



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



ESTUDIO GEOFÍSICO DE SUELOS EN EL CP CHALLHUAYACO Y SU APORTE EN LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES (Provincia de Huari – Región Ancash)

Informe Técnico N°007-2022/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Febrero, 2022

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Estudio Geofísico de suelos en el CP Challhuayaco y su aporte en la reducción del riesgo de desastres (Distrito de San Marcos, Provincia de Huari, Región Ancash)

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: Mariana Vivanco / Juan Carlos Gómez.

Apoyo técnico: SGA Geofísica.

Apoyo logístico: Robert Yupanqui / Augusto Cárdenas.

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

**ESTUDIO GEOFÍSICO DE SUELOS EN EL CP CHALLHUAYACO Y SU
APORTE EN LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES.**

**DISTRITO DE SAN MARCOS, PROVINCIA DE HUARI
(REGIÓN DE ANCASH)**

Lima - Perú
Enero, 2022

RESUMEN

Se analiza y evalúa el comportamiento dinámico de los suelos del Centro Poblado Challhuayaco del distrito de San Marcos, a partir de la aplicación de técnicas geofísicas. Los resultados obtenidos evidencian el predominio de suelos poco a medianamente consolidados (suelos coluviales) formando capas de 40 metros de espesor hacia el extremo norte del Centro Poblado (parte baja de la ladera) y de 60 metros hacia su extremo sur (parte alta de la ladera). Estos suelos presentan humedad hasta una profundidad promedio de 20 metros, la misma que se incrementa en la zona céntrica del área de estudio, por el sector de la Municipalidad, Puesto de Salud y la Institución Educativa. A la ocurrencia de lluvias extremas y/o a un sismo de modera a mayor magnitud, sumado a la inclinación del terreno y al efecto de gravedad, estos suelos podrían dar origen a deslizamientos de grandes volúmenes de tierra.

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.- Zonas de peligro por deslizamiento

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO I. Secciones de Refracción Sísmica

ANEXO II. Perfiles MASW y MAM.

ANEXO III. Secciones geoelectricas

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 Geofísico de suelos en el Centro Poblado Challhuayaco y su aplicación para la Gestión del Riesgo de Desastres". 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 Centro Poblado Challhuayaco (distrito de San Marcos, provincia de Huari, región de Ancash), los suelos vienen desplazándose en dirección a la quebrada Pacchac, formando grietas y escarpes en la superficie. Este desplazamiento identificado en la parte baja y media de la ladera, viene generando daños estructurales en las viviendas del lugar, quedando en algunos casos como inhabitables.

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 emplea 4 métodos geofísicos: Refracción Sísmica (RS), Tomografía Eléctrica (ERT), MASW-MAM y Vibración Ambiental (HV).

En el área del Centro Poblado Challhuayaco, la aplicación de estos métodos geofísicos permitirá determinar las características físicas y dinámicas de los suelos, así como explicar el origen de los desplazamientos que vienen ocurriendo en el tiempo, siendo importante considerar 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 posible ocurrencia de sismos y/o lluvias extremas.

El Centro Poblado Challhuayaco (Figura 1), se encuentra ubicado en una cota promedio de 3500 m.s.n.m. A la fecha presenta una población de

719 habitantes que ocupan viviendas construidas con material rustico (adobe o tapial), tal es el caso del local municipal, el Puesto de Salud y la Institución Educativa N° 86383 (inicial, primaria y secundaria).



Figura 1. Vista de la Institución Educativa N° 86383, desde la parte alta en dirección a la quebrada Pacchac.

En la Figura 2, se presenta el mapa con la delimitación del área de estudio a escala 1:5000, y en la cual se indica la ubicación de los puntos de afloramiento de agua y de las grietas y escarpes de diferente longitud observados in situ. Asimismo, se identificó la ubicación de los suelos de relleno, depósitos de materiales diversos, zonas con asentamientos de terreno y principalmente, un gran número de viviendas de adobe/tapial con daños estructurales (Figura 3).

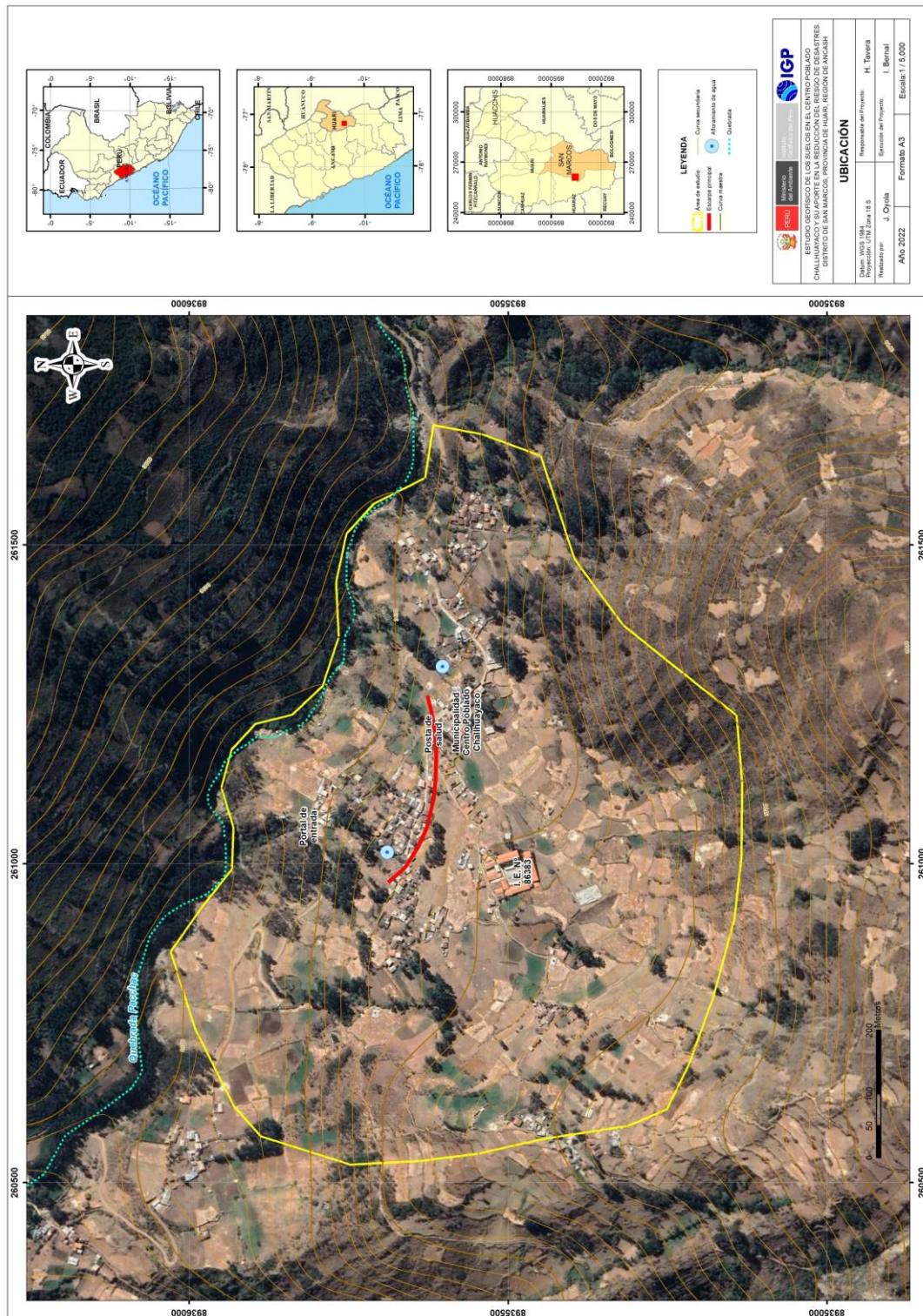


Figura 2. Mapa de ubicación del Centro Poblado Challhuayaco. Asimismo, se observa los puntos de afloramientos de agua (círculos celestes), el escarpe principal (línea roja) y los diferentes escarpes secundarios (líneas amarillas), todos identificados en campo.



Figura 3. Vivienda en la cual se muestra el desplazamiento de uno de sus muros como producto del empuje generado por el desplazamiento del suelo.

Según la Figuras 2, estas áreas críticas por el tipo de suelo se encuentran básicamente en la parte baja y media de la ladera, las mismas que con/sin presencia de humedad, vienen afectando la infraestructura física de las viviendas (Figura 3).

1.1. Estudios previos

En el 2019, la Municipalidad distrital de San Marcos ejecuta el proyecto “Evaluación de riesgo por movimiento de masa en la localidad de Challhuayaco, centro poblado de Challhuayaco del distrito de San Marcos –

provincia de Huari – región Ancash”. En este estudio se concluye que existe un riesgo Muy alto y se debe elaborar un Plan de Actividades para la reubicación de viviendas e infraestructuras de salud y educación, debiéndose realizar un plan de Reasentamiento Poblacional.

Asimismo, en el 2019 se ejecuta el “Estudio de mecánica de suelos con fines de estudio de riesgo”. Los resultados sugieren que en el área de estudio, predominan los suelos tipo grava y solo en un sector presenta suelos tipo arcillosos identificados en la parte posterior del colegio. Asimismo, se ejecutaron ensayos de corte directo donde la capacidad de carga admisible del terreno es baja, menor a 1.2 Kg/cm².

Por otra parte, se indica que durante los trabajos de campo, verificaron la existencia de reptación del suelo, aunque en las calicatas ejecutadas no se evidencio presencia de niveles freáticos, pero si la presencia de puquiales; sin embargo, estas pueden variar en épocas de precipitaciones en el área de estudio.

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 reconocimiento in situ.

2.1.- Geología local

El área de estudio se asienta sobre la formación Chimú conformada por la intercalación de areniscas y lutitas cubiertos por arcillas, limos y gravas arcillosas y limosas. Las unidades litológicas aflorantes en las inmediaciones del área de estudio a escala 1:5,000 (Figura 4) son:

-Formación Carhuaz (Ki-ca): conformada por areniscas grises intercaladas con lutitas negras y limolitas. Estos materiales afloran al extremo noroeste del Centro Poblado Challhuayaco; es decir, fuera del área de estudio del presente informe.

-Formación Santa (Ki-sa): integrada por calizas grises oscuras. Estos materiales están cubiertos por arcillas y gravas distribuidas en los extremos noroeste y suroeste del área de estudio.

-Formación Chimú (Ki-chi): constituido por areniscas intercaladas con lutitas de coloración gris oscuras. Estos materiales conforman la mayor parte del área de estudio y afloran en la parte alta de la ladera de montaña. En la parte media y baja de la ladera están cubiertos por materiales arcillosos, limosos y gravosos (Figuras 5 y 6).

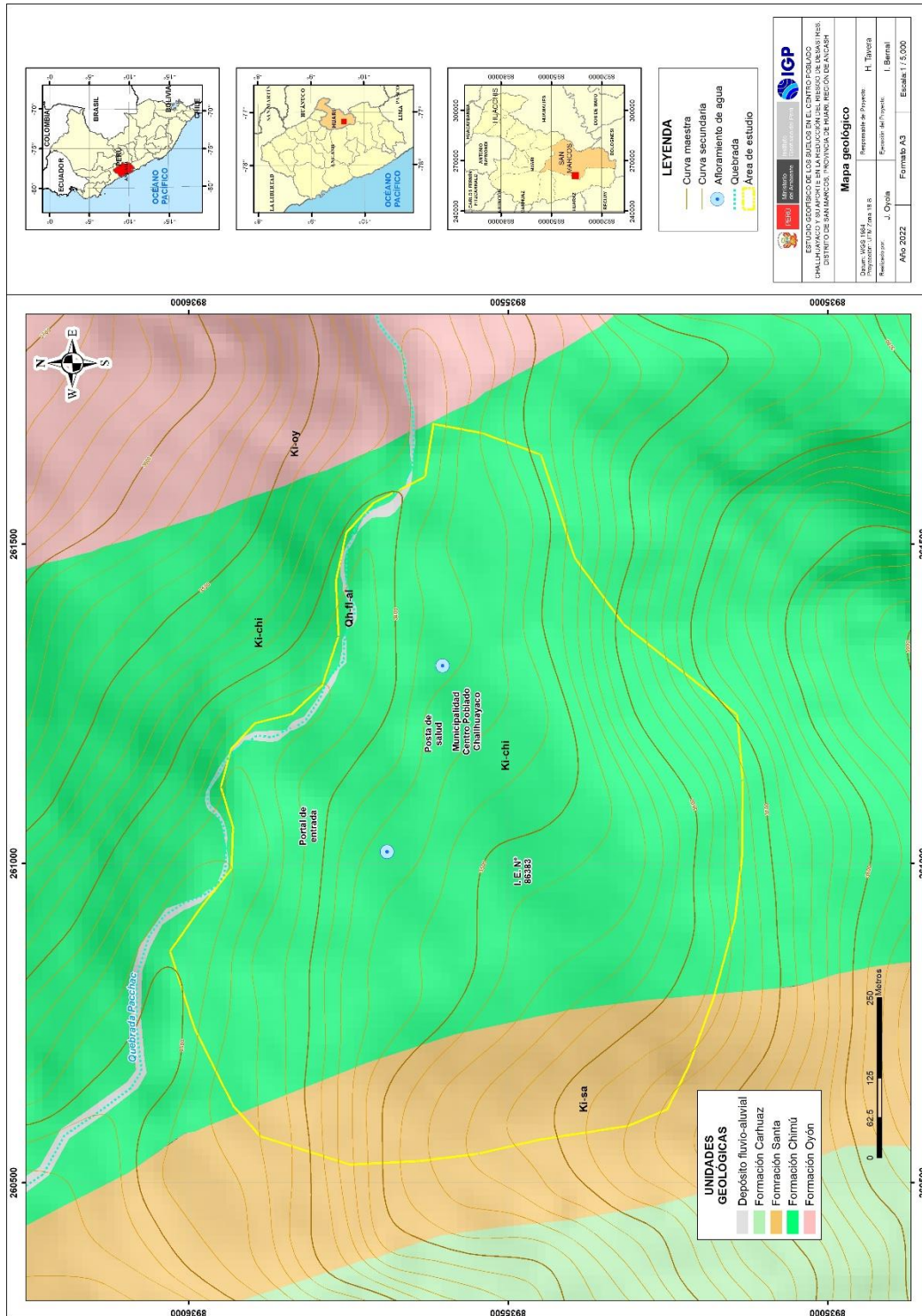


Figura 4. Unidades geológicas identificadas en las inmediaciones del área de estudio.



Figura 5. Afloramientos de areniscas intercaladas con lutitas que conforman el sustrato rocoso en el área de estudio



Figura 6. Arcillas y gravas con matrices arcillosas y limosas que cubren a la Formación Chimú, sobre este tipo de materiales se asienta el Centro Poblado Challhuayaco.

➤ **Formación Oyón (Ki- oy)**

Unidad geológica conformada por limolitas, lutitas gris oscuras intercaladas con areniscas amarillentas, gris a gris claras. Esta formación aflora al extremo noreste y se encuentra fuera del área de estudio.

➤ **Depósitos Fluvio-aluviales (Qh-fl-al)**

Materiales sueltos o inconsolidados que resultan de la dinámica de un cauce fluvial de régimen constante (quebrada), siendo reconocidos en

la parte baja del área de estudio, en la quebrada Pacchac. En épocas de precipitaciones descienden flujos aluviales de quebradas secundarias que confluyen en el cauce principal de la quebrada en mención, para luego desembocar en el río Mosna (Figura 7).



Figura 7. Materiales fluviales depositados en el cauce y materiales aluviales depositados a ambas márgenes de la quebrada Pacchac. Materiales resultantes de flujos aluvionales activados en periodos de lluvias provenientes de quebradas secundarias.

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:

➤ Ladera de montaña

Constituyen elevaciones del terreno con relieves que presentan pendientes mayores a 25° (desniveles topográficos), así como geometría y drenaje regular. En el área de estudio, estas laderas son utilizadas para sembríos de papa, alfalfa, entre otros. Sobre esta geoforma se asienta el Centro Poblado de Challhuayaco (Figura 8).



Figura 8. Zonas de cultivo en terrenos con alta pendiente.

➤ **Cauce aluvio fluvial**

Corresponde al cauce de quebradas que generalmente se activan durante los periodos de lluvias. La morfología del cauce depende del caudal, la pendiente, el tamaño del sedimento y de lo erosionable que sea el substrato rocoso. Es decir, esta geoforma es producto de un equilibrio dinámico entre la carga de sedimentos y su capacidad de transporte.

Al lado noreste, a una distancia de 190 m del área de estudio, existe la quebrada denominada Pacchac, de cauce continuo que se incrementa en los periodos de lluvia e incorpora flujos hídricos provenientes de las quebradas Llacllacuna y Tayapata. Esta quebrada presenta desnivel topográfico aproximado de 60 m respecto al área de estudio; por tanto, no produce inundaciones en el Centro Poblado Challhuayaco (Figura 9).



Figura 9. Quebrada de régimen fluvial continuo ubicado en la parte baja de ladera donde se asienta el poblado Challhuayaco.

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.

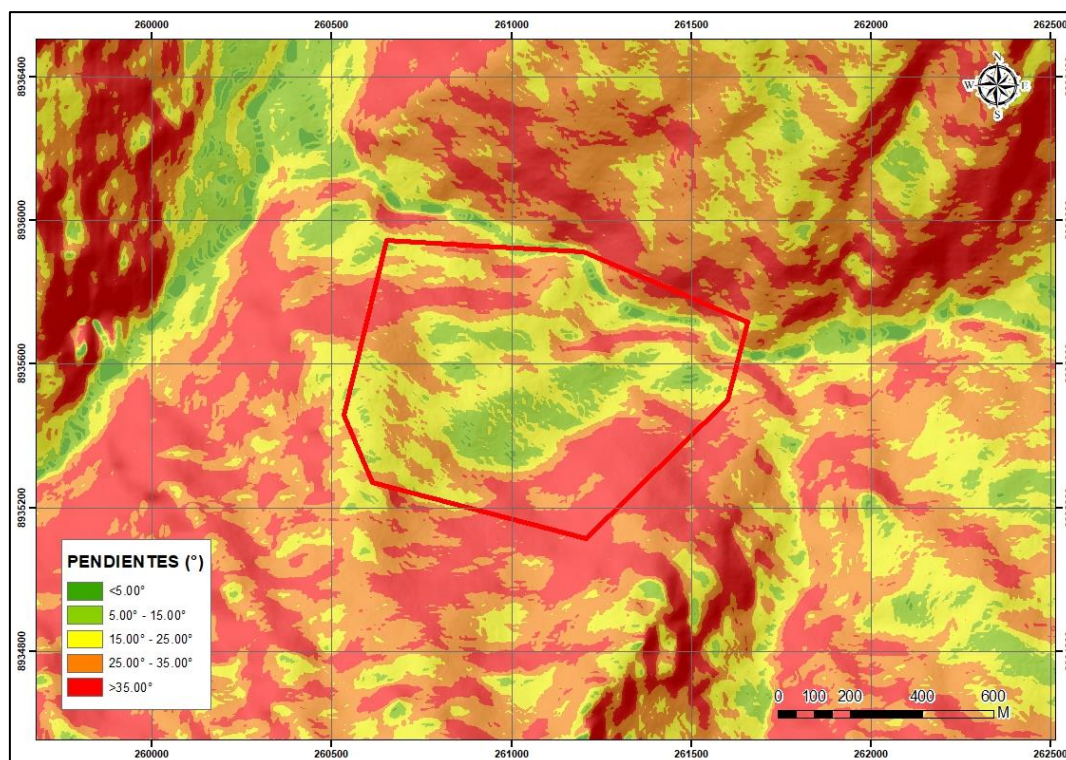


Figura 10. Mapa de pendientes en las inmediaciones del área de estudio demarcada con línea roja

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

Según el mapa de pendientes, el área de estudio se emplaza principalmente sobre zonas de pendiente superior a los 25° de inclinación; es decir, laderas de montaña.

2.3.- Geodinámica

Comprende todos aquellos eventos 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).

➤ **Deslizamiento rotacional**

Es un movimiento ladera abajo de una masa de suelo cuyo desplazamiento ocurre a lo largo de una superficie de falla (curva o cóncava) activada por 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 la escarpa principal y escarpas secundarias (Figura 12) que corresponden a la reactivación de un deslizamiento tipo rotacional que se desarrolla en la parte media y baja de la ladera de montaña con dirección al noreste hacia la quebrada Pacchac. Su reactivación afecta la infraestructura física de las viviendas (agrietamientos en paredes, Figura 13), Puesto de Salud y pavimentos. Así mismo, se ha identificado canales de regadío sin

revestimiento ubicados en la zona de estudio que provoca la saturación del suelo y contribuye a la aparición de grietas en el terreno.

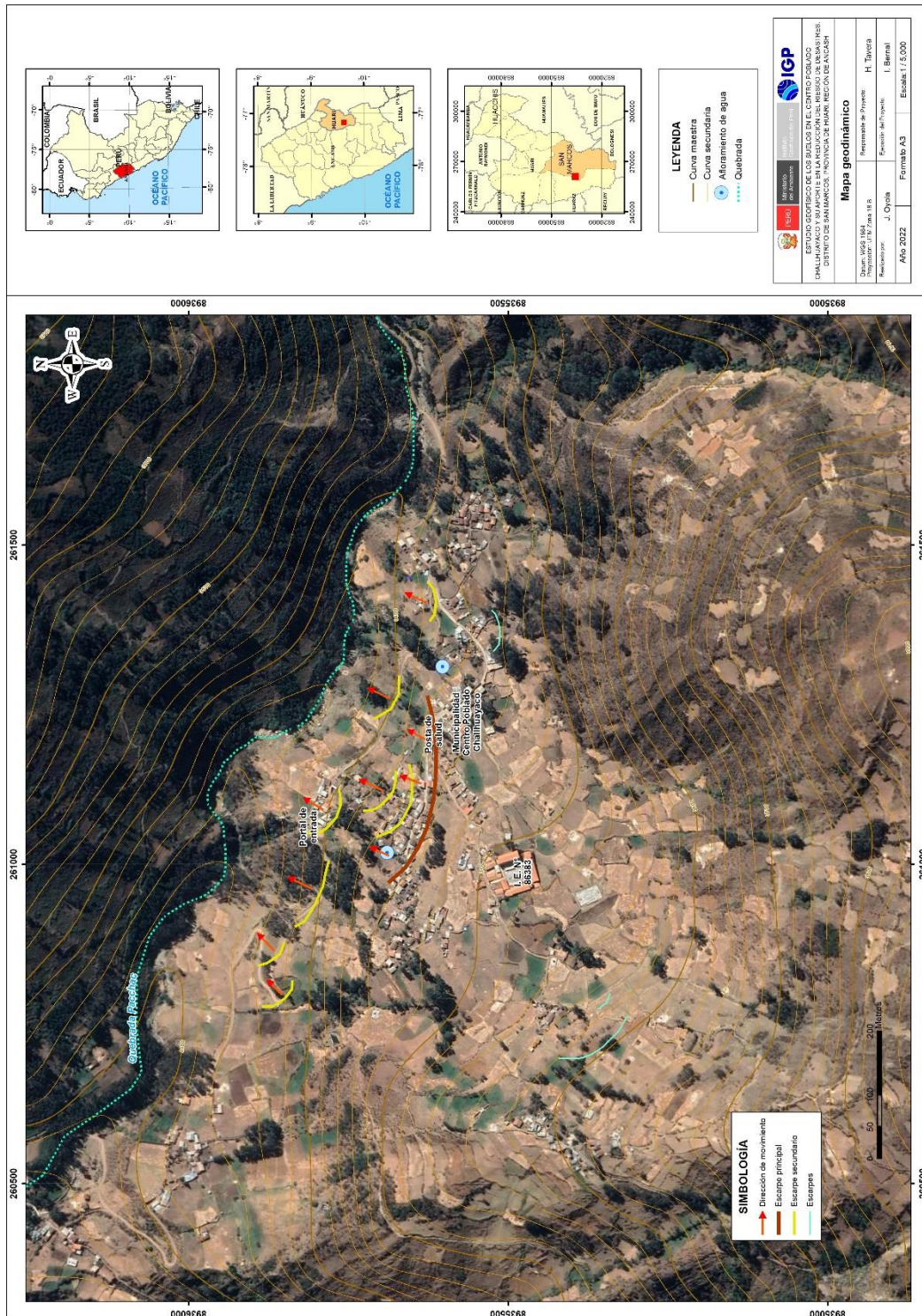


Figura 11. Mapa del área de estudio mostrando la ubicación de la escarpa principal (línea roja) y escarpas secundarias (líneas amarillas). Asimismo, las flechas de color rojo indican la dirección del movimiento de suelo.



Figura 12. Escarpas secundarias (líneas amarillas discontinuas) que indican el desarrollo de un deslizamiento rotacional de tierra en el Centro Poblado Challhuayaco. La flecha blanca indica la dirección de deslizamiento.



Figura 13. Grietas de 5 cm de ancho identificadas en las paredes de una vivienda

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 y/o lluvias extremas son susceptibles a generar deslizamientos de grandes volúmenes de tierra.

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 factor de 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 el periodo de trabajo en campo se recolectaron 28 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 la carretera (CH-06), donde existe ruido de poca amplitud y/o saltos transitorios (suelos compactos), y otro en la Posta de Salud del centro poblado (CH-28) 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.

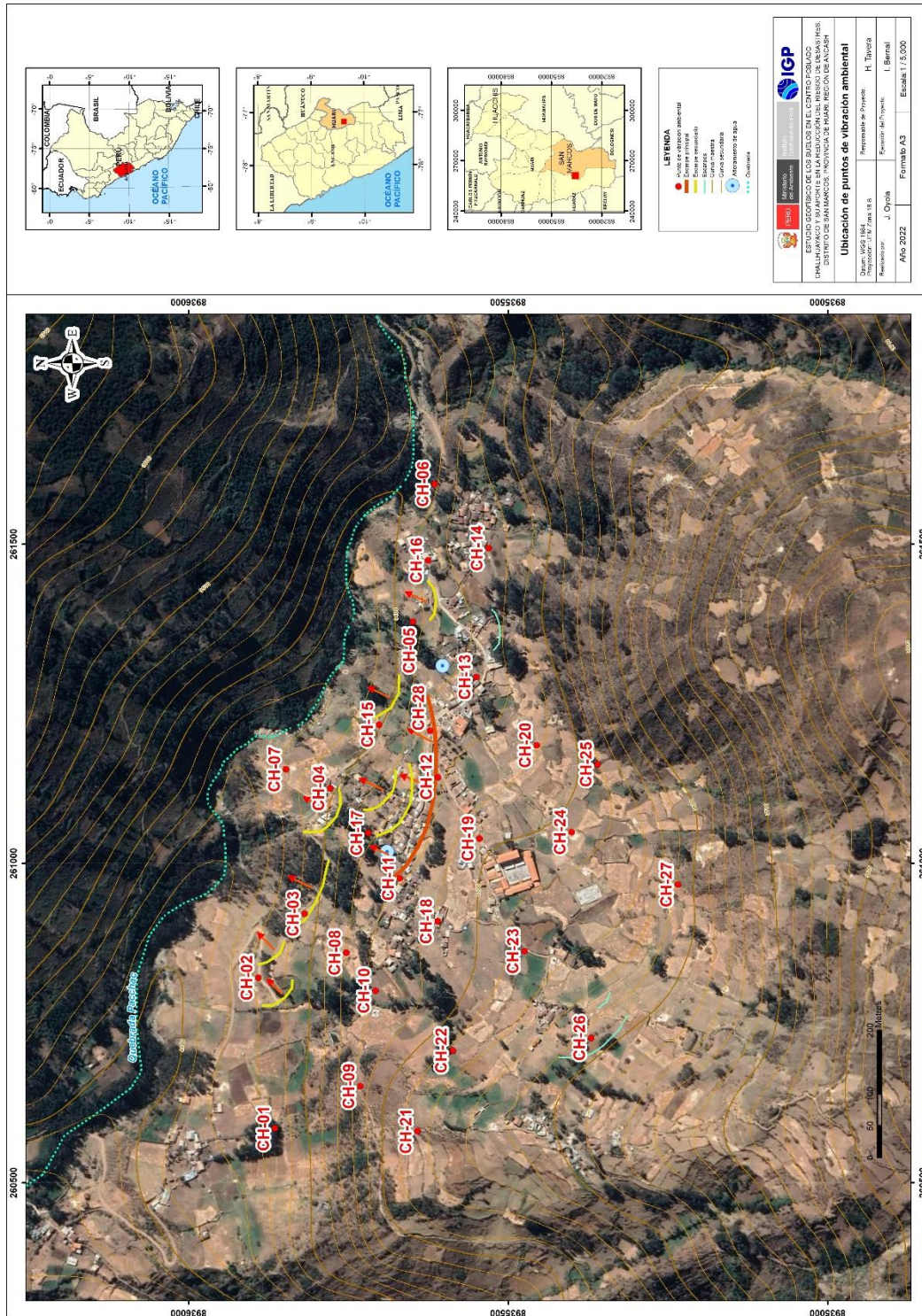


Figura 15. Mapa del Centro Poblado Challhuayaco y distribución espacial de los puntos de registros de vibración ambiental

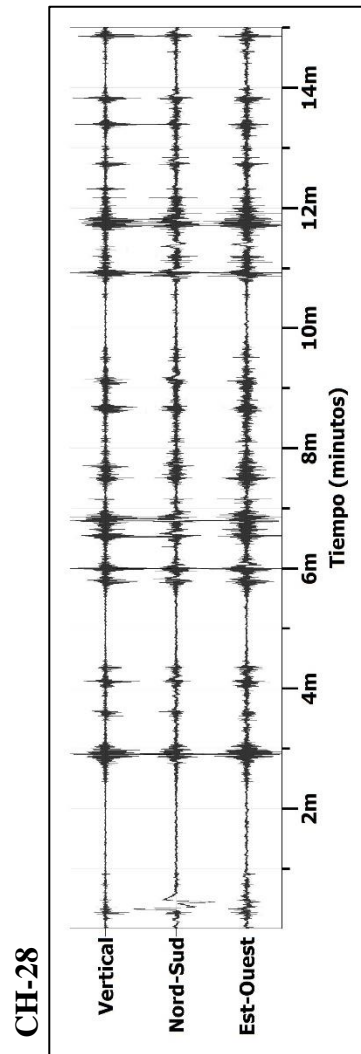
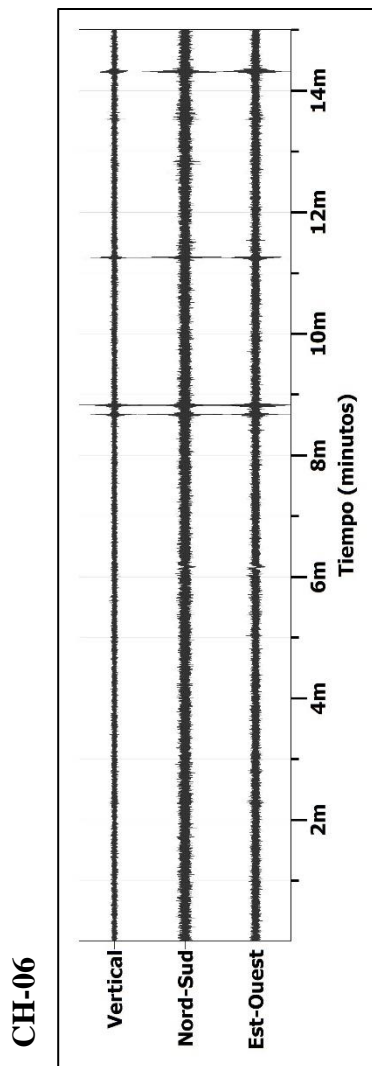


Figura 16. Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros obtenidos en: la carretera (CH-06) y en la posta (CH-28). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

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).

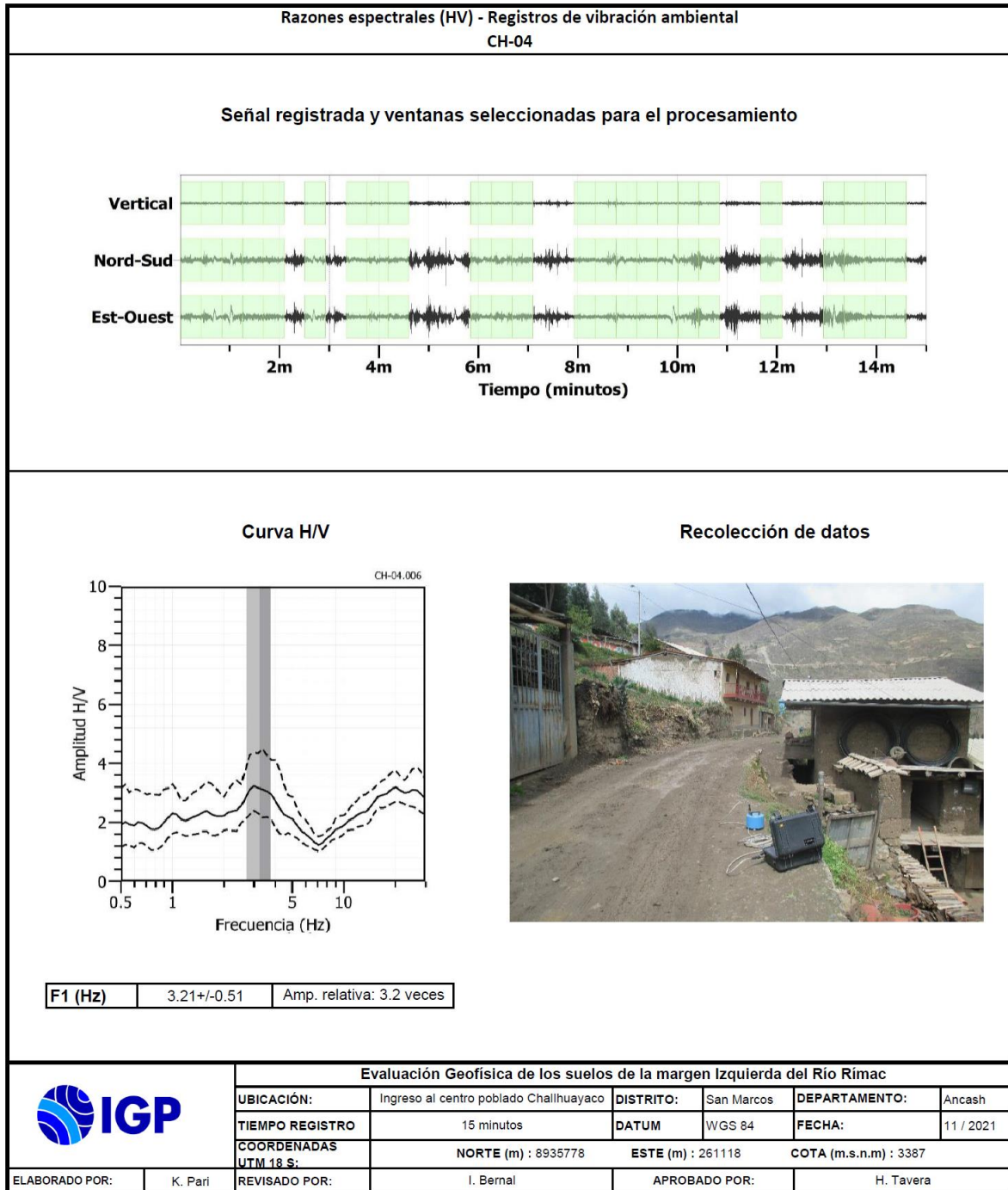


Figura 17. Resultados obtenidos con el método de razones espectrales (H/V) para el punto CH-04. Arriba, la señal registrada y abajo la curva promedio de las razones espectrales, en línea gruesa y su desviación estándar en líneas discontinuas. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

3.1.3.- Resultados e interpretación

En el Centro Poblado Challhuayaco, los suelos responden a dos rangos de frecuencias: F_0 ($F \leq 2.0$ Hz) y F_1 ($F > 2.0$ Hz); y su distribución espacial muestra la presencia de bajas frecuencias hacia el sur y suroeste, con amplificaciones mayores a 3 veces. Las frecuencias mayores se distribuyen en gran parte del área de estudio, donde prevalece un pico de frecuencias, presentando sus mayores amplificaciones hacia el norte. Estas características sugieren gran heterogeneidad en la composición de los suelos. A fin de evaluar el cambio en el comportamiento dinámico del suelo en el Centro Poblado Challhuayaco, 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 0.9 a 1.7 Hz (0.6-0.9 segundos), distribuidos principalmente hacia el sur y oeste del área de estudio. Estos valores bajos de frecuencia (en el mapa se identifican en gris y con letra cursiva), estarían asociados a la presencia de una capa sedimentaria de gran espesor.

- **Frecuencias predominantes F_1 :** En la Figura 18, se muestra la distribución espacial de los valores de F_1 , observándose el predominio de valores entre 2.1 a 5.7 Hz (0.2-0.5 segundos). Estos valores se presentan en gran parte del área de estudio y en algunos puntos se observa amplificaciones mayores a 3 veces (en el mapa se identifican en color rojo).

La Figura 19 muestra ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos CH-02, CH-03 y CH-21, ubicados al oeste. En estos espectros sobresalen un pico predominante a frecuencias de 1.27, 1.25 y 1.57 Hz con amplificaciones de 2.7, 2.5 y 2.6 veces respectivamente; además sobresale un segundo pico a frecuencias de 3.32, 3.31 Hz con amplificaciones mayores a 2.5 veces.

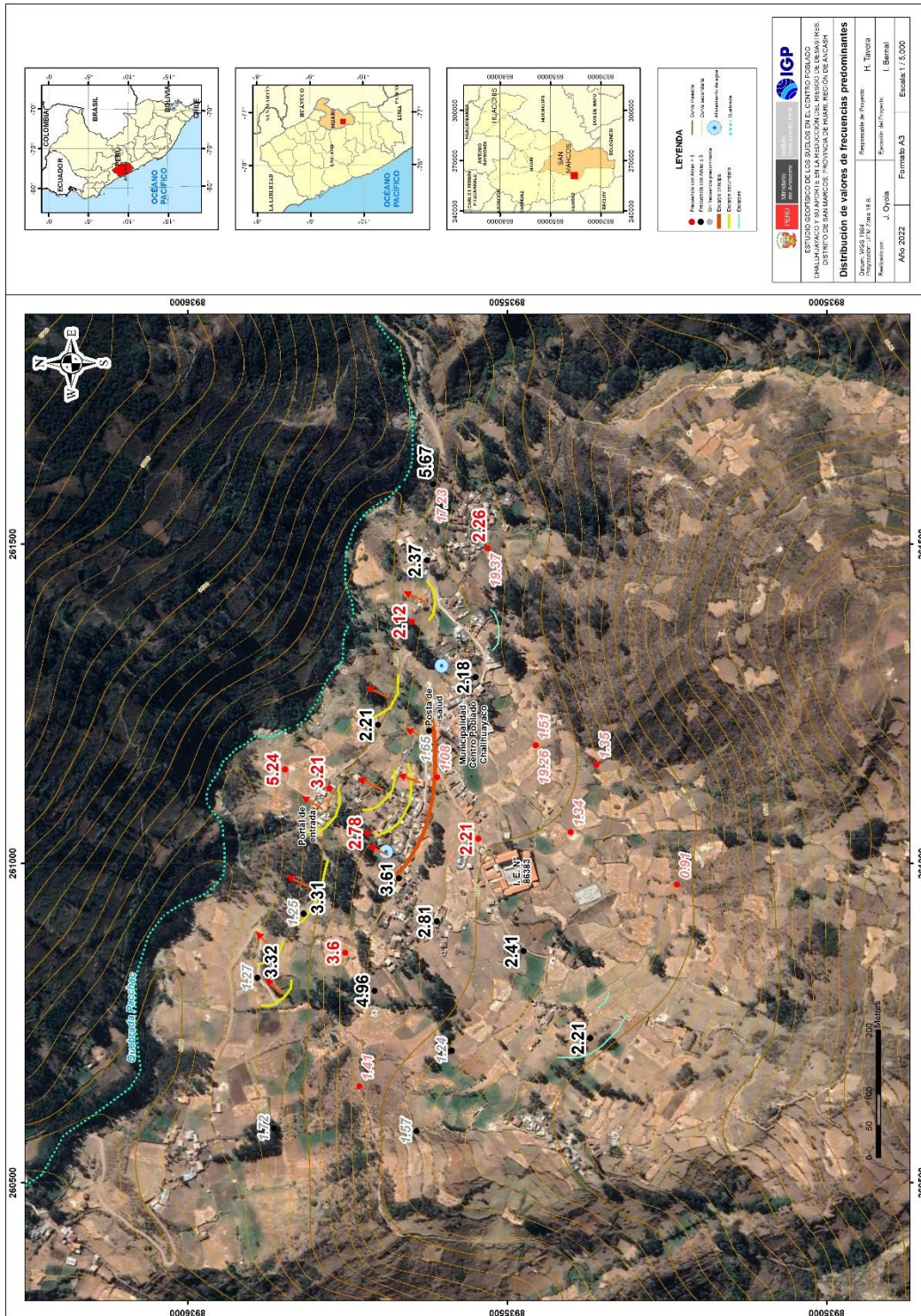
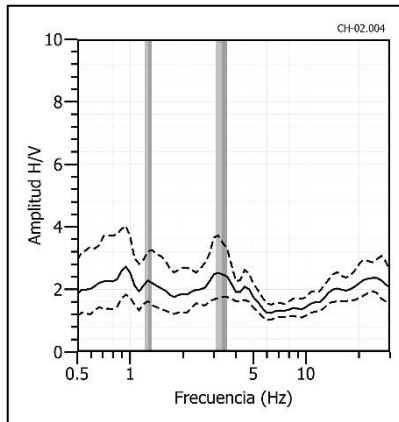
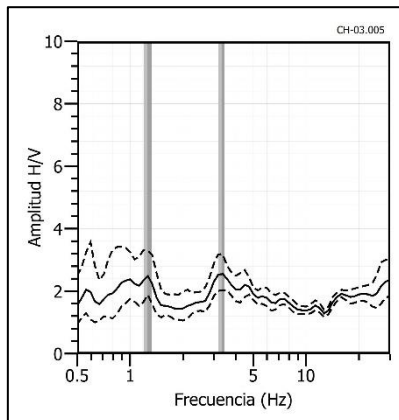


Figura 18. Mapa del Centro Poblado Challhuayaco y distribución espacial de las frecuencias F_0 ($F < 2.0\text{Hz}$) en cursiva y F_1 ($F > 2.0\text{Hz}$). Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 3 veces.

CH-02



CH-03



CH-21

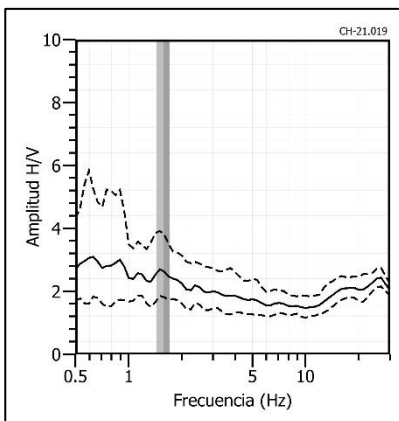


Figura 19. Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F \leq 2.0\text{Hz}$): Para los puntos CH-02, CH-03 y CH-21, ubicados al oeste del centro poblado. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

La Figura 20 muestra las razones espectrales (H/V) obtenidas para los puntos CH-04, CH-16 y CH-19, ubicados en la zona central y norte del centro poblado. Aquí se presenta un pico bien definido con frecuencias predominantes de 3.21, 2.37 y 2.21 Hz y amplificaciones de 3.1, 2.6 y 3.6 veces respectivamente.

Los resultados obtenidos evidencian que los suelos del Centro Poblado Challhuayaco, tienen un comportamiento dinámico irregular y complejo, con amplificaciones mayores a 3 veces. Esta complejidad es puesta en evidencia con la presencia de dos picos de frecuencia, algunos de ellos de mayor amplificación.

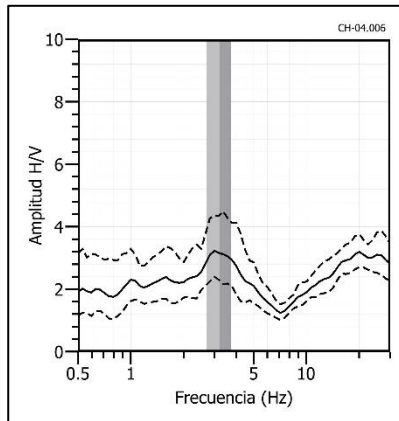
- **Periodos Dominantes:** aquí los valores de frecuencias predominantes fueron transformados a periodos dominantes y para construir el mapa de periodos, se asignó a cada punto de medición un radio de confiabilidad de 10 metros. Según la Figura 21, los periodos dominantes fueron separados en dos grupos, en color negro para periodos menores a 0.5 segundos y en gris y cursiva para periodos mayores. Con rojo se muestra los puntos que presentan amplificaciones mayores a 3 veces.

En general, los suelos del Centro Poblado Challhuayaco responden a dos rangos de periodos: Sobre gran parte del área analizada los suelos responden a un pico de periodo con bajas amplificaciones (0.1 – 0.5 segundos) evidenciando la presencia de suelos homogéneos. Por otra parte, hacia el sur y por el local Municipal, los suelos responden a periodos de 0.6 – 0.9 segundos con altas amplificaciones, evidenciando la presencia de suelos heterogéneos e inestables.

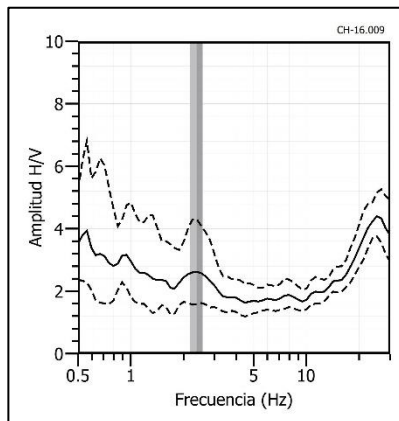
De acuerdo a estos resultados, existe una capa de suelo de mayor espesor hacia el sur del área de estudio, lo cual podría ser responsable a la generación de escarpas. Asimismo, el suelo presentaría amplificaciones

moderadas mayores a 3 veces, que estarían asociadas a su baja consolidación.

CH-04



CH-16



CH-19

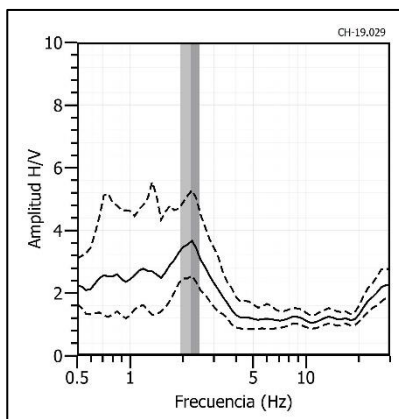


Figura 20. Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F > 2.0\text{Hz}$): Para los puntos CH-04, CH-16 y CH-19, ubicados en la zona norte y central del centro poblado. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

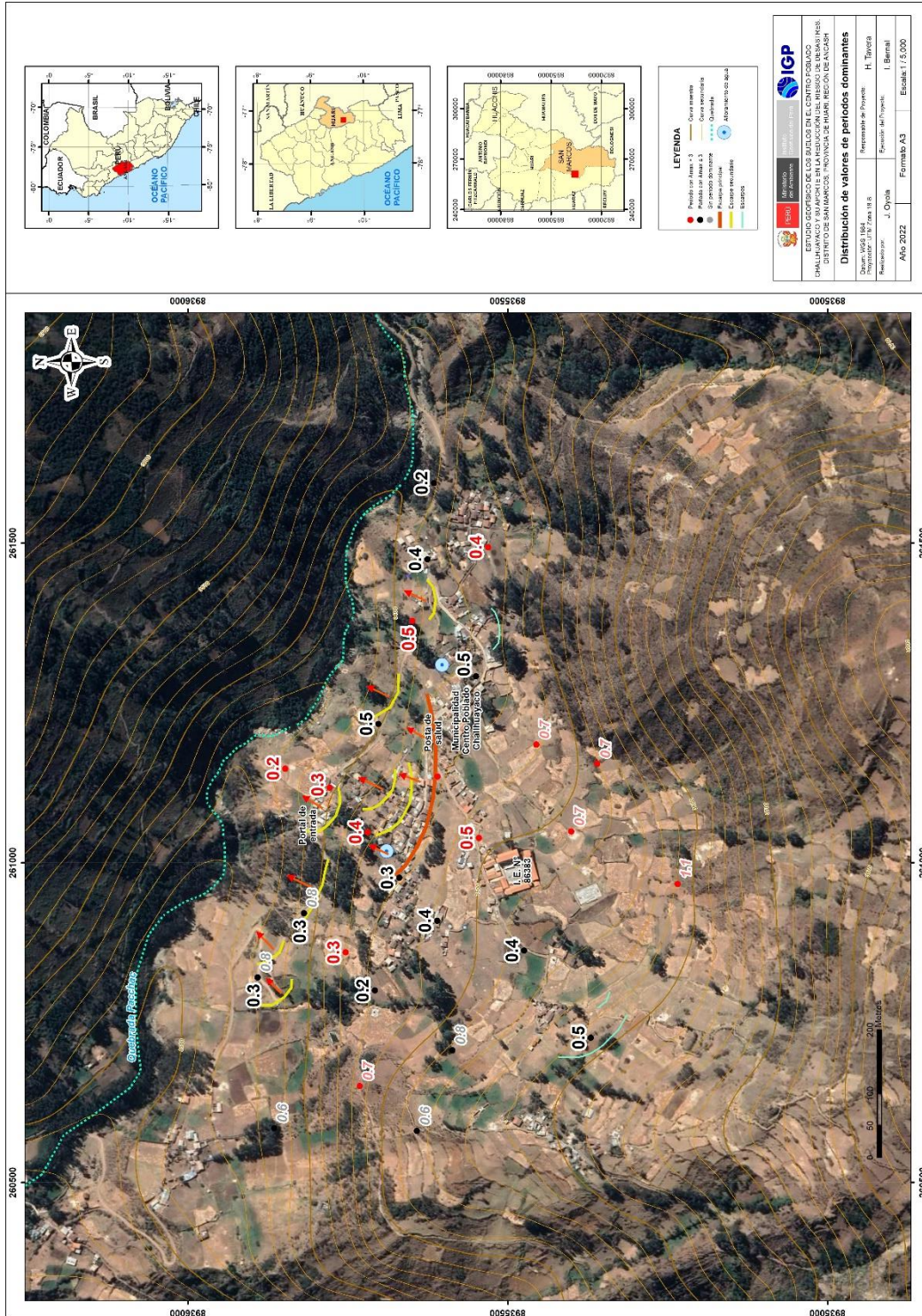


Figura 21. Mapa del Centro Poblado Challhuayaco y distribución espacial de periodos dominantes del suelo. Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 3 veces.

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 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.

3.2.1.- 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 22. Para este método se ha considerado tendidos lineales con espaciamiento entre geófonos de 5 metros, 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.

En la localidad de Challhuayaco se realizaron, 07 líneas de RS con longitudes de hasta 800 metros (Tabla 2). La distribución espacial de estas líneas debidamente codificadas se muestra en la Figura 23. 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.

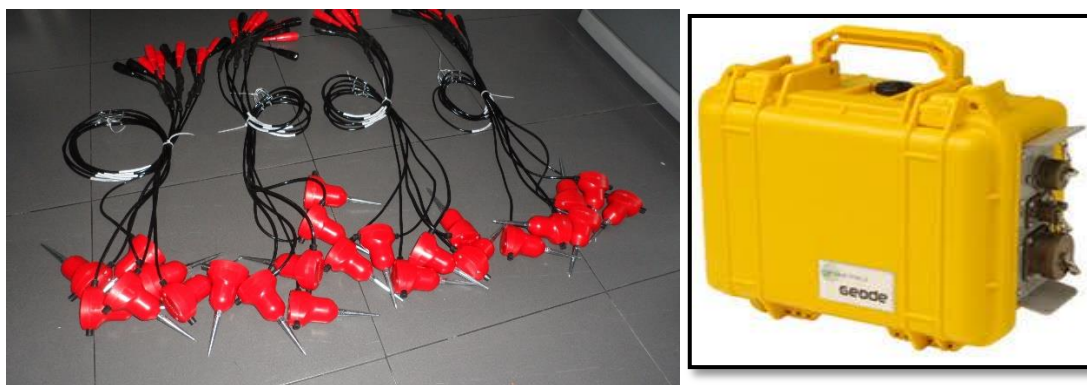


Figura 22. Equipos utilizados en la adquisición de datos RS.

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-CH	260590	8935878	3350	299
	260885	8935827	3367	
RS02-CH	260639	8935761	3425	322
	260948	8935688	3432	
RS03-CH	260598	8935643	3499	512
	261049	8935400	3489	
RS04-CH	260828	8935336	3544	391
	261200	8935216	3622	
RS05-CH	261198	8935901	3337	828
	260638	8935292	3614	
RS06-CH	261470	8935779	3373	299
	261287	8935543	3430	
RS07-CH	261258	8935605	3414	391
	261631	8935487	3465	

3.2.2.- Procesamiento y análisis

El procesamiento de los datos fue realizado con el programa RAYFRACT 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 24, se muestra un ejemplo de las curvas tiempo vs distancia para la línea sísmica RS07-CH.

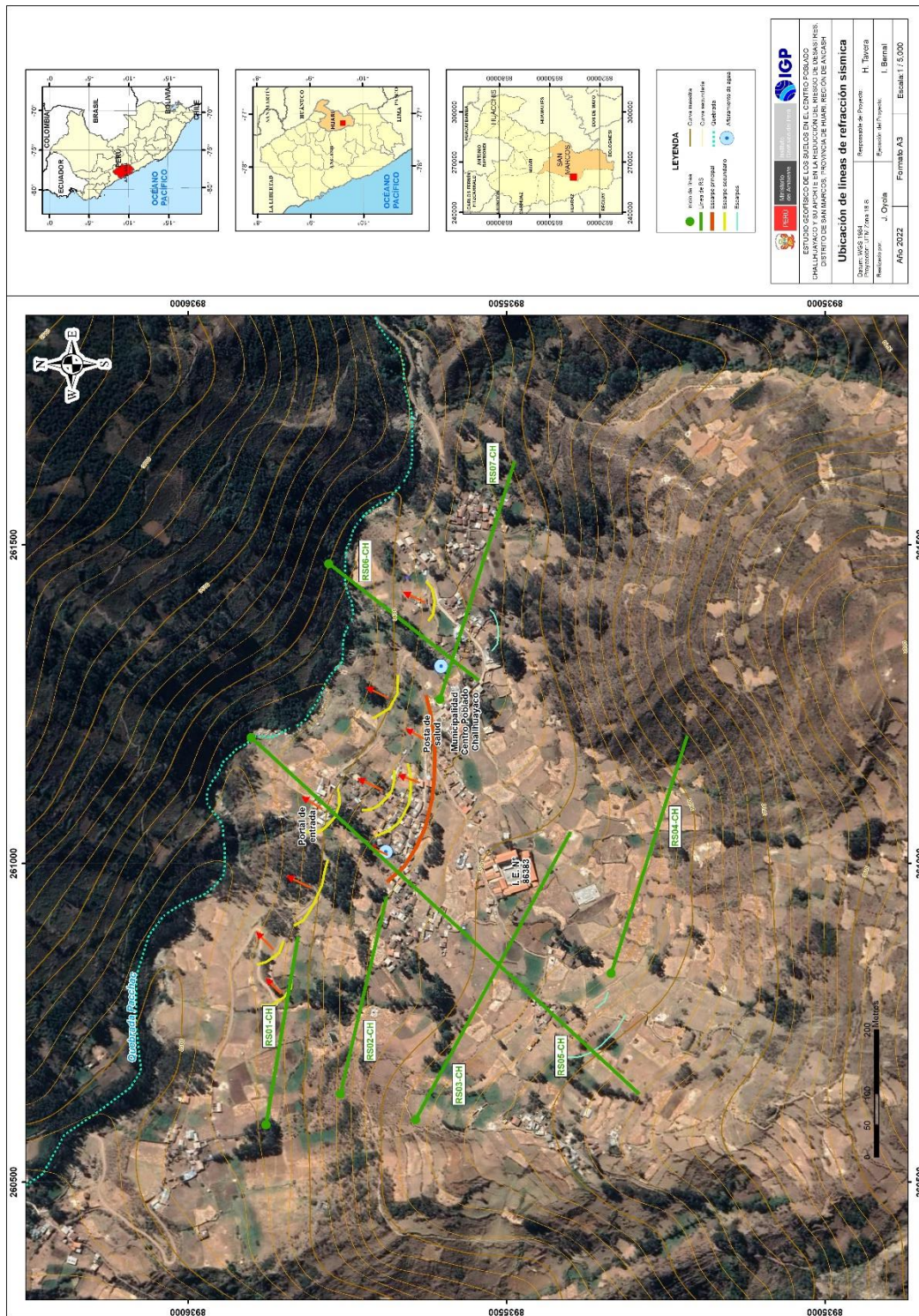


Figura 23. Mapa del Centro Poblado Challhuayaco y distribución espacial de las líneas de RS (líneas de color verde), codificadas como RS01-CH,..., RS07-CH.

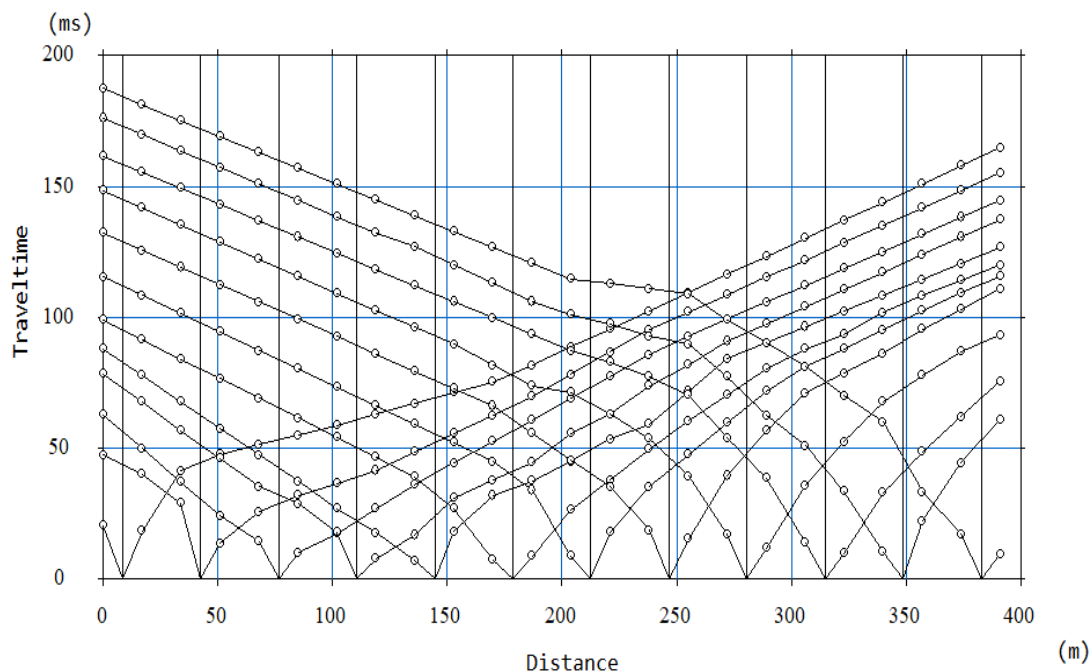


Figura 24. Curvas de tiempo - distancia obtenidas para la línea sísmica RS07-CH.

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

3.1.3.- Resultados e interpretación

a). Resultados

En el área de estudio se realizaron 07 líneas de RS, de las cuales 4 presentan resolución con una profundidad mayor a 100 metros (RS01-CH, RS03-CH, RS04-CH y RS05-CH) y el resto hasta los 80 metros (RS02-CH, RS06-CH y RS07-CH). En la Figura 25, se presenta la sección de RS obtenida para la línea RS01-CH y en el Anexo I, para las líneas restantes, siendo sus características las siguientes:

Sección sísmica RS01-CH: Línea realizada al noroeste de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco y 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	11 – 12	400 – 1900	Material poco a medianamente consolidado.
02	4 – 27	1900 – 2800	Material consolidado o roca muy fracturada.
03	25 – 40	2800 – 3700	Material muy consolidado o roca fracturada.
04	-	> 3700	Roca sana.

Sección sísmica RS02-CH: Línea realizada al oeste de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco y 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	13 – 18	400 – 1900	Material poco a medianamente consolidado.
02	6 – 10	1900 – 2800	Material consolidado o roca muy fracturada.
03	7 – 11	2800 – 3700	Material muy consolidado o roca fracturada.
04	-	> 3700	Roca sana.

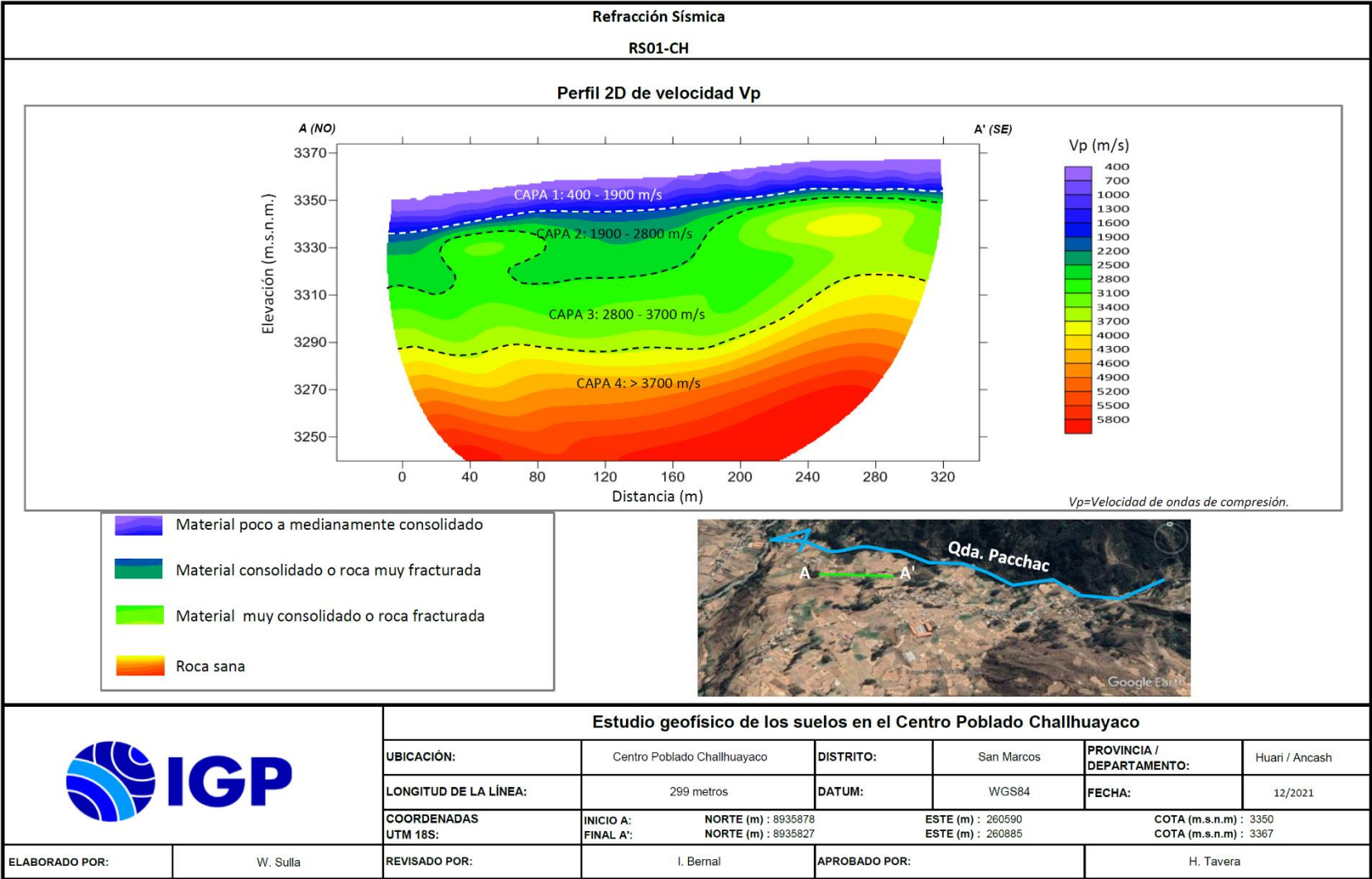


Figura 25. Resultados obtenidos con el método de refracción sísmica para la línea RS01-CH.

Sección sísmica RS03-CH: Línea realizada al suroeste de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco y 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	17 – 18	400 – 1900	Material poco a medianamente consolidado.
02	10 – 45	1900 – 2800	Material consolidado o roca muy fracturada.
03	30 – 50	2800 – 3700	Material muy consolidado o roca fracturada.
04	-	> 3700	Roca sana.

Sección sísmica RS04-CH: Línea realizada al sur de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco (parte alta) y 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	6 – 10	1900 – 2800	Material consolidado o roca muy fracturada.
03	5 – 20	2800 – 3700	Material muy consolidado o roca fracturada.
04	-	> 3700	Roca sana.

Sección sísmica RS05-CH: Línea realizada al oeste de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco (perpendicular a la quebrada Pacchac y 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	10 – 30	1900 – 2800	Material consolidado o roca muy fracturada.
03	10 – 50	2800 – 3700	Material muy consolidado o roca fracturada.
04	-	> 3700	Roca sana.

Sección sísmica RS06-CH: Línea realizada al noreste de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco y 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	12 – 20	400 – 1900	Material poco a medianamente consolidado.
02	4 – 6	1900 – 2800	Material consolidado o roca muy fracturada.
03	5 – 10	2800 – 3700	Material muy consolidado o roca fracturada.
04	-	> 3700	Roca sana.

Sección sísmica RS07-CH: Línea realizada al este de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco y 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	13 – 23	400 – 1900	Material poco a medianamente consolidado.
02	5 – 12	1900 – 2800	Material consolidado o roca muy fracturada.
03	6 – 37	2800 – 3700	Material muy consolidado o roca fracturada.
04	-	> 3700	Roca sana.

b) Interpretación

De acuerdo a los resultados obtenidos, los suelos menos consistentes y de mayor espesor se encuentran hacia el extremo noroeste de la Municipalidad del Centro Poblado con espesores de hasta 40 metros, hacia el norte con espesor de 35 metros (próximo a la quebrada Pacchac) y hacia el sur con espesores entre 60 y 70 metros (altura del colegio y parte alta del centro poblado). En el resto del área de estudio los espesores de estos suelos varían entre 25 a 30 metros.

Según los resultados, se identifica que los mayores espesores de suelo se emplazan en lugares de mayor pendiente, lo que podría 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 26). 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 26. Equipos utilizados en la toma de datos por el método de MASW.

En el Centro Poblado Challhuayaco se realizaron 07 arreglos lineales MASW y MAM, y sus coordenadas de ubicación se muestran en la Tabla 4 y en la Figura 27, su distribución espacial en el área de estudio.

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-CH	260796	8935842	3364
LS02-CH	261010	8935696	3406
LS03-CH	261406	8935677	3383
LS04-CH	261460	8935543	3431
LS05-CH	260841	8935523	3492
LS06-CH	261091	8935382	3490
LS07-CH	260630	8935339	3601

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).

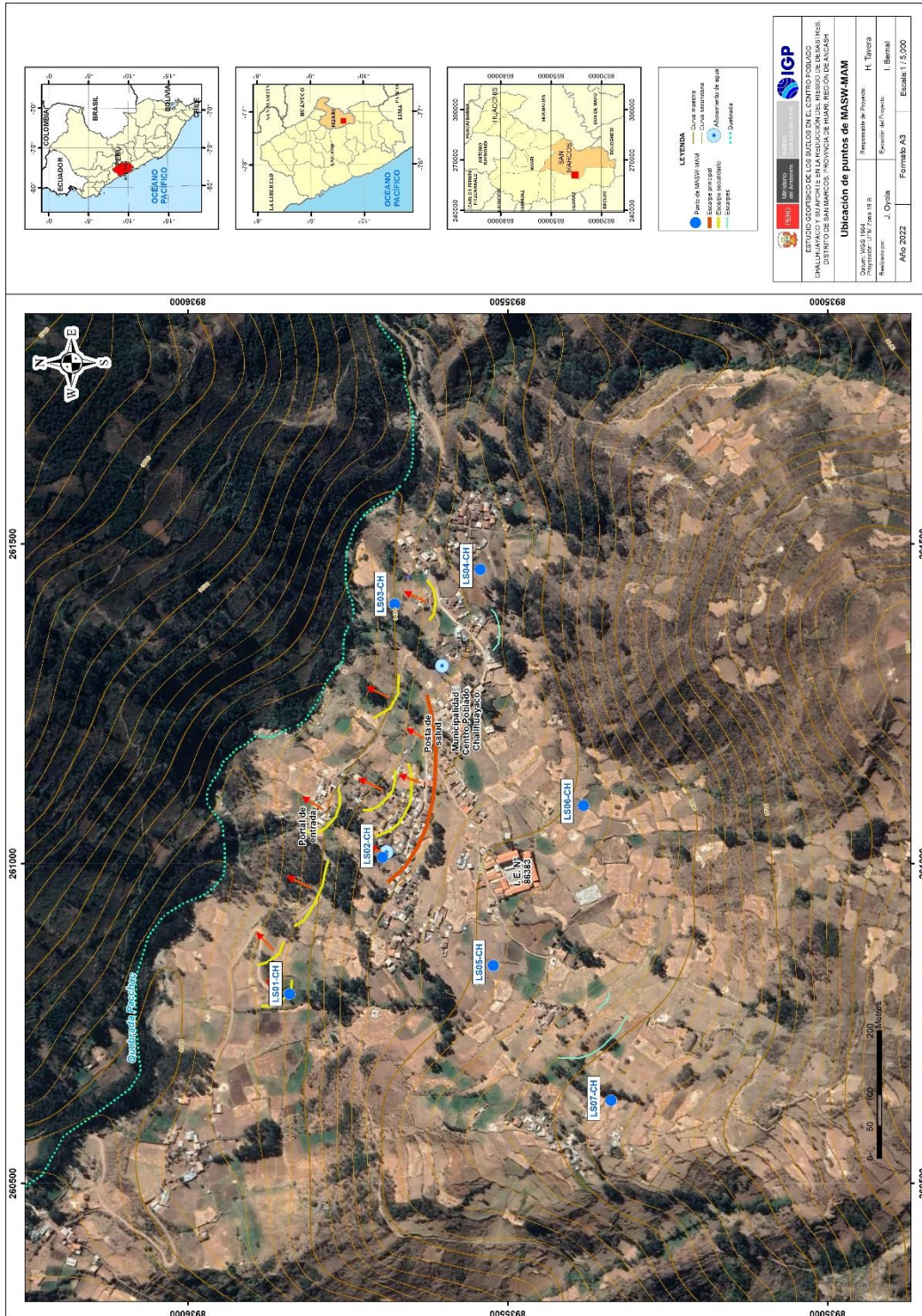


Figura 27. Mapa del Centro Poblado Challhuayaco y distribución espacial de las líneas MASW y MAM (puntos de color azul), codificadas como LS01-CH, ..., LS07-CH.

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 Vs 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 07 líneas sísmicas MASW y MAM con resolución hasta una profundidad de ≈ 90 metros, tal como se muestra en la Figura 27. Los resultados obtenidos para la línea LS01-CH se muestran en la Figura 28 y en el Anexo II, para las líneas restantes. El análisis realizado para cada línea sísmica es mostrado a continuación:

Línea sísmica LS01-CH: Realizada al oeste de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco. Este perfil permite identificar la existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 14 metros de espesor y velocidades Vs de 383 m/s, está compuesta de material medianamente compacto. La segunda, de 22 metros de espesor y velocidades Vs de 786 m/s; está compuesta por material compacto. La tercera capa de 29 metros de espesor y velocidades Vs de 1362 m/s compuesta por material muy compacto. En el semiespacio, se tiene velocidades Vs > 2157 m/s y corresponderían a roca.

Línea sísmica LS02-CH: Realizada al oeste de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco. Este perfil permite identificar la existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 10 metros de espesor y velocidades Vs de 609 m/s y la segunda, de 18 metros de espesor y velocidades de 681 m/s; ambas compuestas por material compacto. La tercera capa tendría un espesor de 24 metros y velocidades Vs de 810 m/s; mientras que, el semiespacio presentaría velocidades Vs > 1398 m/s, y en este caso, ambas capas estarían compuestas por material muy compacto.

Línea sísmica LS03-CH: Realizada al noreste de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco. Este perfil permite identificar la existencia de dos (2) capas sísmicas: La primera de 22 metros de espesor y velocidades Vs de 539 m/s y la segunda, de 25 metros de espesor y velocidades de 637

m/s; ambas compuestas por material compacto. En el semiespacio, se tiene velocidades $V_s > 1089$ m/s y corresponderían a material muy compacto.

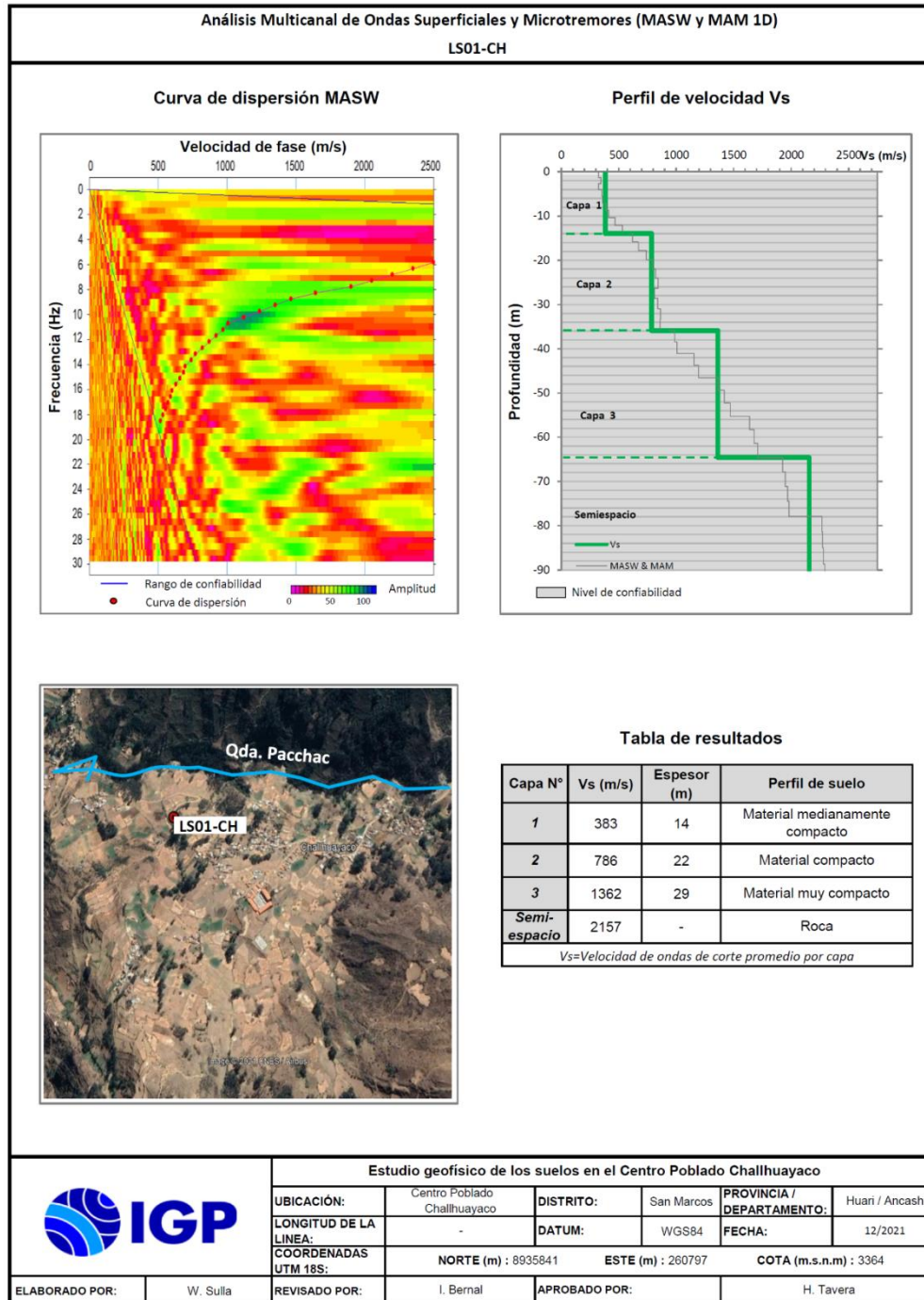


Figura 28. Resultados obtenidos con la técnica MASW y MAM para la línea sísmica LS01-CH.

Línea sísmica LS04-CH: Realizada al este de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco. Este perfil permite identificar la existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 16 metros de espesor y velocidades V_s de 570 m/s, la segunda, de 15 metros de espesor y velocidades de 630 m/s y la tercera capa, de 21 metros de espesor y velocidades de 730 m/s, estas capas estarían compuestas por material compacto. En el semiespacio, se tiene velocidades $V_s > 1093$ m/s y corresponderían a material muy compacto.

Línea sísmica LS05-CH: Realizada al suroeste de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco. Este perfil permite identificar la existencia de dos (2) capas sísmicas: La primera de 31 metros de espesor y velocidades V_s de 706 m/s, está compuesta por material compacto. La segunda capa tendría un espesor de 24 metros y velocidades V_s de 862 m/s; mientras que, el semiespacio presentaría velocidades $V_s > 1449$ m/s, y en este caso, ambas capas estarían compuestas por material muy compacto.

Línea sísmica LS06-CH: Realizada al sur de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco. Este perfil permite identificar la existencia de tres (3) capas sísmicas: La primera de 22 metros de espesor y velocidades V_s de 311 m/s, está compuesta de material suelto a medianamente compacto. La segunda, de 30 metros de espesor y velocidades V_s de 486 m/s; está compuesta por material medianamente compacto. La tercera capa de 33 metros de espesor y velocidades V_s de 729 m/s compuesta por material compacto. En el semiespacio, se tiene velocidades $V_s > 1103$ m/s y corresponderían a material muy compacto.



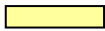
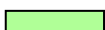


Línea sísmica LS07-CH: Realizada al suroeste de la Municipalidad del C.P. Challhuayaco. Este perfil permite identificar la existencia de dos (2) capas sísmicas: La primera de 33 metros de espesor y velocidades V_s de 434 m/s, está compuesta de material medianamente compacto, la

segunda, de 25 metros de espesor y velocidades V_s de 785 m/s; está compuesta por material compacto. En el semiespacio, se tiene velocidades $V_s > 1191$ m/s y corresponderían a 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 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)	V_s (m/s)	Esp. (m)	V_s (m/s)	Esp. (m)	V_s (m/s)	Esp. (m)
LS01-CH	383	14	786	22	1362	29	2157	-
LS02-CH	609	10	681	18	810	24	1398	-
LS03-CH	539	22	637	25	1089	-	-	-
LS04-CH	570	16	630	15	730	21	1093	-
LS05-CH	706	31	862	24	1449	-	-	-
LS06-CH	311	22	486	30	729	33	1103	-
LS07-CH	434	33	785	25	1191	-	-	-

	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 el Centro Poblado Challhuayaco permiten identificar la presencia en el subsuelo de 3 capas. Estas capas con diferente grado de compactación se caracterizan por presentar materiales medianamente compactos a compactos presentando diferencias en su espesor. Hacia el noroeste y noreste de la Municipalidad

del Centro Poblado Challhuayaco, próximos a la quebrada Pacchac, muestran espesores de 36 y 57 metros, respectivamente. Sin embargo, los suelos emplazados hacia el sur (por el colegio y la parte alta de la ladera), presentan espesores de hasta 60 metros. En el resto del área de estudio, presentan espesores entre 28 y 31 metros. Por otra parte, localmente y a nivel superficial, los suelos identificados hacia el sur (por el colegio) y al noroeste, presentan menor consistencia en toda el área de estudio debido a las características del material y presencia de humedad.

3.4.- Método de Tomografía Eléctrica

El método de tomografía de resistividad 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 06 líneas de ERT utilizado un equipo de Resistividad GDD GRX8-32. En la Figura 29 se presenta su distribución espacial y en la Tabla 7 las características de las líneas ERT realizadas en la localidad de Challhuayaco.

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.

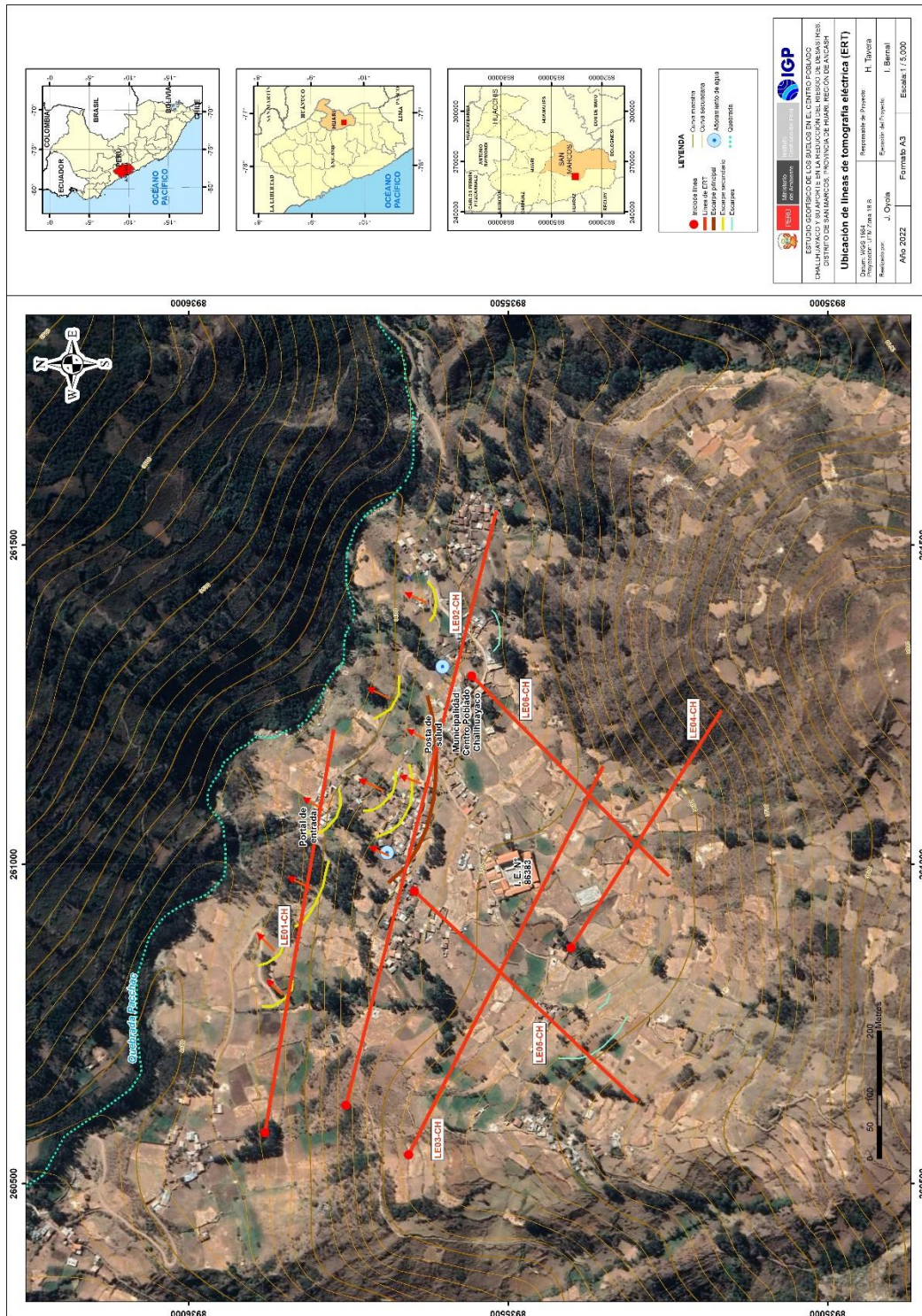


Figura 29. Mapa del Centro Poblado Challhuayaco y distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica (líneas de color rojo), codificados como LE01-CH, ..., LE06-CH.

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-CH	260580	8935881	3348	680
	261211	8935773	3353	
LE02-CH	260623	8935754	3430	920
	261554	8935519	3444	
LE03-CH	260545	8935656	3494	680
	261154	8935352	3511	
LE04-CH	260869	8935402	3518	400
	261241	8935166	3674	
LE05-CH	260958	8935647	3444	440
	260628	8935298	3615	
LE06-CH	261295	8935557	3425	400
	260981	8935249	3556	

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.

3.4.3.- Resultados e interpretación

a) Resultados

En el Centro Poblado Challhuayaco se realizaron 06 secciones geoelectricas, con resolución hasta los 100 metros de profundidad. En la Figura 30, se presenta la sección geoelectrica para la línea LE01-CH 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:

Tabla 8: 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

Sección geoelectrica LE01-CH: Realizada al noroeste de la Municipalidad del Centro Poblado Challhuayaco sobre una longitud de 680 metros y en dirección NO-SE. En esta sección predominan depósitos de moderada resistividad (80 a 300 Ohm-m). Sin embargo, a nivel superficial hacia el extremo NO (inicio de la sección), se ha identificado la existencia de materiales con alto contenido de humedad que se extiende a profundidad. Además, entre las longitudes de 240 a 360 y 520 a 600, se identifican depósitos con alto contenido de humedad con espesores de 10 a 20 metros respectivamente, el mayor espesor se presenta a la altura del portal de entrada. En profundidad se ha identificado una zona anómala con bajo contenido de humedad.

Sección geoelectrica LE02-CH: Realizada al norte de la Municipalidad del Centro Poblado Challhuayaco sobre una longitud de 920 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 zonas anómalas con bajo

y alto contenido de humedad. La primera zona se presenta al inicio de la sección al NO, con espesor de hasta 40 metros. La segunda zona anómala con alto contenido de humedad se presenta desde la longitud 200 a 840 metros. La posta y la Municipalidad están sobre depósitos con moderada resistividad y espesores de 20 y 10 metros respectivamente. En profundidad se ha identificado dos zonas anómalas con alto (< 80 Ohm-m) y bajo contenido de humedad (> 300 Ohm-m).

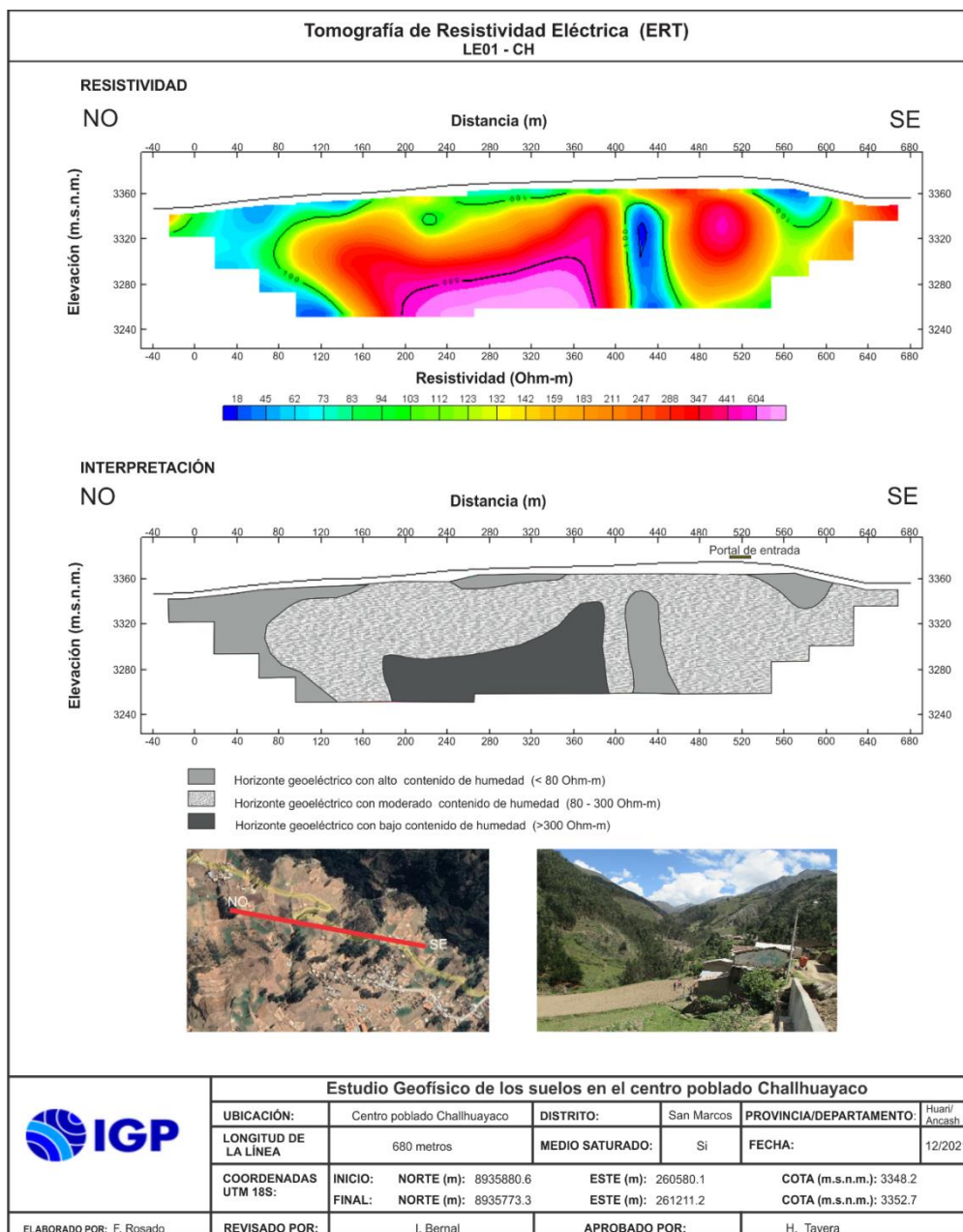


Figura 30. Resultado de tomografía eléctrica para la línea LE01-CH.

Sección geoelectrica LE03-CH: Realizada al sur de la Municipalidad del Centro Poblado Challhuayaco sobre una longitud de 680 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 tres zonas anómalas con alto contenido de humedad (< 80 Ohm-m), la primera zona ubicada al extremo NO, con espesor que llega hasta 20 metros, la segunda entre las longitudes 120 a 240 metros que se extiende a profundidad y la tercera zona a la altura del colegio, cuyos valores bajos de resistividad también se extienden a profundidad. Además, en profundidad se presentan dos zonas anómalas con bajo contenido de humedad (> 300 Ohm-m).

Sección geoelectrica LE04-CH: Realizada al sur de la Municipalidad del Centro Poblado de Challhuayaco sobre una longitud de 400 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 cuatro zonas anómalas. La primera con bajo contenido de humedad (> 300 Ohm-m), ubicada al inicio de la sección (NO) y espesor de hasta 40 metros, las tres anomalías siguientes con mayor humedad se ubican en las longitudes 80 (a la altura del colegio), 160 y entre 280 a 360 metros con espesores variables.

Sección geoelectrica LE05-CH: Realizada al suroeste de la Municipalidad del Centro Poblado Challhuayaco sobre una longitud de 400 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 cuatro zonas anómalas. La primera con bajo contenido de humedad (> 300 Ohm-m), ubicada entre los 160 a 240 metros de longitud y espesor de hasta 80 metros, las tres anomalías restantes presentan alto contenido de

humedad ($< 80 \text{ Ohm-m}$), a la altura del colegio se presenta una de ellas con espesor de hasta 20 metros. Las dos anomalías restantes se presentan entre las longitudes 240 a 280 y 320 metros de longitud. En profundidad se presentan dos zonas anómalas con bajo y alto contenido de humedad.

Sección geoelectrica LE06-CH: Realizada al sureste de la Municipalidad del Centro Poblado Challhuayaco sobre una longitud de 400 metros y en dirección NE-SO. En esta sección se ha identificado 2 horizontes geoelectricos: El primero de baja resistividad ($< 80 \text{ Ohm-m}$) está presente a lo largo de toda la sección y espesores de 20 a 80 metros. El segundo horizonte, con moderado contenido de humedad (80 a 300 Ohm-m). Sin embargo, a nivel superficial se presenta una zona anómala a los 60 metros de longitud y espesor de 10 metros.

b) Interpretación

En las secciones de tomografía eléctrica elaboradas para el Centro Poblado de Challhuayaco, se ha identificado las siguientes características:

En el área de estudio, el suelo a nivel superficial presenta alto contenido de humedad hasta profundidades de 20 metros en promedio, sin embargo, en algunos sectores la humedad alcanzaría hasta los 60 metros de profundidad. Estos lugares se encuentran por la Municipalidad del Centro Poblado, Puesto de Salud, hacia el noroeste de la Municipalidad, la parte posterior de la Institución Educativa y la parte alta de la ladera.

En la Figura 31, con líneas amarillas entre cortadas se indica la ubicación de las zonas con alto contenido de humedad, las mismas que

estarían relacionadas con la presencia de escarpes y/o fisuras en superficie.

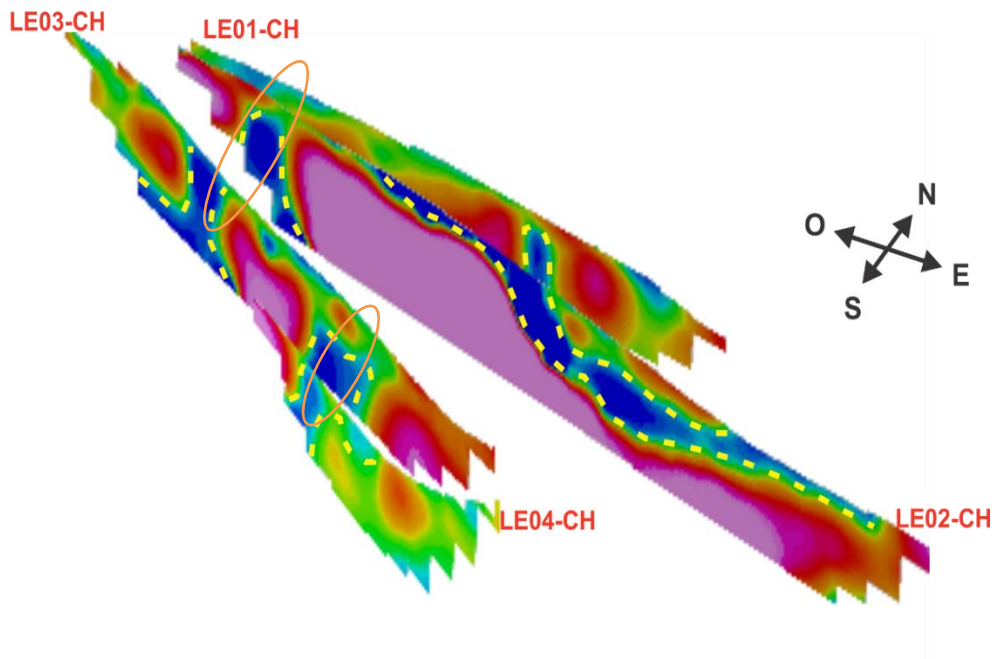


Figura 31. Ubicación y orientación de las líneas de tomografía eléctrica realizadas en el centro poblado Challhuayaco. Las líneas discontinuas de amarillo delimitan las zonas con presencia de humedad. Los círculos de color naranja corresponden a la correlación de áreas con alta humedad en dirección norte - sur.

Asimismo se observa, que la primera zona crítica se encuentra ubicada hacia el extremo noroeste y la segunda, en la parte media de la sección LE02 (altura de la Municipalidad del C. P. de Challhuayaco). En medio de estas dos zonas y en profundidad, se ha identificado la presencia de un medio con bajo contenido de humedad que actúa como una cuña. Por otra parte, hacia el extremo sur, se ha identificado suelos con alto y moderado contenido de humedad que siguen una dirección norte –sur.

4. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUBSUELO Y SU COMPORTAMIENTO DINÁMICO

La exploración de la estructura y caracterización física del subsuelo en el Centro Poblado Challhuayaco, fue realizada usando datos e información generada a partir del empleo de métodos geofísicos y su correlación con la información geológica, y los resultados obtenidos son detallados a continuación.

4.1. Estructura del subsuelo

El área urbana del Centro Poblado Challhuayaco, se asienta sobre la ladera con pendiente moderada y donde predominan materiales como areniscas y lutitas que en la parte media y baja de la ladera, se encuentran cubiertos por materiales arcillosos, limosos y gravosos. Para conocer sus características físicas 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) considerando tendidos lineales que han sido ubicadas estratégicamente para conocer los espesores y densidades de los diferentes materiales que conforman el subsuelo hasta una profundidad de aproximadamente 80 metros.

En base a los resultados obtenidos, se generan dos perfiles de interpretación (ver Figura 32), con el fin de mostrar las características físicas y comportamiento dinámico de los suelos en el área de estudio.

Perfil 1: *Con una orientación NE-SO (ver Figura 33), inicia en la quebrada Pacchac en dirección a la parte alta de la ladera y sus características son:*

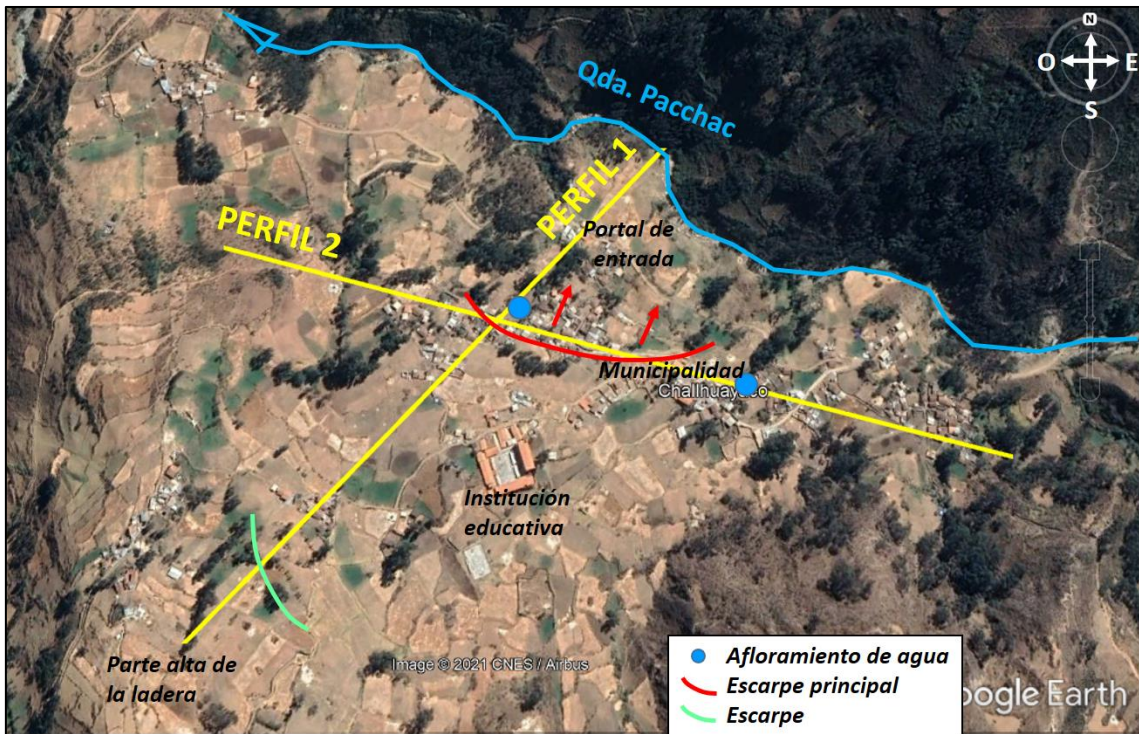


Figura 32. Ubicación y orientación del Perfil 1 con dirección NE-SO y el Perfil 2 con dirección NO-SE.

- A lo largo del perfil se ha identificado suelos constituidos por materiales poco a medianamente consolidados con espesores de 35 metros en la parte baja (próximo a la Qda. Pacchac) y de hasta 60 metros en la parte alta. Por debajo, presenta características de roca fracturada, con espesores de 40 metros en la parte baja, espesor que disminuye a la altura del colegio, para luego incrementarse en la parte alta nuevamente (Los resultados obtenidos a partir de la refracción sísmica y MASW-MAM, son consistentes).
- A lo largo del perfil, el suelo presenta humedad hasta alcanzar los 20 metros de profundidad en promedio, siendo mayor la concentración de humedad en algunos sectores, por ejemplo, en la parte alta del área de estudio.
- Los resultados de periodos dominantes del suelo muestran buena consistencia con los espesores identificados; por ejemplo,

mayores espesores en la parte alta de la ladera. Asimismo, los valores de amplificación sugieren suelos con menor consistencia identificados en la parte baja de la ladera.

Estas características físicas mostradas en el perfil de suelo (Figura 33), sumado al efecto de la gravedad y la inclinación que presenta la superficie, podrían ser los responsables de la aparición de escarpas y agrietamientos, todos identificados principalmente en la parte baja de la ladera.

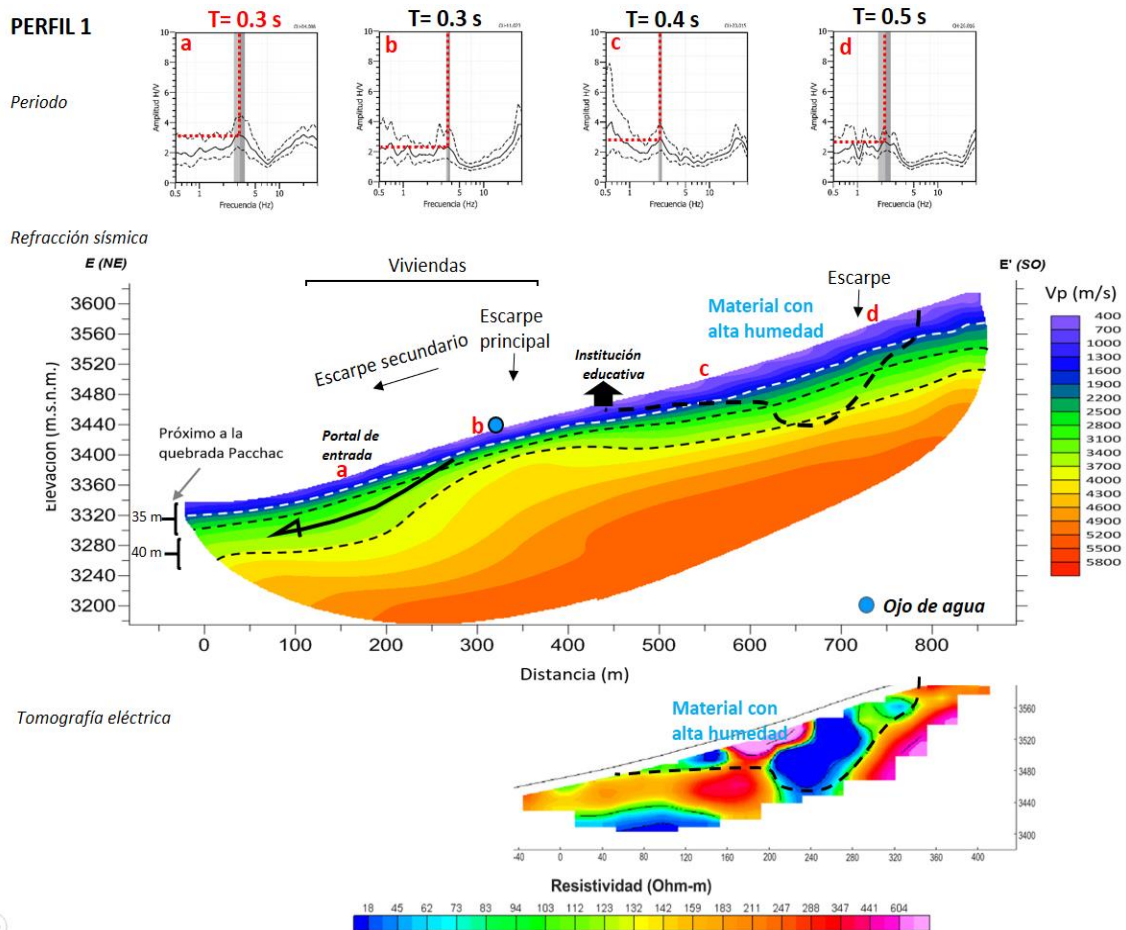


Figura 33. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos de tomografía eléctrica, refracción sísmica y vibración ambiental, para el Perfil 1.

Perfil 2: *Con una orientación NO-SE (Figura 34), se ubica paralelo a la quebrada Pacchac a 250 metros en promedio y próximo a la Municipalidad del Centro Poblado Challhuayaco y sus características son:*

- *A lo largo del perfil se ha identificado suelos constituidos por materiales poco a medianamente consolidados en capas con espesores de 25 y 30 metros, mostrando una tendencia a incrementar su espesor en la parte media del perfil y en el extremo noroeste. Por debajo presentan características de roca fracturada, con espesores entre 10 y 30 metros (Los resultados obtenidos a partir de la refracción sísmica y MASW-MAM son consistentes).*
- *A lo largo del perfil, el suelo presenta humedad, siendo la mayor concentración en la parte media hasta una profundidad de 60 metros y corresponde a la zona donde se ubica el escarpe principal. Hacia los extremos, la humedad alcanza los 20 metros de profundidad en promedio, con tendencia a incrementarse en el extremo noroeste.*
- *Los resultados de periodos dominantes del suelo muestran consistencia con los espesores identificados, estando los suelos más complejos en el extremo noroeste y los suelos de mayor espesor, en la parte media del perfil. Por otra parte, los resultados sugieren suelos de menor consistencia para los primeros niveles del suelo.*

De acuerdo a las características físicas identificadas en el perfil de suelo, existe una mayor concentración de humedad en la parte media del perfil, lo cual podría ser responsable de la aparición de escarpas y agrietamientos en superficie. Aquí la Municipalidad del Centro Poblado Challhuayaco y la Posta de Salud serían severamente afectados.

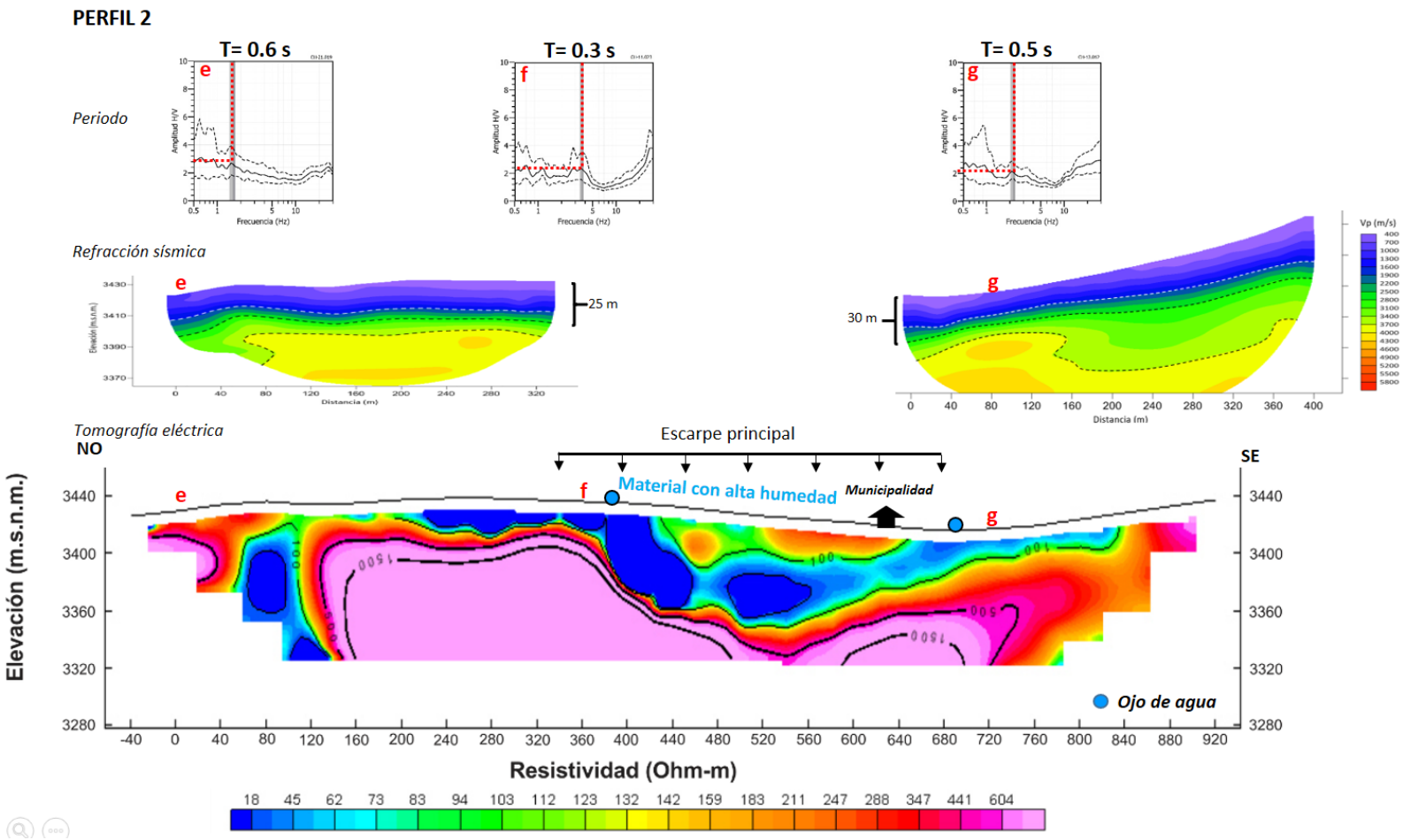


Figura 34. Correlación de los resultados obtenidos con los métodos de tomografía eléctrica, refracción sísmica y vibración ambiental, para el Perfil 2.

En general, los suelos en el Centro Poblado Challhuayaco, a nivel superficial, presentan baja compactación y/o densidad media al estar constituidos por materiales heterogéneos; mientras que, por debajo se tiene roca fracturada y sana a mayor profundidad. Asimismo, se ha identificado la presencia de humedad para los primeros niveles de profundidad del suelo, debido a la filtración del agua proveniente de lluvias de temporada, canales de regadío no revestidos, sistemas de regadío inadecuados y la presencia de puntos de afloramiento de agua.

4.2. Mapa de Iso-espesores

Para el Centro Poblado Challhuayaco, se genera el mapa de iso-espesores considerando las dos primeras capas sísmicas caracterizadas como suelo poco a medianamente consolidado y en algunos sectores como roca muy fracturada, la cual se asienta sobre material con mayor densidad caracterizada como roca fracturada y sana a mayor profundidad.

En la Figura 35, se muestra el mapa de iso-espesores y en ella se observa que los suelos con mayor espesor siguen una dirección NE-SO y de manera puntual hacia el extremo NO, con tendencia a incrementarse. Las capas de suelos con espesores de hasta 40 metros se encuentran próximas a la quebrada Pacchac, por el portal de entrada a Challhuayaco, la Posta de Salud y la Municipalidad del Centro Poblado. En este sector, la ladera del terreno presenta mayor inclinación y en superficie se observa gran variedad de escarpes originadas por el movimiento del suelo.

Asimismo, los suelos en capas con espesores de hasta 60 metros, son identificados por la Institución Educativa y la parte alta de la ladera de la montaña, lo cual sugiere que el suelo muestra poca estabilidad y podría dar origen a la formación de nuevos escarpes en el futuro. Durante la inspección in situ, se ha observado indicios de formación de escarpes en la parte alta de la ladera.

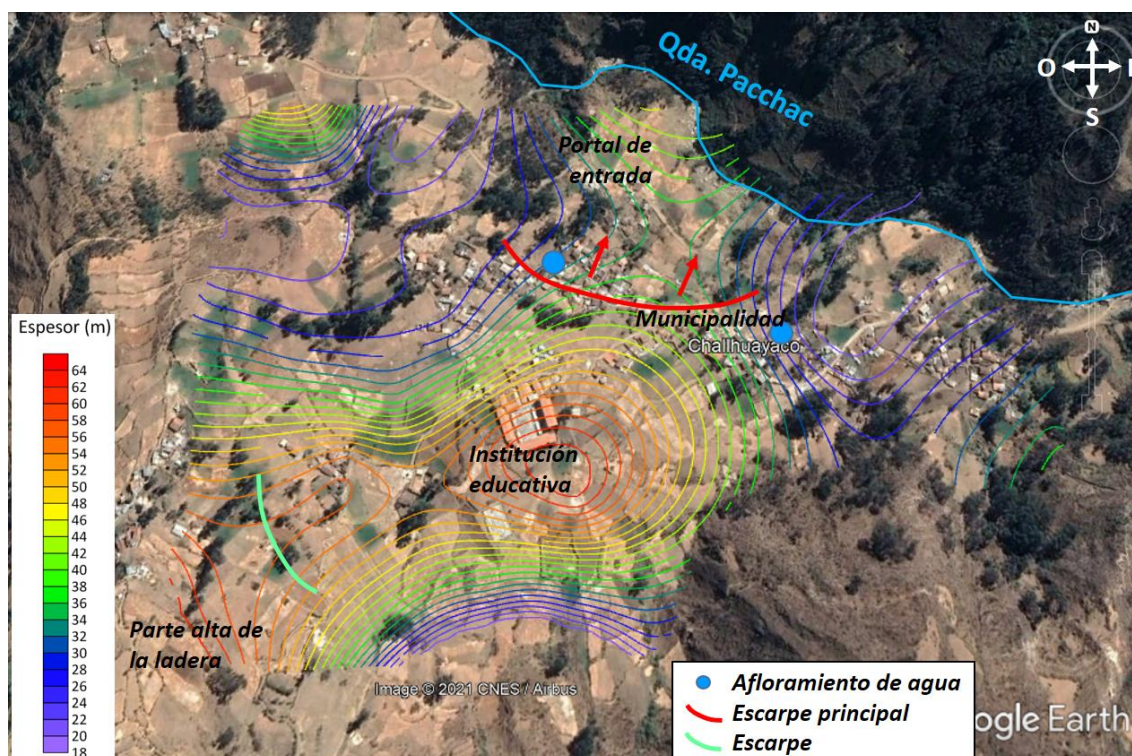


Figura 35. Mapa de iso-espesores para el área de estudio, Centro Poblado Challhuayaco.

4.3. Zonas de peligro por deslizamiento

En el Centro Poblado Challhuayaco, la evaluación del comportamiento dinámico de los suelos ha permitido delimitar y diferenciar espacialmente, la ubicación de los suelos estables e inestables que podrían dar origen a la ocurrencia de asentamientos diferenciales y/o deslizamientos en dirección a la quebrada Pacchac. Para el Centro Poblado Challhuayaco, el análisis de los resultados se realiza de acuerdo a la Figura 36:

Las zonas con alto peligro por deslizamiento están presentes en toda el área del Centro Poblado Challhuayaco; sin embargo, en algunos sectores el peligro es mayor y pueden ser identificados en la Figura 36 por la intensidad del color rojo. En estos sectores los suelos son parte de una capa de gran espesor, son poco compactos y con mayor concentración de humedad; por lo tanto, podrían desarrollar procesos de deslizamientos ante la ocurrencia de lluvias extremas y/o sismos de

moderada a mayor magnitud (líneas punteadas de color amarillo). En estas zonas se tiene la mayor concentración de viviendas; así como la Posta Médica, la Municipalidad del Centro Poblado y la Institución Educativa.

Estos resultados permiten definir que los suelos en la parte media y baja de la ladera se encuentran inestables y susceptibles a generar deslizamientos, puesto en evidencia con la existencia de escarpes en la parte media de la ladera. Un eventual deslizamiento en la parte baja, podría desencadenar una secuencia de deslizamientos desde la parte más alta.

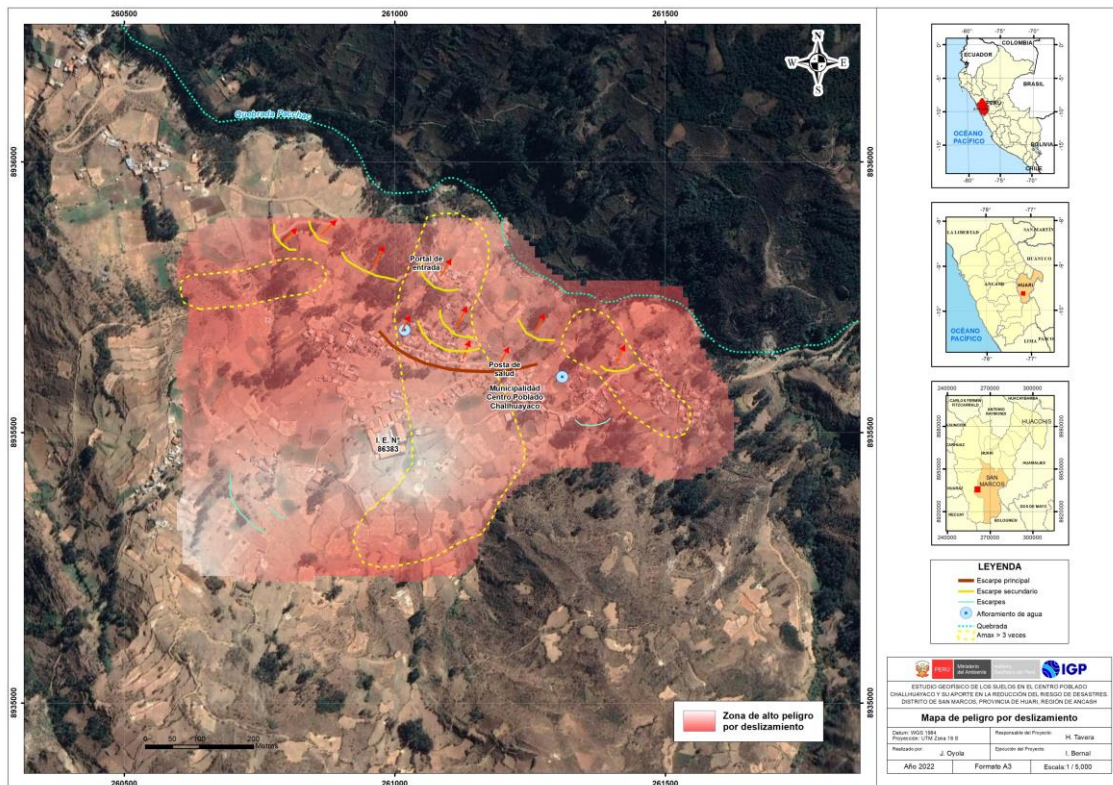


Figura 36. Delimitación de la zona con alto peligro por deslizamiento. Las zonas con mayor peligro corresponden a la coloración con mayor intensidad.

CONCLUSIONES

El análisis y evaluación geofísica de los suelos en el Centro Poblado de Challhuayaco, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- Se ha observado que la capa compuesta por suelos poco a medianamente consolidados o roca muy fracturada, presenta espesores de hasta 40 metros próximos a la quebrada Pacchac (parte baja de la ladera); y de 60 metros hacia el extremo sur (parte alta de la ladera). Este escenario, permite considerar que en el área de estudio existen grandes espesores de suelo, que sumados a la inclinación de la superficie del terreno, evidencian la posibilidad de generación de deslizamientos.*
- A nivel superficial, los suelos presentan alto contenido de humedad hasta una profundidad promedio de 20 metros; sin embargo, por la Municipalidad del Centro Poblado Challhuayaco, Puesto de Salud, parte posterior de la Institución Educativa; así como por el extremo noroeste del área de estudio, y la parte alta de la ladera, la humedad alcanzaría una profundidad de hasta 60 metros. La alta concentración de humedad en el suelo, incrementa la inestabilidad del terreno.*
- Sobre la superficie, se ha observado la presencia de escarpas que sugieren el desarrollo de un deslizamiento tipo rotacional y cuya masa se desplaza en dirección de la quebrada Pacchac. Este deslizamiento afectaría la infraestructura física presente en el área de estudio, principalmente a las viviendas asentadas en este sector. Muchas de estas viviendas ya presentan grietas y fisuras en sus paredes, así como el deslizamiento de algunos de sus muros y/o paredes.*

- *Los factores condicionantes reconocidos en campo que contribuyen al desarrollo de procesos de deslizamientos de masas de tierra son: la pendiente del terreno (> a 25°) y la presencia de suelos arcillosos, limosos y gravas limosas sobre los cuales se asientan las viviendas. Asimismo, los factores desencadenantes son: las precipitaciones pluviales intensas, la actividad antrópica (canales de regadío sin cementar) y la ocurrencia de sismos.*
- *En toda el área de estudio, los suelos reúnen las condiciones necesarias como para experimentar un comportamiento dinámico anómalo y dar origen a deslizamientos.*
- *Los sectores en donde existe la mayor probabilidad de experimentar deslizamientos del suelo, se encuentran por la Municipalidad del Centro Poblado, la Posta de Salud y la Institución Educativa. Aquí, los suelos presentan gran espesor y baja compactación; además de un alto contenido de humedad, todo ello sumado a la inclinación de la superficie del terreno y al efecto de la gravedad. En estos sectores de ha identificado, en superficie, la presencia de fisuras en la parte baja de la ladera (próximo a la quebrada Pachac), lo cual evidencia el desarrollo de un deslizamiento a futuro.*

RECOMENDACIONES

La evaluación geofísica en el Centro Poblado Challhuayaco, permite realizar las siguientes recomendaciones:

•Mejorar el sistema de drenaje pluvial para evacuar las aguas de escorrentía generadas por la ocurrencia de precipitaciones pluviales y así, evitar el asentamiento del suelo producto de la infiltración del agua y la formación de grietas en superficie. Asimismo, implementar un sistema de regadío adecuado que remplace al riego por inundación para evitar la saturación del suelo.

•Se sugiere reforzar los enrocados ubicados en la vía de acceso al área de estudio a fin dar mayor estabilidad a los suelos susceptibles a deslizarse. Se debe considerar los espesores de las capas de suelos indicados en este estudio.

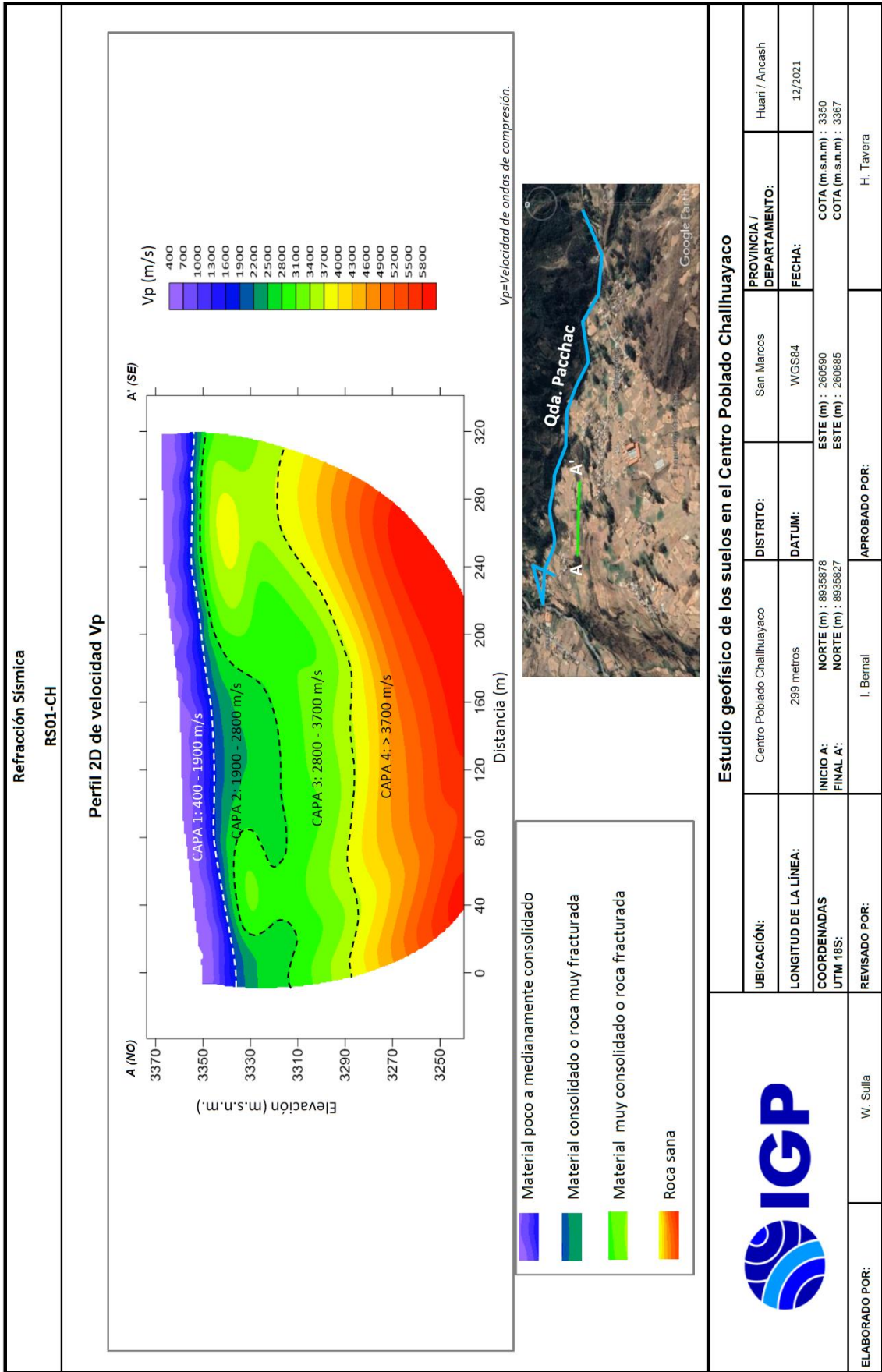
•Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, se sugiere tomar acciones que permitan lograr mantener la estabilidad del suelo, en caso contrario y para reducir el riesgo de desastre, se sugiere la reubicación del Centro Poblado, debido a que se encuentra expuesto de manera constante al peligro por deslizamiento.

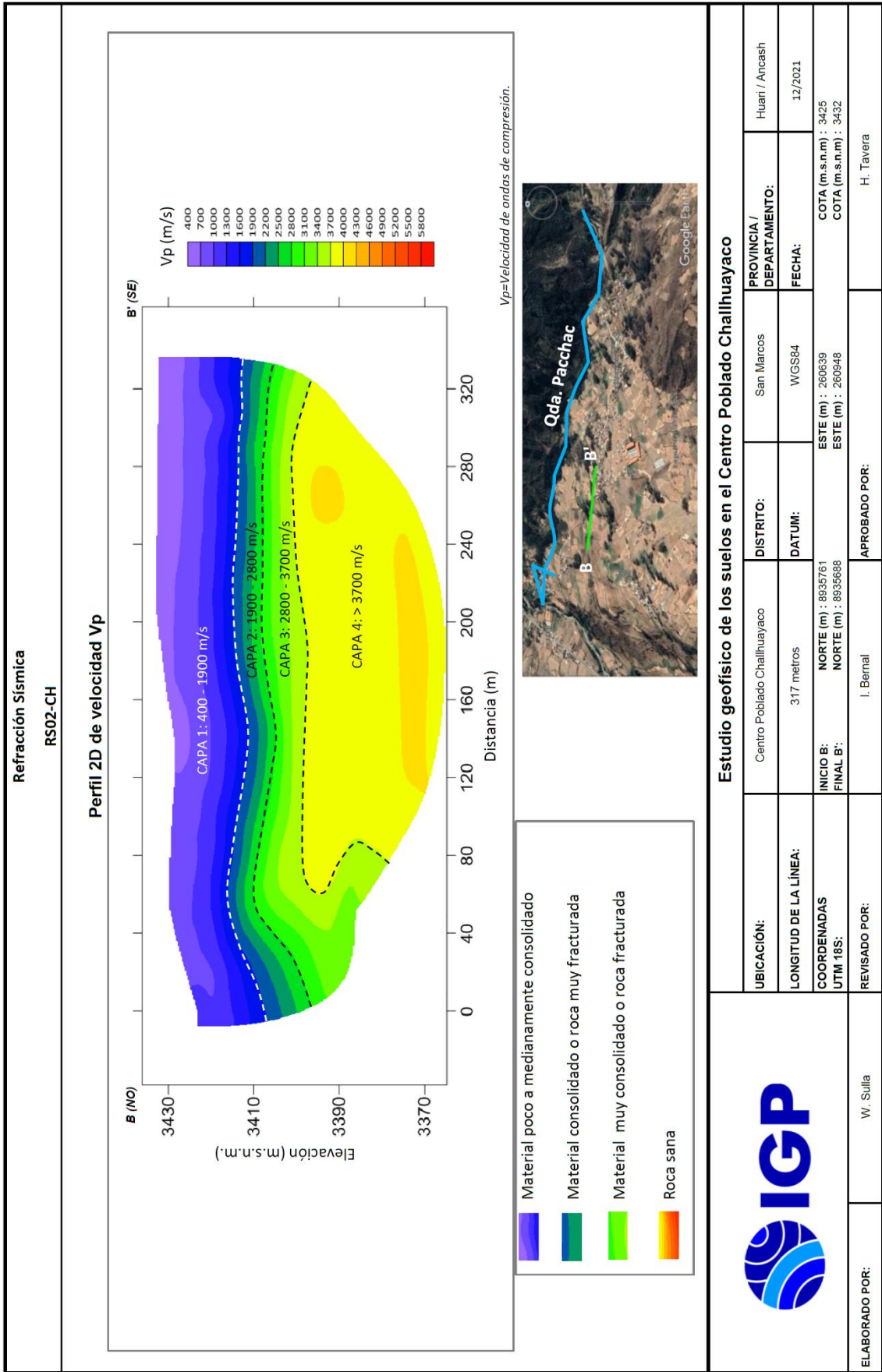
BIBLIOGRAFÍA

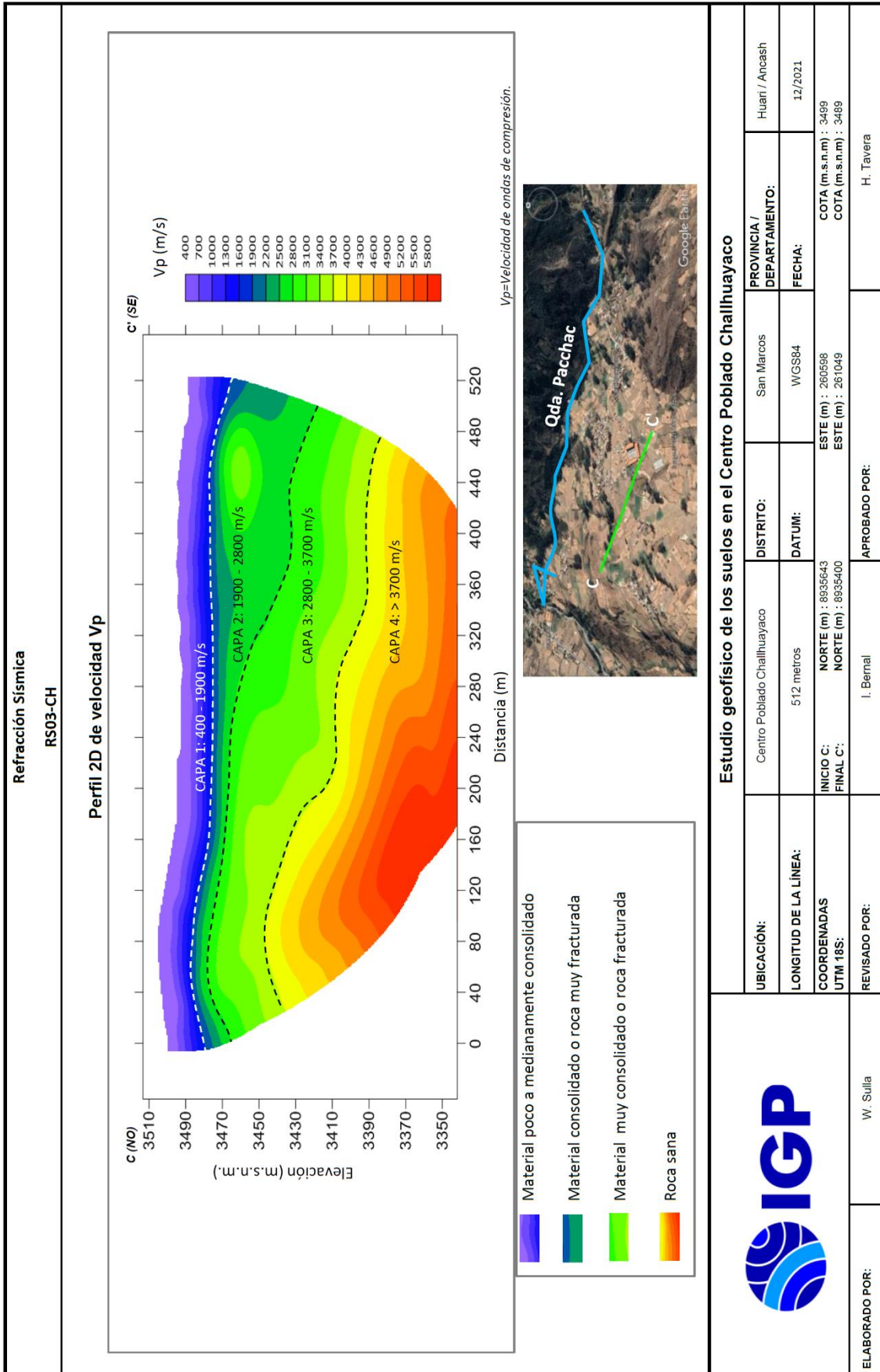
- Argandoña, M (2019). Estudio de mecánica de suelos con fines de estudios de riesgo. Municipalidad del distrito de San Marcos – Huari – Ancash.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Carta Geológica del Perú, Serie A. INGEMMET, Mapa geológico del Cuadrángulo de Recuay (20-i)
- Loke M.H. (1996-2004). 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, *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30(1):25-33.
- 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.
- Rojas, I (2019). Evaluación De Riesgo Por Movimiento De Masa En La Localidad De Challhuayaco, Centro Poblado De Challhuayaco Del Distrito De San Marcos – Provincia De Huari – Región Ancash"
- 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>.

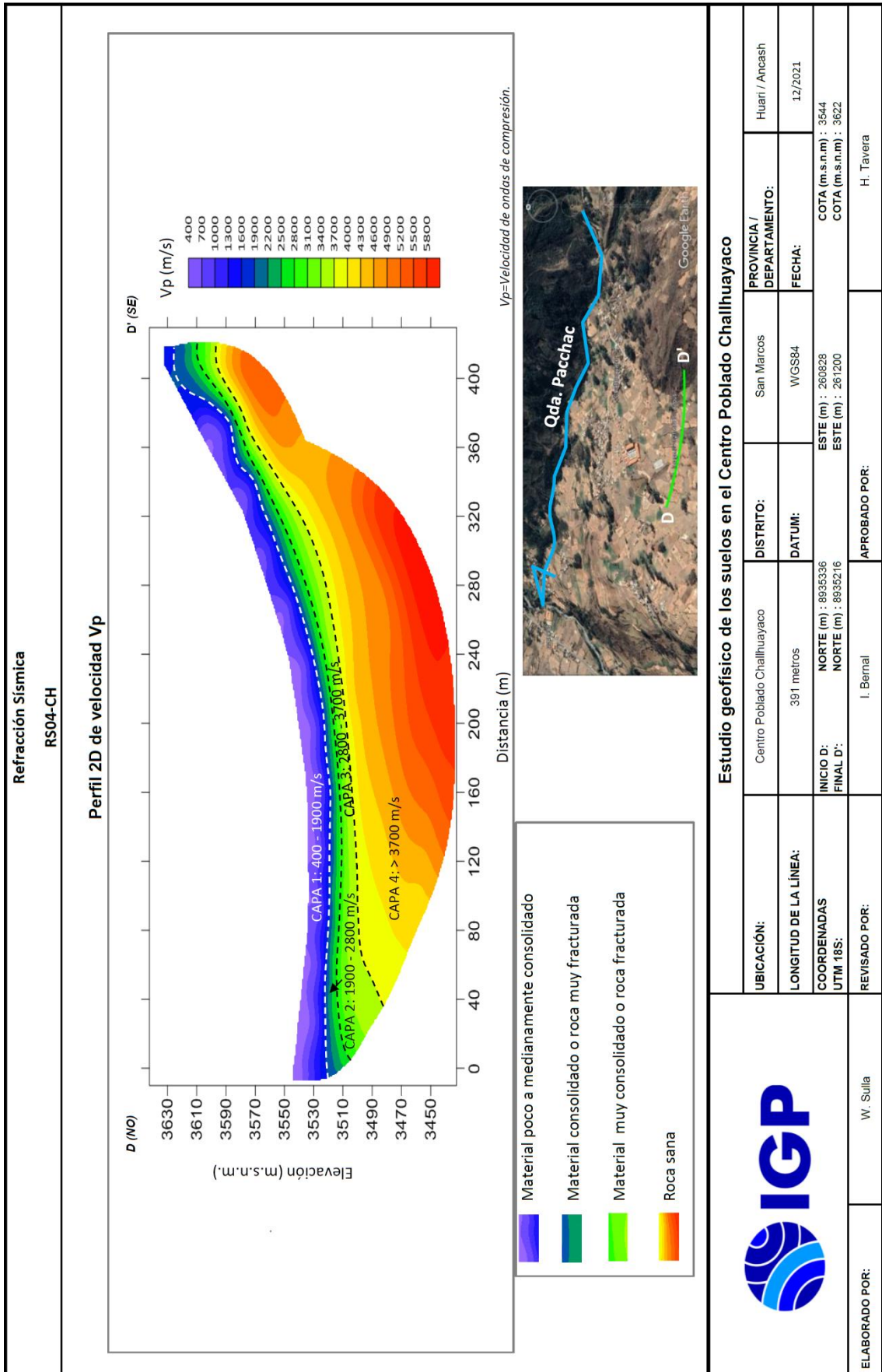
ANEXO I

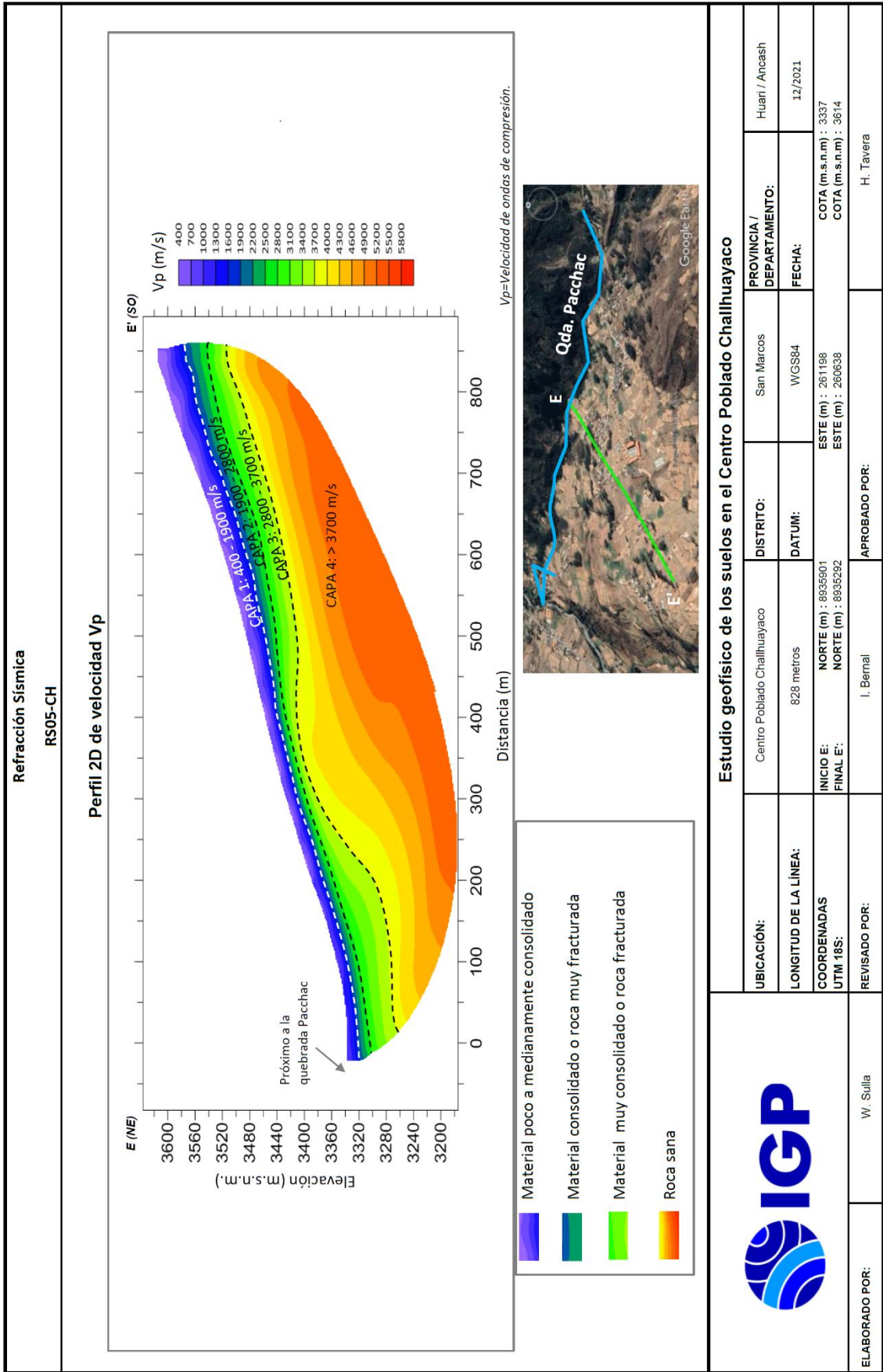
Secciones de Refracción Sísmica

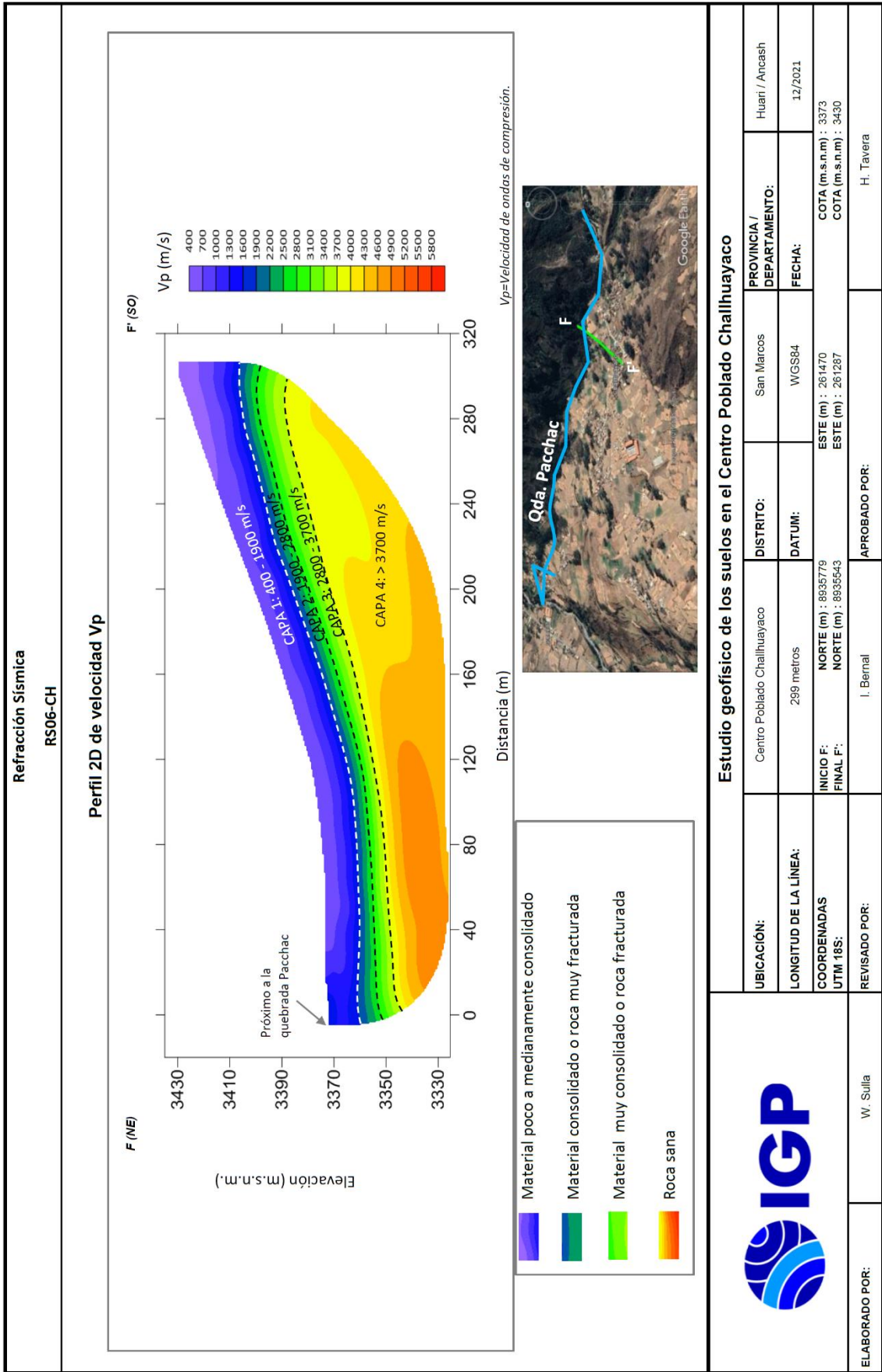


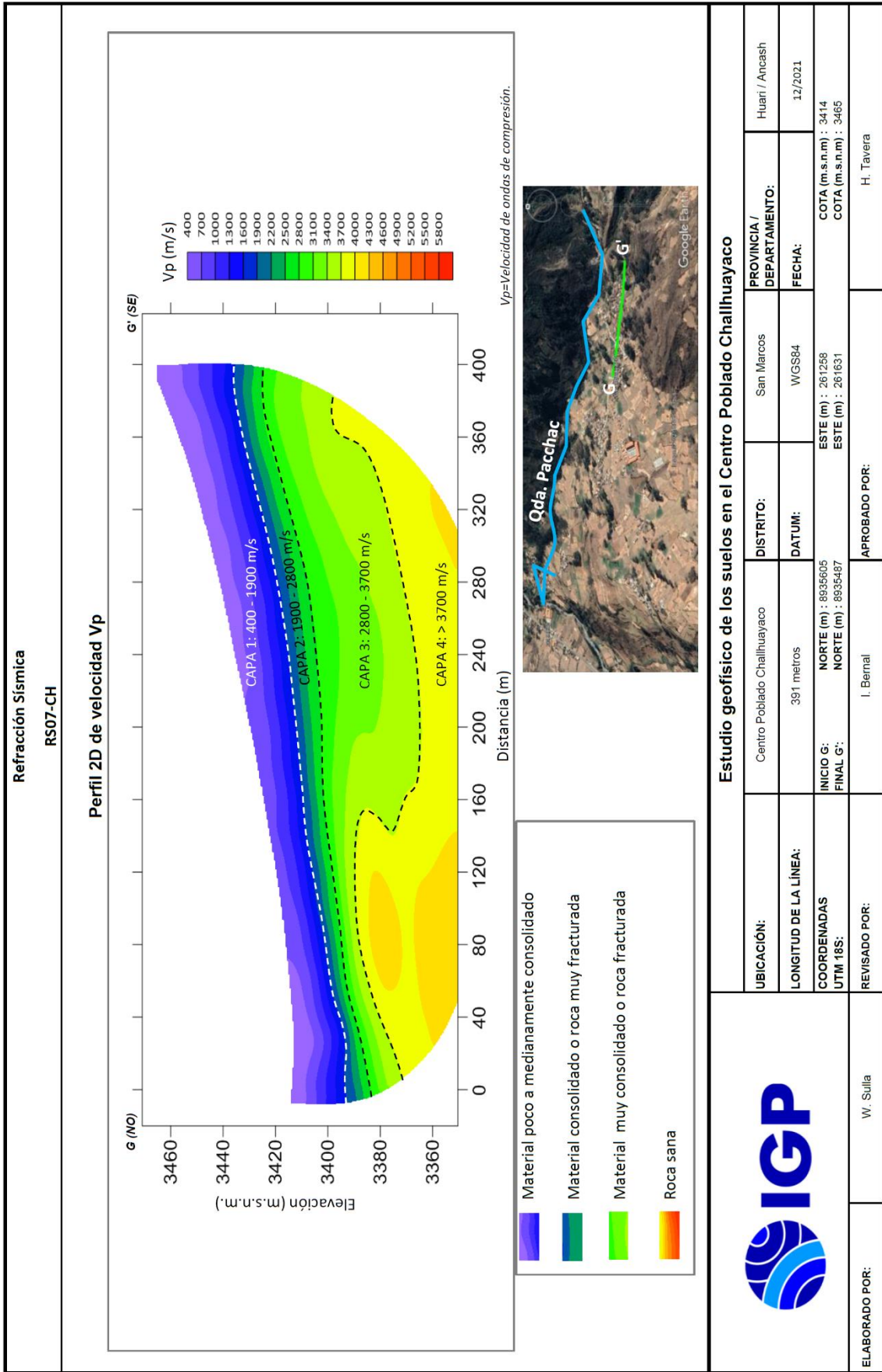






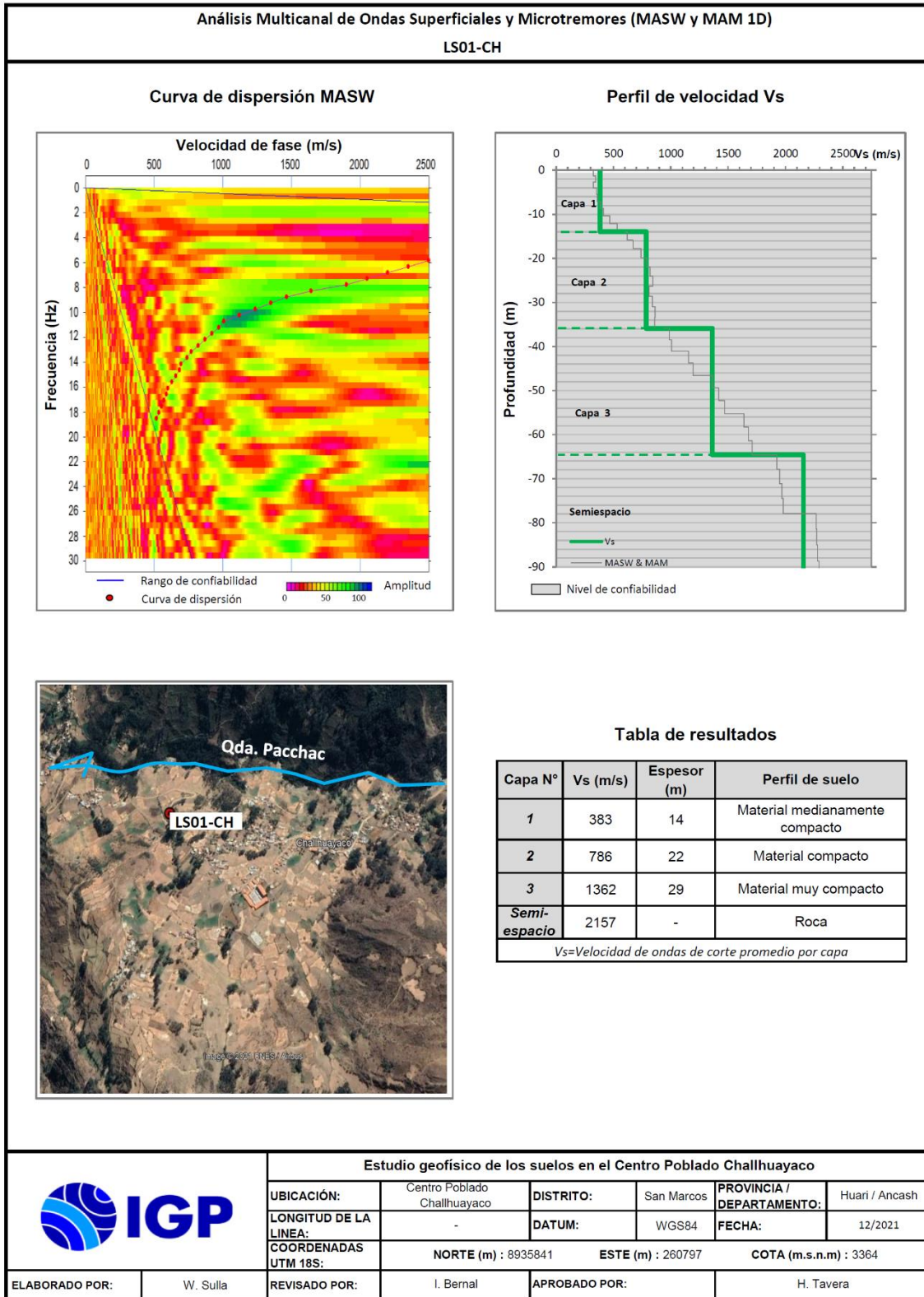


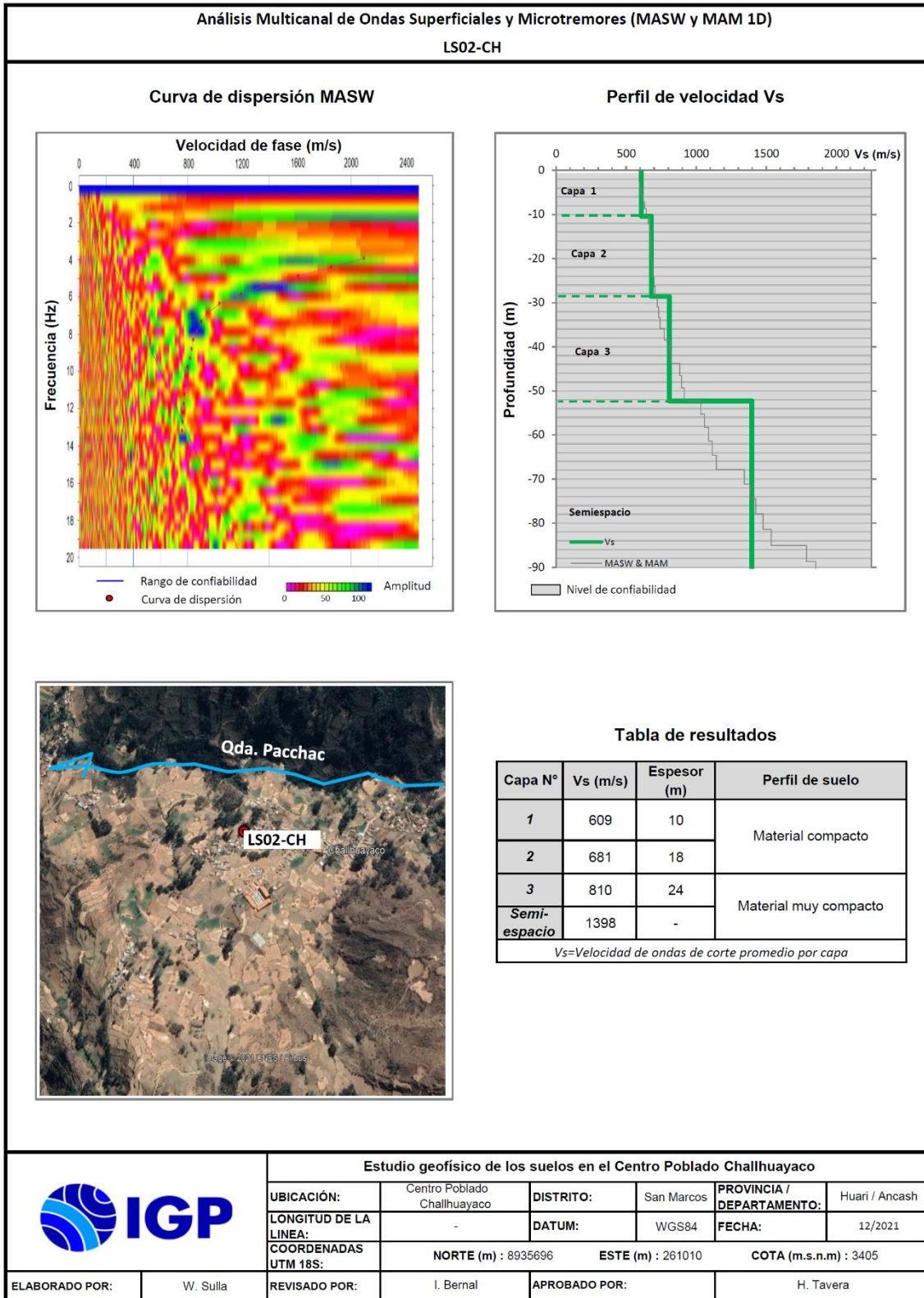


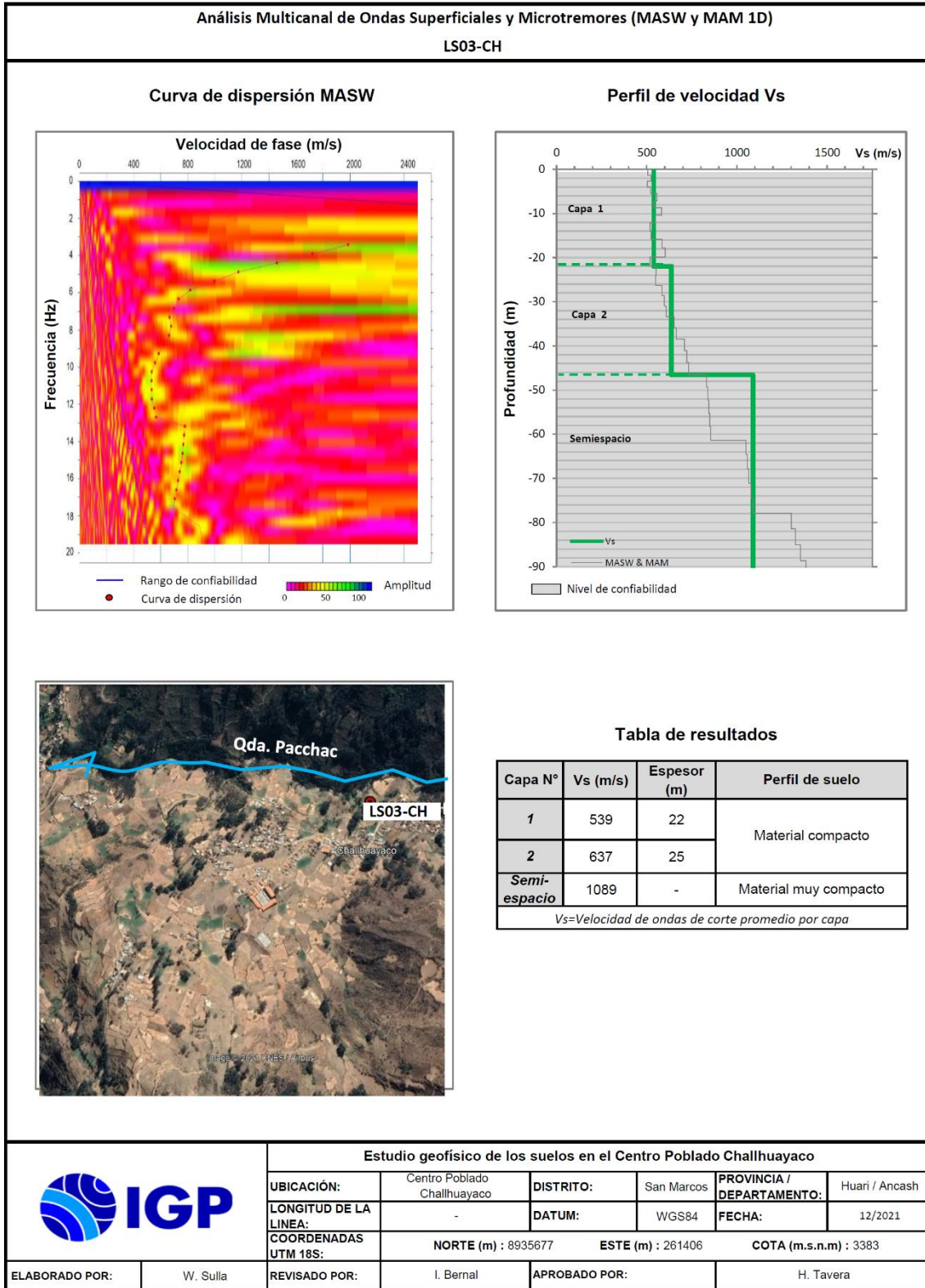


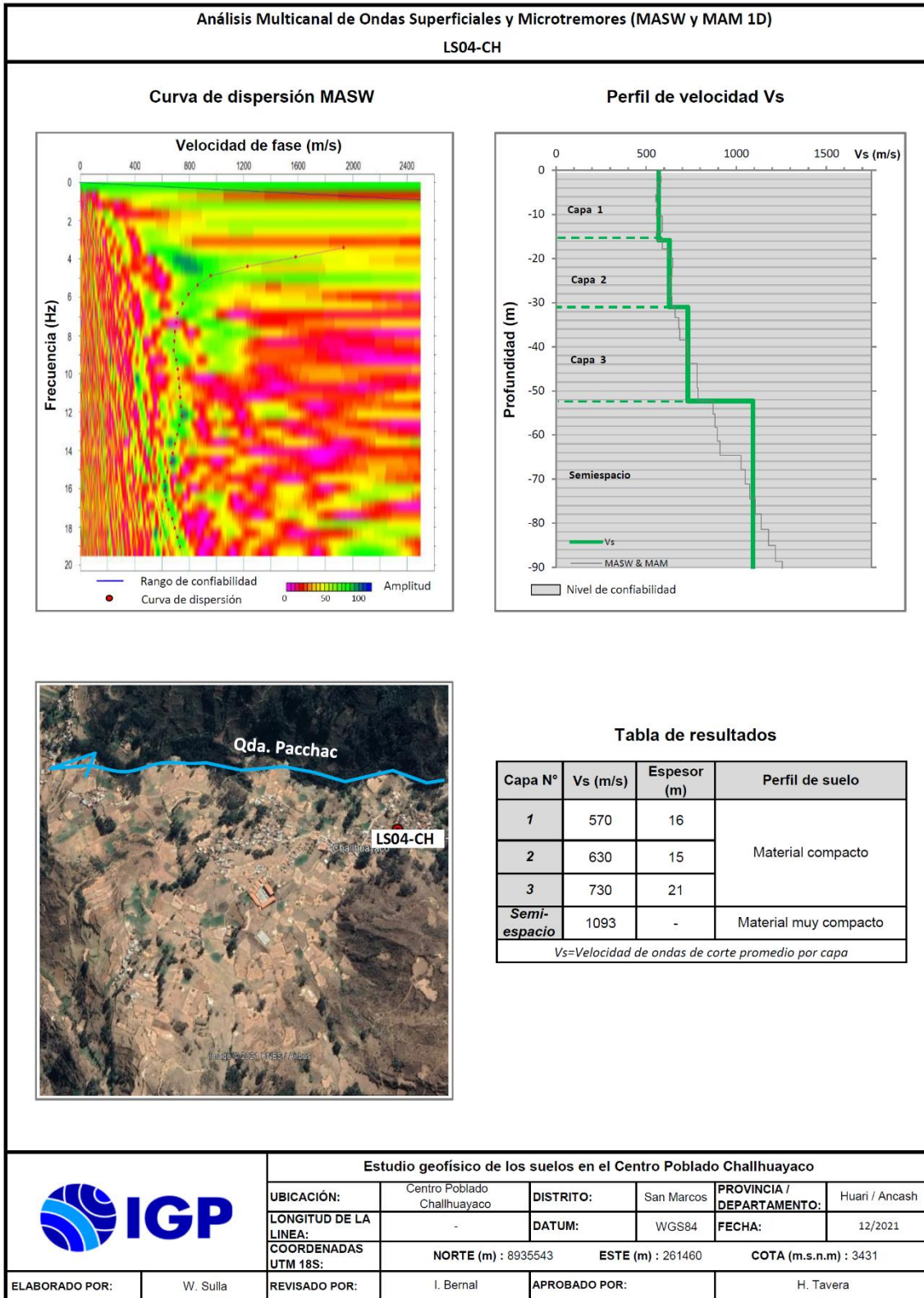
ANEXO II

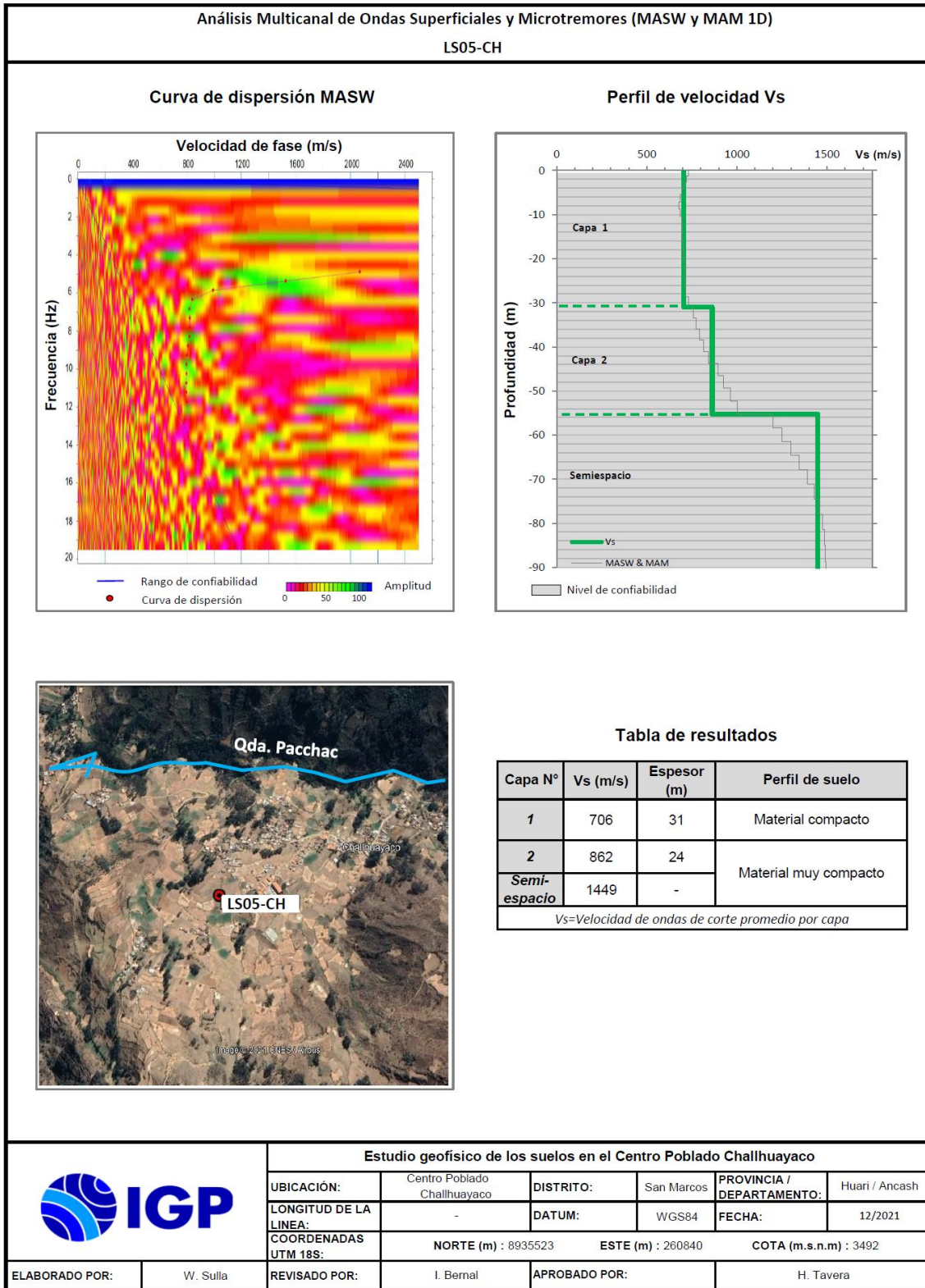
Perfiles MASW y MAM.

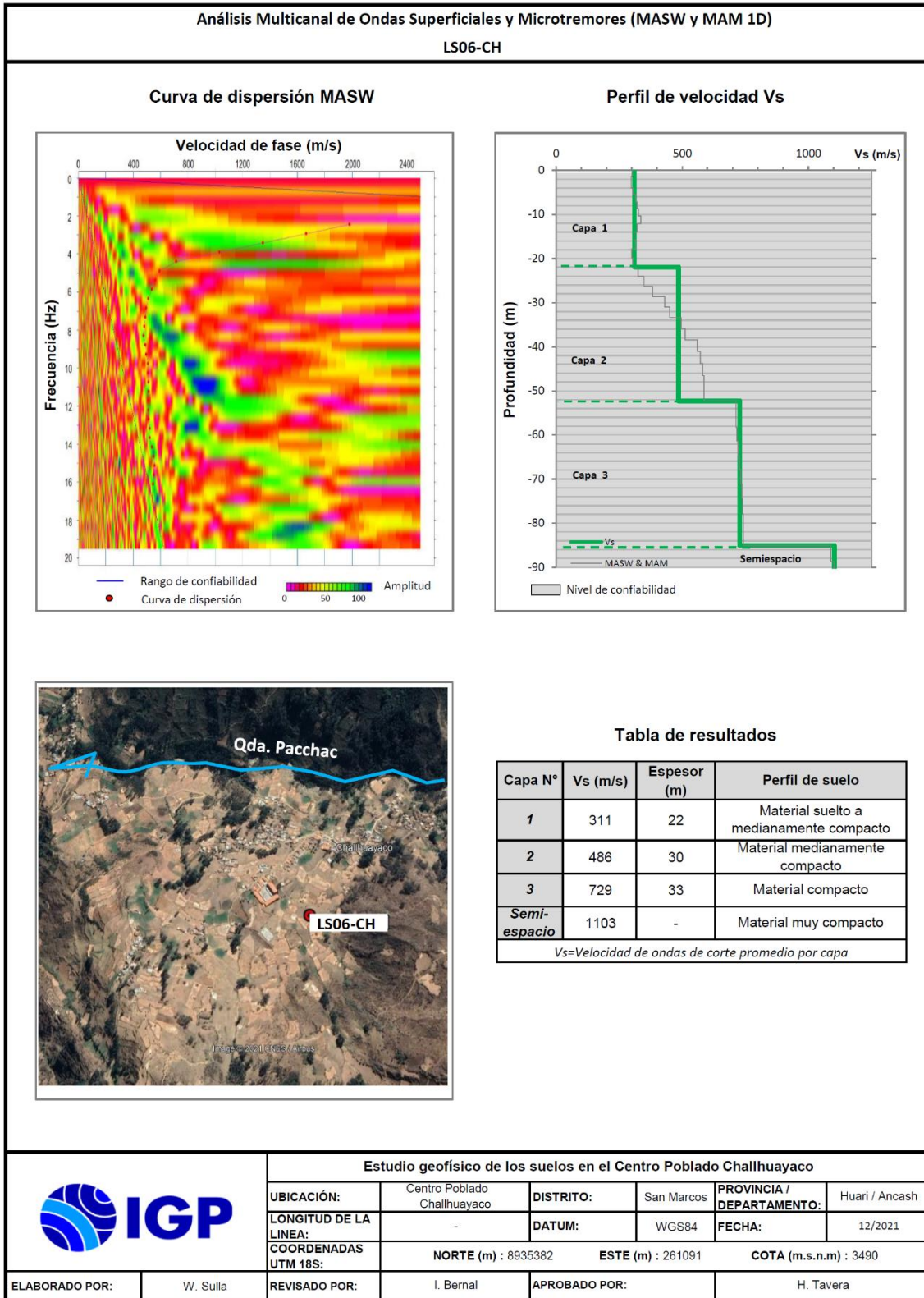


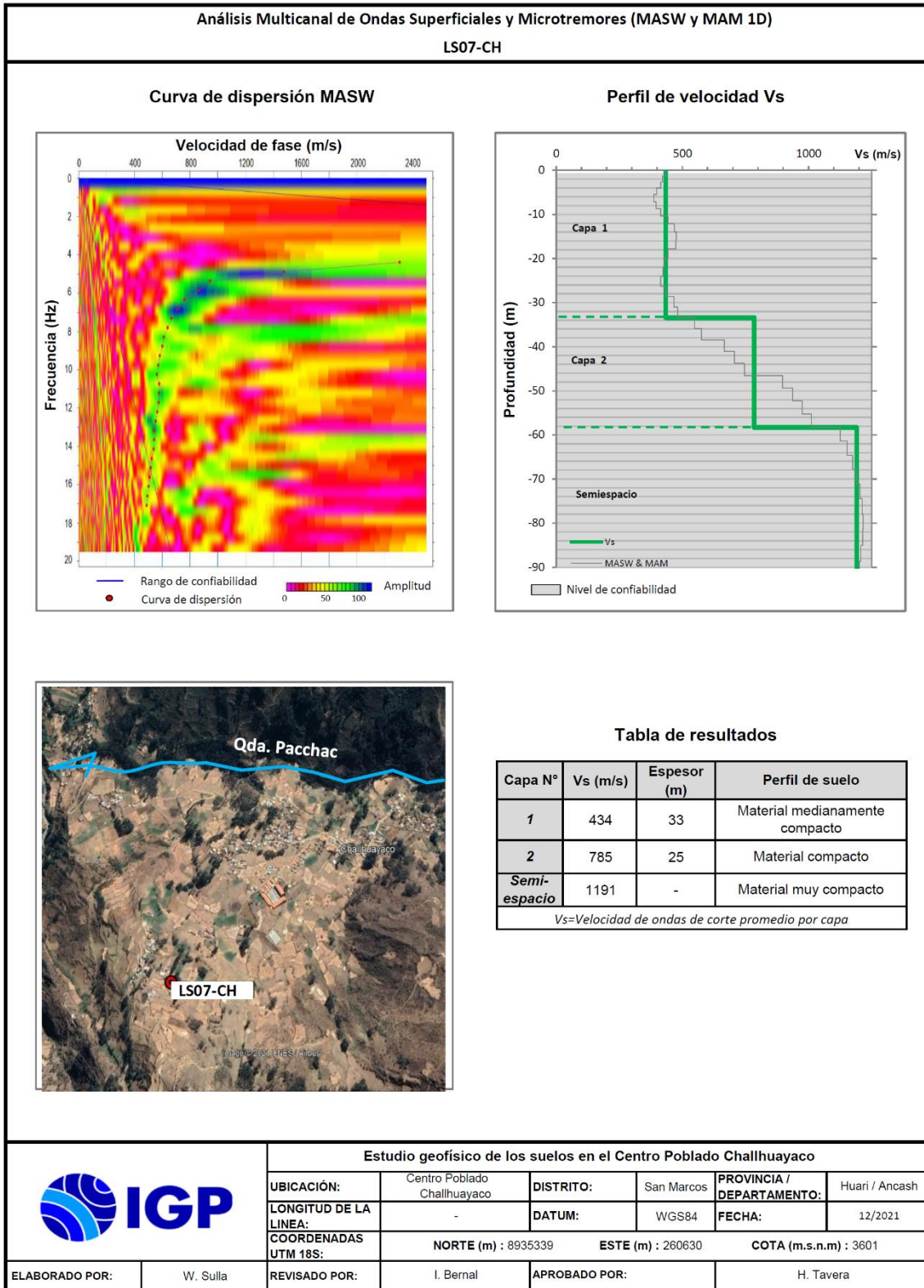






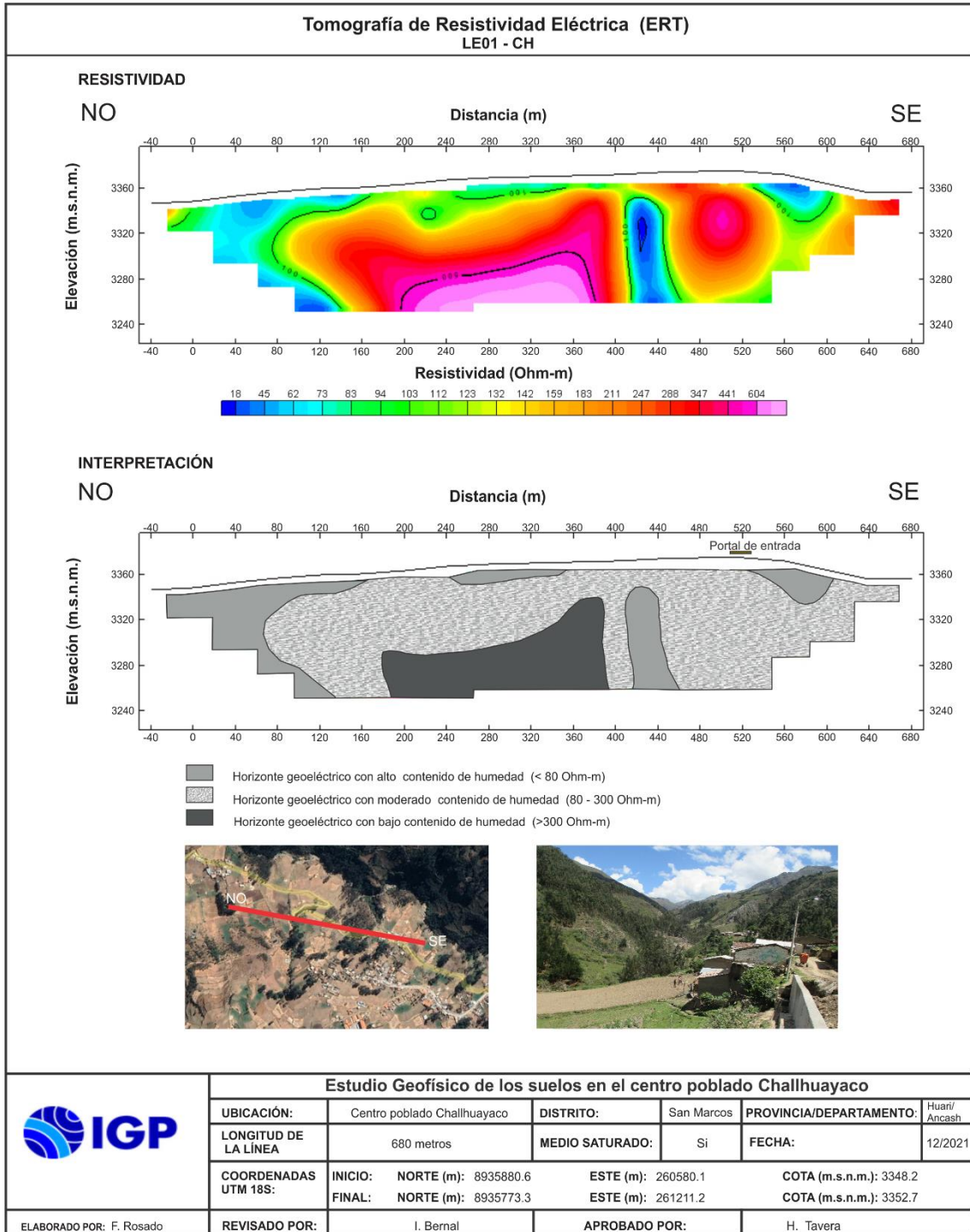


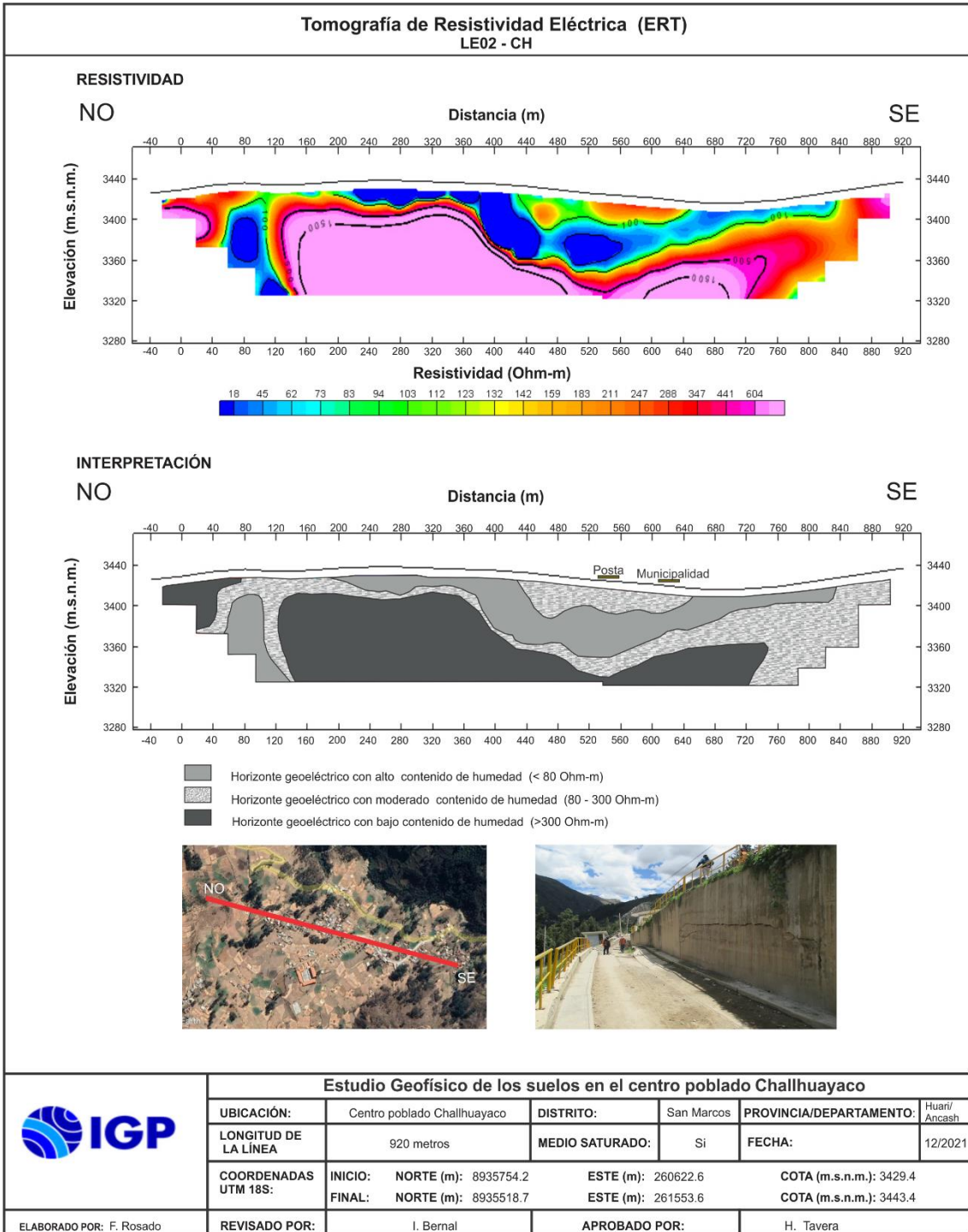


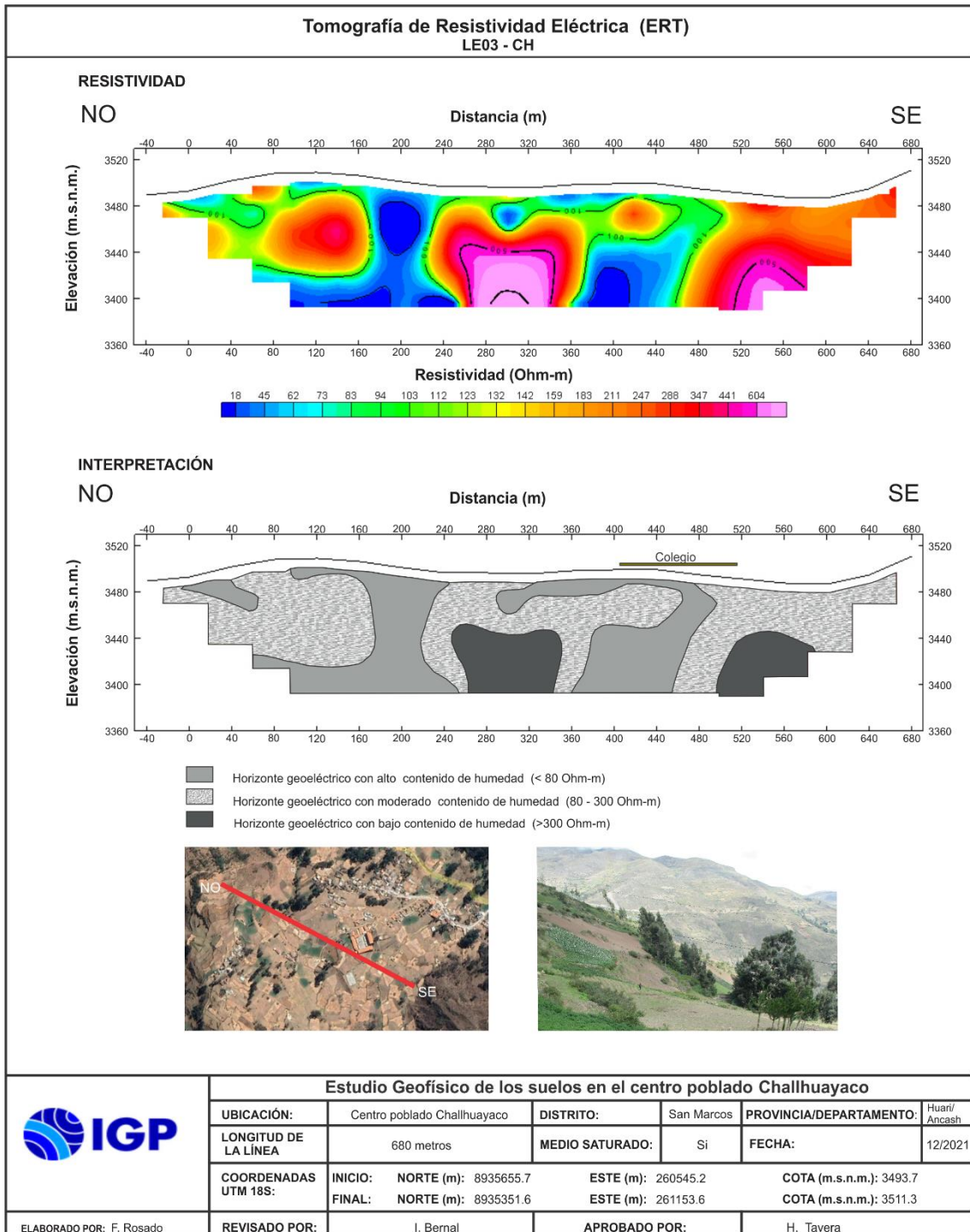


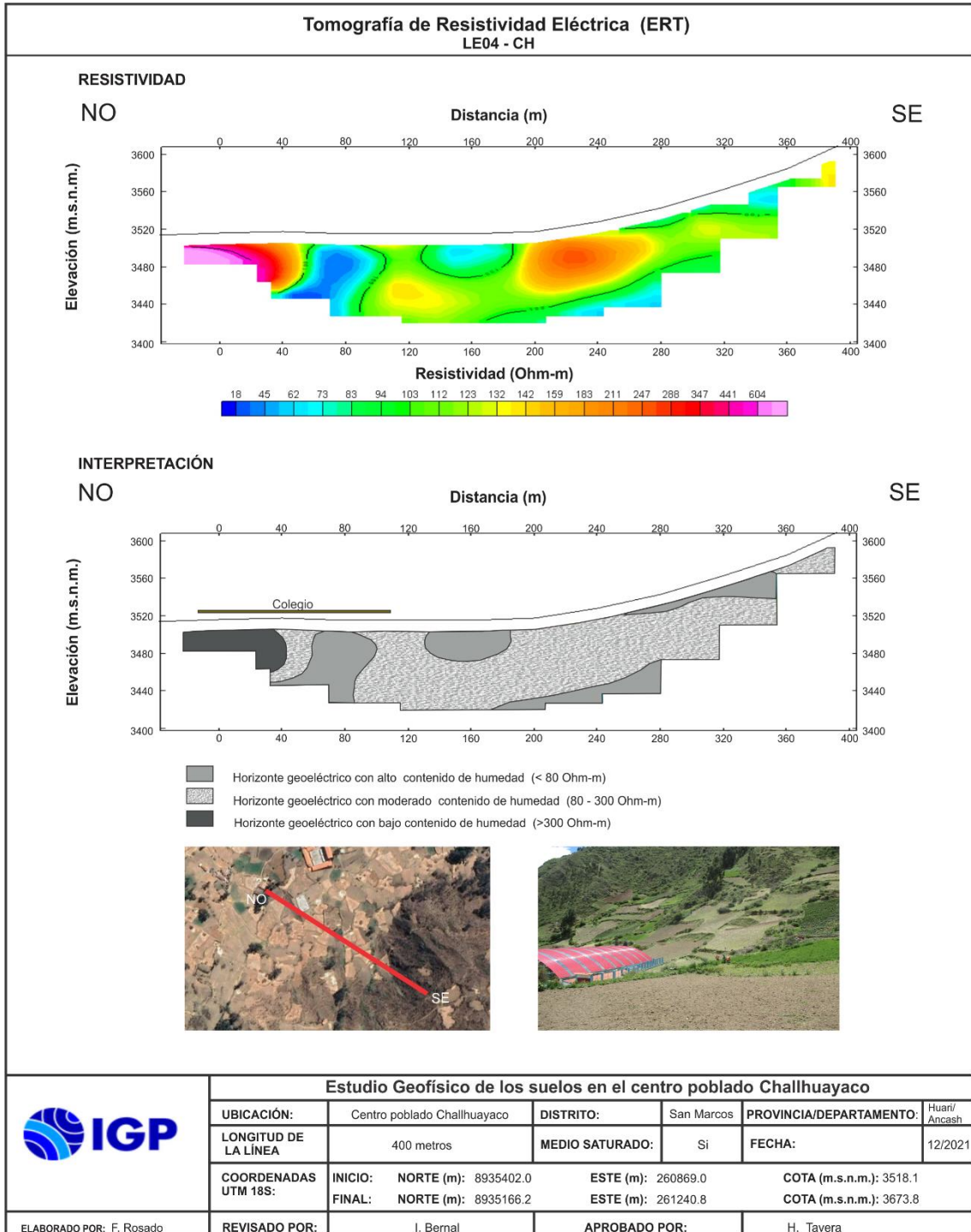
ANEXO IV

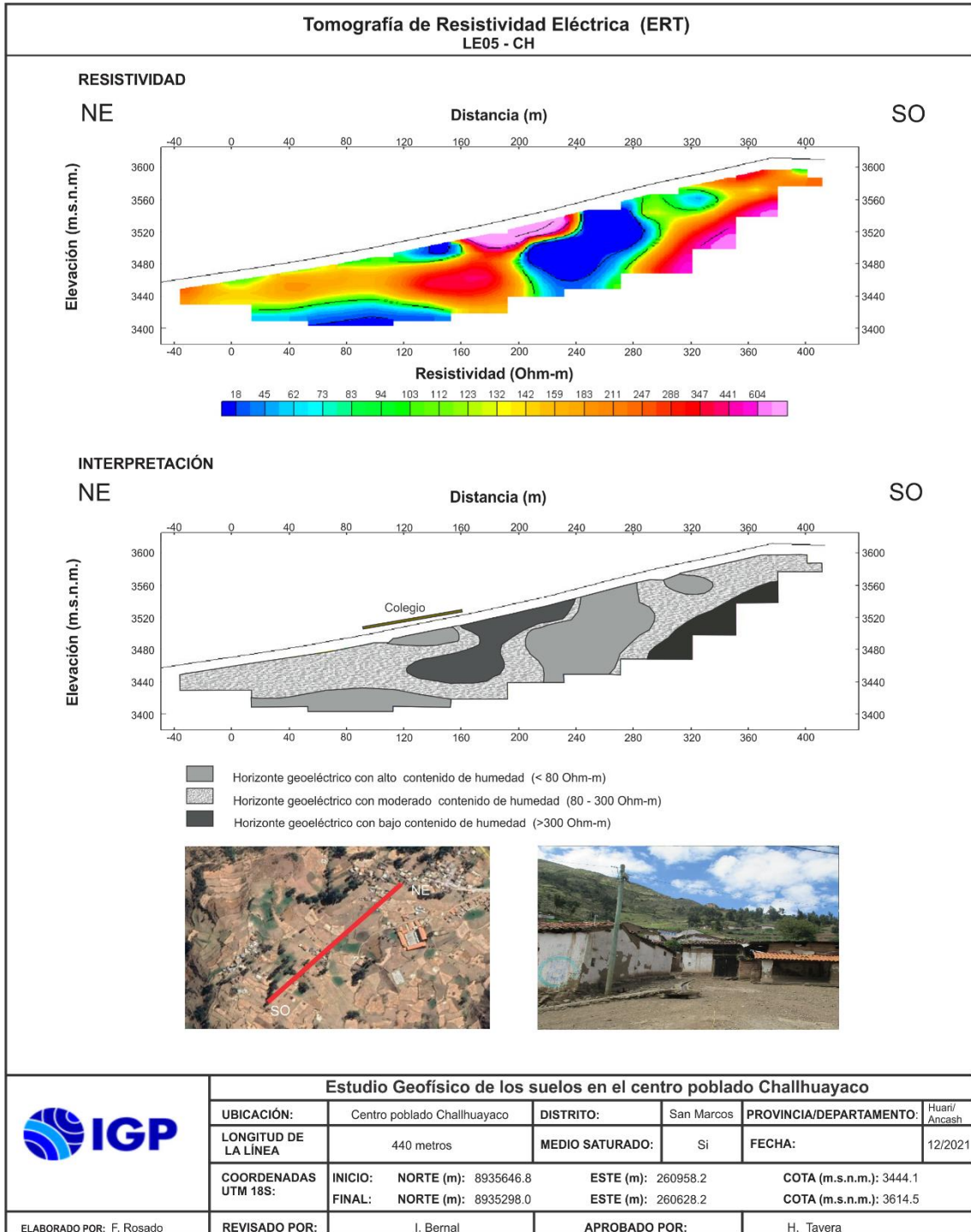
Secciones geoeléctricas

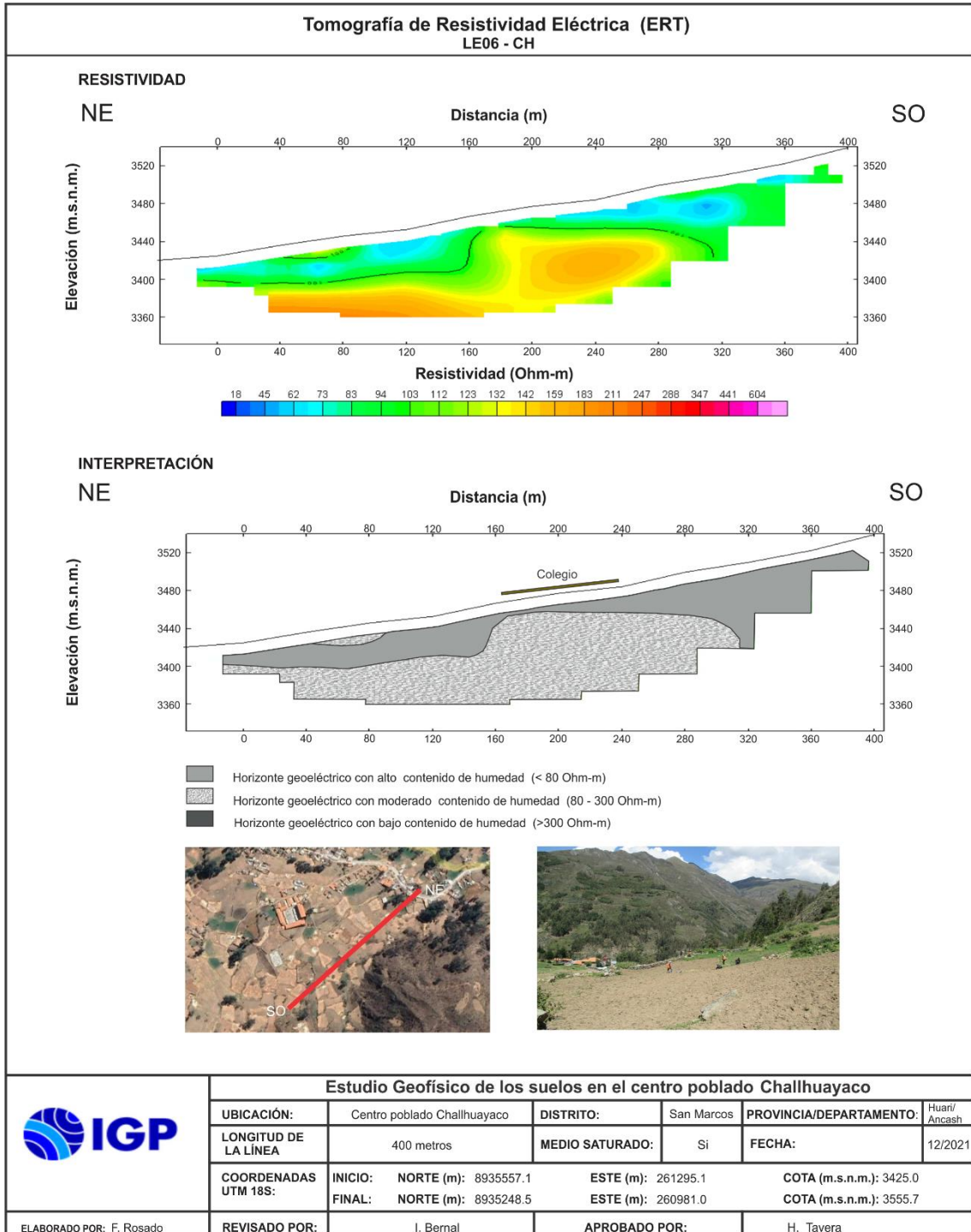












MAPAS TEMÁTICOS

