



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



ANÁLISIS GEOFÍSICO DE SUELOS EN EL CASERIO MILLHUIISH Y SU APORTE EN LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES (Provincia de Huari – Región Ancash)

Informe Técnico N°009-2022/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Febrero, 2022

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Análisis Geofísico de suelos en el Caserío Millhuish y su aporte en la reducción del riesgo de desastres.

(CP de Rancas, Distrito de San Marcos, Provincia de Huari, Región Áncash)

Autores

Isabel Bernal, Wilfredo Sullá y Hernando Tavera

Participantes:

Evaluación Geofísica: Wilfredo Sullá / Jorge Salas / Isabel Bernal / Fabiola Rosado / Kelly Pari.

Cartografía: Javier Oyola

Geodinámica: Gustavo Namay / Juan Carlos Gómez.

Apoyo técnico: SGA Geofísica.

Apoyo logístico: Robert Yupanqui.

Apoyo administrativo: Marisol Enríquez / Susana Huaccachi.

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
Teléfono: 51-1-3172300

**ANÁLISIS GEOFÍSICO DE SUELOS EN EL CASERIO MILLHUIH Y SU
APORTE EN LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES**

**CP DE RANCAS, DISTRITO DE SAN MARCOS, PROVINCIA DE HUARI
(REGIÓN ÁNCASH)**

Lima - Perú
Enero, 2022

RESUMEN

Se analiza y evalúa el comportamiento dinámico de los suelos en el Caserío Millhuish del Centro Poblado Rancas, distrito de San Marcos, a partir de la aplicación de técnicas geofísicas. Los resultados obtenidos evidencian el predominio de suelos poco a medianamente consolidados o roca muy fracturada, formando capas de 45 metros de espesor que se encuentran presentes próximo al río Mosna y áreas de cultivo; y de hasta 30 metros debajo del área urbana. Los suelos con menor consistencia se encuentran en dirección noroeste y puestos en evidencia con la presencia de escarpes. Asimismo, el suelo presenta humedad a diferentes niveles de profundidad, pero la mayor concentración se encuentra en las proximidades al río Mosna. Debido a su baja compactación y presencia de humedad, estos suelos pueden dar origen a deslizamientos de grandes masas de tierra con la ocurrencia de lluvias extremas y/o sismos de moderada a mayor magnitud.

CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

1.1. Estudios previos

2.- CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS

2.1. Geología local

2.2. Geomorfología

2.3. Geodinámica

3.- COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SUELO

3.1.- Método de razones espectrales (H/V)

3.1.1.- Adquisición de datos

3.1.2.- Procesamiento y análisis

3.1.3.- Resultados e interpretación

3.2.- Método de Refracción Sísmica

3.2.1.- Adquisición de datos

3.2.2.- Procesamiento y análisis

3.2.3.- Resultados e interpretación

3.3.- Métodos sísmicos MASW y MAM

3.3.1.- Adquisición de datos

3.3.2.- Procesamiento y análisis

3.3.3.- Resultados e interpretación

3.4.- Método de Tomografía Eléctrica

3.4.1.- Adquisición de datos

3.4.2.- Procesamiento y análisis

3.4.3.- Resultados e interpretación

4.- CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUBSUELO Y SU COMPORTAMIENTO DINÁMICO

- 4.1. Estructura del subsuelo
- 4.2. Mapa de Iso-espesores
- 4.3. Zona de peligro por deslizamiento

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO I. Secciones de Refracción Sísmica

ANEXO II. Perfiles MASW y MAM.

ANEXO III. Secciones de Tomografía Eléctrica

1.- INTRODUCCIÓN

En el marco del convenio específico de colaboración interinstitucional entre el Instituto Geofísico del Perú IGP y la municipalidad de San Marcos, se realiza el estudio “Análisis geofísico de los Suelos en el Caserío Millhuish y su aplicación para la Gestión de Riesgo de Desastre”. Este estudio permitirá conocer las características físicas y dinámicas del suelo, específicamente en las zonas afectadas por movimientos de masa.

Durante los últimos años, en el Caserío Millhuish (Centro Poblado Rancas, distrito de San Marcos, provincia de Huari, Región de Ancash), los suelos vienen desplazándose en dirección al río Mosna, formando grietas y escarpes en la superficie. Estos suelos con poca estabilidad, vienen generando daños estructurales en las viviendas del lugar, siendo en algunos casos irreparables. En este contexto, el área de estudio se encuentra vulnerable ante un eventual deslizamiento, de ahí que es necesario conocer y entender su origen.

Uno de los pasos fundamentales para identificar el origen de los desplazamientos del suelo es conocer sus características físicas y dinámicas, y para ello, en este estudio se empleará 4 métodos geofísicos: Refracción Sísmica (RS), Tomografía Eléctrica (ERT), MASW-MAM y Vibración Ambiental (HV). La aplicación de estos métodos geofísicos en el área del Caserío Millhuish permitirá evaluar parámetros como la saturación de los suelos, su variación de rigidez, el espesor de los diferentes estratos que los conforman y su comportamiento dinámico a la ocurrencia de lluvias extremas y/o sismos de moderada a mayor magnitud.

El Caserío Millhuish (Figura 1), se ubicada en las coordenadas UTM: 261814 E y 8942052 N y cota promedio de 3200 m.s.n.m. Sus habitantes ocupan viviendas construidos con material rustico (adobe o tapial). El área

está limitada al Norte y Sur por quebradas activas, por el Este con el Caserío Vista Alegre y por el Oeste con el río Mosna.

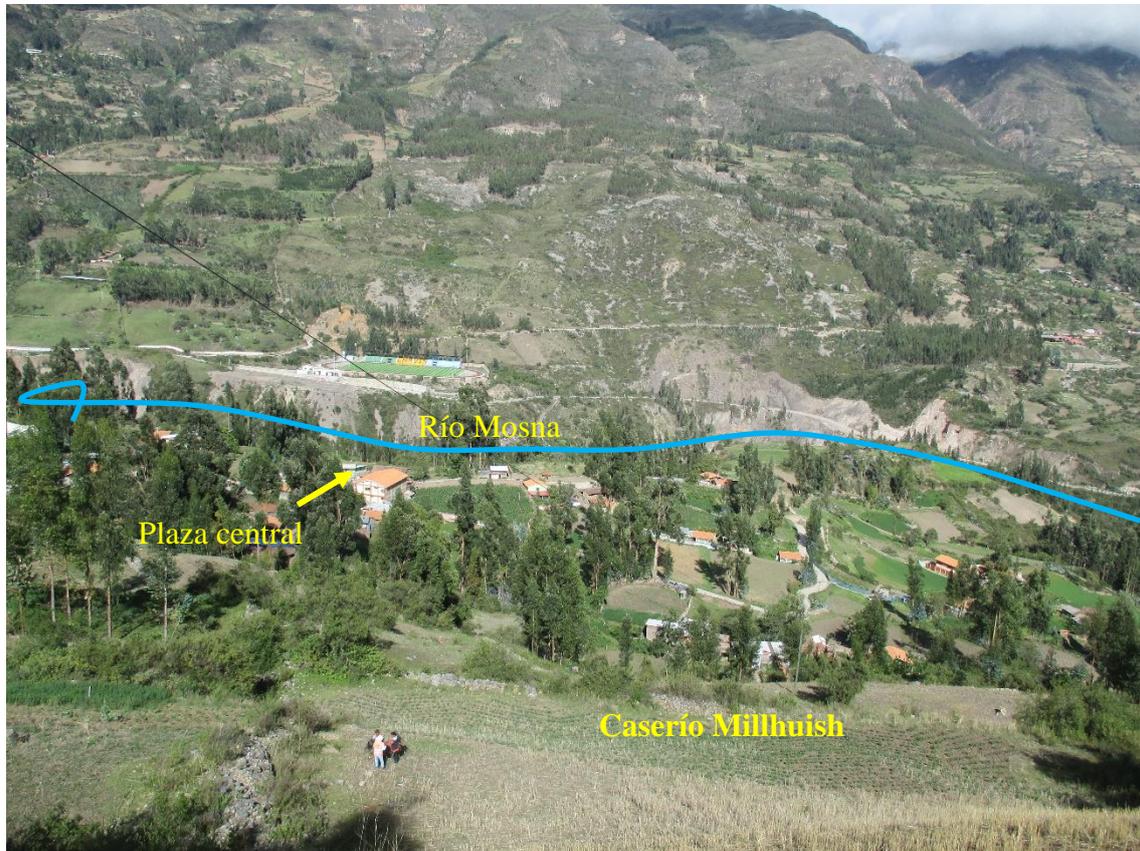


Figura 1. Vista del Caserío Millhuish, desde la parte alta en dirección al río Mosna.

En la Figura 2, se presenta el mapa con la delimitación del área de estudio a escala 1:5000 y los resultados obtenidos del trabajo realizado en campo “in situ”: identificación de áreas críticas definidas por suelos con presencia de grietas y escarpes en la superficie, suelos con materiales diversos, asentamientos de suelos y viviendas con daños estructurales (Figura 3).

Según las Figuras 2 y 3, las áreas críticas por el tipo de suelo con/sin presencia de humedad, vienen afectando la infraestructura física de las viviendas.

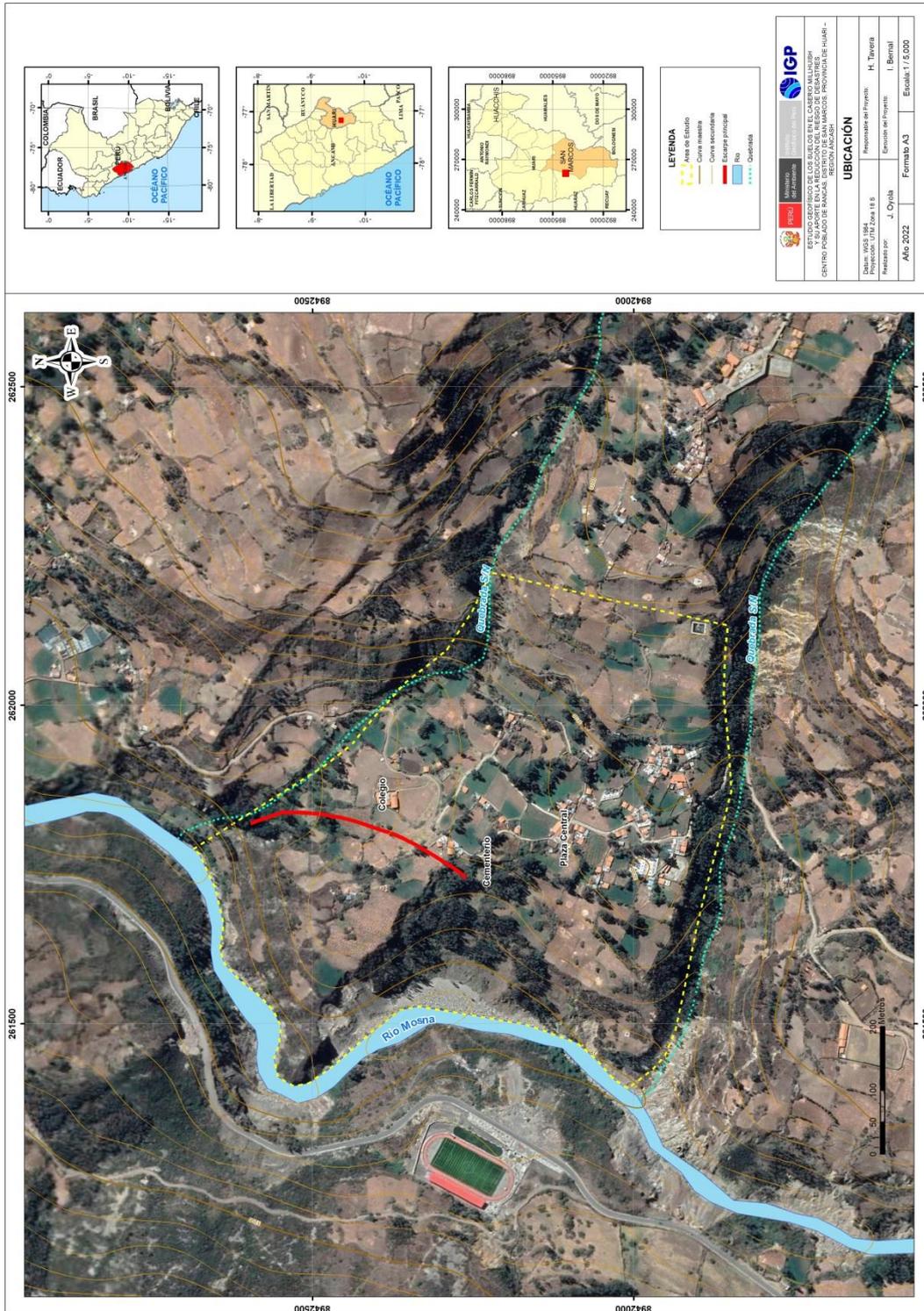


Figura 2. Mapa de ubicación del Caserío Millhuish, Centro Poblado Rancas, distrito de San Marcos (línea amarilla). Asimismo, se observa el escarpe principal (línea roja) y los diferentes escarpes secundarios (líneas amarillas) identificados en campo.



Figura 3. Asentamiento del suelo y presencia de agrietamientos en estructuras de albañilería.

1.1. Estudios previos

En el 2020, el personal de la Unidad de Gestión de Riesgo de Desastre de la Municipalidad de San Marcos elabora el informe N°248 - 2020-MDSM/GM/UGRD/JPTM con respecto a la visita técnica realizada al Caserío Millhuish. En este informe, concluyeron que se evidencia la presencia de grietas y fisuras en el suelo del Caserío Millhuish que están afectando a las viviendas existentes, y que en su mayoría fueron construidas con material rústico. Los procesos de agrietamiento se observan en casi todos los suelos del área de estudio, tal como se aprecia en la Figura 4.



Figura 4. Se observa que hay un agrietamiento en el suelo, lo cual aparece en la mayoría de los terrenos agrícolas de Millhuish, principalmente aquellas que se encuentra cerca al río Mosna. Extraído del informe N° 248-2020-MDSM/GM/UGRD/JPTM.

2.- CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS

El análisis de la geología regional ha sido desarrollado, en base a información publicada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) a escala 100,000 (Cuadrángulo Geológico de Recuay – hoja 20 i); mientras que, para la geología local se ha desarrollado el reconocimiento in situ.

2.1.- Geología local

El área de estudio se asienta sobre materiales de origen aluvial conformada por bloques intercaladas con arenas y limos. Las unidades litológicas aflorantes en las inmediaciones del área de estudio a escala 1:5,000 (Figura 5) son:

- **Grupo Goyllarisquizga:** Unidad geológica que constituye el sustrato rocoso del área de estudio, está conformada por areniscas cuarzosas con intercalaciones de lutitas y limos. Este grupo se encuentra hacia la parte oriental del área de estudio.

- **Formación Chimú (Ki-chi):** Unidad geológica conformada por estratos comunes de areniscas blancas y macizas en capas de 1 a 3 metros de espesor y en total, la secuencia completa de la unidad puede variar entre 600 m en el extremo sur a 100 en el extremo norte. Esta unidad se encuentra aproximadamente a 660 metros en dirección noreste del área de estudio.

- **Formación Oyón (Ki- oy):** Unidad geológica conformada por limolitas, lutitas gris oscuras en estratos delgados de 5 a 30 cm intercaladas con areniscas pardo-amarillentas, grises y gris claras en estratos más gruesos. Esta unidad se ubica aproximadamente a 480 metros al oeste del área de estudio.

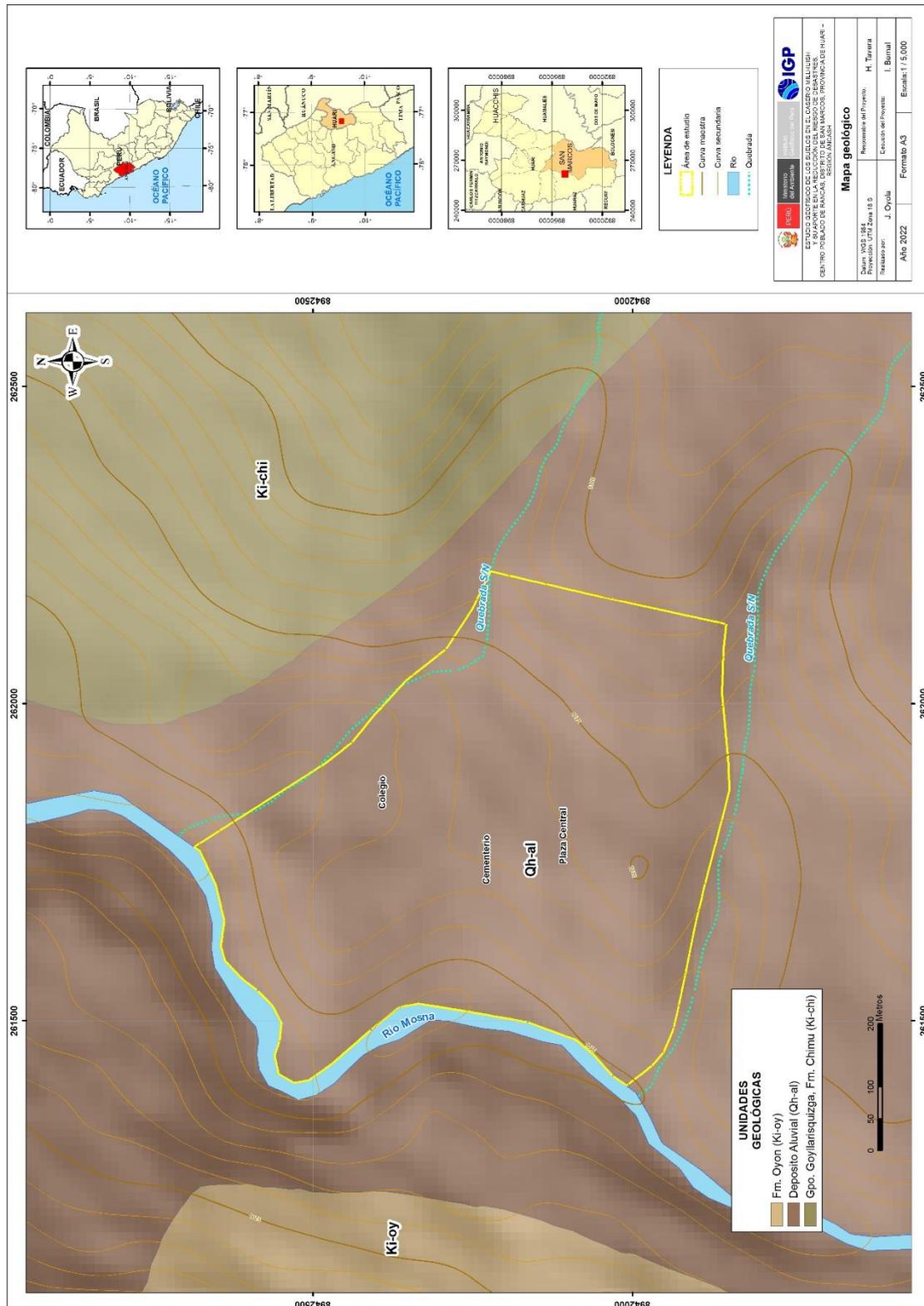


Figura 5. Unidades geológicas identificadas en las inmediaciones del área de estudio (línea de color amarilla).

- **Depósitos Aluviales (Qh-al):** Unidad geológica sobre la cual se encuentra emplazado el Caserío Millhuish. Está conformada por grandes bloques redondeados a subredondeados mezclados con arena gruesa y limo resultantes de la meteorización granular de las rocas graníticas que se encuentran en ese sector (Figura 6).



Figura 6. Perfil estratigráfico del depósito aluvial ubicado en el extremo occidental del área de estudio.

2.2.- Geomorfología

Las principales unidades geomorfológicas identificadas en el área de estudio, en base a sus características físicas y los procesos que las han originado son:

- **Abanico aluvial:** Se formó de antiguos aluviones que descendieron de la parte más alta, posteriormente se acumularon los sedimentos en la ladera norte, para que finalmente formaran un gran abanico sobre el cual se asienta el Caserío Millhuish (Figura 7). Los materiales están conformados por clastos y bloques angulosos de 20 a 70 cm de diámetro, lo que evidencia su corto recorrido. Estos suelos se encuentran distribuidos y dispersos en la parte media y baja del área de estudio.



Figura 7. Vista panorámica del caserío Millhuish asentado sobre un abanico aluvial.

- **Terraza aluvial:** En el área de estudio, esta unidad geomorfológica se ubica en su extremo oeste y se caracteriza por tener un desnivel topográfico de 30 m aproximadamente (Figura 8).

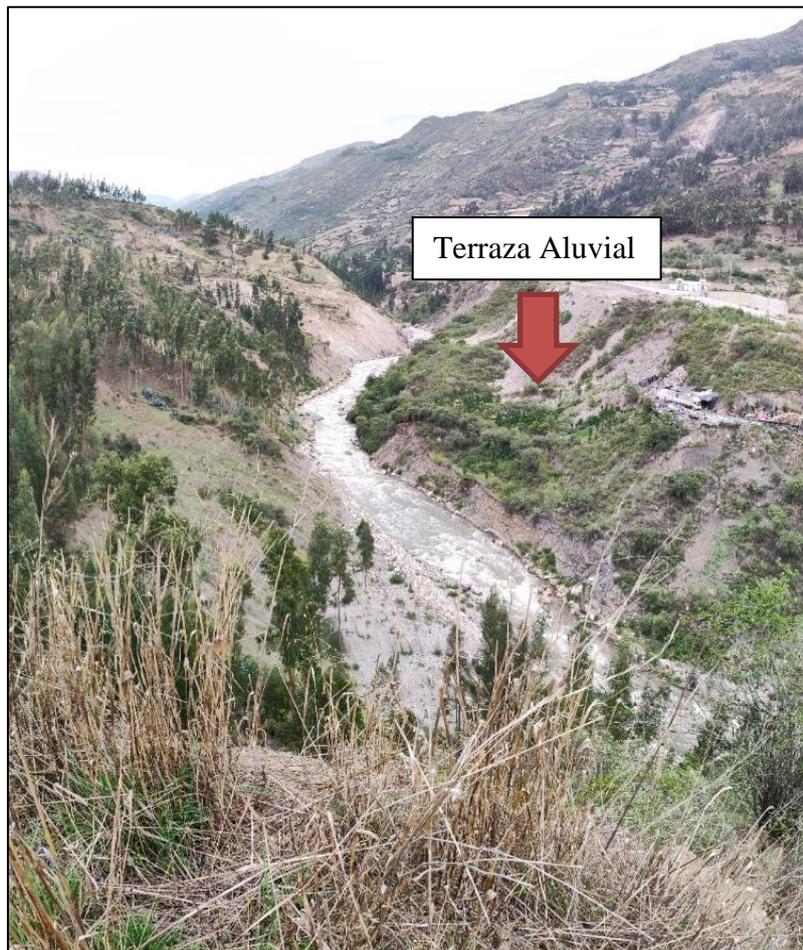


Figura 8.- Terraza aluvial inclinada sobre la cual se ubica la parte occidental del área de estudio

- **Laderas de montaña:** Se encuentra ubicadas en el extremo oriental del área de estudio y está constituida por laderas con pendientes del orden de 40° y 90°, tal como se observa en la Figura 9.
- **Lecho fluvial:** En el Caserío Millhuish el lecho fluvial corresponde al Río Mosna, ubicado en el extremo occidental del área de estudio. En períodos extraordinarios de grandes avenidas, el río ocupa el lecho de manera excepcional

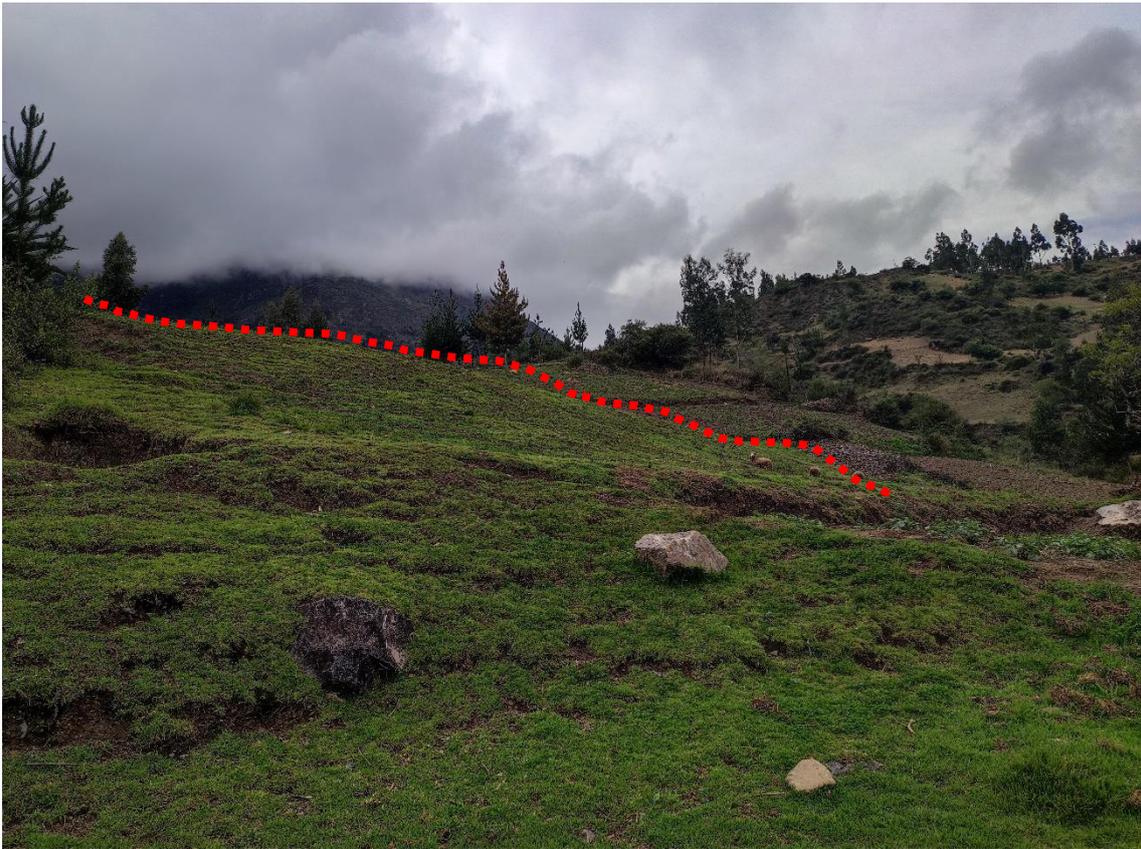


Figura 9.- Ladera ubicada hacia el lado oriental del área de estudio.

Asimismo, en la Figura 10, se presenta el mapa de pendientes para el área de estudio desarrollado a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) elaborado en base a una imagen ALOS PALSAR con una resolución de 12.5 metros. El mapa de pendientes construido fue interpretado considerando los rangos de pendiente propuestos por Fidel (2006), ver Tabla 1.

Tabla 1: Rangos de pendientes del terreno.

PENDIENTE EN GRADOS (°)	CLASIFICACIÓN
< 5°	Muy baja
De 5° a < 15°	Baja
De 15° a < 25	Media
De 25 a < 35	Fuerte
> 35	Muy fuerte

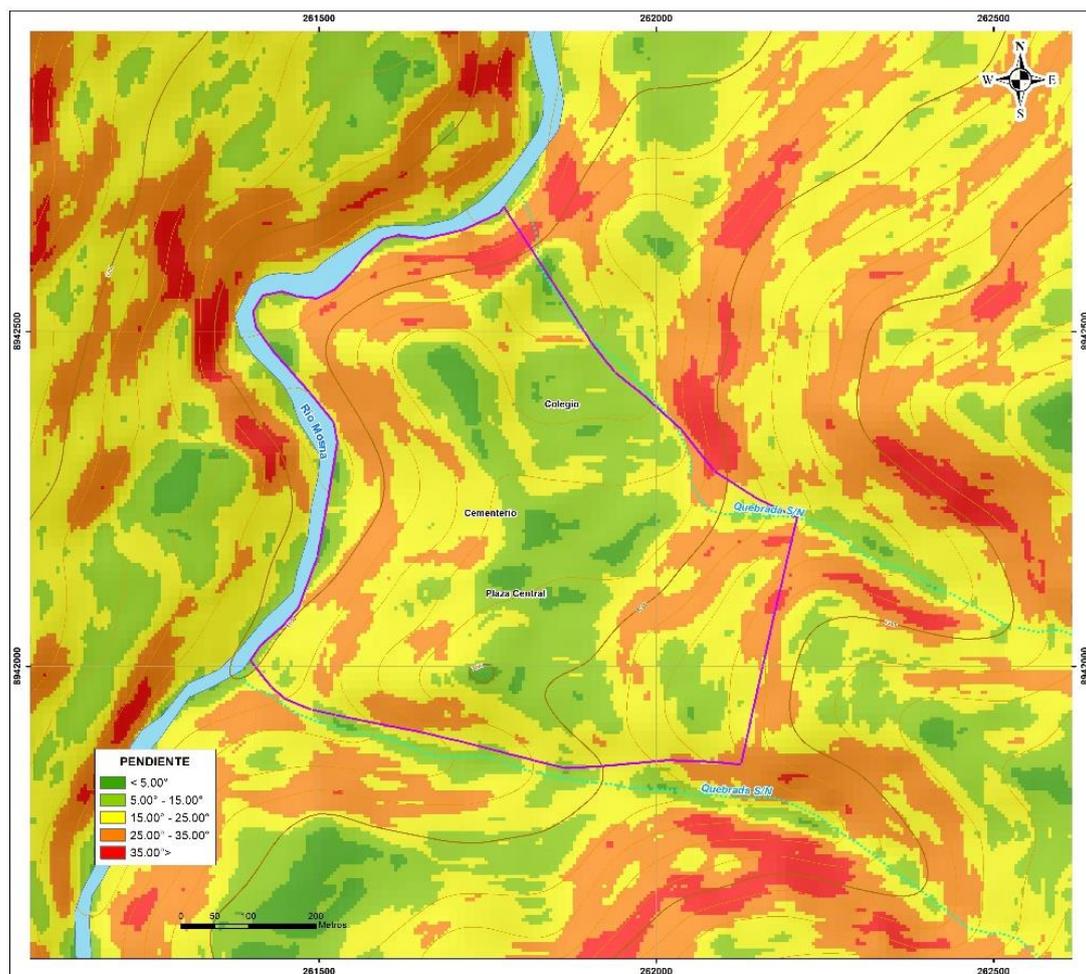


Figura 10. Mapa de pendientes en las inmediaciones del área de estudio (contorno de color rosado).

Según el mapa de pendientes, el área de estudio se emplaza principalmente sobre zonas con pendientes menores a los 35° de inclinación correspondientes a lomas elevadas y terrazas intermedias.

2.3.- Geodinámica

Comprende todos aquellos eventos geodinámicos producto de la interacción de procesos geológicos (internos y externos) que originan cambios físicos, químicos y/o morfológicos que alteran y modifican el relieve actual. En el área de estudio se han reconocido zonas con potencial de generación del siguiente evento geodinámico (Figura 11).

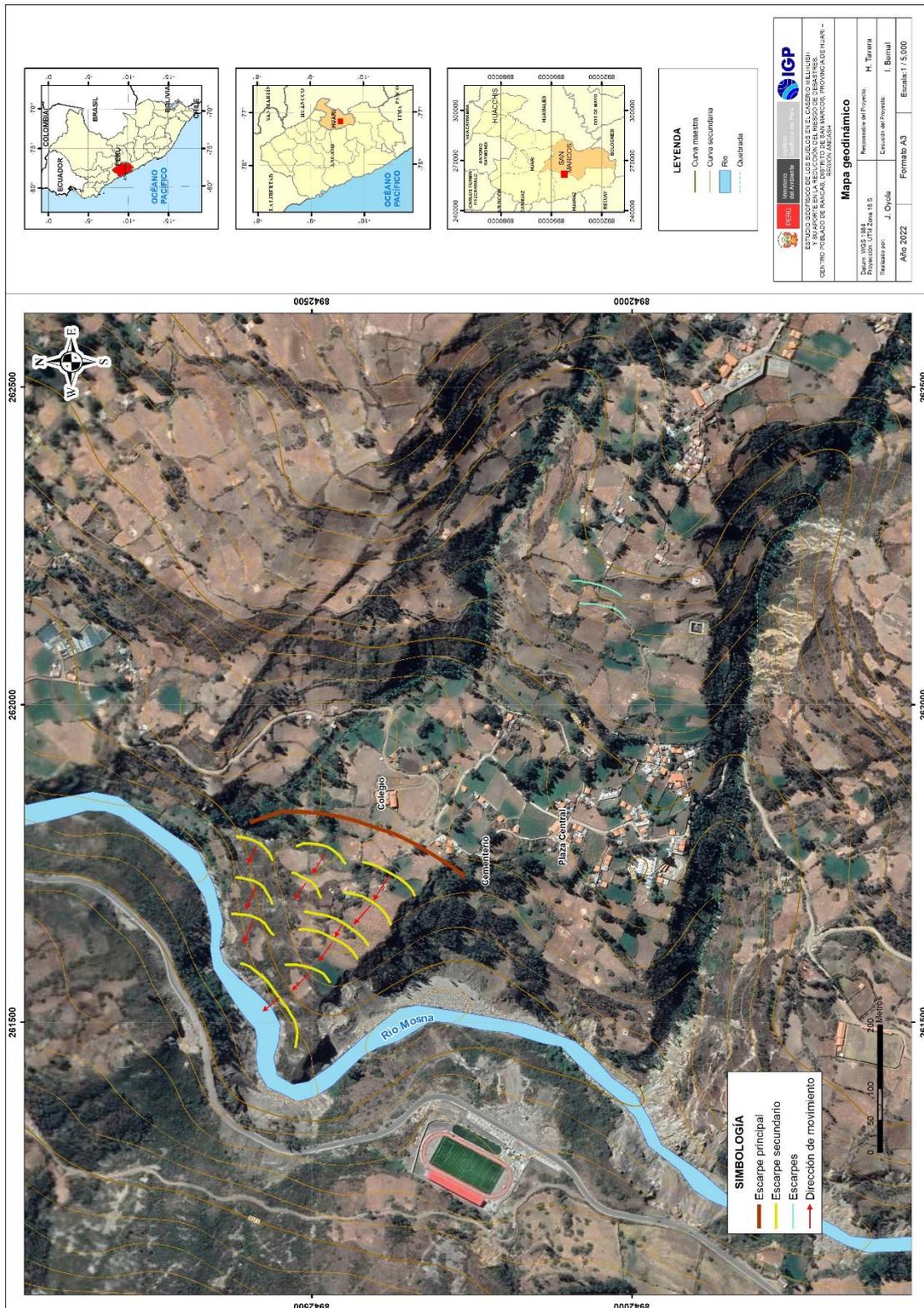


Figura 11. Escarpa principal (línea roja) y escarpas secundarias (líneas amarillas) identificadas en el Caserío Millhuish. Las flechas de color rojo indican la dirección del movimiento de suelo.

- **Deslizamiento rotacional:** Es un movimiento ladera abajo de una masa de suelo cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla (curva o cóncava). Su activación dependerá de la ocurrencia de precipitaciones pluviales intensas, condiciones de suelos (arcillosos, limosos, gravas con contenido de limos y arcillas), inclinación del terreno e intervención antrópica. En el área de estudio se ha identificado que la dirección del deslizamiento rotacional es en dirección nor-oeste, desde el caserío Vista Alegre hacia el cauce del río Mosna (Figura 11).

Por otro lado, en el área de estudio se identificó la existencia de restos de lo que fue un sistema de riego por goteo, que posiblemente presento filtraciones que probablemente aceleraron los deslizamientos en la zona de estudio y por ende, los agrietamientos en las viviendas aledañas (Figuras 12 y 13).

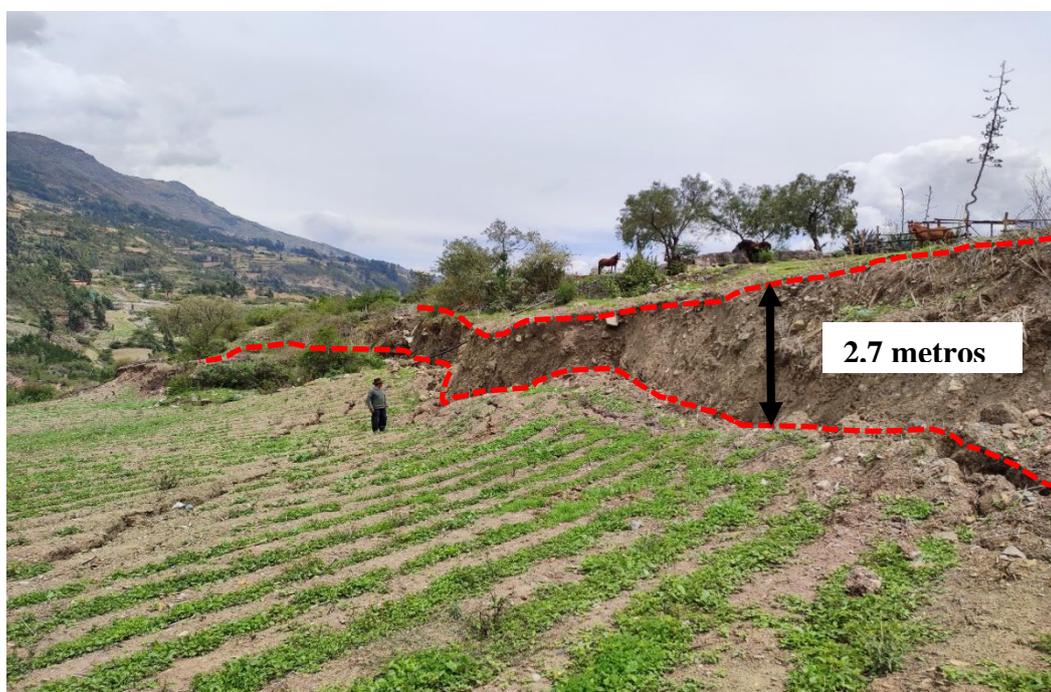


Figura 12. Escarpe originado por el deslizamiento rotacional en el Caserío Millhuish.



Figura 13. Grietas de hasta 12 cm en vivienda afectada por deslizamientos.

3.- COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SUELO

Las características y propiedades físicas del subsuelo dependen de los materiales que lo conforman en sus diferentes capas y que pueden ser conocidas a través de los estudios de geología, estratigrafía y geomorfología. Sin embargo, su comportamiento dinámico está asociado a la ocurrencia de sismos, lluvias, movimientos de masa, entre otros, y que puede ser conocido usando métodos geofísicos. En general, estos métodos permitirán, a partir del análisis e interpretación de los datos obtenidos directamente en el campo y usando instrumentación especializada, conocer los espesores de las capas del subsuelo a gran profundidad, su composición, rigidez, contenido de humedad y en conjunto, su comportamiento dinámico ante la sollicitación sísmica. Por ejemplo, los suelos blandos compuestos por sedimentos saturados de agua o rellenos antrópicos, a la ocurrencia de un sismo son susceptibles a generar deslizamientos ante la ocurrencia de sismos y/o fuerzas de gravedad.

3.1.- Método de razones espectrales (H/V)

El método de razones espectrales (H/V) fue propuesto por Nakamura (1989) para caracterizar la respuesta dinámica del suelo y en algunos casos, estimar su amplificación, ante la sollicitación sísmica. El método hace uso de registros de vibración ambiental que contienen información sobre las características físicas de los suelos en sus primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de cada capa estratigráfica, de diferente espesor, geometría y composición litológica, causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes a la ocurrencia de un sismo de gran magnitud.

3.1.1.- Adquisición de datos

Durante los trabajos en campo se recolectaron 23 registros de vibración ambiental utilizando sensores Lennartz y registradores CityShark II (Figura 14). Los puntos de adquisición de datos se distribuyen siguiendo la ubicación de líneas de refracción sísmica y tomografía eléctrica, con intervalos de 100 a 200 metros en promedio (Figura 15). Cada registro de vibración ambiental, tiene una duración de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de datos para su posterior análisis.



Figura 14. Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: sensor Lennartz (2N) y registradores CityShark II.

En la Figura 16, se muestra ejemplos de señales de vibración ambiental registrados en el punto ubicado en el cementerio (ML-09), donde existe ruido de poca amplitud y/o saltos transitorios y otro al sur del centro poblado (ML-13) con presencia de altos niveles de ruido (suelos muy heterogéneos y/o blandos). La correlación de las características físicas y dinámicas de estos

suelos, permite poder clasificarlos y a la vez zonificar el área de estudio en base a la respuesta del suelo ante la sollicitación sísmica.

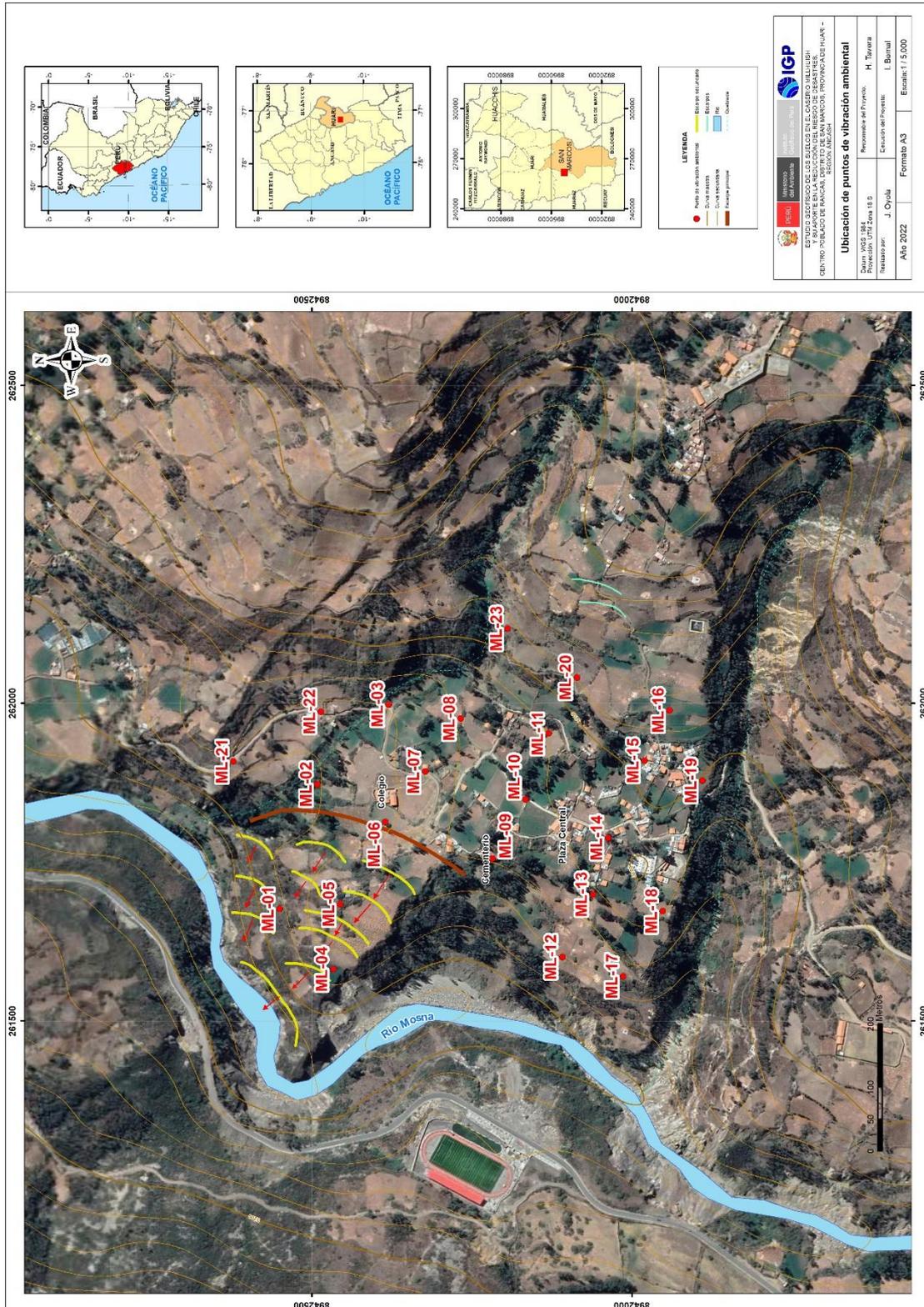


Figura 15. Centro poblado Millhuish y distribución espacial de los puntos de registros de vibración ambiental.

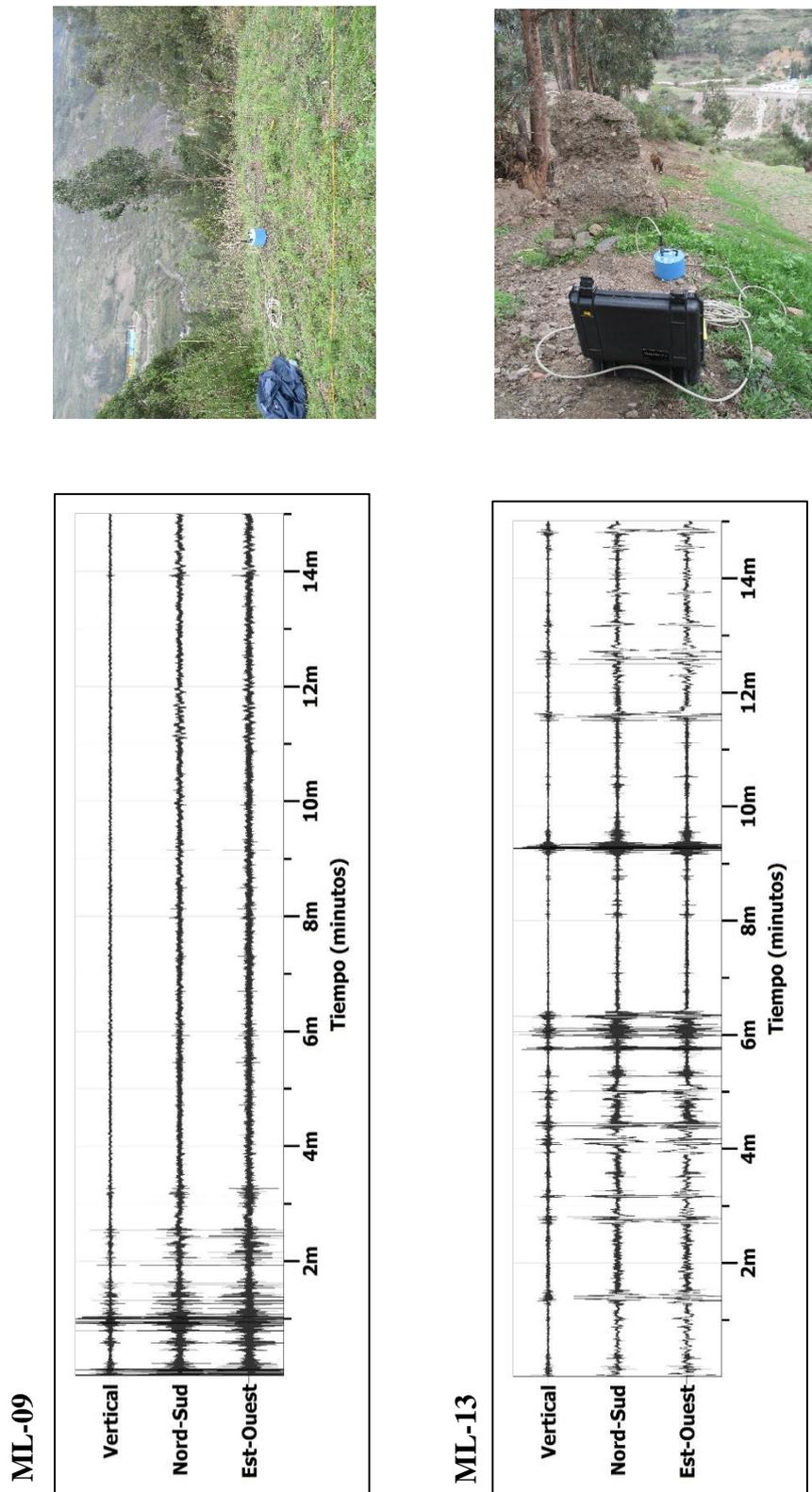


Figura 16. Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros obtenidos en: El cementerio (ML-09) y al sur (ML-13). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

3.1.2.-Procesamiento y análisis

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

- ✓ Los registros de vibración ambiental fueron tratados por ventanas de 20 segundos de señal no perturbada por el ruido de fondo. Para tal efecto, se selecciona de forma aleatoria diversos tramos de señal sin la presencia de ruidos transitorios.
- ✓ Se calcula la Transformada Rápida de Fourier para un número mayor a 10 ventanas de observación para cada punto, a fin de obtener los cocientes espectrales para cada componente de registro entre su componente vertical (E-O/V; N-S/V).
- ✓ Los espectros horizontales de la señal se dividieron entre el espectro vertical para obtener la relación H/V y luego se promediaron estos para cada punto de observación considerando su respectiva desviación estándar.
- ✓ Se procedió a identificar la frecuencia predominante considerando, un rango de interés que fluctúa entre 0.5 a 20 Hz y picos/rangos con amplificaciones relativas de al menos 2 veces (se considera la amplitud de "1" como punto de referencia), ver figura 17.

Para el análisis de los resultados obtenidos se considera toda la información geológica, geomorfología y geotécnica disponible, así como la información obtenida en este estudio de acuerdo a lo siguiente:

- ✓ Las frecuencias predominantes menores a 1 Hz corresponden a vibraciones generadas por el oleaje del mar, y/o cambios meteorológicos (periodos muy largos).
- ✓ Las bajas frecuencias o periodos largos son debidas a la presencia de depósitos profundos.

- ✓ Las frecuencias altas o periodos cortos son debidos a depósitos superficiales blandos y de poco espesor (SESAME, 2006; Bernal, 2006).

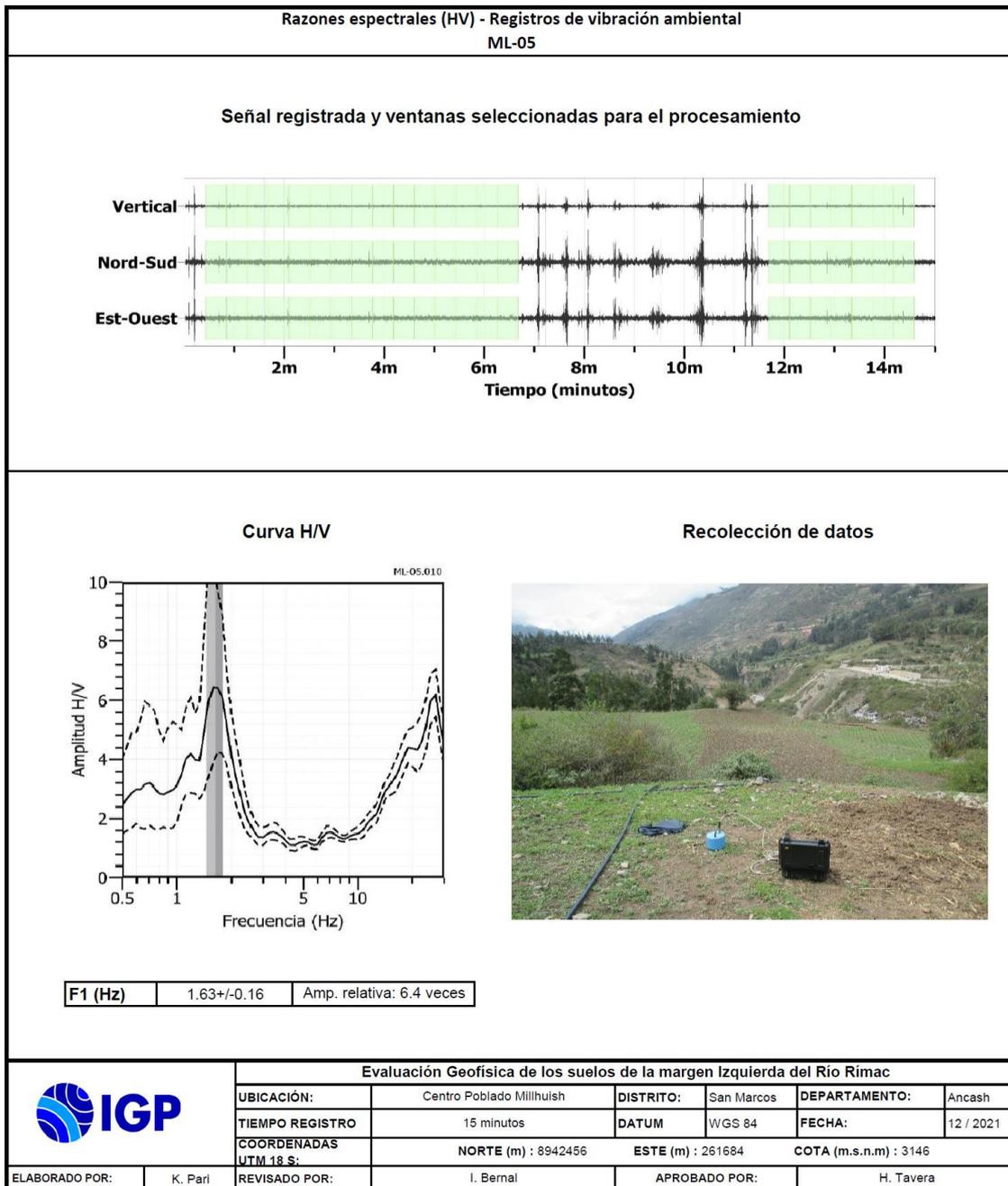


Figura 17. Resultados obtenidos con el método de razones espectrales (H/V) para el punto ML-05. Arriba, la señal registrada y abajo la curva promedio de las razones espectrales H/V en línea gruesa y su desviación estándar en líneas discontinuas. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

3.1.3.- Resultados e interpretación

En el Caserío Millhuish, los suelos responden a dos rangos de frecuencias: F_0 ($F \leq 2.0$ Hz) y F_1 ($F > 2.0$ Hz); pero en general, su distribución espacial muestra la presencia de bajas frecuencias en toda el área de estudio, con amplificaciones mayores a 3 veces hacia el extremo oeste. Sin embargo, los suelos sobre los cuales se encuentra el área urbana, responden a dos picos de frecuencias, sugiriendo materiales heterogéneos en su composición.

A fin de evaluar los cambios en el comportamiento dinámico de los suelos en el Caserío Millhuish, se analiza de manera conjunta la información contenida en cada gráfico de razones espectrales (H/V).

- **Frecuencias predominantes F_0 :** En la Figura 18, se muestra el mapa con la distribución espacial de los valores de F_0 , observándose el predominio de valores entre 1.5 a 1.9 Hz (0.5 – 0.8 segundos) en toda el área de estudio. Estos valores de frecuencia bajas (distinguidos en gris y con letra cursiva), estarían asociados a la presencia de una capa sedimentaria de gran espesor, que presenta amplificaciones mayores a 3 veces hacia el oeste, próximo al río Mosna.

- **Frecuencias predominantes F_1 :** En la Figura 18, se muestra la distribución espacial de los valores de F_1 , con el predominio de valores entre 4.6 a 6.5 Hz (0.2 segundos). Estos valores son identificados sobre el área urbana y hacia el extremo sur del caserío.

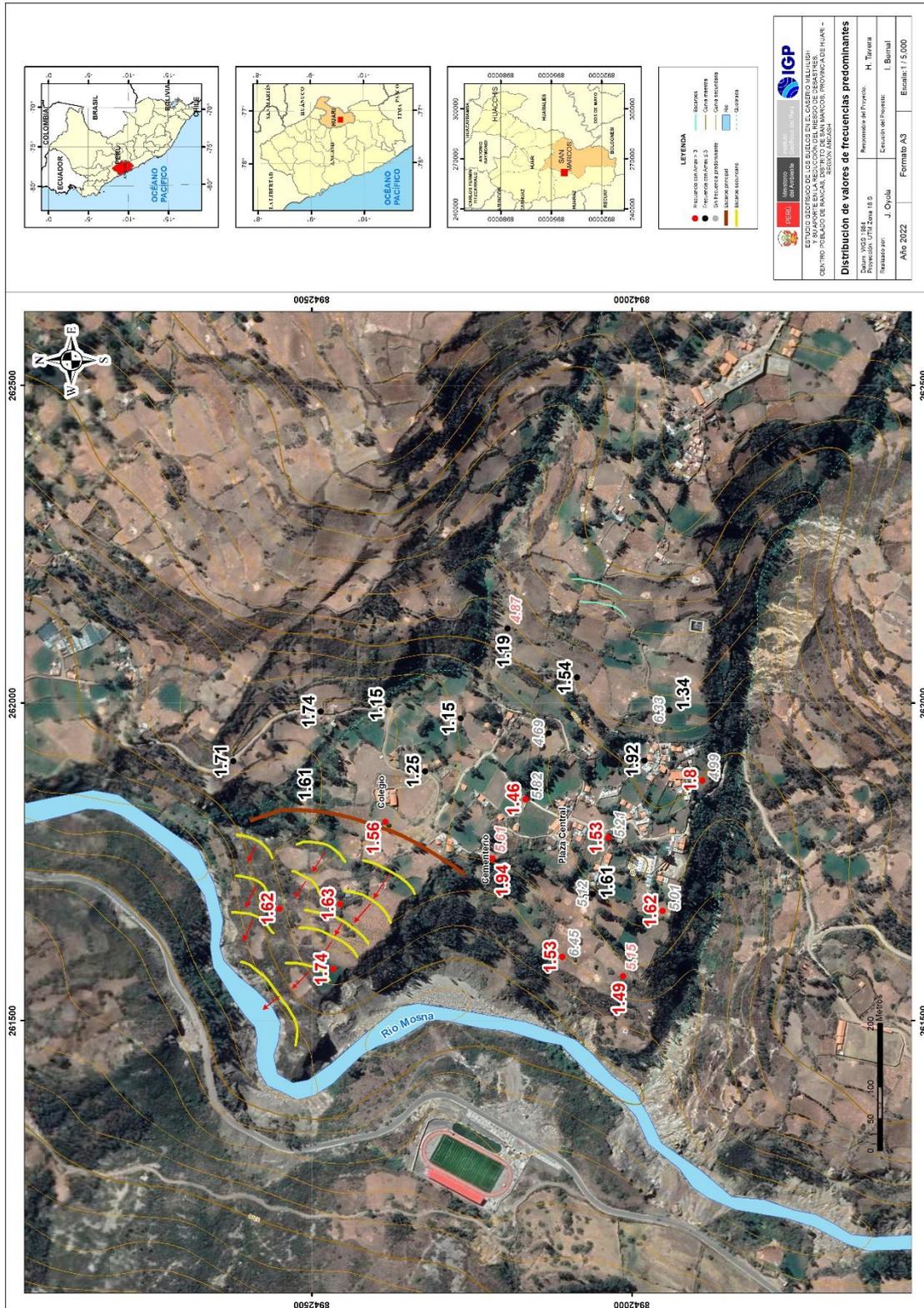


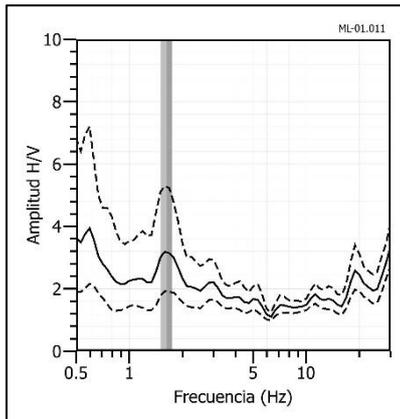
Figura 18. Distribución espacial de las frecuencias F_0 ($F \leq 2.0\text{Hz}$) en cursiva y F_1 ($F > 2.0\text{Hz}$). Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 3 veces.

La Figura 19 muestra ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos ML-01, ML-04 y ML-05, ubicados en el extremo oeste del área de estudio. En el primer punto no se evidencia a nivel superficial grietas, el segundo punto está sobre extensas áreas con grietas superficiales y el tercero se encuentra a 100 metros al Este de la zona de grietas. En estos espectros sobresalen un pico predominante a frecuencias de 1.6, 1.7 y 1.63 Hz con amplificaciones de 3.7, 13.0 y 6.4 veces respectivamente. Estos valores muestran que en la zona de grietas, el suelo presenta amplificaciones de la señal sísmica de hasta 12 veces, lo que evidencia que en este sector el suelo muestra un comportamiento dinámico complejo y puede desarrollar grandes niveles de sacudimiento ante un sismo y/o desplazamientos por lluvias extremas.

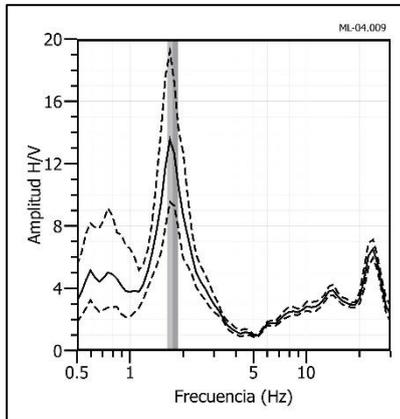
Asimismo, en la Figura 20, se muestra ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos ML-03, ML-07 y ML-08, ubicados en el extremo Este del área de estudio. Estos suelos responden a frecuencias predominantes de 1.15, 1.25 y 1.15 Hz con amplificaciones de 1.9, 2.8 y 1.8 veces respectivamente. Esto evidencia que en esta zona, los suelos presentan menor amplificación en comparación a la zona Oeste.

Finalmente, en la Figura 21, los puntos ML-09, ML-12 y ML-17, ubicados en el extremo Oeste sobre el borde del río. En estos espectros sobresalen un pico predominante a frecuencias de 1.9, 1.5 y 1.49 Hz con amplificaciones de 3.1, 3.4 y 5.9 veces respectivamente. Además sobresale un segundo pico con frecuencias de 5.6, 6.4 y 5.2 Hz con amplificaciones de 4.1, 2.4 y 3.7 veces.

ML-01



ML-04



ML-05

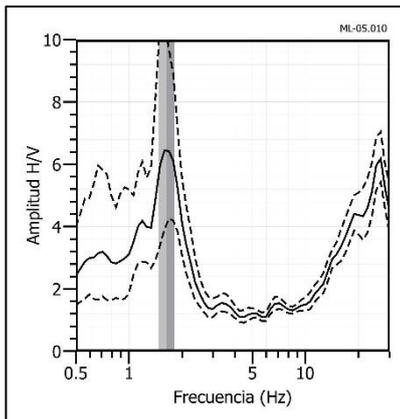
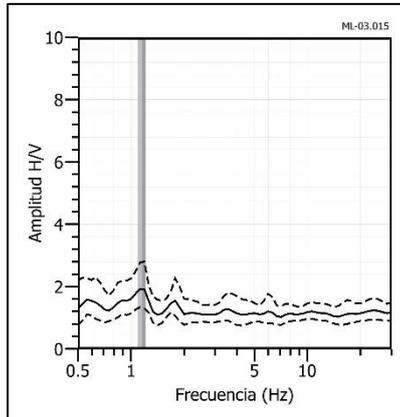
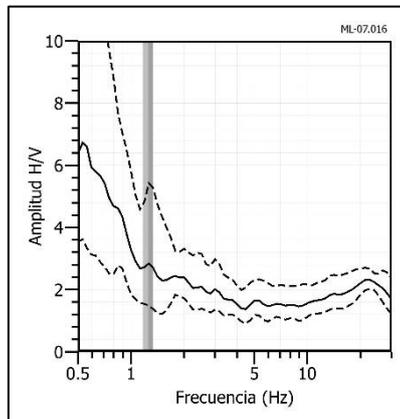


Figura 19. Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F0 ($F \leq 2.0$ Hz): Para los puntos ML-01, ML-04 y ML-05, ubicados al Oeste del centro poblado. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

ML-03



ML-07



ML-08

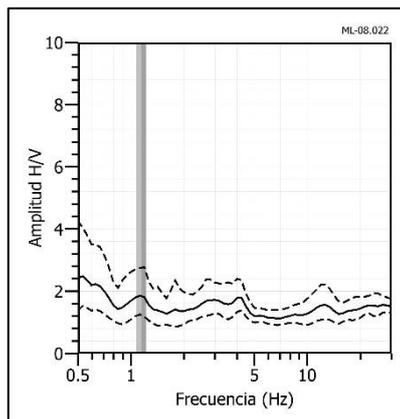
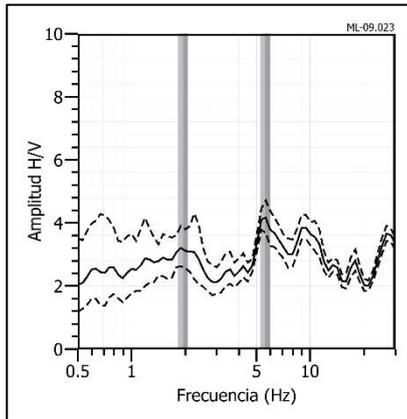
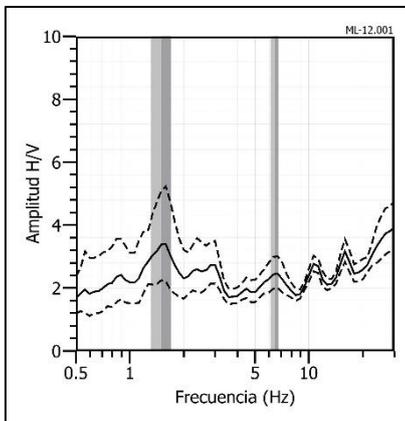


Figura 20. Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F0 ($F \leq 2.0$ Hz): Para los puntos ML-03, ML-07 y ML-08, ubicados al Este del centro poblado. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

ML-09



ML-12



ML-17

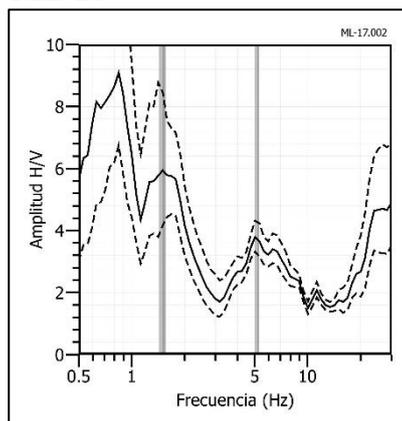


Figura 21. Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F0 ($F \leq 2.0$ Hz): Para los puntos ML-09, ML-12 y ML-17, ubicados al Oeste sobre el borde del río. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

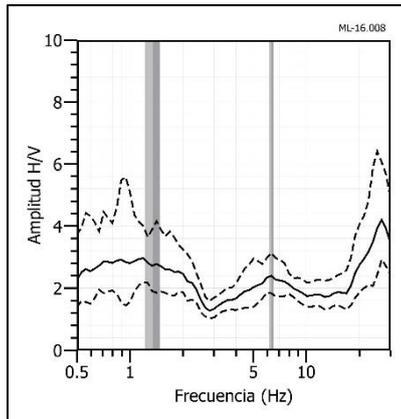
La Figura 22 muestra las razones espectrales (H/V) obtenidas para los puntos ML-16, ML-19 y ML-23, ubicados en el extremo Este con dos picos con frecuencias predominantes de 1.3, 1.8 y 1.2 Hz con amplificaciones de 2.7, 3 y 2.6 veces respectivamente. El segundo pico a frecuencias de 6.33, 4.99 y 4.87 Hz con amplificaciones de 2.3, 2.2 y 3.2 veces respectivamente.

El análisis de razones espectrales H/V en el Caserío Millhuish ha permitido observar, que los suelos responden a dos rangos de frecuencias, F0 (≤ 2.0 Hz) y F1 (> 2.0 Hz), el primer rango de frecuencia se presenta en toda el área de estudio, mostrando moderada a alta amplificación hacia el extremo Oeste. El segundo rango se presenta principalmente en suelos sobre la cual se encuentra el área urbana.

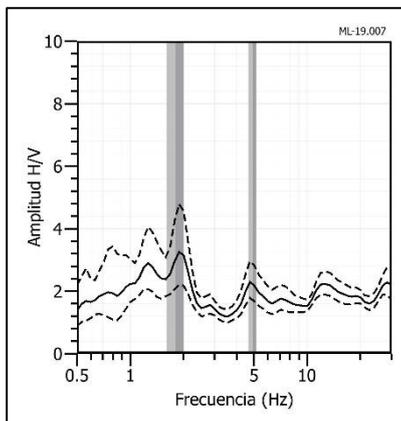
Finamente, estos resultados evidencian que los suelos en el Caserío Millhuish, tienen un comportamiento dinámico irregular y complejo. En dirección Oeste (áreas de cultivo ubicados próximos al río Mosna), el suelo responde a un pico bien definido con amplificaciones de hasta 12 veces que estarían asociados a su baja consolidación; mientras que, en el área urbana los suelos responden a dos picos, evidenciando mayor complejidad, más aún si presenta niveles altos de amplificación.

En general, en toda el área de estudio los suelos son parte de una capa sedimentaria de gran espesor y con mayor sensibilidad hacia el extremo norte; mientras que, hacia el extremo sur (sobre el área urbana) se encuentra una segunda capa de suelo delgada que suprayace al anterior, lo que hace que esta zona tenga un comportamiento dinámico muy complejo.

ML-16



ML-19



ML-23

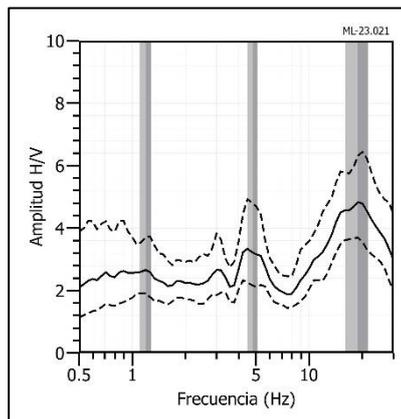


Figura 22. Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F0 ($F > 2.0$ Hz): Para los puntos ML-16, ML-19 y ML-23, ubicados al este del poblado. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

- **Periodos Dominantes:** Para presentar los resultados finales, los valores de frecuencias predominantes fueron transformados a periodos dominantes y para construir el mapa de periodos, se asignó a cada punto de medición un radio de confiabilidad de 10 metros, lo cual facilita los procedimientos seguidos para la zonificación de los suelos. Según la Figura 23, los periodos dominantes fueron separados en dos grupos, en color negro para periodos mayores a 0.5 segundos y en gris y cursiva, para periodos menores. Asimismo, en la misma figura se muestran en color rojo los puntos que presentan amplificaciones mayores a 3 veces.

Los resultados muestran que los suelos en el Caserío Millhuish responden a dos rangos de periodos: En toda el área de estudio los suelos responden a un pico de periodo (0.5 – 1.8 segundos) con amplificaciones mayores a 3 veces, lo que indica la presencia de suelos complejos e inestables. Asimismo, en dirección sur, sobre el área urbana, los suelos responden a un segundo periodo (0.2 segundos), evidenciando la presencia de suelos heterogéneos.

3.2.- Método de Refracción Sísmica

El método de Refracción Sísmica (RS) permite conocer los parámetros físicos de los suelos como su espesor y rigidez en base al contraste de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas de compresión "P" en el subsuelo. Básicamente, la RS consiste en generar ondas sísmicas a partir de una fuente artificial (martillo) y medir el tiempo requerido por las ondas para viajar en el subsuelo, desde la fuente hacia una serie de geófonos, usualmente dispuestos en línea recta.

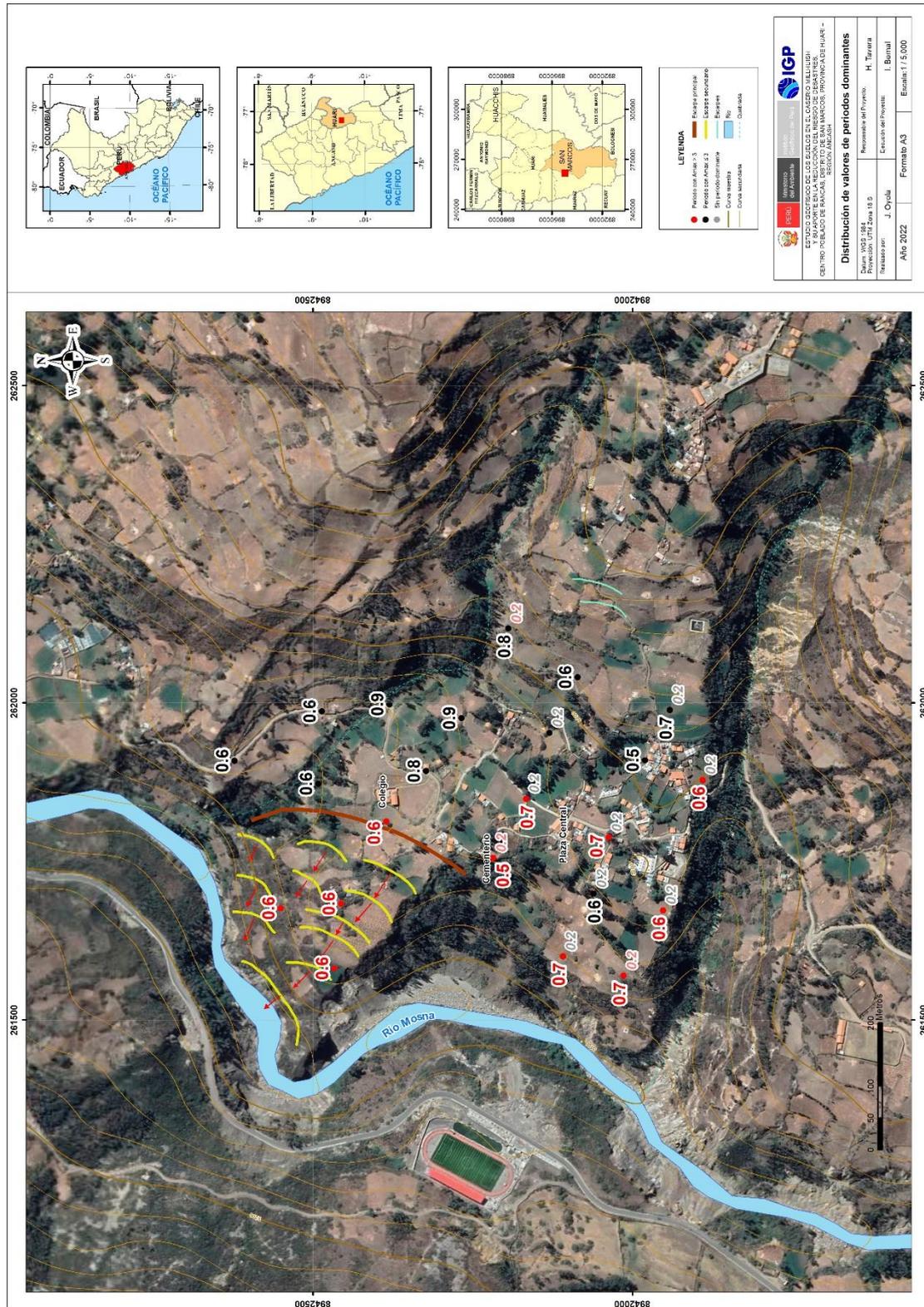


Figura 23. Distribución espacial de periodos dominantes del suelo para el Caserío Millhuish. Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 3 veces.

2.1.1.- Adquisición de datos

Para la aplicación del método de RS se ha utilizado un equipo sísmico de uso multipropósito, modelo GEODE de Geometrics, 24 sensores o geófonos de alta frecuencia (14 Hz). Como fuente de impacto y/o energía para generar las ondas sísmicas, se utilizó un martillo de 20 lbs, tal como muestra la Figura 24. Para este método se ha considerado tendidos lineales y frecuencia de muestreo de 4000 Hz (0.25 ms). La ubicación de cada RS fue variable ya que dependió de la geomorfología de la zona de estudio y de su accesibilidad.



Figura 24. Equipos utilizados en la adquisición de datos RS.

En la localidad de Millhuish se realizaron, 05 líneas de RS con longitudes de hasta 725 metros (Tabla 2). La distribución espacial de estas líneas debidamente codificadas se muestra en la Figura 25. Durante la toma de datos de RS, el operador evaluaba la calidad de los datos conforme eran adquiridos, indicando repeticiones, cambio de fuentes de energía o posición del equipo, según sea conveniente o necesario para el levantamiento geofísico.

Tabla 2: Coordenadas y características de las líneas sísmicas.

Línea Sísmica	Coordenadas UTM – WGS84		Cota (m.s.n.m.)	Longitud total (m)
	Este (m)	Norte (m)		
RS				
RS01-ML	261916	8942617	3105	725
	261635	8941949	3143	
RS02-ML	262013	8942545	3129	672
	262006	8942345	3134	
RS03-ML	261884	8941886	3179	621
	261524	8942531	3071	
RS04-ML	262063	8942223	3171	506
	261560	8942117	3099	
RS05-ML	262028	8941924	3218	414
	261743	8942208	3134	

3.2.2.- Procesamiento y análisis

El procesamiento de los datos fue realizado con el programa RAYFRAC y se inició con el picado de los primeros arribos de la onda P en el registro, formando de esta manera curvas tiempo vs distancia (dromocronas), que después de un proceso de inversión permite obtenerse la sección RS respectiva. En la Figura 26, se muestra un ejemplo de las curvas tiempo vs distancia para la línea sísmica RS05-ML.

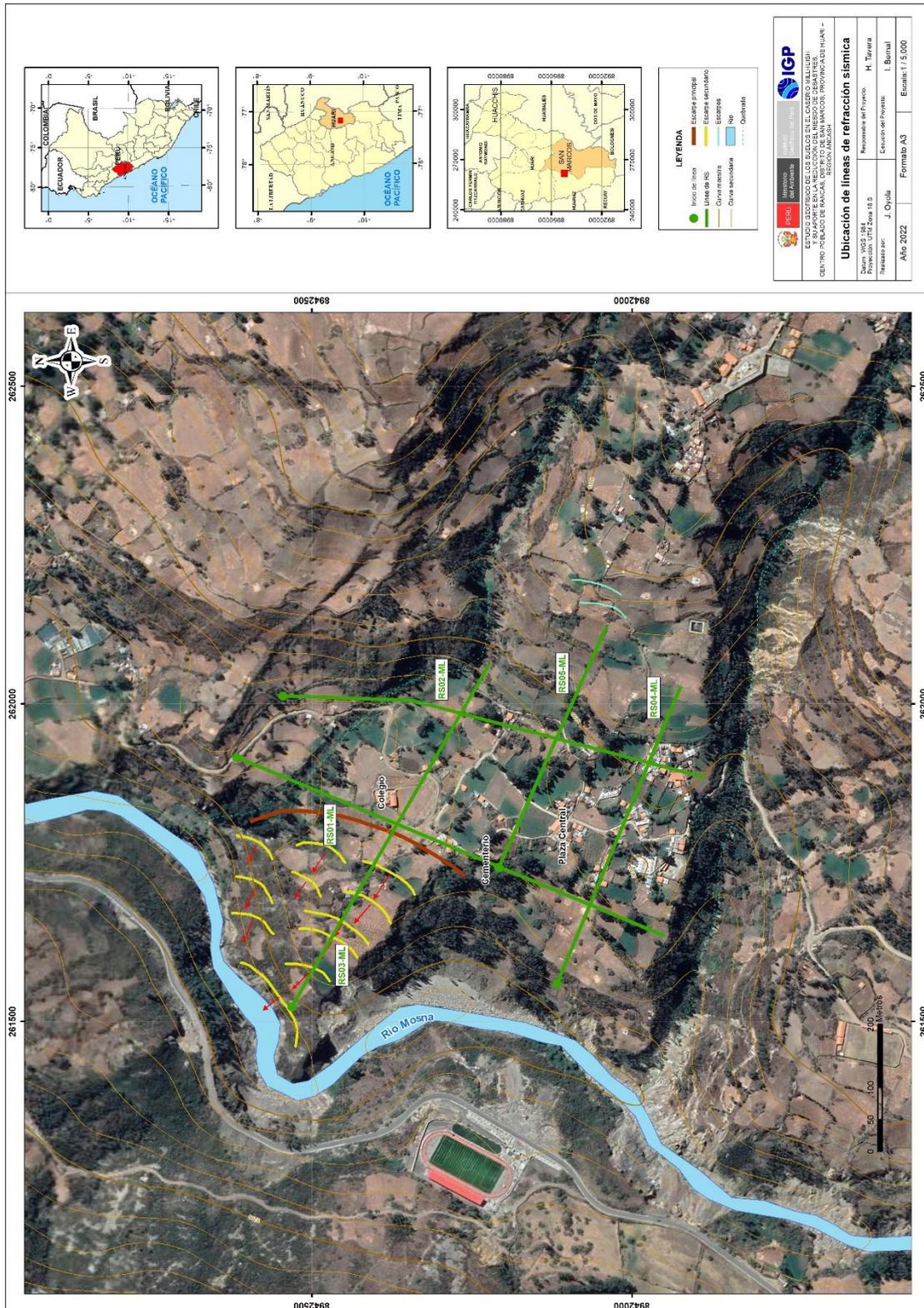


Figura 25. Distribución espacial de las líneas de RS (líneas de color verde), codificadas como RS01-ML, ..., RS05-ML.

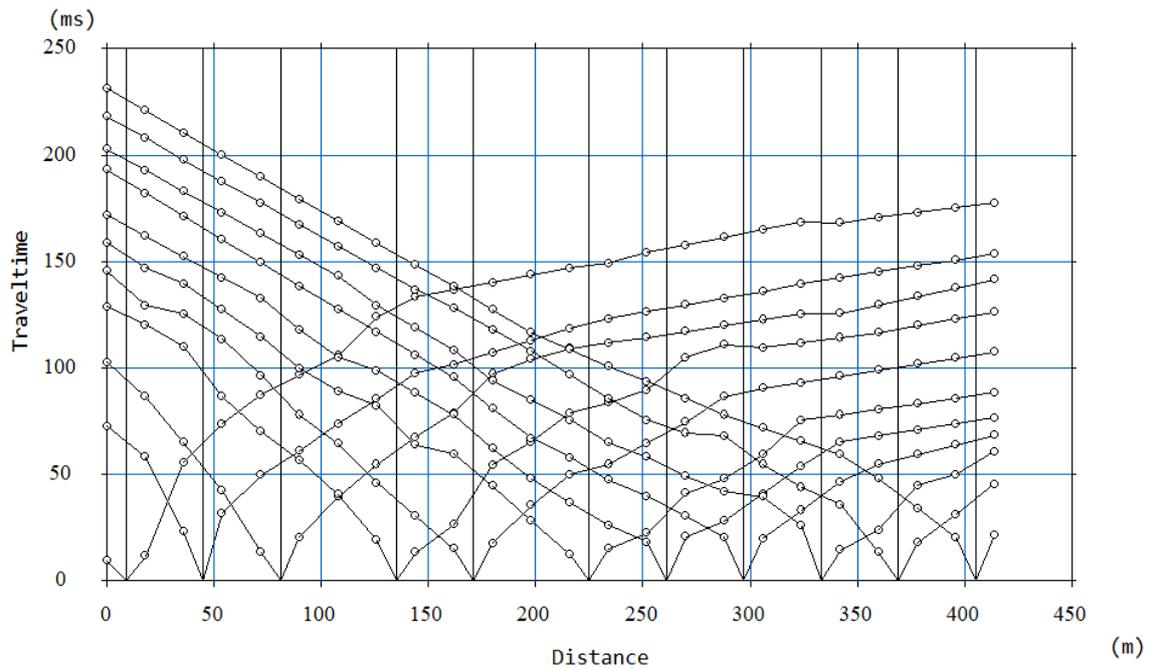


Figura 26. Curvas de tiempo - distancia obtenidas para la línea sísmica RS03-ML.

Para el análisis de los resultados e identificación del tipo de suelo en base a las velocidades de las ondas de volumen (V_p), se considera los valores propuestos por la ASTM-D5777 y la CNA (1993), ver Tabla 3.

Tabla 3: Clasificación de perfiles de suelo según la ASTM-D5777 y la CNA 1993.

ASTM - D5777		CNA - 1993	
Velocidad V_p (m/s)	Descripción	Velocidad V_p (m/s)	Descripción
240 - 610	Suelo intemperizado	170 - 450	Suelo arenoso
460 - 915	Grava o arena seca	300 - 650	Suelos con finos
1830 - 1220	Arena saturada	500 - 900	Suelos gruesos
910 - 2750	Arcilla saturada	800 - 1400	Depósitos de Talud
1430 - 1665	Agua	1450 - 1550	Materiales saturados
1460 - 1525	Agua de mar	1400 - 2000	Roca blanda
1830 - 3960	Arenisca	1800 - 2500	Roca muy fracturada
2750 - 4270	Esquisto, arcilla esquistosa	2000 - 3000	Roca fracturada
1830 - 3960	Tiza	3000 - 5000	Roca intacta
2134 - 6100	Caliza	4500 - 6500	Granito sano
4575 - 5800	Granito	6000 - 7500	Rocas metamórficas
3050 - 7000	Roca metamórfica	5500 - 8000	Caliza intacta

2.1.3.- Resultados e interpretación

a). Resultados

En el área de estudio se realizaron 05 líneas de RS, todas presentan resolución con una profundidad del orden de 100 metros. En la Figura 27, se presenta la sección de RS obtenida para la línea RS01-ML y en el Anexo I, para las líneas restantes, siendo sus características las siguientes:

Sección sísmica RS01-ML: Línea realizada al Oeste del Caserío Millhuish, paralelo al río Mosna. Los resultados obtenidos, han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 4 capas con las siguientes características:

Capa	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	10 – 30	400 – 1900	Material poco a medianamente consolidado.
02	5 – 30	1900 – 2800	Material consolidado o roca muy fracturada.
03	20 – 60	2800 – 3700	Material muy consolidado o roca fracturada.
04	-	> 3700	Roca sana.

Sección sísmica RS02-ML: Línea realizada al Este del Caserío Millhuish, línea paralela al río Mosna. Los resultados obtenidos, han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 4 capas con las siguientes características:

Capa	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	15 – 18	400 – 1900	Material poco a medianamente consolidado.
02	10 – 15	1900 – 2800	Material consolidado o roca muy fracturada.
03	10 – 25	2800 – 3700	Material muy consolidado o roca fracturada.
04	-	> 3700	Roca sana.

Sección sísmica RS03-ML: Línea realizada al Norte del Caserío Millhuish, línea perpendicular al río Mosna. Los resultados obtenidos,

han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 4 capas con las siguientes características:

Capa	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	10 – 20	400 – 1900	Material poco a medianamente consolidado.
02	05 – 10	1900 – 2800	Material consolidado o roca muy fracturada.
03	05 – 15	2800 – 3700	Material muy consolidado o roca fracturada.
04	-	> 3700	Roca sana.

Sección sísmica RS04-ML: Línea realizada al sur del Caserío Millhuish, línea perpendicular al río Mosna. Los resultados obtenidos, han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 4 capas con las siguientes características:

Capa	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	10 – 15	400 – 1900	Material poco a medianamente consolidado.
02	10 – 30	1900 – 2800	Material consolidado o roca muy fracturada.
03	50 – 80	2800 – 3700	Material muy consolidado o roca fracturada.
04	-	> 3700	Roca sana.

Sección sísmica RS05-ML: Línea realizada en el centro del Caserío de Millhuish, línea perpendicular al río Mosna. Los resultados obtenidos, han permitido identificar en el subsuelo, la presencia de 4 capas con las siguientes características:

Capa	Espesor (m)	Velocidad Vp (m/s)	Descripción
01	20 – 40	400 – 1900	Material poco a medianamente consolidado.
02	20 – 40	1900 – 2800	Material consolidado o roca muy fracturada.
03	25 – 70	2800 – 3700	Material muy consolidado o roca fracturada.
04	-	> 3700	Roca sana.

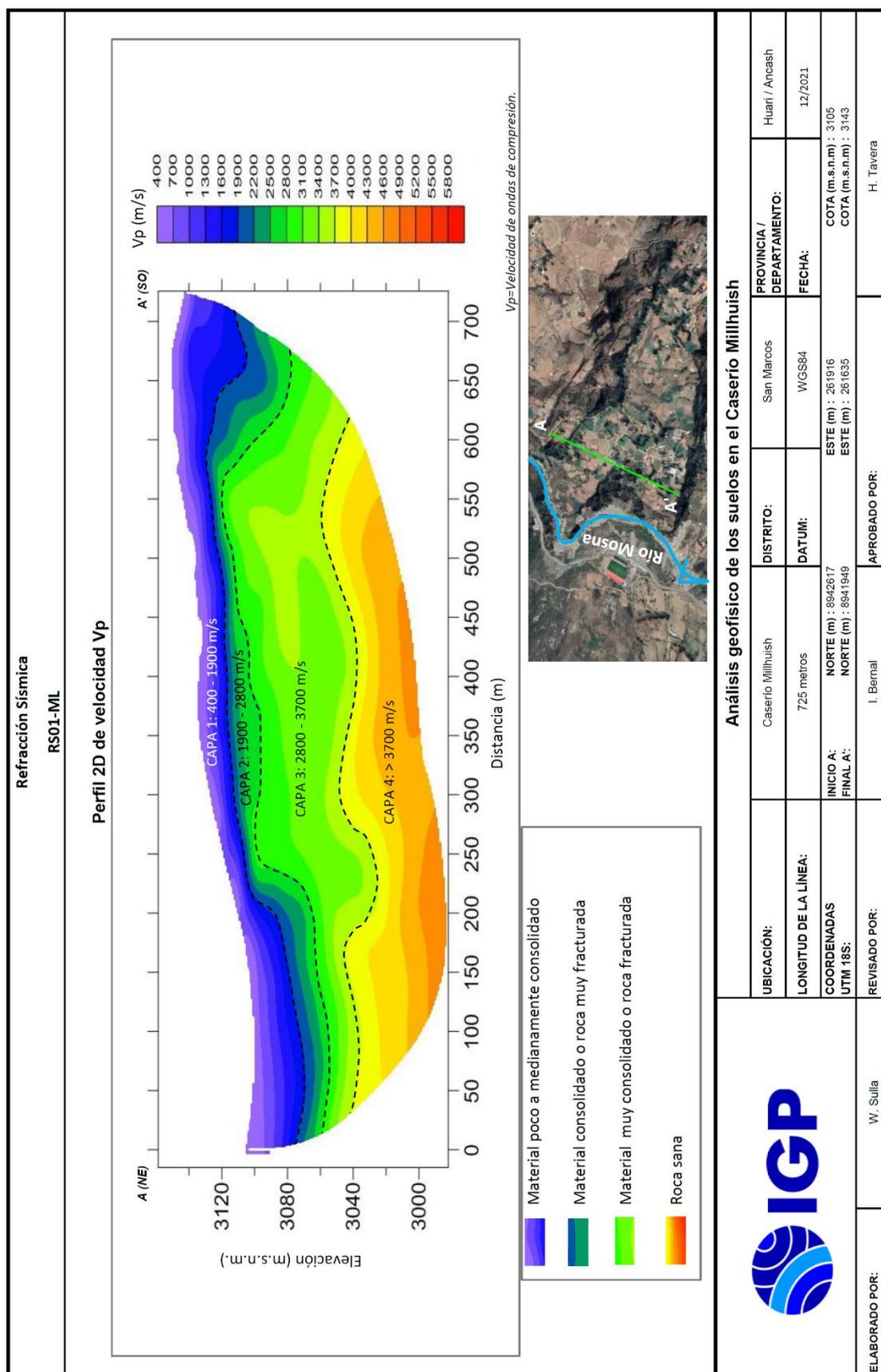


Figura 27. Resultados obtenidos con el método de refracción sísmica para la línea RS01-ML.

b) Interpretación

De acuerdo a los resultados obtenidos, los suelos menos consistentes y de mayor espesor están compuestos por material poco a medianamente consolidado o roca muy fracturada. Estos suelos están presentes en toda el área de estudio en capas con espesores de hasta 45 metros hacia el extremo norte y de 30 metros hacia el oeste. En general, estos suelos son parte de áreas de cultivo próximos al río Mosna. Por otro lado, hacia el extremo sur (área urbana), los suelos presentan espesores entre 20 y 30 metros con tendencia a incrementarse hacia la quebrada y los extremos oeste y este.

Asimismo, se observa que las capas con mayores espesores corresponden a áreas que presentan mayores pendientes y próximos al río Mosna, los que podrían estar aportando a la aparición de escarpes.

3.3.- Métodos sísmicos MASW y MAM

El ensayo de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto; es decir, conocer la velocidad de propagación de las ondas de corte Vs en el subsuelo a partir del análisis de la dispersión de ondas superficiales generadas por una fuente de energía impulsiva y registrada por arreglos lineales de estaciones sísmicas.

El ensayo de Análisis Multicanal de Microtremores (MAM) o sísmica de Microtremores (Louie, 2001), es otro método para conocer la estructura del subsuelo a partir de la velocidad de ondas de corte, pero en este caso se hace uso del registro de ruido sísmico (vibración generada por la actividad humana), cuya contribución es principalmente en bajas frecuencias, lo que permite investigar a mayores profundidades. La combinación de los métodos

MASW y MAM permite obtener información de subsuelo a niveles superficiales y en profundidad.

3.3.1.- Adquisición de datos

Para el registro de señales sísmicas con la técnica MASW y MAM se ha utilizado un equipo sísmico de uso multipropósito, modelo GEODE de Geometrics, 24 sensores o geófonos de baja frecuencia (4.5 Hz). Para la técnica MASW se usó como fuente de impacto y/o energía para generar las ondas sísmicas, un martillo de 20 lbs (Figura 28). Los parámetros de registro, la geometría del tendido y el espaciamiento entre geófonos fueron variables, ya que dependió de la geomorfología y accesibilidad a la zona de estudio. La frecuencia de muestreo fue de 4000 Hz (0.25 ms) para una longitud de registro de 2 segundos.



Figura 28. Equipos utilizados en la toma de datos por el método de MASW.

En el Caserío Millhuish se realizaron 05 arreglos lineales MASW y MAM, y su distribución espacial de muestra en la Figura 29 y sus coordenadas en la Tabla 4.

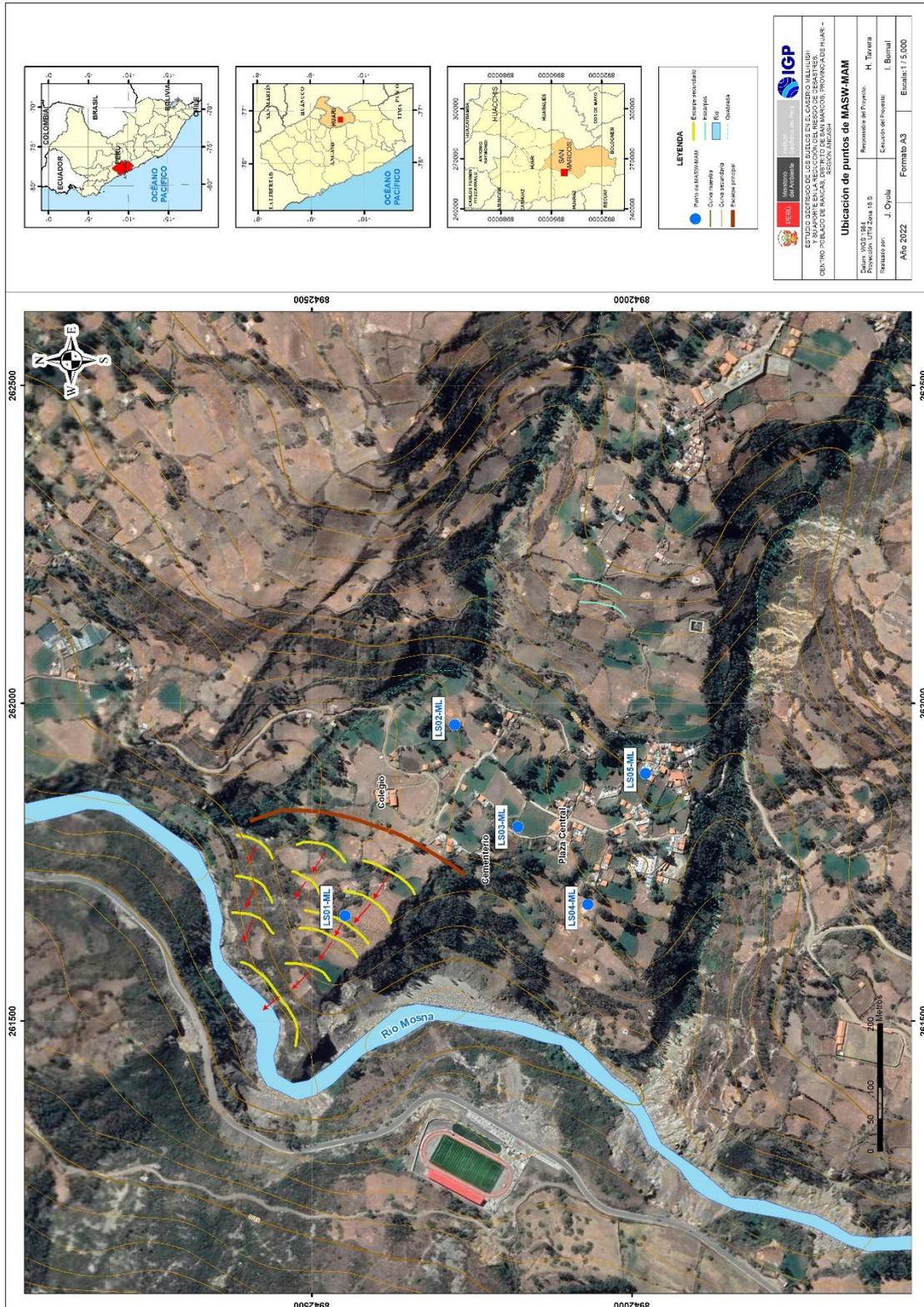


Figura 29. Distribución espacial de las líneas MASW y MAM (puntos de color azul), codificadas como LS01-ML, ..., LS05-ML.

Tabla 4: Coordenadas y características de las líneas sísmicas MASW y MAM.

Línea Sísmica	Coordenadas UTM – WGS84		Cota (m.s.n.m.)
	Este (m)	Norte (m)	
MASW-MAM			
LS01-ML	261666.0	8942448.0	3116
LS02-ML	261966.7	8942277.0	3139
LS03-ML	261805.7	8942178.4	3147
LS04-ML	261684.0	8942069.0	3148
LS05-ML	261890.0	8941979.0	3181

Durante todo el proceso de adquisición de datos con la técnica MASW, las señales registradas fueron analizadas a fin de evaluar sus niveles de ruido y de ser necesario, repetir el proceso. Para mejorar la relación señal/ruido se realizó el apilamiento de las señales registradas (sumatoria de registros sísmicos) y generadas por más de cuatro golpes en cada punto (shot).

3.3.2.- Procesamiento y análisis

Los datos sísmicos recolectados fueron procesados con el programa SeisImager y se aplicó la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtener la curva de dispersión que relaciona la velocidad de fase de las ondas superficiales con la frecuencia (Reynolds, 2011). Seguidamente, cada curva de dispersión perteneciente a un mismo arreglo (MASW y MAM), fue sometida a un proceso de inversión a fin de obtener los perfiles de velocidad V_s en una dimensión (1D) para el punto central de la línea.

Para el análisis de los resultados obtenidos, se considera la clasificación de suelos propuesta por la Norma de Diseño Sismorresistente (2018). En este caso, el rango de velocidad de los perfiles de suelo S1 y S2 se subdividen, a fin de analizar con mayor detalle las velocidades de ondas que caracterizan a los suelos identificados en la zona de estudio, tal como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de del tipo de suelo a partir de la Norma de Diseño Sismorresistente (2018).

Clasificación de los perfiles de Suelo					
N°	Vs (m/s)	Norma E.030		Descripción	
1	< 180	S3	Suelo blando	Material suelto	
2	180 a 350	S2	Suelo medianamente rígido	Material suelto a medianamente compacto	
3	350 a 500			Material medianamente compacto	
4	500 a 800	S1	Roca o suelo muy rígido	Material compacto	
5	800 a 1500			Material muy compacto	
6	> 1500	S0	Roca dura	Roca	

3.3.3.- Resultados e interpretación

a) Resultados

En el área de estudio se realizaron 05 líneas sísmicas MASW y MAM con resolución hasta una profundidad de ≈ 90 metros, tal como se muestra en la Figura 29. Los resultados obtenidos para la línea LS01-ML se muestran en la Figura 30 y en el Anexo II, para las líneas restantes. El análisis realizado para cada línea sísmica es mostrado a continuación:

Línea sísmica LS01-ML: Realizada al Oeste del Caserío Millhuish. Este perfil permitió identificar la existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 10 metros de espesor y velocidades Vs de 253 m/s, está compuesta de material medianamente compacto, la segunda, de 14 metros de espesor y velocidades Vs de 365 m/s. La tercera capa de 20 metros de espesor y velocidades Vs de 466 m/s ambas compuestas por material medianamente compacto. En el semiespacio, se tiene velocidades Vs > 655 m/s y corresponderían a material compacto.

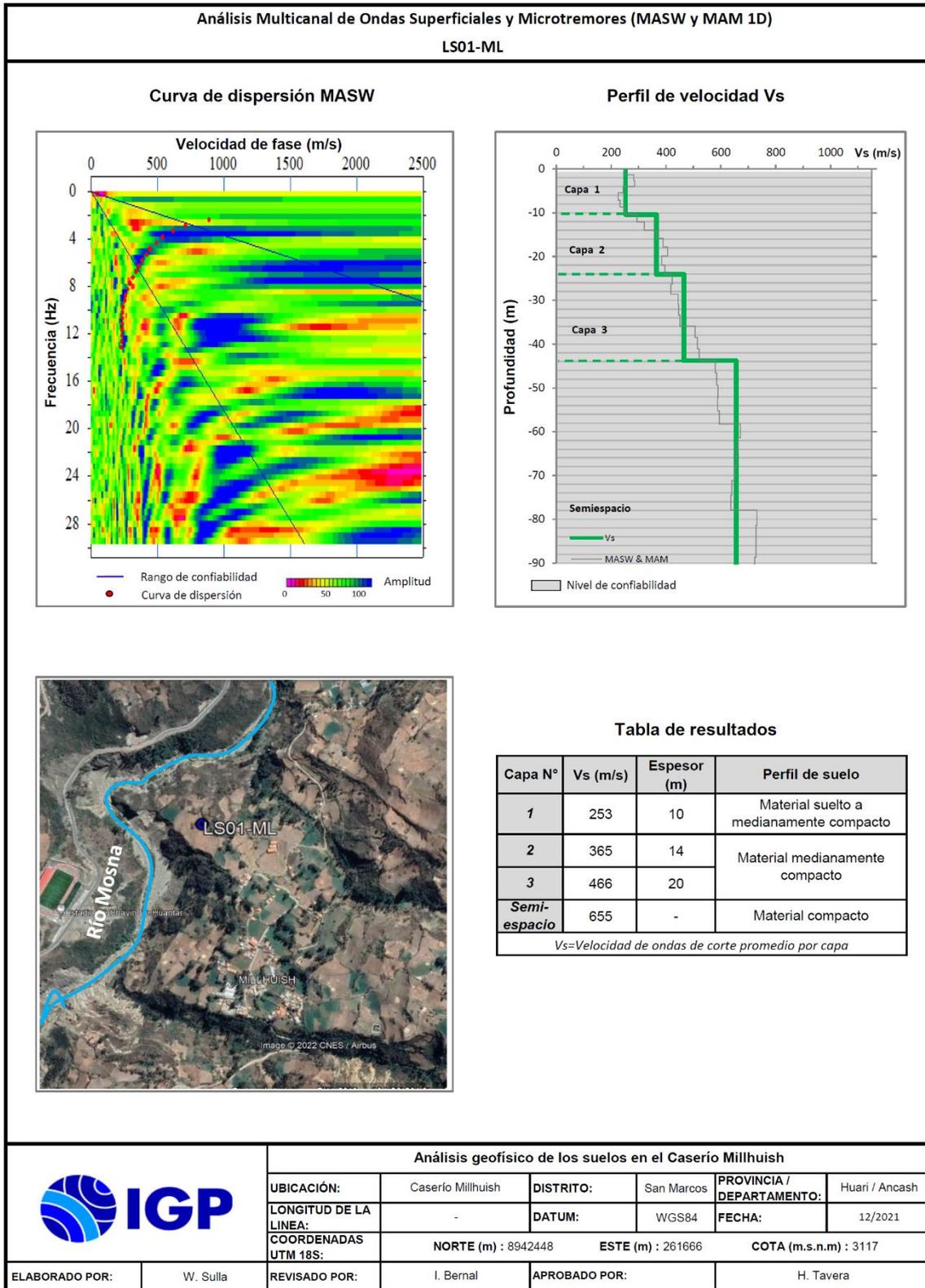


Figura 30. Resultados obtenidos con la técnica MASW y MAM para la línea sísmica LS01-ML.

Línea sísmica LS02-ML: Realizada al Oeste del Caserío Millhuish. Este perfil permitió identificar la existencia de dos (2) capas sísmicas: La primera de 26 metros de espesor y velocidades V_s de 611 m/s compuesta por material compacto y la segunda, de 26 metros de espesor y velocidades de 858 m/s. El semiespacio presenta velocidades $V_s > 1291$ m/s, y en este caso, ambas capas estarían compuestas por material muy compacto.

Línea sísmica LS03-ML: Realizada en el centro del Caserío Millhuish. Este perfil permitió identificar la existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 9 metros de espesor y velocidades V_s de 311 m/s, compuesta por materiales sueltos a medianamente compactos, la segunda, de 20 metros de espesor y velocidades de 457 m/s; compuesta por material medianamente compacto. La tercera con velocidades de 645 m/s y el semiespacio, con velocidades $V_s > 786$ m/s, ambas capas corresponden a material compacto.

Línea sísmica LS04-ML: Realizada al suroeste del Caserío Millhuish. Este perfil permitió identificar la existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 9 metros de espesor y velocidades V_s de 347 m/s corresponde a material suelto a medianamente compacto, la segunda, de 9 metros de espesor y velocidades de 491 m/s, compuesta por material medianamente compacto y la tercera capa, de 34 metros de espesor y velocidades de 690 m/s, con material compacto. En el semiespacio, se tiene velocidades $V_s > 919$ m/s y corresponderían a material muy compacto.

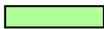
Línea sísmica LS05-ML: Realizada al sureste del C.P. de Millhuish. Este perfil permitió identificar la existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 9 metros de espesor y velocidades V_s de 334 m/s corresponde a material suelto a medianamente compacto, la segunda capa con un espesor de 13 metros y velocidades V_s de 485 m/s; está

compuesta por material medianamente compacto, la tercera capa con velocidades de 752 m/s, correspondientes a materiales compactos. El semiespacio presenta velocidades $V_s > 1095$ m/s, compuesto por material muy compacto.

Finalmente, en la Tabla 6, se presenta el resumen de los valores de velocidades de ondas de corte (V_s) y espesores de capas obtenidos en cada uno de los perfiles del suelo (Tabla 5).

Tabla 6. Valores de espesor y V_s de los perfiles sísmicos obtenidos para el área de estudio.

Línea Sísmica	Superficie				Profundidad			
	N° DE CAPA							
	1		2		3		Semiespacio	
	V_s (m/s)	Esp. (m)						
LS01-ML	253	10	365	14	466	20	655	-
LS02-ML	611	26	858	26	1291	-	-	-
LS03-ML	311	9	457	20	645	21	786	-
LS04-ML	347	9	491	9	690	34	919	-
LS05-ML	334	9	485	13	752	27	1095	-

	Material suelto ($V_s < 180$ m/s)
	Material suelto a medianamente compacto (180–350m/s)
	Material medianamente compacto (350 – 500 m/s)
	Material compacto (500 – 800 m/s)
	Material muy compacto (800 – 1500 m/s)
	Roca ($V_s > 1500$ m/s)

b) Interpretación

Los perfiles de velocidad de ondas de corte obtenidos para la localidad de Millhuish permiten identificar la presencia de 3 capas sísmicas. Estas capas presentan diferentes espesores, de variada compactación, con el predominio de suelos sueltos a medianamente compactos. Los suelos de menor consistencia a nivel superficial se encuentran en capas de 44 metros de espesor hacia el extremo oeste del área de estudio, puestos en evidencia con la presencia de grietas y escarpes (próximo al río Mosna). Estos suelos

son más compactos hacia el extremo este del área de estudio. Por otra parte, los suelos emplazados en dirección sur, tienen espesores entre 18 y 30 metros; pero se ha identificado la presencia de una capa más superficial y de menor consistencia de hasta 9 metros de espesor.

3.4.- Método de Tomografía Eléctrica

El método de tomografía eléctrica (ERT) permite determinar las variaciones de resistividad y conductividad eléctrica de las rocas y suelos para conocer la ubicación de los niveles freáticos en su estructura. En general, los materiales que conforman el subsuelo muestran diversos rangos de valores de resistividad (ρ) que dependen principalmente de la porosidad del suelo, conductividad de las partículas y del contenido de agua o de sales disueltas en las fracturas de las rocas.

3.4.1.- Adquisición de datos

Los datos recolectados en campo corresponden al registro de valores de resistividad obtenidos en 04 líneas de ERT, distribuidas en la zona de estudio, tal como se observa en la Figura 31. El instrumental utilizado en campo corresponde al equipo de Resistividad GDD GRX8-32. En la Tabla 7, se detalla las características de las líneas ERT realizadas en el Caserío Millhuish.

Tabla 7: Parámetros físicos de los tendidos de tomografía eléctrica.

Línea Eléctrica	Coordenadas UTM – WGS84		Cota (m.s.n.m.)	Longitud total (m)
	Este (m)	Norte (m)		
LE01- ML	261910	8942622	3104	720
	261629	8941959	3142	
LE02- ML	262000	8942594	3127	680
	261880	8941888	3178	
LE03- ML	261583	8942512	3089	520
	262063	8942223	3171	
LE04- ML	261547	8942122	3093	520
	262028	8941924	3218	

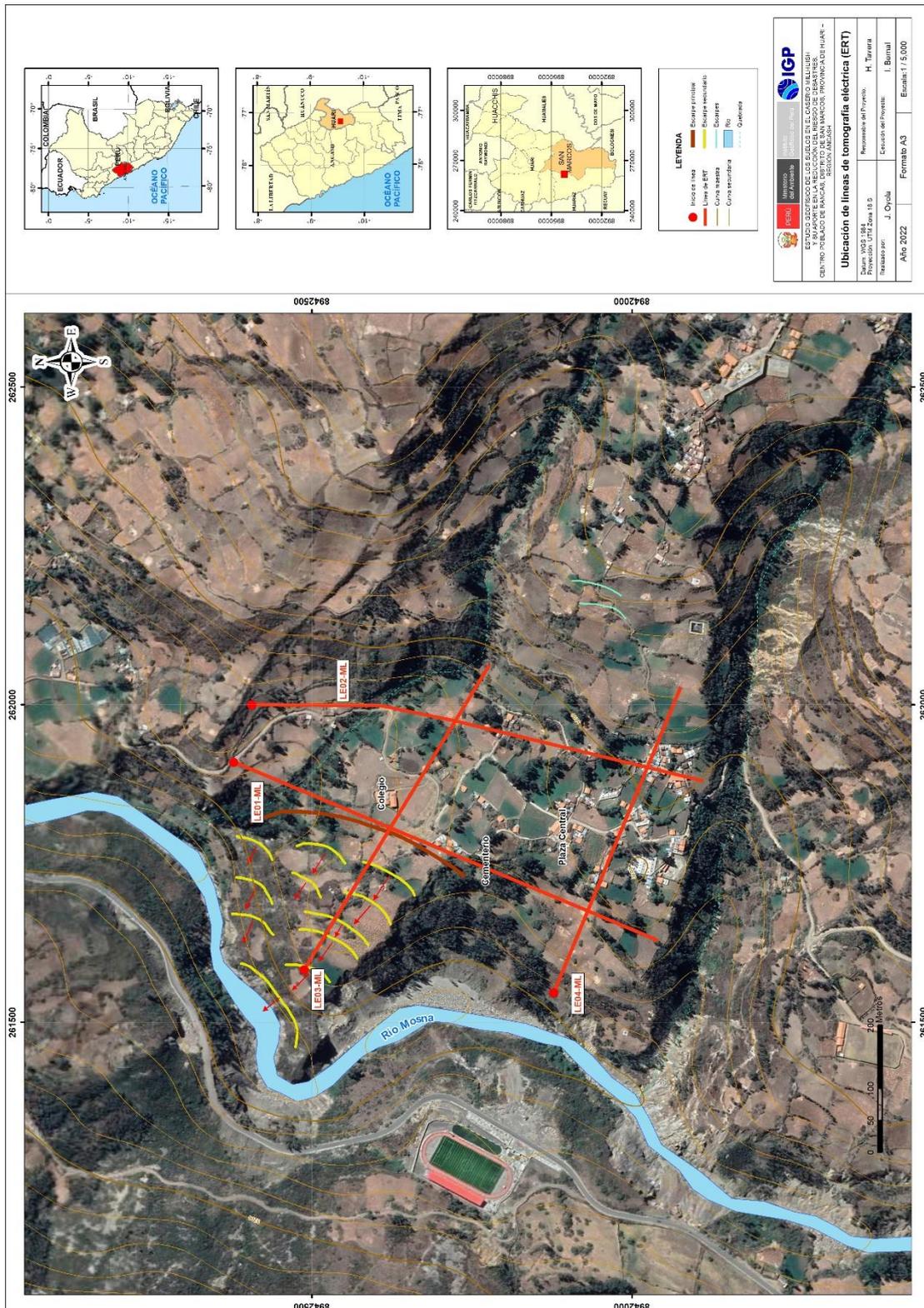


Figura 31: Distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica (líneas de color rojo), codificadas como LE01-ML,..., LE04-ML.

3.4.2.-Procesamiento y análisis

Para el procesamiento de los datos recolectados en campo, fue necesario realizar la corrección por efectos de topografía usando algoritmos de inversión propios de métodos geoelectricos y de procesamiento de imágenes. Asimismo, para la interpretación de los resultados se debe tener en cuenta que son varios los factores que influyen en las propiedades físicas de los suelos (grado de saturación, porosidad y forma del poro, salinidad del fluido, tipo y composición de la roca, temperatura, procesos geológicos que afectan a los materiales); es decir, el incremento de fluidos en el terreno se verá reflejado por una disminución en los valores de resistividad. En la Tabla 8, se presentan algunos valores de resistividad relacionados con los diferentes tipos de suelos y rocas.

Tabla 7: Valores representativos de resistividad (UNC, 2000).

*MATERIAL	RESISTIVIDAD (ohm-m)
Arcillas saturadas	5-20
Arcillas no saturadas	20-40
Limos saturados	20-100
Limos no saturados	100-200
Arenas saturadas	100-200
Arenas no saturadas	400-700
Grava saturada	300-500
Grava no saturada	500-2000
Roca fracturada saturada	100-2000
Roca fracturada	1500-5000
Roca sana	>5000

2.3.3.- Resultados e interpretación

a) Resultados

En el Caserío Millhuish se realizaron 04 secciones geoelectricas, con resolución hasta los 100 metros de profundidad. En la Figura 32, se presenta

la sección geoelectrica para la línea LE01-ML y en el Anexo III, para las secciones restantes. El análisis realizado para cada sección geoelectrica y/o tomografía eléctrica, permite tener los siguientes resultados:

Sección geoelectrica LE01-ML: Realizada al oeste de la plaza principal del Caserío de Millhuish sobre una longitud de 720 metros y en dirección NE-SO. En esta sección predominan depósitos de moderada resistividad (80 a 300 Ohm-m). Sin embargo, a nivel superficial se ha identificado la existencia de dos zonas anómalas con alto contenido de humedad, la primera a los 200 metros de longitud desde el inicio de la sección (a la altura del colegio inicial) y la segunda al final de la sección (extremo SO), ambas zonas se extienden a profundidad.

Sección geoelectrica LE02-ML: Realizada al este de la Plaza central del caserío Millhuish sobre una longitud de 680 metros y en dirección NE-SO. En esta sección predominan depósitos de moderada resistividad (80 a 300 Ohm-m). Sin embargo, a nivel superficial se ha identificado la existencia de tres zonas anómalas con alto contenido de humedad (< 80 Ohm-m). La primera zona a la altura del colegio, con espesores desde 10 metros. La segunda zona entre la plaza central y el cementerio, con valores que se extienden en profundidad. La tercera zona se encuentra presente al final de la sección (extremo SO), con espesor de 20 metros.

Sección geoelectrica LE03-ML: Realizada al norte de la plaza central del Caserío Millhuish sobre una longitud de 520 metros y en dirección NO-SE. En esta sección predominan depósitos de moderada resistividad (80 a 300 Ohm-m). Sin embargo, a nivel superficial se ha identificado la existencia de dos zonas anómalas con alto contenido de humedad (< 80 Ohm-m). La primera zona se presenta al inicio de la sección (extremo NO), hasta una profundidad de 20 metros. La segunda zona

se presenta entre las longitudes 80 a 520 metros de longitud desde el inicio de la sección, con valores se extienden a profundidad.

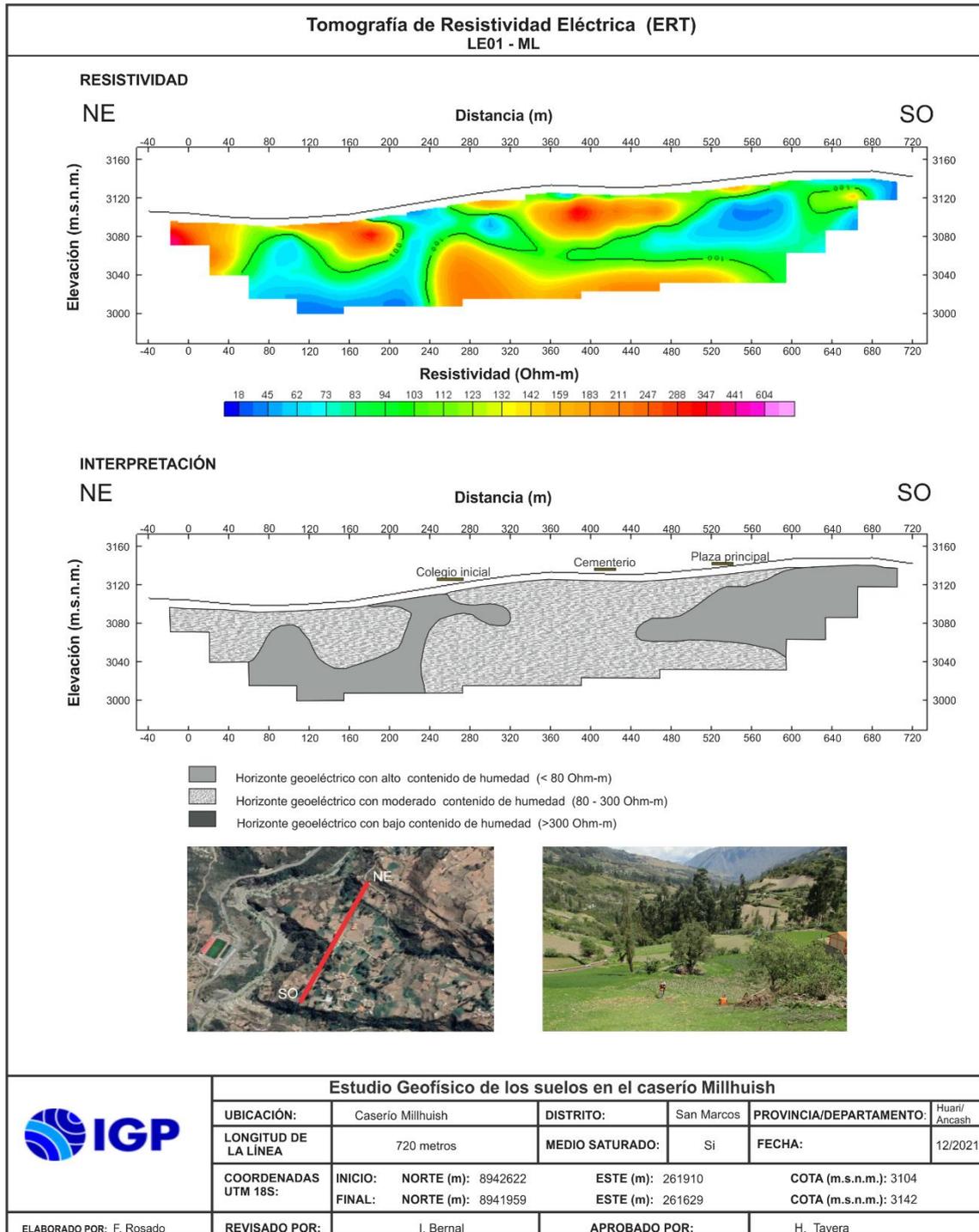


Figura 32: Resultado de tomografía eléctrica para la línea LE01-ML.

Sección geoelectrica LE04-ML: Realizada al sur de la plaza central del Caserío Millhuish sobre una longitud de 520 metros y en dirección NO-SE. En esta sección predominan depósitos de moderada resistividad (80 a 300 Ohm-m). Sin embargo, a nivel superficial se ha identificado la existencia de dos zonas anómalas con alto contenido de humedad (< 80 Ohm-m). La primera zona se presenta al inicio de la sección (extremo NO) y espesor de hasta 50 metros. La segunda zona se presenta a la altura de la plaza central y se extiende a profundidad.

b) Interpretación

En las secciones de tomografía eléctrica elaboradas en el Caserío Millhuish, se ha identificado las siguientes características:

En la Figura 33, se muestra las líneas LE01 y LE02 con orientaciones NE-SO. En esta figura y con líneas amarillas entre cortadas, se muestra las zonas con alto contenido de humedad producto del riego de las áreas de cultivo. Los materiales que constituyen este suelo (arcillas, limos y gravas), la pendiente y el riego, facilitan la formación de grietas y/o fisuras como las que se observa en la Figura 34. Asimismo, se ha identificado la presencia de suelos con alta humedad en las proximidades del río Mosna.

En temporadas de lluvias intensas, los deslizamientos pueden acelerarse debido a la saturación de los suelos, ocasionando mayores daños a los que ya se han venido evidenciando en la zona (Figura 34)

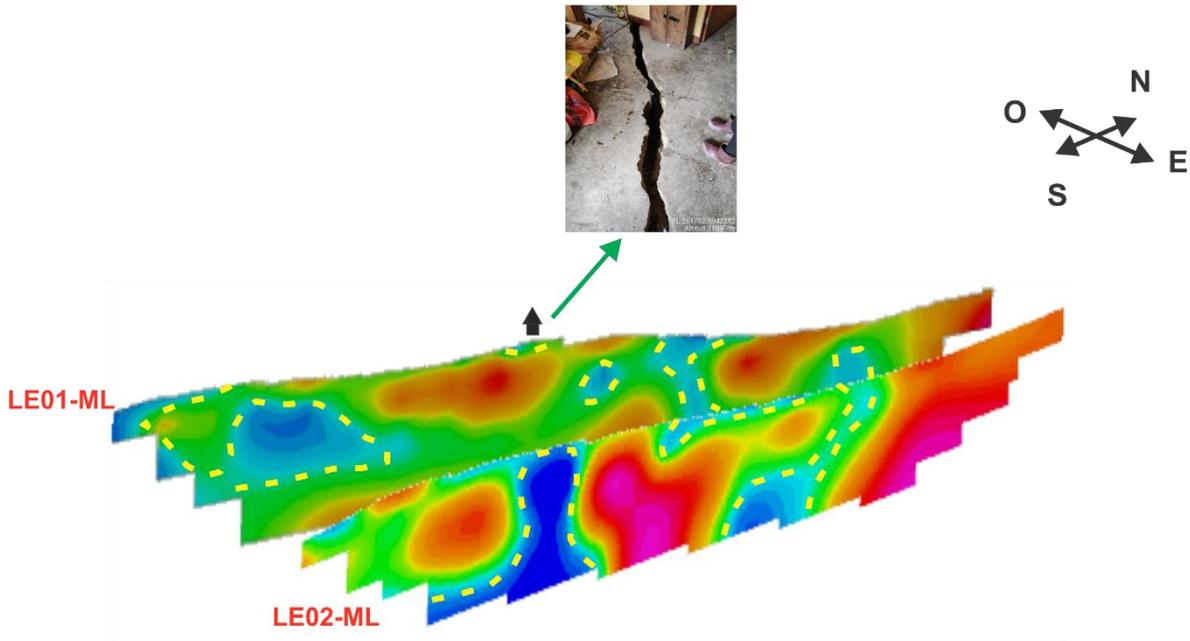


Figura 33. Orientación de las líneas de tomografía eléctrica LE01 y LE02 realizadas en el caserío Millhuish. Las líneas discontinuas amarillas delimitan las zonas con mayor contenido de humedad.



Figura 34. Vista del deslizamiento.

4. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUBSUELO Y SU COMPORTAMIENTO DINÁMICO

La exploración de la estructura y caracterización física del subsuelo en el Caserío Millhuish fue realizada usando datos e información generada a partir del empleo de métodos geofísicos y su correlación con la información geológica, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

4.1. Estructura del subsuelo

El área correspondiente al Caserío Millhuish, se asienta principalmente sobre un abanico aluvial con pendiente moderada y en donde predominan la presencia de bloques redondeados y subredondeados mezclados con arenas y limos. Para conocer las características físicas de estos suelos se ha recolectado datos geofísicos en toda el área de interés (velocidades de ondas longitudinales - V_p , perfiles unidimensionales de ondas de corte - V_s , secciones geoelectricas y curvas de razones espectrales) y considerando tendidos lineales que han sido ubicadas estratégicamente para conocer los espesores y densidades de los diferentes materiales que conforman el suelo hasta una profundidad de aproximadamente 80 metros.

En base a los resultados obtenidos, se construyeron perfiles del suelo (ver Figura 35), a fin de analizar las características físicas y el comportamiento dinámico del área de estudio.

Perfil 1

Con una orientación NO-SE (Figura 36), se inicia en el río Mosna en dirección a la ladera de la montaña, siendo sus características las siguientes:

- A lo largo del perfil se ha identificado suelos constituidos por materiales poco a medianamente consolidados en capas con espesores de 35 metros próximos al río Mosna. Luego en la parte media el espesor de la capa disminuye (por el Colegio) hasta los 20 metros, para luego incrementarse hacia el extremo SE. Por debajo de estas capas, se presenta suelos con características de roca fracturada con espesores entre 5 y 20 metros y la roca sana a mayor profundidad.

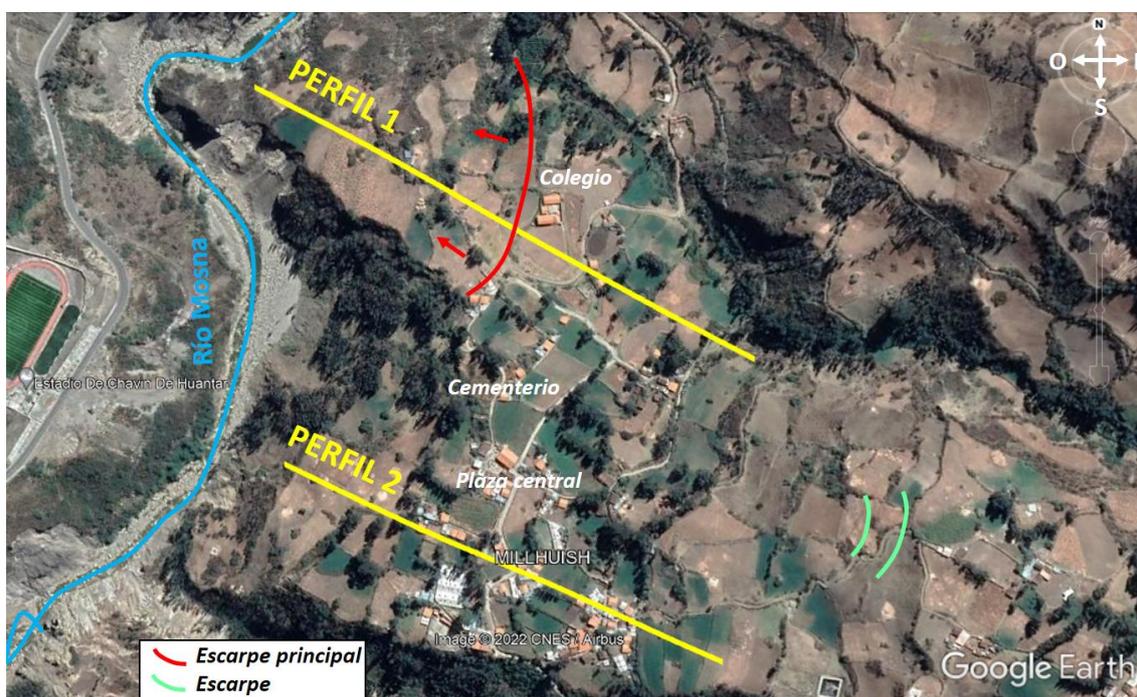


Figura 35. Ubicación y orientación de los perfiles 1 y 2 con dirección NO-SE.

- Asimismo, a lo largo del perfil el suelo presenta humedad hasta una profundidad de 30 metros en promedio. En algunos sectores próximos al colegio y a la altura de los escarpes, los suelos presentan mayor concentración de humedad, incrementando su inestabilidad.
- Los resultados del periodo del suelo muestran buena consistencia con los espesores identificados; es decir, el suelo de gran espesor

es relativamente constante a lo largo del perfil. Asimismo, el espectro HV con amplificación alta, sugiere suelos de menor consistencia, presentes en las proximidades del río Mosna principalmente.

Las características físicas mostradas en el perfil de suelo próximo al río Mosna (Figura 36), sumado al efecto de la gravedad y la inclinación del terreno, podrían ser los responsables de la aparición de escarpas, agrietamientos y del desarrollo de posibles deslizamientos a mayor escala.

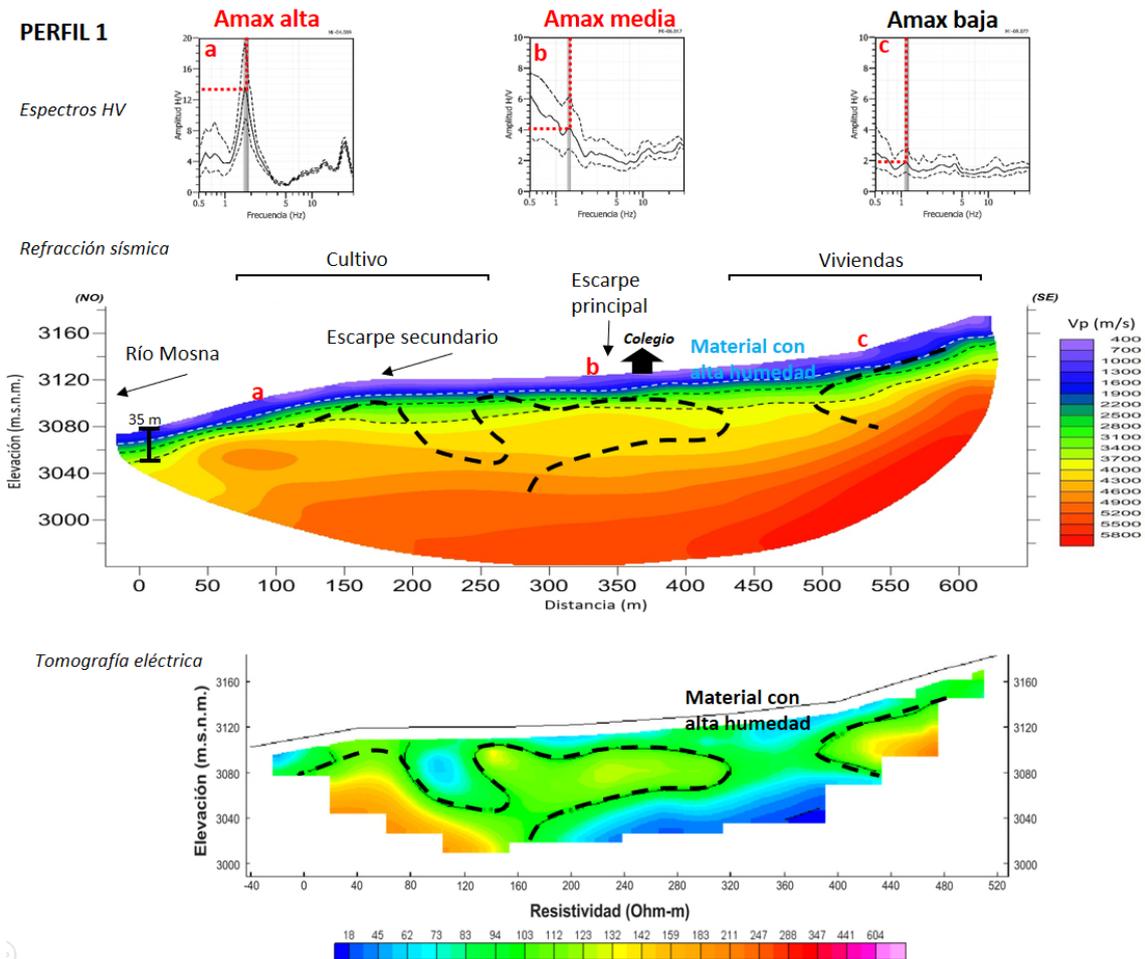


Figura 36. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos de tomografía eléctrica, refracción sísmica y vibración ambiental (espectros HV), para el Perfil 1.

Perfil 2

Con una orientación NO-SE (Figura 37), se inicia próximo al río Mosna para luego cruzar por la Plaza central en dirección a la ladera de la montaña. Las características de este perfil se describen a continuación:

- *A lo largo del perfil se ha identificado la presencia de suelos constituidos por materiales poco a medianamente consolidados en capas con espesores entre 20 y 40 metros, mostrando una tendencia a incrementarse en las proximidades del río Mosna y hacia la ladera de la montaña. Por debajo de esta capa, los suelos presentan características de roca fracturada y en profundidad la roca sana.*
- *Asimismo, a lo largo del perfil, el suelo presenta moderada humedad, estando la mayor concentración próxima al río Mosna y en la parte media del perfil (Plaza central), para luego incrementarse en profundidad.*
- *Los periodos del suelo indican que el espesor del suelo es relativamente constante a lo largo del perfil; mientras que los suelos con menor consistencia están presentes desde la Plaza central en dirección al río Mosna.*

De acuerdo a las características físicas identificadas en el perfil, los suelos con mayor concentración de humedad se encuentran en la parte media del perfil que sumado a su baja consistencia, permiten la formación de grietas y escarpes que podrían dañar a las viviendas (durante la inspección en campo no se observó en superficie).

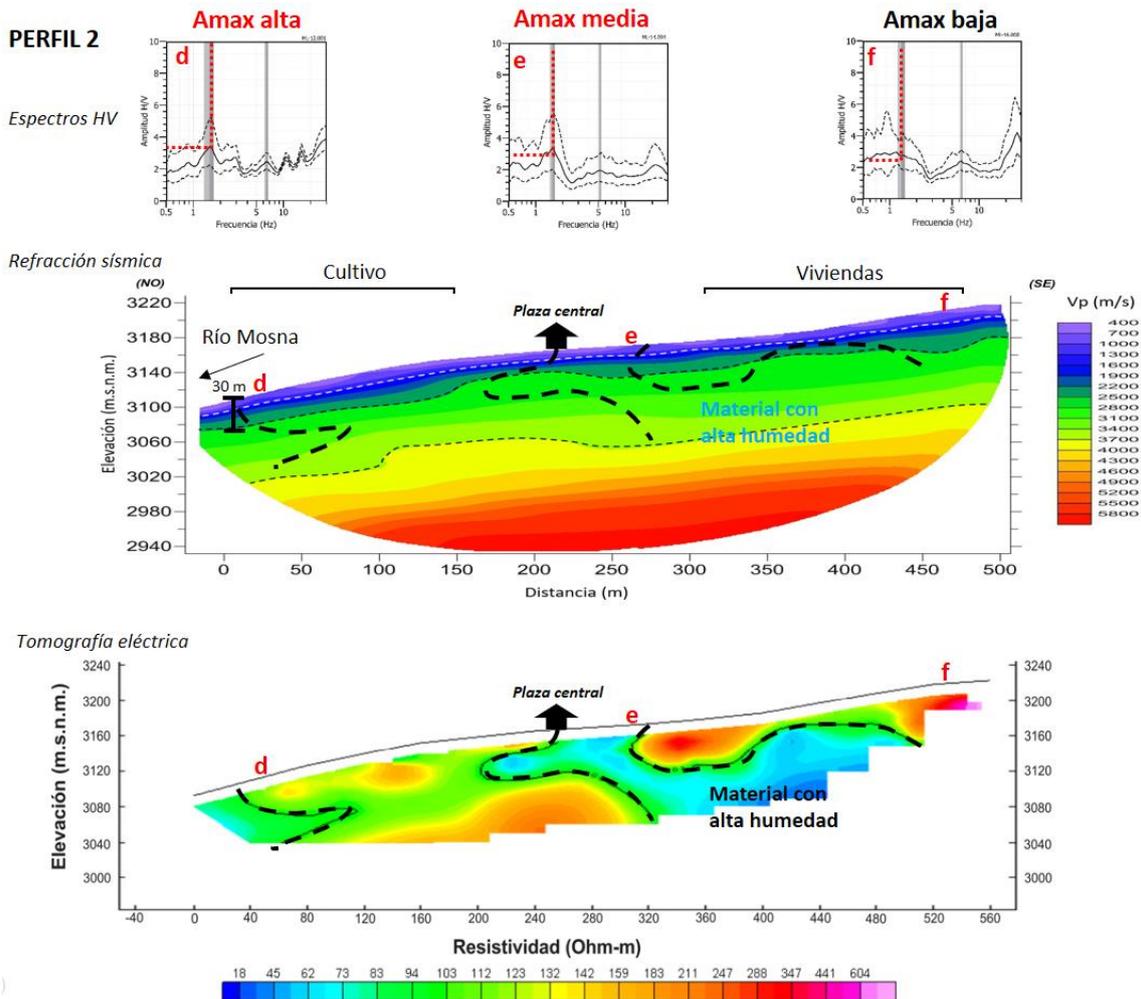


Figura 37. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos de tomografía eléctrica, refracción sísmica y vibración ambiental (espectros HV), para el Perfil 2.

En general, los suelos en el Caserío Millhuish, a nivel superficial, presentan baja compactación y/o densidad media al estar constituidos por materiales heterogéneos; mientras que, por debajo corresponde a la roca fracturada y roca sana a mayor profundidad. Asimismo, se ha identificado la presencia de humedad a diferentes niveles de profundidad del suelo, en algunos puntos con mayor concentración encontrándose por la Plaza central y el Colegio.

4.2. Mapa de Iso-espesores

Para el Caserío Millhuish, se genera el mapa de Iso-espesores considerando las dos primeras capas sísmicas consideradas como suelo poco

a medianamente consolidado y en algunos sectores, como roca muy fracturada. Ambas se asientan sobre material con mayor densidad por corresponder a roca fracturada y roca sana a mayor profundidad.

En la Figura 38, se muestra el mapa de Iso-espesores y en ella se observa que el espesor del suelo varía entre 22 y 66 metros, estando los mayores espesores en 03 sectores. El primero, desde la altura del colegio hacia el extremo noroeste con tendencia a incrementar su espesor en dirección al río Mosna. En este sector, los suelos presentan agrietamientos y escarpes mostrando cambios significativos en la forma de la superficie, lo cual evidencia que el suelo se está desplazando.

El segundo sector considera la Plaza central hacia el extremo Sur, mostrando tendencia a incrementar su espesor en dirección a la quebrada que limita el área de estudio. En este sector, durante el reconocimiento in situ, no se ha identificado la presencia de grietas y/o escarpes en la superficie; sin embargo, el suelo al ser parte del talud y presentar baja compactación, podría dar origen a deslizamientos.

El tercer sector considera la Plaza central hacia la ladera de la montaña en dirección Este, considerando que en esta misma dirección se incrementa el espesor de la capa. En la parte media de la ladera se ha identificado la presencia de escarpes, que, sumado al espesor del suelo, definen un sector con suelos poco estables. Ante un eventual deslizamiento del material en dirección Oeste, el área urbana en el caserío Millhuish sería severamente afectados.

En la zona de estudio, las capas de suelos con menores espesores, entre 20 y 25 metros se encuentran entre el Colegio y la Plaza central. El subsuelo en este sector en forma de cuña, estaría soportando todo el material que forma parte de la ladera y que se encuentra poco estable.

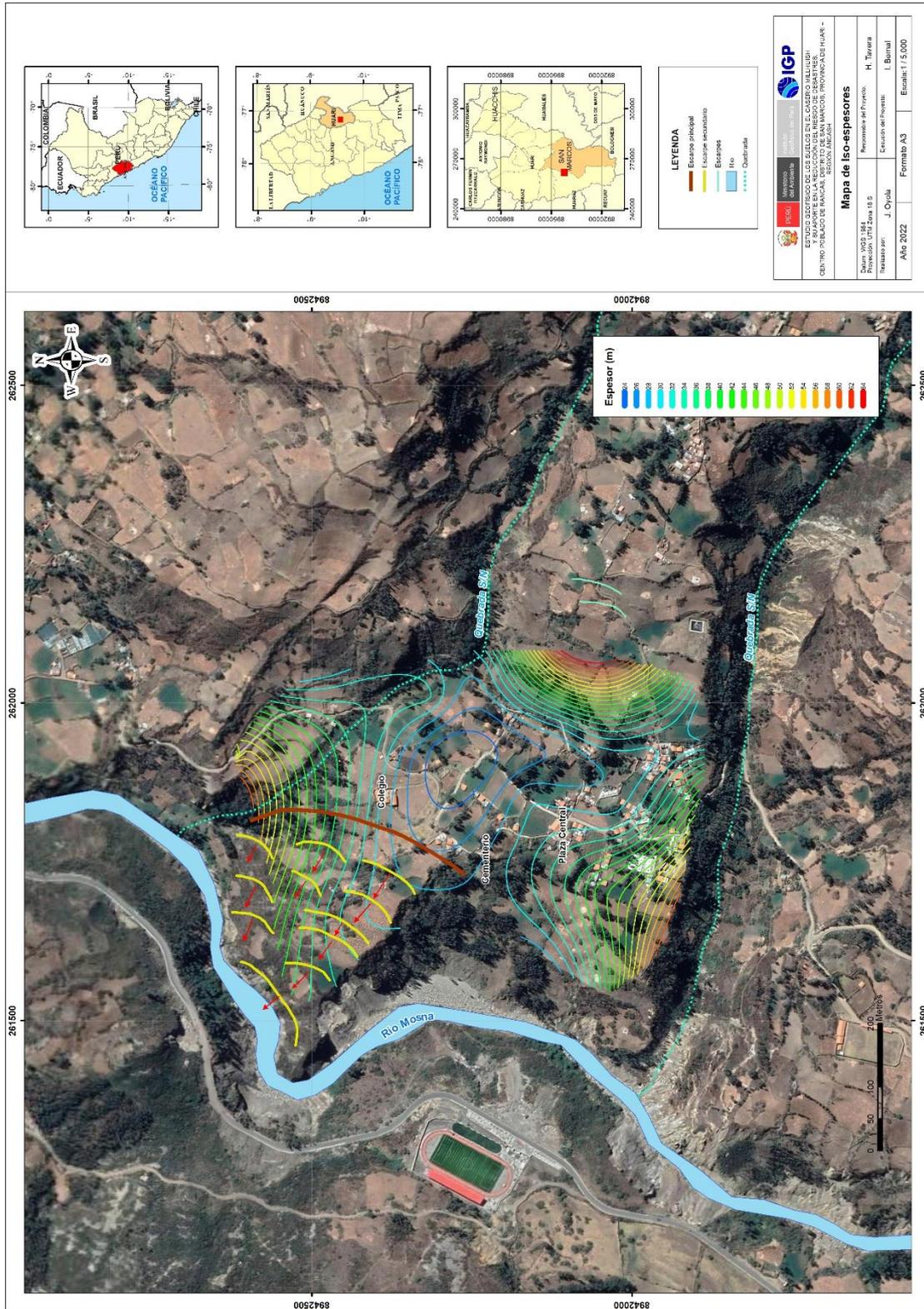


Figura 38. Mapa de Iso-espesores para el área de estudio, Caserío Millhuish.

4.3. Zonas de peligro por deslizamiento

La aplicación de métodos geofísicos para evaluar el comportamiento dinámico de los suelos en el Caserío Millhuish, ha permitido identificar espacialmente y delimitar la ubicación de los suelos estables y de los inestables ante la ocurrencia de asentamientos diferenciales y/o deslizamientos en dirección al río Mosna. Para el Caserío Millhuish, el análisis de los resultados se realiza de acuerdo a la Figura 39:

Las zonas con alto peligro por deslizamiento están presentes en la mayor parte del área de estudio del Caserío Millhuish, sin embargo, en algunos sectores el peligro es mayor y en la Figura 39 pueden ser distinguidos por la intensidad del color rojo. Estos sectores corresponden a suelos poco compactos en capas de mayor espesor y con mayor concentración de humedad que ante la ocurrencia de sismos podrían generar niveles altos de sacudimiento del suelo y/o deslizamientos debido a lluvias extremas. En este sentido, los suelos altamente susceptibles a deslizarse se encuentran en su mayoría próximos al río Mosna. Estos lugares forman parte de la terraza aluvial con una inclinación y/o pendiente entre 25° y 35°, contribuyendo a la inestabilidad del suelo.

Por otra parte, hacia el extremo Este en dirección de la ladera de la montaña, existe un sector con suelos en capas de gran espesor que también muestran un alto peligro por deslizamiento, puesto en evidencia con la presencia de escarpes identificados durante la inspección en campo. La generación de un posible deslizamiento del suelo de este sector, podría afectar significativamente el área urbana del Caserío Millhuish.

Los resultados obtenidos permiten definir que los suelos próximos al río Mosna, se encuentran inestables y susceptibles a generar

deslizamientos, puesto en evidencia con la presencia de escarpes. Un eventual deslizamiento, podría desencadenar una secuencia de deslizamientos desde la parte más alta y que en conjunto, obstruirían y represarían el agua del río Mosna, tal como se aprecia en la Figura 40.

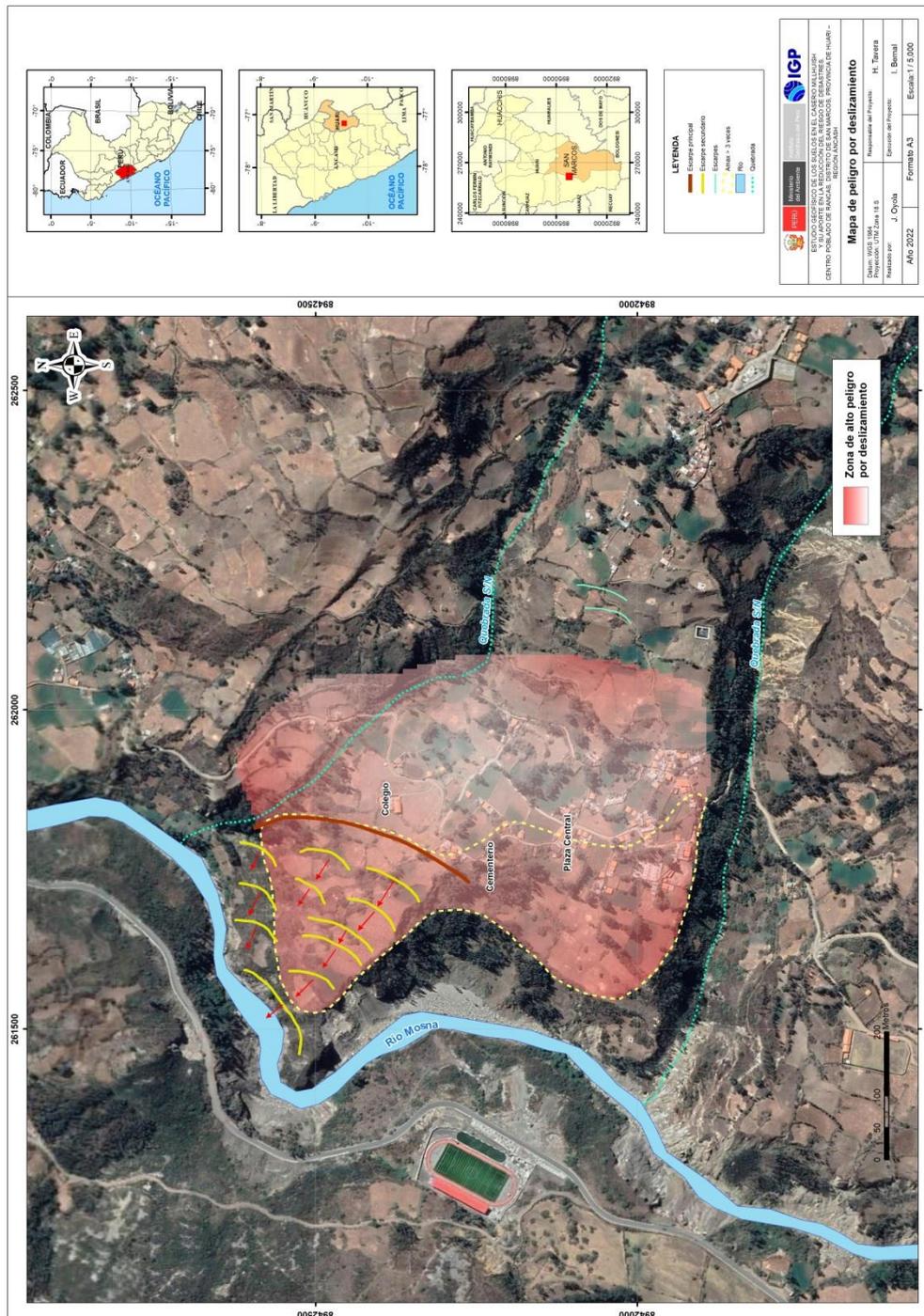


Figura 39. Delimitación de la zona con alto peligro por deslizamiento. Las zonas con mayor peligro corresponden a la coloración con mayor intensidad.



Figura 40. Agrietamiento y desplazamiento del material en dirección al río Mosna.

CONCLUSIONES

El análisis y evaluación geofísica del Caserío Millhuish en el Centro Poblado de Rancas, distrito de San Marcos, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- *Se ha observado que la capa compuesta por suelos sueltos a medianamente compactos están presentes en toda el área de estudio. Los suelos con menor consistencia en capas de 45 metros de espesor se encuentran presentes próximos al río Mosna y áreas de cultivo; y de hasta 30 metros debajo del área urbana. A mayor profundidad se encuentran los materiales compactos a muy compactos. Particularmente y de forma local, los suelos presentes en los primeros 10 metros desde la superficie, presentan baja consistencia en toda el área de estudio lo cual favorece a la inestabilidad del suelo dando origen a la generación de escarpes.*

- *En el área de estudio, la humedad se encuentra presente a diferentes niveles de profundidad del suelo, estando la mayor concentración en las proximidades del río Mosna y a la altura del Colegio y la Plaza central.*

- *Se ha identificado que los eventos geodinámicos más recurrentes en el área de estudio son los deslizamientos rotacionales. La inspección geodinámica in situ permitió identificar que toda el área de estudio es afectado por estos eventos, siendo más recurrente en los extremos orientales y occidentales, y que han provocado la presencia de agrietamientos de hasta 12 cm en paredes de viviendas y de hasta 40 cm en superficie*

- *Finalmente, en toda el área de estudio está presente el peligro por deslizamiento, pero con mayor probabilidad en emplazados próximos al río Mosna, hacia la quebrada ubicada al Sur y hacia el Este (suelos que forman parte de la ladera de la montaña). Los suelos que presentan baja compactación con grandes espesores y con alto contenido de humedad, se*

encuentran próximos al río Mosna, todo ello sumado a la inclinación de la superficie y al efecto de la gravedad, los suelos son susceptibles a generar movimiento de material y la aparición de escarpes. Durante el trabajo de campo in situ, se ha identificado la presencia de escarpes en superficie, desde el colegio en dirección al río Mosna, lo cual evidencia que el suelo se está moviendo y podría generar un gran deslizamiento.

RECOMENDACIONES

La evaluación geofísica en el Caserío Millhuish, ha permitido realizar las siguientes recomendaciones:

•Mejorar el sistema de drenaje pluvial para evacuar las aguas de escorrentía generadas por ocurrencia de precipitaciones pluviales para así, evitar el asentamiento del suelo producto de la infiltración del agua de escorrentía y generar futuras grietas. Asimismo, implementar un sistema de riego adecuado y dejar la práctica de riego por inundación, esto evitará la saturación del suelo.

•Se sugiere reforzar los enrocados ubicados en la vía de acceso al área de estudio que cumplen la función de estabilizar partes de las laderas susceptibles a deslizarse.

•De realizarse cimentaciones y/o muros de contención en zonas de ladera, es necesario se tenga en cuenta el espesor de los suelos identificado en este estudio.

•Finalmente, de acuerdo a los resultados, se sugiere tomar acciones que permitan lograr mantener la estabilidad del suelo, en caso contrario y para mayor seguridad, se sugiere la reubicación del caserío, debido a que se encuentran expuesto al peligro por deslizamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro et al. (2014). Estimación de umbrales de precipitaciones extremas para la emisión de avisos meteorológicos, Boletín Técnico SENAMHI, pp135.
- Fidel, L., Zavala, B., Núñez, S., Valenzuela, G. (2006). Estudio de riesgos geológicos del Perú, Franja N° 4. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 29. 383 p.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Carta Geológica del Perú, Serie A. INGEMMET, Mapa geológico del Cuadrángulo de Recuay (20-i)
- Loke M.H. (1996-2004). Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys
- Marríos A. Sánchez-Sesma F. (2015). Full microtremor H/V (Z:f) inversion for shallow subsurface characterization. Geophysical Journal International.
- Nakamura, Y. (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface, Quaterly Report of Railway Technical Research Institute, 30(1):25-33.
- Orellana, E (1982): "Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua". 2ª ed. Madrid: Paraninfo Volumen 1.
- Quintana A. (2013) Aplicación de la Tomografía Eléctrica en la Caracterización del Deslizamiento de Doña Mencía. Tesis de grado para optar el título de maestría en Geofísica y Meteorología. Universidad de Granada, España.
- Reynolds, J.M. (2011). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2nd ed., 712 pp.
- Richards B.G. (1985). "Geotechnical aspects of Residual Soils". Southeast Asian Geotechnical. Society, Scorpion Press, Hong Kong.

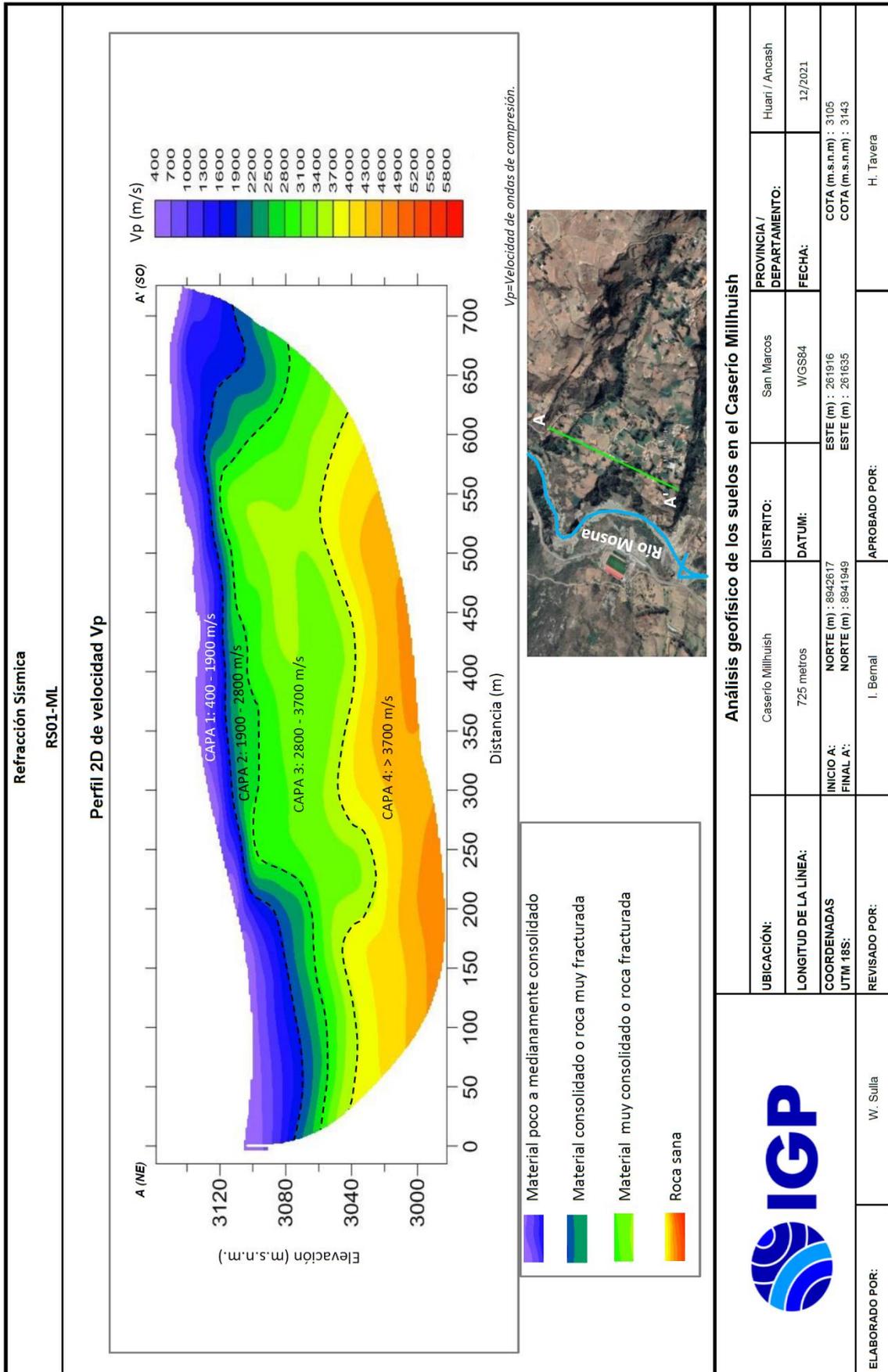
Sandoval V. (2013): Estudio de la robustez de la estimación espectral de la técnica h/v de Nakamura para estudios de caracterización dinámica de suelos.

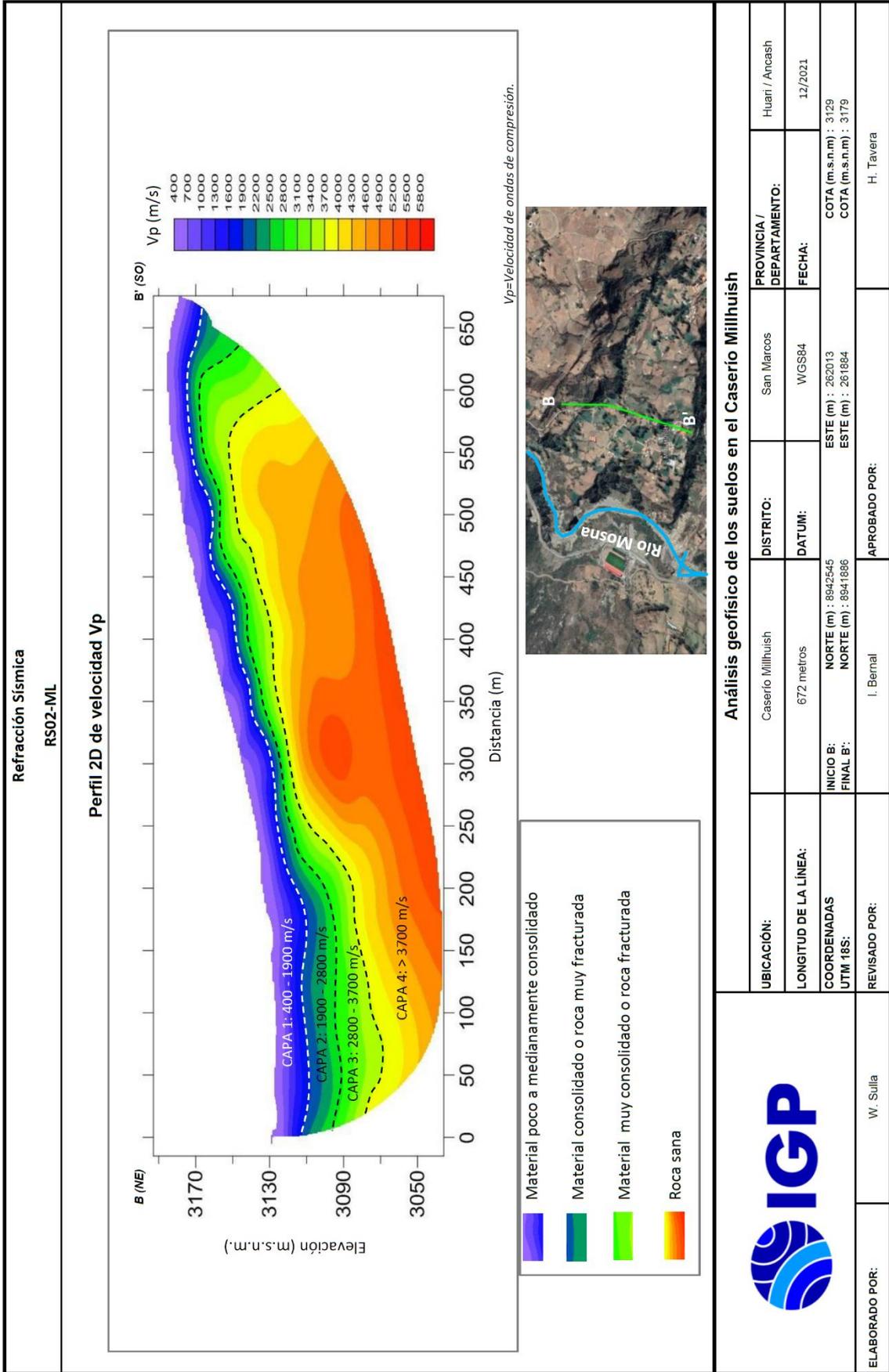
SESAME (2004). Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations, Research Report WP12, Available online at: <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm>.

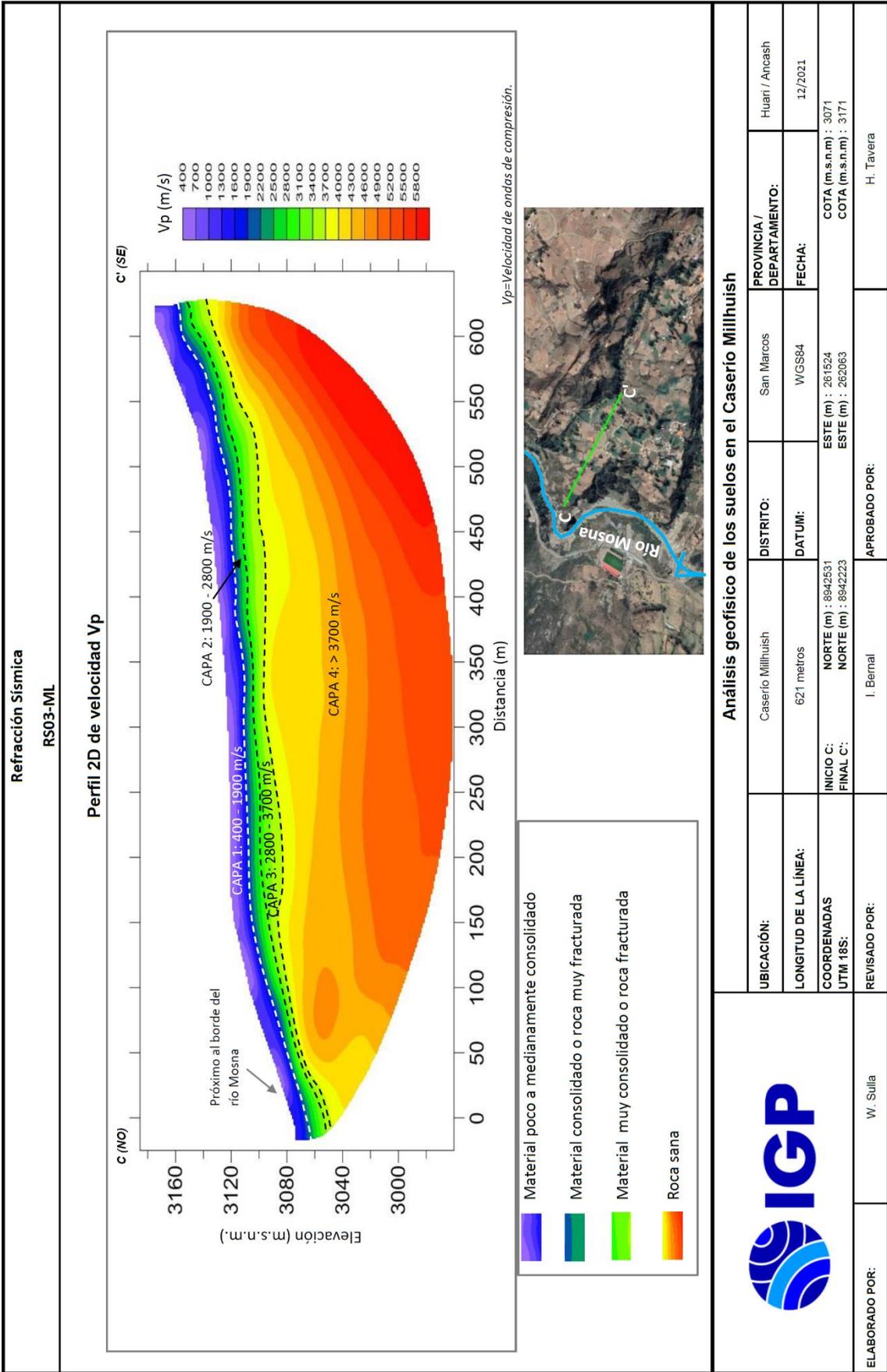
Telford W.M, Geldart L.P. and Sheriff R.E. (1990). Applied Geophysics. 2^a ed. New York: Cambridge University Press.

ANEXO I

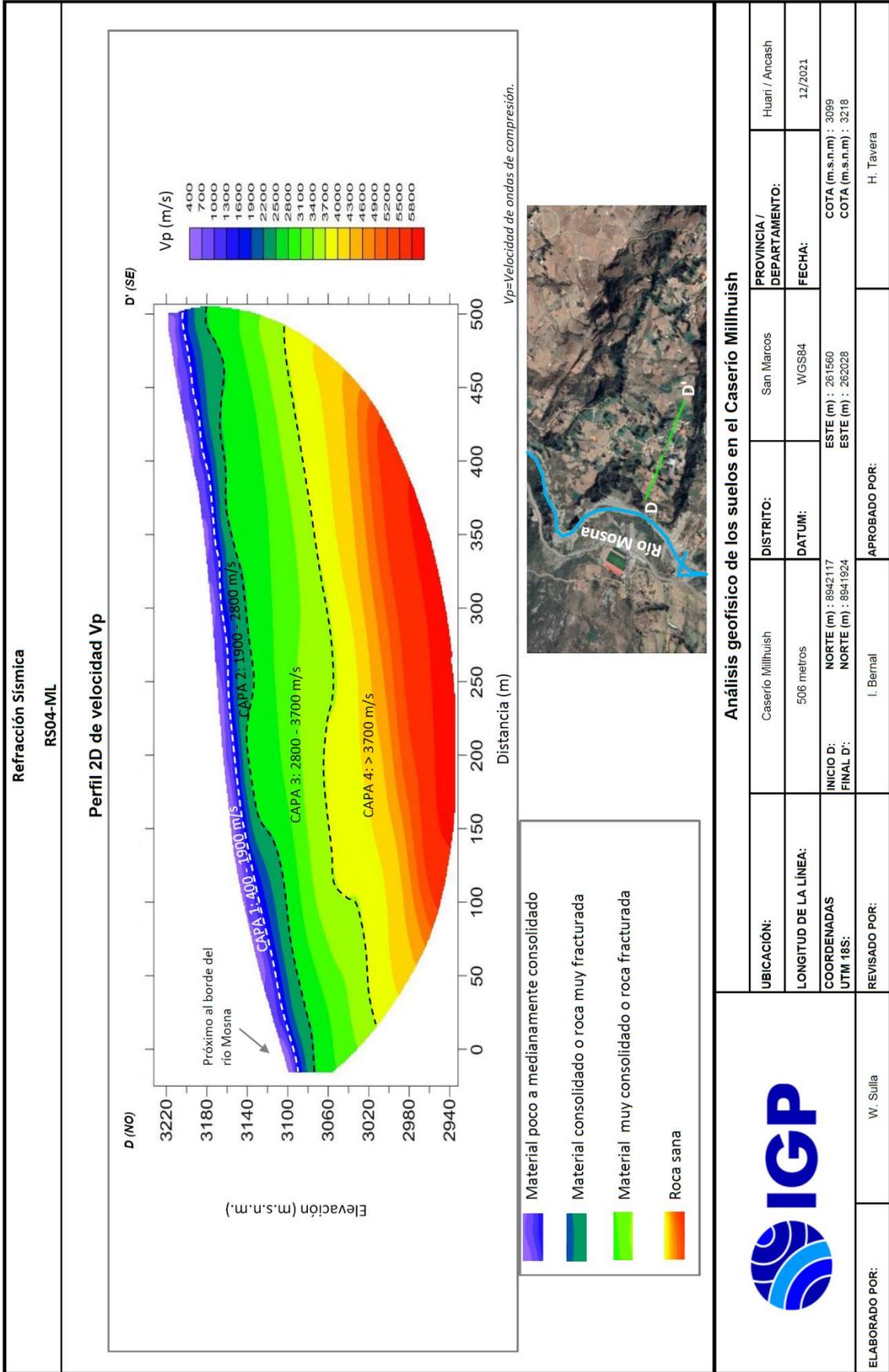
Secciones de Refracción Sísmica

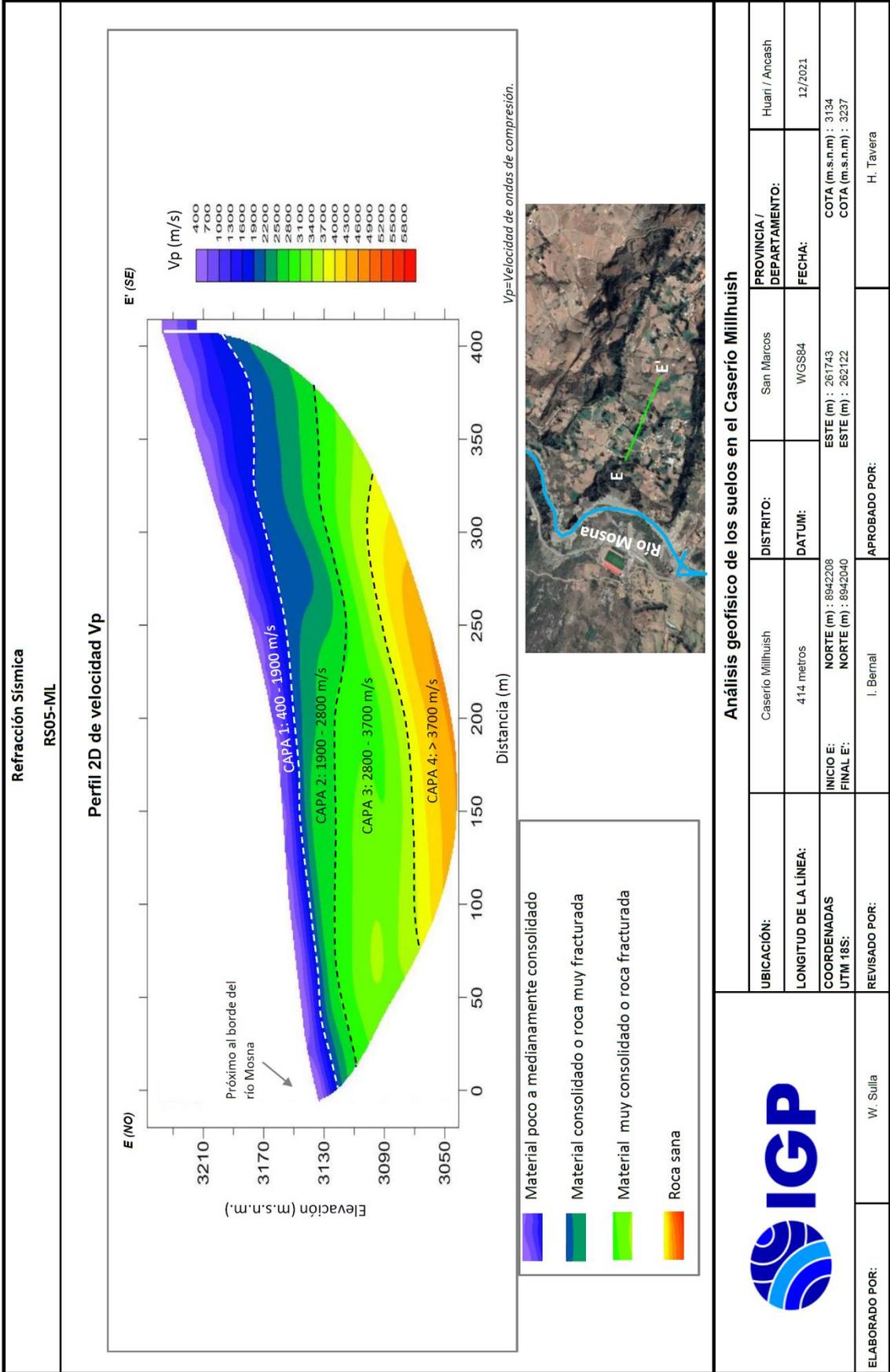






Análisis geofísico de los suelos en el Caserío Millhuish			
UBICACIÓN:	Caserío Millhuish	DISTRITO:	San Marcos
PROVINCIA / DEPARTAMENTO:	Huari / Ancash	DATUM:	WGS84
LONGITUD DE LA LÍNEA:	621 metros	FECHA:	12/2021
COORDENADAS UTM 18S:	INICIO C: NORTE (m) : 8942531 FINAL C: NORTE (m) : 8942223	ESTE (m) :	261524
REVISADO POR:	I. Bernal	ESTE (m) :	262063
ELABORADO POR:	W. Sullia	COTA (m.s.n.m) :	3071
		COTA (m.s.n.m) :	3171
		APROBADO POR:	H. Tavera



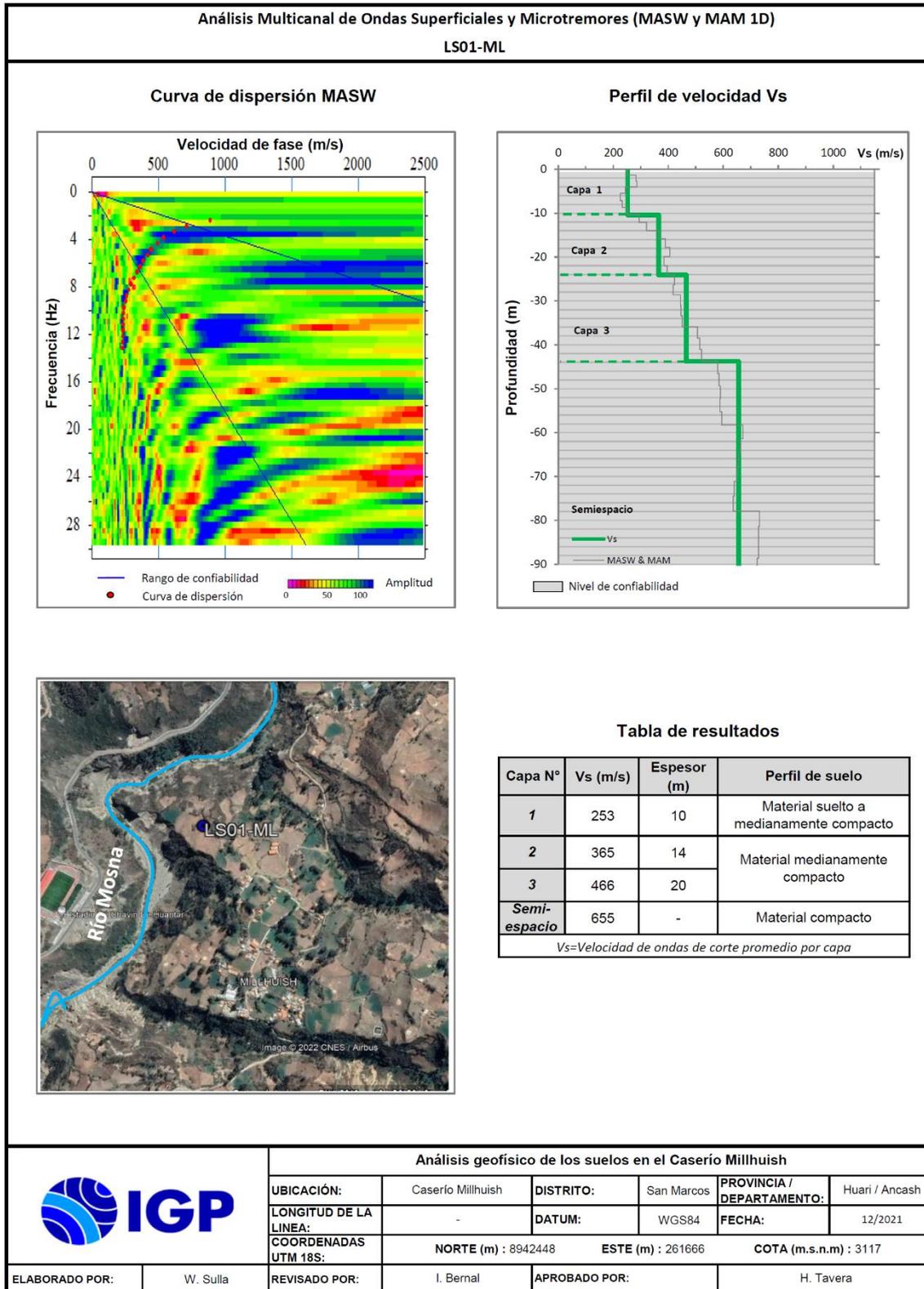


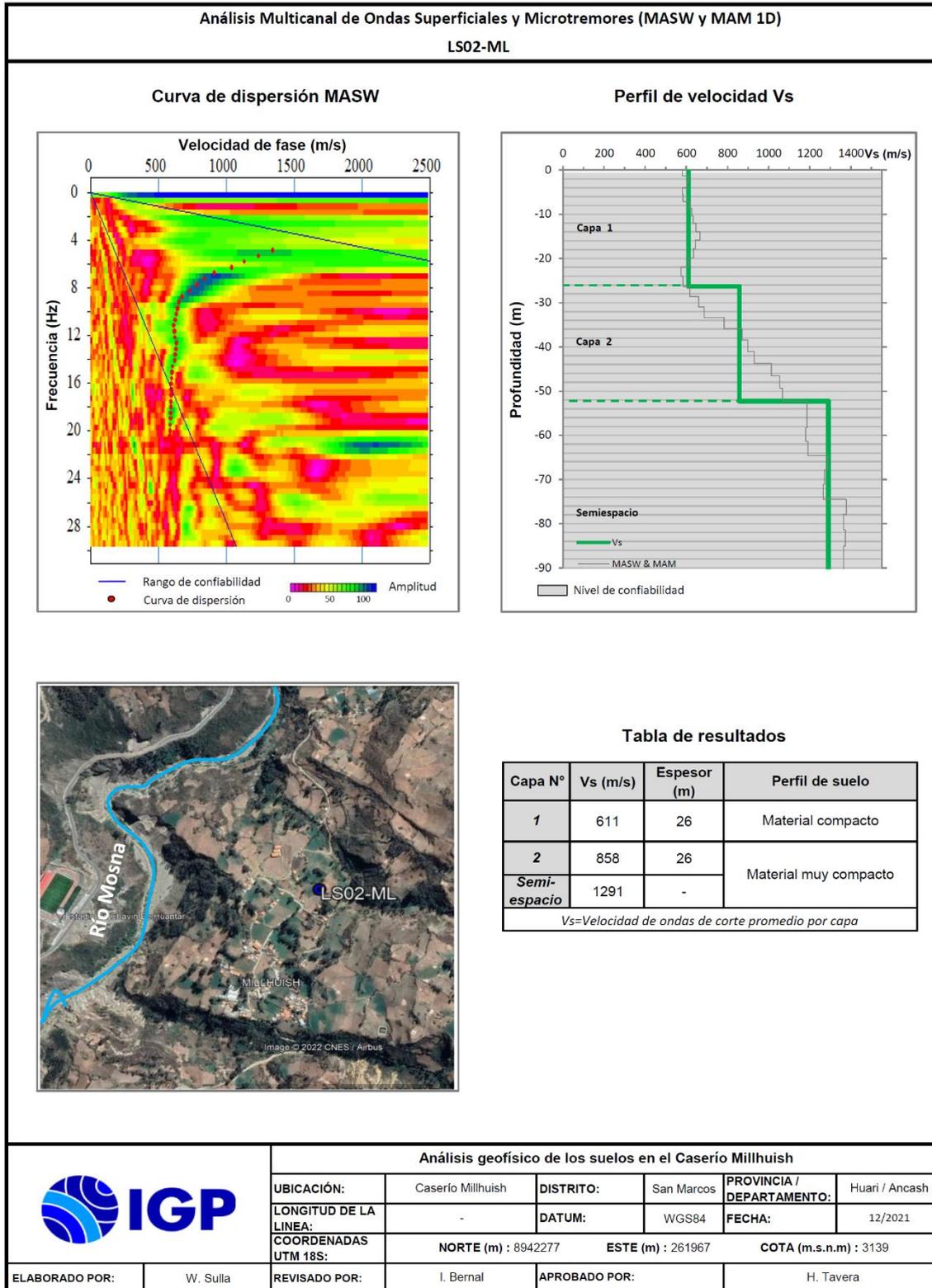
Análisis geofísico de los suelos en el Caserío Millhuish

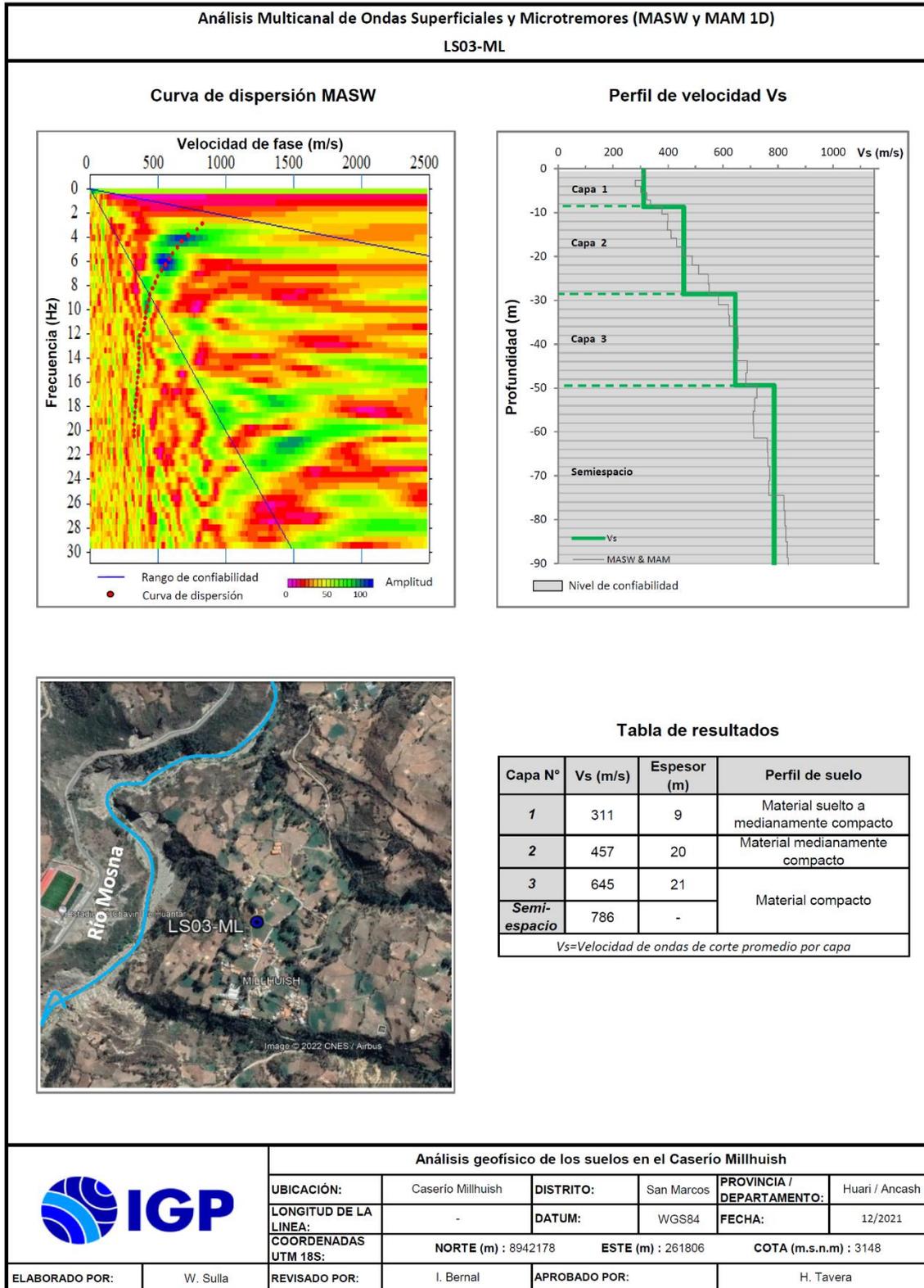
	UBICACIÓN:		Caserío Millhuish	San Marcos	PROVINCIA / DEPARTAMENTO:	Huari / Ancash
	LONGITUD DE LA LÍNEA:		414 metros	WGS84	FECHA:	12/2021
ELABORADO POR: W. Sullia	COORDENADAS UTM 18S:		NORTE (m) : 8942208 NORTE (m) : 8942040	ESTE (m) : 261743 ESTE (m) : 262122	COTA (m.s.n.m) : 3134 COTA (m.s.n.m) : 3237	
	REVISADO POR:		I. Bernal	APROBADO POR: H. Tavera		

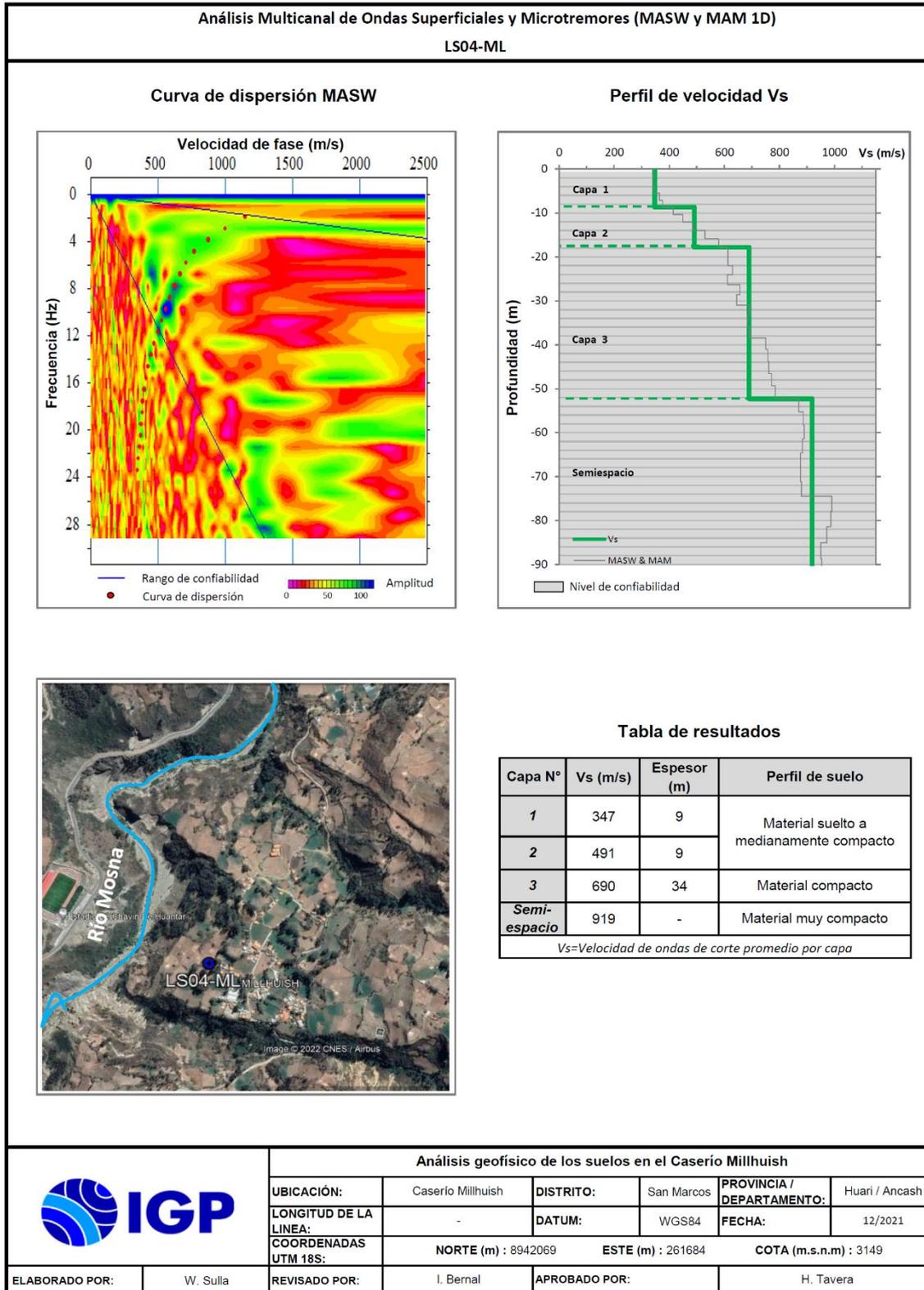
ANEXO II

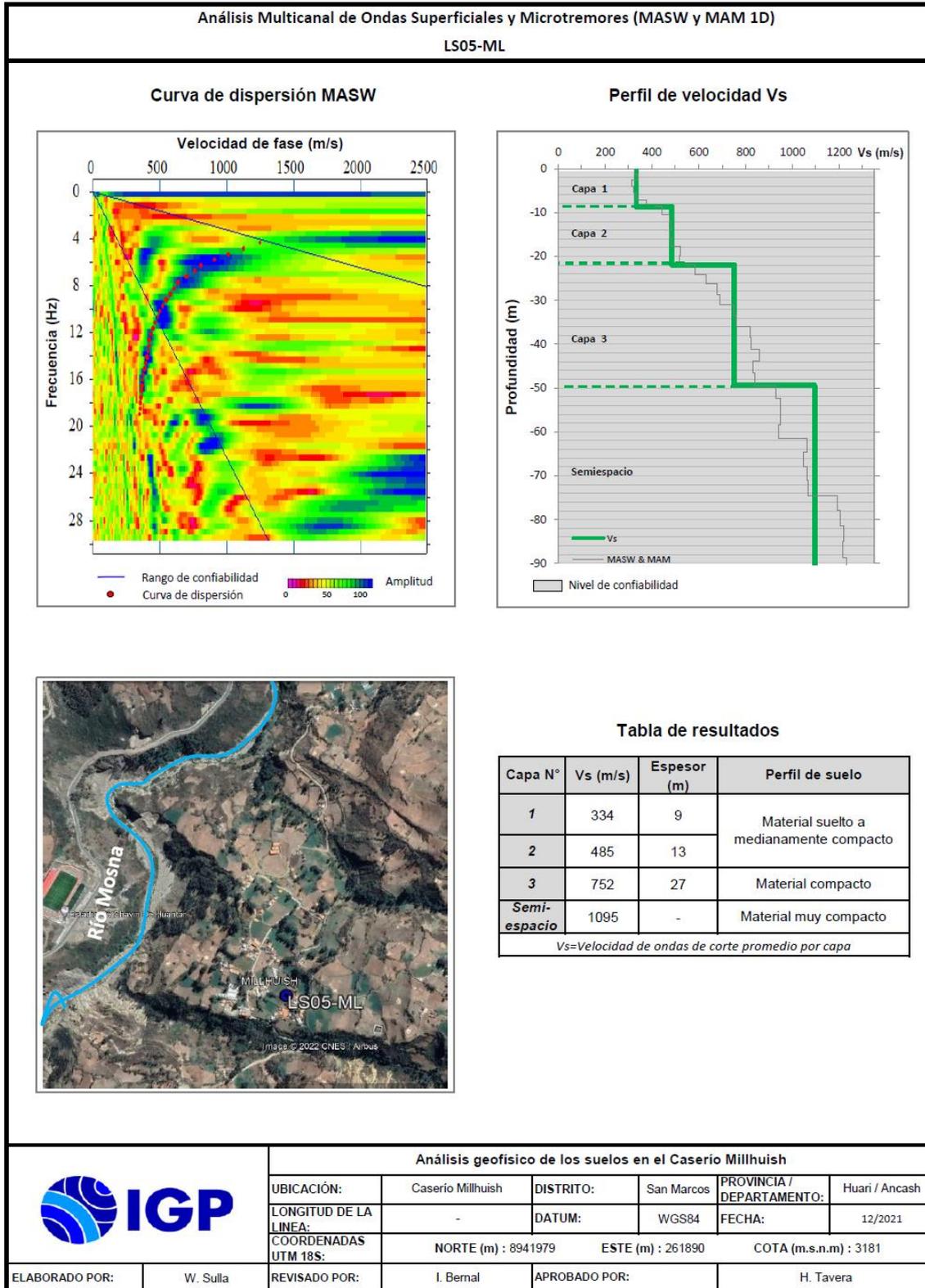
Perfiles MASW y MAM.





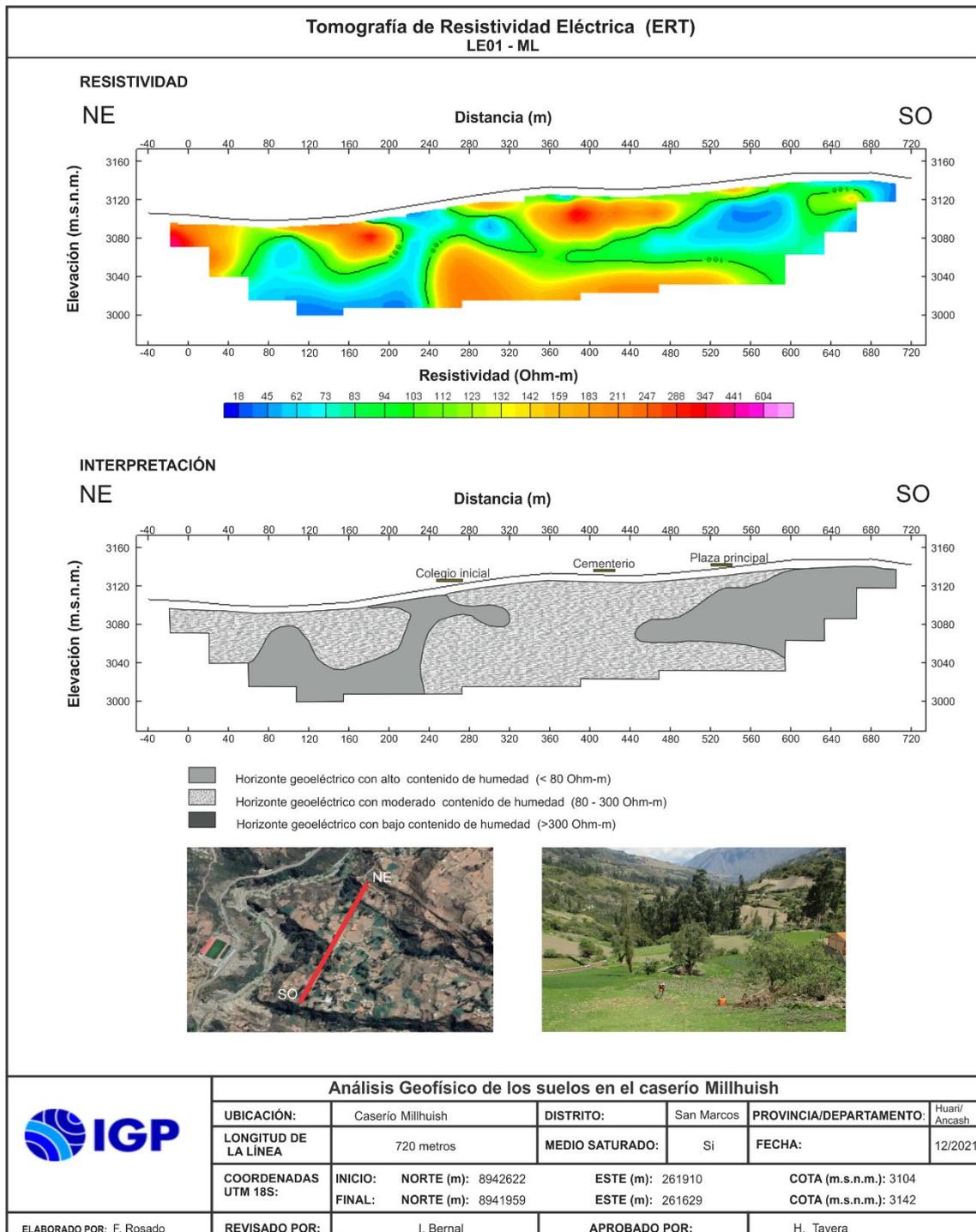


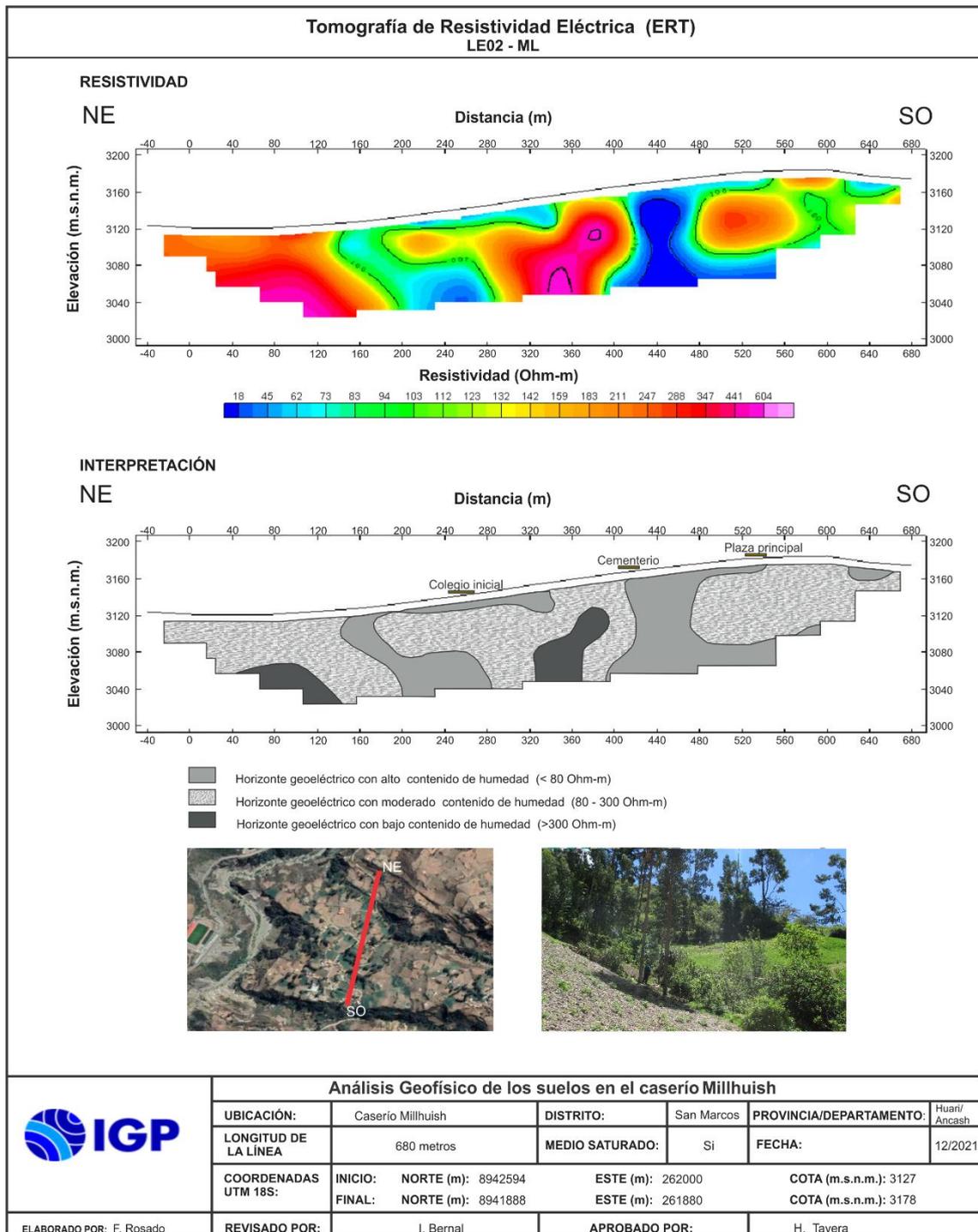


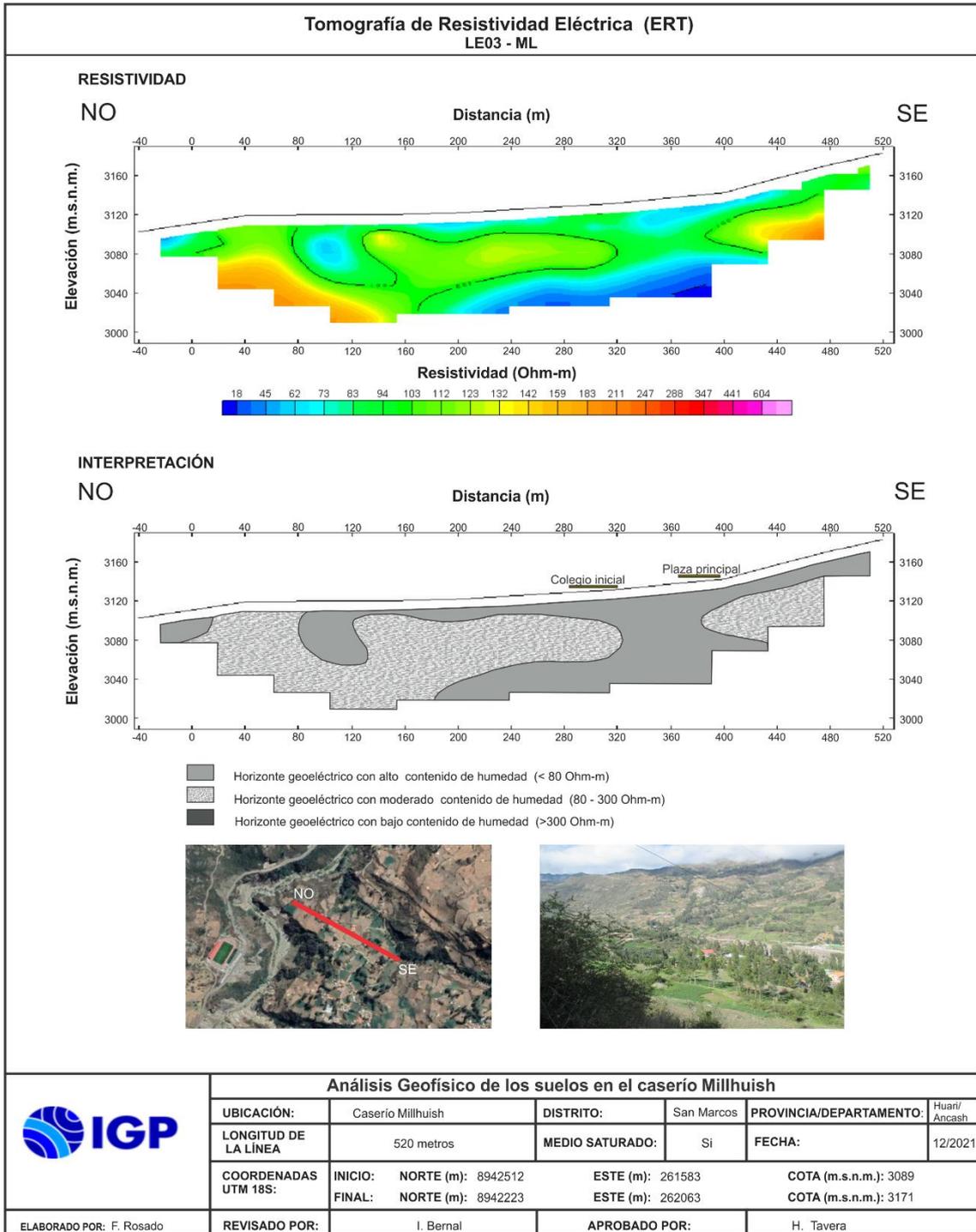


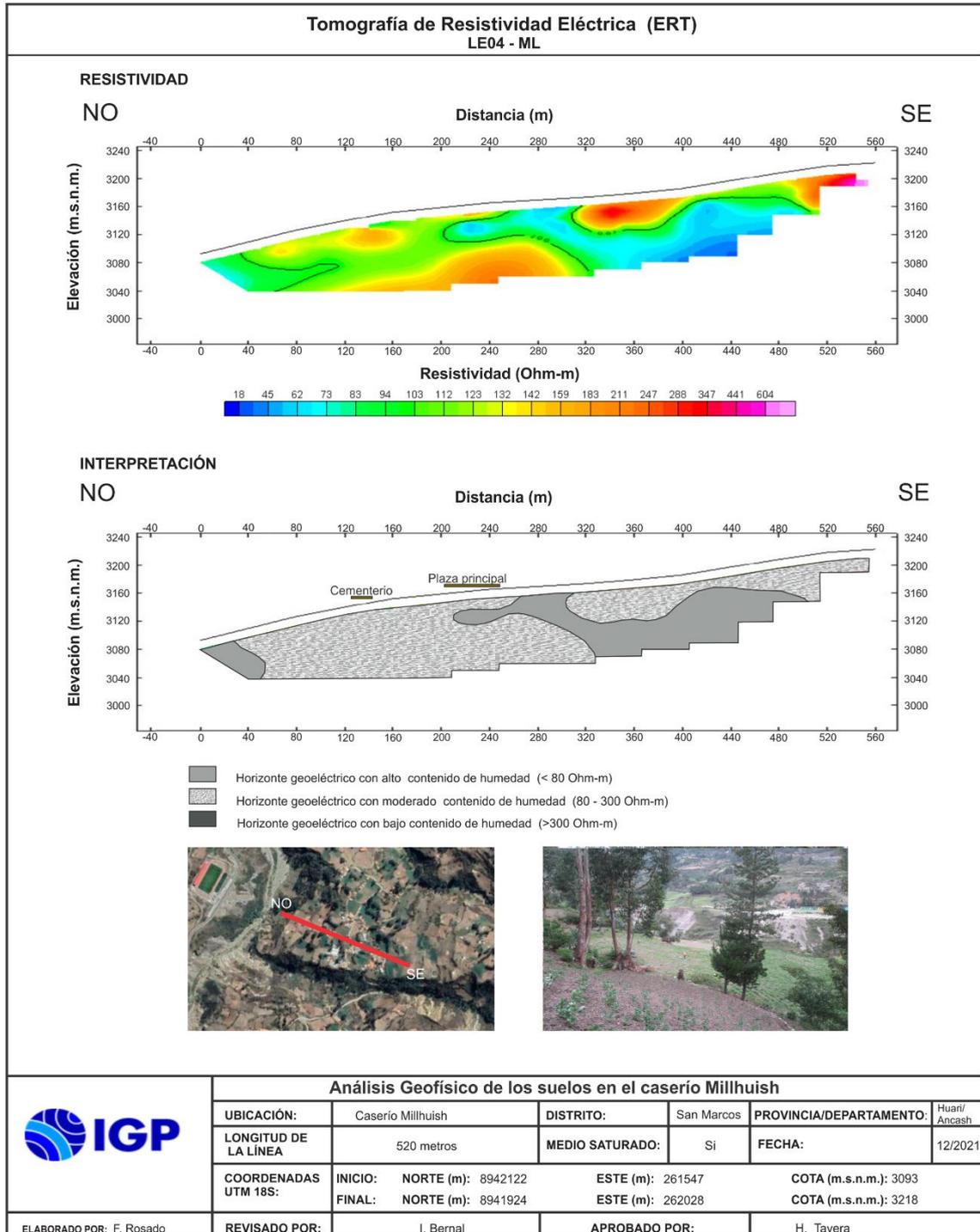
ANEXO IV

Secciones geoelectricas









MAPAS TEMÁTICOS

