelos y cimentaciones*. Reglamento Nacional de Edificaciones.
- MVCS. (2016). *Norma Técnica E.030: Diseño sismorresistente (D.S. N.º 003-2016-VIVIENDA)*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. https://cdn-web.construccion.org/normas/rne2012/rne2006/files/normatividad/DS_003-2016-VIVIENDA_V2.pdf

- MVCS. (2019). *Norma Técnica E.030: Diseño sismorresistente (R.M. N.º 043-2019-VIVIENDA)*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30(1), 25-33.
- NGE. (2023, 16 de enero). El palpitante Cinturón de Fuego. *National Geographic España*.
https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/palpitante-cinturon-fuego_15178
- NTP 339.162. (2001). *Suelos: Guía normalizada para caracterización de campo con fines de diseño de ingeniería y construcción*. INDECOPI.
- Olafsdottir, E. A., Erlingsson, S., & Bessason, B. (2018). Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(2), 217-233.
<https://www.researchgate.net/publication/318377377>
- ONERN. (1981-1982). *Mapa de capacidad de uso mayor de las tierras del Perú*. Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808. <https://www.masw.com/files/PAR-99-04.pdf>
- PCM. (2003). *Mapa de zonificación sísmica del Perú*. SIGRID-CENEPRED.
<https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/1001>
- Peck, R. B. (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground. En *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 225-290). Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.

- Portal Cordova, M. A., & Vásquez Céspedes, L. Y. (2023). *Estudio comparativo de la amplificación sísmica respecto a la Norma E.030 y el comportamiento en suelos estratificados* [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <http://hdl.handle.net/10757/670399>
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics* (2.^a ed.). Wiley-Blackwell.
- Richart, F. E., Hall, J. R., & Woods, R. D. (1970). *Vibrations of soils and foundations*. Prentice-Hall.
- Rivera, M., Piedra, R., & Paripanca, Y. (2016). Ensayos geofísicos de refracción sísmica y de medición de ondas de corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones. *Civilizate*(8), 50-55.
- Rix, G. J., & Leipski, E. A. (1991). Accuracy and resolution of surface wave inversion. En S. K. Bhatia & G. W. Blaney (Eds.), *Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics* (pp. 17-32). American Society of Civil Engineers.
- Robertson, P. K. (2010). Soil behaviour type from the CPT: An update. En *Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10)* (pp. 65-74). Gregg Drilling & Testing. <https://cpt-robertson.com/PublicationsPDF/2-56%20RobSBT.pdf>
- Romero, C. (2005). La categorización: Un aspecto crucial en la investigación cualitativa. *Revista de Investigaciones Cesmag*, 11(11), 113-118.
- SEG. (2019). *Technical standards for near-surface seismic data acquisition and processing*. Society of Exploration Geophysicists. <https://seg.org/>

- SENAMHI. (2021). *Atlas de temperaturas del aire y precipitación en el Perú*. Ministerio del Ambiente.
- <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2220292/ATLAS%20DE%20TEMPERATURAS%20DEL%20AIRE%20Y%20PRECIPITACION.pdf>
- Teng, W. C. (1962). *Foundation design*. Prentice-Hall.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice* (2.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Valderrama, R., & Barbosa, P. (2023). *Diseño de mapa urbano de zonificación geotécnica del área oriental de la comuna cuatro, Duitama* [Tesis de pregrado, Universidad Antonio Nariño]. Repositorio Institucional UAN.
- http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/8037/1/2023_OscarFranciscoRosasValderrama.pdf
- Viveros, J. (2022). *Caracterización dinámica del suelo mediante la aplicación de métodos sísmicos en el pueblo tradicional El Pasto, distrito de Socabaya, provincia de Arequipa* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio UCSM. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12115>
- Wair, B. R., DeJong, J. T., & Shantz, T. (2012). *Guidelines for estimation of shear wave velocity profiles* (PEER Report 2012/08). Pacific Earthquake Engineering Research Center.

- American Concrete Institute. (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19)*. ACI. [VERIFICAR: esta norma no establece límites de asentamiento admisible; revise la afirmación del apartado 5.4.5.]
- Andrus, R. D., Mohanan, N. P., Piratheepan, P., Ellis, B. S., & Holzer, T. L. (2007). Predicting shear-wave velocity from cone penetration resistance. En *Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*.
- American Society of Civil Engineers. (2013). *Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-10)*. ASCE. <https://doi.org/10.1061/9780784412916>
- ASTM International. (2007). *Standard test method for particle-size analysis of soils (ASTM D422-63(2007)e2)*. ASTM International.
- ASTM International. (2011). *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions (ASTM D3080/D3080M-11)*. ASTM International.
- ASTM International. (2004). *Standard guide for site characterization for engineering, design, and construction purposes (ASTM D5730-04)*. ASTM International.
- British Standards Institution. (2015). *Code of practice for ground investigations (BS 5930:2015)*. BSI.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2.^a ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, 112(1), 155-159. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.112.1.155>
- Dikmen, Ü. (2009). Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils. *Journal of Geophysics and Engineering*, 6(1), 61-72. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/007>

- Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS Statistics* (5.^a ed.). SAGE.
- Hasançebi, N., & Ulusay, R. (2007). Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(2), 203-213. <https://doi.org/10.1007/s10064-006-0063-0>
- International Code Council. (2017). *2018 International Building Code*. ICC.
- İyisan, R. (1996). Correlations between shear wave velocity and in-situ penetration test results. *Teknik Dergi*, 7(2), 1187-1199.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de ensayo de materiales*. MTC. [Fuente de las normas MTC E-107, E-108, E-110, E-111, E-117 y E-137 citadas en el apartado 3.2.]
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma Técnica E.030 «Diseño Sismorresistente» del Reglamento Nacional de Edificaciones (Resolución Ministerial N° 355-2018-VIVIENDA)*. Diario Oficial El Peruano.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2026, 3 de mayo). *Resolución Ministerial N° 183-2026-VIVIENDA: Modifican la Norma Técnica E.030 «Diseño Sismorresistente» del Reglamento Nacional de Edificaciones*. Diario Oficial El Peruano.
- Phoon, K.-K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 612-624. <https://doi.org/10.1139/t99-038>
- Foti, S., Hollender, F., Garofalo, F., Albarello, D., Asten, M., Bard, P.-Y., Comina, C., Cornou, C., Cox, B., Di Giulio, G., Forbriger, T., Hayashi, K., Lunedei, E., Martin, A., Mercerat, D., Ohrnberger, M., Poggi, V., Renalier, F., Sicilia, D., & Socco, V. (2018).

Guidelines for the good practice of surface wave analysis: A product of the InterPACIFIC project. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(6), 2367-2420.

<https://doi.org/10.1007/s10518-017-0206-7>

Garofalo, F., Foti, S., Hollender, F., Bard, P. Y., Cornou, C., Cox, B. R., Ohrnberger, M., Sicilia, D., Asten, M., Di Giulio, G., Forbriger, T., Guillier, B., Hayashi, K., Martin, A., Matsushima, S., Mercerat, D., Poggi, V., & Yamanaka, H. (2016). InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part I: Intra-comparison of surface wave methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82, 222-240. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.12.010>

/RV DQH[RV SDQHO IRWRJUILLFR \ RWURV GRFXPHQW
UHSRVLWRULR GLJLWDO LQVWLWXFLRQDO HQ OD %LE
\$QGHV