

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia

**Sísmica de refracción y microtremores para caracterización  
de parámetros dinámicos superficiales en un estudio  
geotécnico en la quebrada Caramolle,  
Distrito de Pocollay - Tacna**

TESIS

Presentada por:

Bach. TONY BRADY CANQUI ANQUISE

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO – GEOTÉCNICO

TACNA – PERU  
2013

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA – GEOTECNIA  
**“SÍSMICA DE REFRACCIÓN Y MICROTREMORES PARA CARACTERIZACIÓN  
DE PARÁMETROS DINÁMICOS SUPERFICIALES EN UN ESTUDIO  
GEOTÉCNICO EN LA QUEBRADA CARAMOLLE,  
DISTRITO DE POCOLLAY – TACNA”**

Tesis sustentada y aprobada el 2 de setiembre del 2013, integrada por el siguiente jurado:

PRESIDENTE

-----  
Ph. D. EDWIN M. PINO VARGAS

MIEMBRO – SECRETARIO

-----  
ING. JORGE BARRIGA GAMARRA

MIEMBRO

-----  
ING. FREDY CABRERA OLIVERA

ASESOR DE TESIS

-----  
ING. LUIS A. CORNEJO NAVARRETTY

*A mi madre, por su apoyo  
incondicional, su paciencia  
y sus lecciones impartidas  
para la vida.*

*A la memoria de mi padre, por  
su incansable sacrificio para  
hacer de sus hijos personas de bien.*

*A mis hijos Tony y Alejandro,  
que son mis motivos para  
ser cada día mejor.*

## **AGRADECIMIENTO**

En especial a todos los docentes que han contribuido en mi formación académica y a la E. A. P. de Ingeniería Geológica – Geotecnia.

A mis colegas amigos, que me apoyaron en los trabajos de campo, Rubén Cahuana, Hugo Quispe, Froilán Barrantes y Cesar Huamán.

Al Msc. Ing. Conrado Bedoya Jaén por su confianza, aliento y apoyo en la realización de este trabajo.

Al Ing° Luis Cornejo, catedrático de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann y asesor de la presente tesis; a los catedráticos Ing. Fredy Cabrera, Ing. Jorge Barriga, Ph D. Edwin Pino y Ing. Gloria Choque, por las sugerencias para mejorar este trabajo.

## **RESUMEN**

Los asentamientos humanos acentuados sin una adecuada asistencia técnica, están expuestos a peligros naturales como sismos, huaycos, deslizamientos, etc., esta situación nos lleva a realizar estudios de caracterización de parámetros dinámicos superficiales y determinación de capacidad portante de los suelos de la quebrada Caramolle con fines constructivos.

El suelo del área de estudio está constituida por depósitos proluviales de arenas tobáceas como relleno del valle, representando éstas un potencial peligro para fines constructivos, en especial ante sollicitaciones sísmicas.

Para la determinación de los parámetros dinámicos superficiales y estimación de capacidad de carga del suelo, se utilizó refracción sísmica y análisis de microtremores acompañado de ensayos en laboratorio de mecánica de suelos para determinar las propiedades dinámicas y estáticas del suelo. El equipo usado para el ensayo de refracción y análisis de microtremores fue un sismógrafo modelo ES-3000 con 12 geófonos verticales de 14Hz, ejecutando siete líneas transversales a la quebrada Caramolle con un total de 37 tendidos de 33 metros cada uno y 6 tendidos de 12 metros, éstos últimos en puntos específicos donde se ejecutarían las calicatas.

En el laboratorio de mecánica de suelos se realizaron ensayos de granulometría, límites de consistencia y corte directo; y

por otro lado mediante el programa de computo *SeisImager* se calculó las velocidades de ondas P a diferentes profundidades llegando hasta 10.7 metros de profundidad, así mismo se calculó las velocidades de ondas S hasta 23 metros de profundidad; con los datos obtenidos en estos procesos se calculó parámetros dinámicos superficiales del suelo, capacidad portante, además se realizó perfiles sísmicos de velocidades de ondas P ( $V_p$ ) y de ondas S ( $V_s$ ) y mapas de isovalores de las relaciones  $V_p/V_s$  y Poisson que muestran la calidad del suelo.

Las capacidades portantes obtenidas por los métodos tradicionales y geofísicos muestran una correlación lineal de 0.7 siendo ésta alta, demostrando la validez del método geofísico; también se determinó que el suelo es óptimo para la urbanización y ejecución de estructuras habitacionales de dos pisos usando zapatas aisladas. Con los planos de isovalores de Poisson y  $V_p/V_s$ , se determinó que los suelos de mejor calidad se ubican al sur y al noreste del área de trabajo, y los suelos con menor calidad están en la parte central y norte.

Así mismo con los datos de parámetros dinámicos del suelo es posible realizar diseños de cimentaciones especiales según sean requeridas.

## CONTENIDO

### CAPITULO I

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>01</b>
1.1 Ubicación y Accesibilidad.....	02
1.2 Objetivos.....	03
1.2.1 Objetivos específicos.....	04
1.3 Trabajos anteriores.....	04

### CAPITULO II

<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>06</b>
2.1 Sísmica de refracción.....	06
2.1.1 Principios básicos de la refracción sísmica.....	07
• Principio de Huygens.....	07
• Ley de Snell.....	08
• Fenómeno de refracción crítica.....	11
2.2 Refracción por microtemores.....	13
2.2.1 Análisis espectral de velocidad.....	14
2.2.2 Selección de la curva de dispersión de ondas Rayleigh.....	15
2.2.3 Modelado de la Velocidad de la Onda de Cizalla.....	16
2.3 Parámetros dinámicos del subsuelo.....	16
2.3.1 Relación de Poisson ( $\nu$ ).....	16
2.3.2 Módulo de Cizalla o Rigidez ( $G_{max}$ ).....	17
2.3.3 Módulo de Elástico o Young ( $E_{max}$ ).....	18
2.3.4 Módulo de Volumen o Bulk ( $K$ ).....	19
2.4 Capacidad de carga.....	19
2.5 Cálculo de densidad empírica usando $V_p$ .....	20
2.6 Asentamientos en suelos granulares según teoría clásica....	21

### CAPITULO III

<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>23</b>
3.1 Geología del área de estudio.....	23
3.1.1 Sedimentología y estratigrafía.....	23
3.1.1.1 Formación Huaylillas.....	23
3.1.1.2 Toba Pachía.....	24
3.1.1.3 Depósitos cuaternarios.....	25
3.1.2 Geomorfología.....	25
3.2 Sísmica de refracción.....	26
3.2.1 Adquisición de datos de refracción sísmica.....	26

3.2.2	Procesamiento mediante el SeisImager.....	27
	• Selección de primeras llegadas.....	28
	• Inversión sísmica bajo la modalidad de tomografía sísmica.....	31
3.3	Sísmica de microtremores.....	34
3.3.1	Adquisición de datos de Sísmica de microtremores.....	34
3.3.2	Procesamiento de los datos de sísmica de microtremores.....	35
3.4	Cálculo de parámetros dinámicos.....	37
3.5	Cálculo de características físicas y de resistencia del suelo...38	
3.5.1	Métodos clásicos.....	38
3.5.2	Métodos geofísicos.....	39

## **CAPÍTULO IV**

<b>RESULTADOS E INTERPRETACION.....</b>	<b>40</b>
4.1 Calicatas.....	40
4.1.1 Densidad de campo.....	40
4.1.2 Clasificación de suelos.....	41
4.1.3 Parámetros dinámicos.....	44
4.1.4 Capacidad de carga.....	45
4.1.5 Asentamiento según la teoría elástica en suelos granulares .....	48
4.2 Perfiles Sísmicos.....	49
4.2.1 Perfil uno.....	49
4.2.2 Perfil dos.....	50
4.2.3 Perfil tres.....	52
4.2.4 Perfil cuatro.....	53
4.2.5 Perfil cinco.....	54
4.2.6 Perfil seis.....	54
4.2.7 Perfil siete.....	55
4.3 Índice de calidad de material usando geofísica.....	56
4.3.1 Plano de isovalores de la relación de Poisson.....	56
4.3.2 Plano de isovalores de la relación $V_p/V_s$ .....	57
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>58</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>60</b>

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

### **FOTOS**

### **ANEXOS**

## ILUSTRACIONES

<b>Figura 01:</b> Se observa la generación de frentes de ondas secundarios en una superficie refractora, para una onda plana.....	08
<b>Figura 02:</b> El fenómeno de reflexión y refracción para ondas P y S entre dos medios de propiedades elásticas diferentes (modificado de Sheriff y Geldart, 1991).....	09
<b>Figura 03:</b> Fenómeno de refracción crítica (rojo) en dos medios de velocidades $V_1$ y $V_2$ . En azul se presenta la onda directa y en verde, una onda reflejada.....	12
<b>Figura 04:</b> Selección de primeras llegadas de perfil sísmico.....	30
<b>Figura 05:</b> Selección de primeras llegadas del contradisparo, en rojo primeras llegadas registro actual y verde primeras llegadas del registro anterior.....	30
<b>Figura 06:</b> Primeras llegadas del disparo ubicado en medio del tendido en rojo, primeras llegadas disparo y contradisparo en verde.....	31
<b>Figura 07:</b> Curvas camino-tiempo obtenido de las primeras llegadas...32	
<b>Figura 08:</b> Curva camino-tiempo con las rectas de velocidades obtenidas por el software SeisImager, en el proceso de inversión.....	33
<b>Figura 09:</b> Presenta el modelo tomográfico.....	33
<b>Figura 10:</b> Se muestra el análisis espectral de registros sísmicos y curva de dispersión de ondas Rayleigh.....	36
<b>Figura 11:</b> Curva de dispersión de ondas Rayleigh.....	36
<b>Figura 12:</b> Modelamiento de las velocidades $V_s$ .....	37
<b>Figura 13:</b> Muestra las curvas granulométricas para las seis calicatas ejecutadas.....	42
<b>Figura 14:</b> Muestra los resultados obtenidos a dos metros de profundidad con métodos clásicos y geofísico.....	47

## **TABLAS**

<b>Tabla 01:</b> muestra las coordenadas de ubicación y cota de las calicatas.....	40
<b>Tabla 02:</b> Muestra las características físicas del suelo.....	41
<b>Tabla 03:</b> Muestra la clasificación de suelos según SUCS y AASHTO.....	43
<b>Tabla 04:</b> Presenta los parámetros dinámicos a dos metros de profundidad, usando densidad del suelo tomada en campo.....	44
<b>Tabla 05:</b> Parámetros dinámicos del suelo a cuatro metros de profundidad, usando densidad obtenida por el método empírico..	44
<b>Tabla 06:</b> Muestran los resultados obtenidos a dos metros de profundidad usando geofísica, se usó densidad hallada en campo.....	46
<b>Tabla 07:</b> Resultados obtenidos para cuatro metros de profundidad, la densidad para este cálculo es hallada por empíricamente.....	46
<b>Tabla 08:</b> Presenta los valores de carga última a dos metros hallada con el método clásico propuesto por distintos autores.....	46
<b>Tabla 09:</b> Muestra los coeficientes de correlación de los resultados obtenidos a dos metros de los distintos métodos.....	47
<b>Tabla 10:</b> Muestra los asentamientos inmediatos para dos metros de profundidad en las seis calicatas.....	48

## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

Tacna está ubicada en el Cinturón de Fuego del Pacífico, y se caracteriza por concentrar algunas de las zonas de subducción más importantes del mundo, esto ocasiona una intensa actividad sísmica y volcánica. A causa de esta actividad sísmica se vienen desarrollando diversos trabajos orientados a identificar las zonas de peligro, para esto se está desarrollando mapas de zonificación geotécnica y realizando ensayos para determinar el comportamiento del suelo ante sollicitaciones sísmicas con fines constructivos.

Con el desarrollo tecnológico y teórico en los campos de la geofísica y la geotecnia, se ha demostrado que se puede cuantificar y caracterizar los parámetros dinámicos del subsuelo a partir de perfiles de velocidad de ondas sísmicas compresionales ( $V_p$ ) y de ondas de corte ( $V_s$ ).

La determinación de los parámetros dinámicos del suelo representa un elemento fundamental en estudios geotécnicos aplicados en la ingeniería de la construcción, y en estudios de microzonificación sísmica con base en la determinación de las características y respuestas locales del suelo ante la propagación de las ondas sísmicas. Los resultados de estos estudios permiten la optimización de los esquemas de diseño de las edificaciones, lo cual redundará en mejores relaciones de costos y en una

minimización de los factores de riesgo asociados a la sismicidad de la zona investigada.

En la actualidad los ensayos geotécnicos que tradicionalmente han sido empleados para este tipo de investigaciones, se ven complementados por estudios geofísicos de refracción sísmica y análisis de microtemores que son de rápida y sencilla adquisición, con la ventaja de no ser invasivos y tener gran alcance en cuanto a profundidad.

En este trabajo se plantea utilizar estas técnicas para obtener los parámetros dinámicos del suelo así como la capacidad portante y hacer una comparación de esta última con los resultados obtenidos por el método tradicional.

### **1.1 Ubicación y Accesibilidad**

El área de estudio se ubica al noroeste de la provincia de Tacna y forma parte del lecho de la quebrada Caramolle, ésta área pertenece al distrito de Pocollay, el acceso principal desde Tacna es por la avenida asfaltada Mariano Necochea.

El área de estudio tiene forma de un polígono irregular, cuyos vértices presentan las siguientes coordenadas (UTM-Sistema PSAD 56).

1.- 370247E	8013012N
2.- 370337E	8013347N
3.- 370473E	8013580N
4.- 370534E	8013939N
5.- 370600E	8014000N
6.- 370700E	8013930N
7.- 370776E	8013713N
8.- 370696E	8013509N
9.- 370491E	8013198N
10.- 370401E	8012976N

El perímetro de este polígono irregular alcanza los 2400m., mientras que el área calculada es de 217471 m<sup>2</sup> aproximadamente. **(Ver anexos - plano TC-01)**

## **1.2 Objetivo general**

En este trabajo se presenta un método reciente de sísmica superficial aplicable a áreas urbanas para la caracterización de suelos, conocido como sísmica de microtemores y está basado en la teoría de dispersión de ondas Rayleigh.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- Realizar mapeo geológico para determinar las formaciones geológicas y litologías presentes en la zona.
- Realizar una campaña de refracción sísmica y microtremores con líneas transversales a la quebrada Caramolle y líneas cortas sobre puntos a ejecutar calicatas.
- Plantear un método alternativo práctico y económico en la determinación de parámetros dinámicos y capacidad de carga en suelos.
- Generar planos de isovalores de la relación  $V_p/V_s$  y Poisson para determinar la calidad del suelo.
- Generar perfiles sísmicos con  $V_p$  y  $V_s$  para inferir la litología del subsuelo.
- Comparar los resultados de capacidad de carga obtenidos por métodos geofísicos, con los obtenidos por el método tradicional.

### **1.3 Trabajos anteriores**

En Abril de 1989 el Ing. Jorge Meneses Loja del CISMID, realizó una campaña de 51 mediciones de micro tremores en toda la ciudad de Tacna, determinando que la parte céntrica de Tacna tiene suelo rígido puesto que priman

los periodos cortos, mientras que en la zona norte de Tacna priman los periodos largos manifestando suelos menos firmes. Con el sismo del 07 de Julio 2001 que fué la réplica del sismo del 23 de Junio del 2001, se ha calculado una aceleración de 0.38g según el acelerógrafo del CISMID instalado en la Universidad Nacional de Tacna.

Después del sismo del 23 de junio del 2001, el INDECI en convenio con la UNJBG realizaron el “MAPA DE PELIGROS PARA LA CIUDAD DE TACNA” y para las demas provincias del departamento.

Existen también diversos trabajos sobre zonificación geotécnica, de parte de los estudiantes de la escuela de Ingeniería Geología-Geotecnia de la UNJBG y otros de mecánica de suelos por los estudiantes de la escuela de Ingeniería Civil de la UPT, realizado en diferentes zonas de la ciudad de Tacna.

En el año 2004, el departamento de Ingeniería Civil de la Washington State University a través de Adel Cortes Flores realizó un estudio de respuesta de sitio usando el método de SASW y STP, realizando un análisis de máximas aceleraciones en Arica, Moquegua y Tacna, donde se determinó que para un periodo de 0.2 seg. se tiene una aceleración máxima de 0.31gals.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Sísmica de refracción**

La sísmica de refracción constituye uno de los métodos de prospección más tradicionales de la geofísica. Su principio fundamental consiste en el tiempo de viaje de las ondas sísmicas generadas por una fuente impulsiva en la superficie del subsuelo, y que son refractadas entre las interfaces de medios con propiedades físicas diferentes, el análisis de dichos tiempos de viaje bajo ciertas hipótesis definidas y siguiendo las leyes de propagación de onda, permite en principio obtener un perfil en profundidad de la distribución geométrica de los diferentes refractores, con las correspondientes velocidades a las cuales la onda sísmica se propaga a través de ellos (Redpath, 1973).

La fuente a emplear puede ser un martillo, una fuente de caída de peso o cargas explosivas. El objetivo en todos los casos es generar un pulso de ondas elásticas que será detectado en la superficie, luego de viajar en profundidad y refractarse en los diferentes estratos del subsuelo por un arreglo lineal de receptores (geófonos), ubicados a distancias conocidas que transmitirán la señal eléctrica generada por las vibraciones del subsuelo hasta un equipo de grabación

(sismógrafo), donde ésta será digitalizada y guardada para su posterior análisis e interpretación. Los datos adquiridos serán entonces sismogramas de los cuales pueden interpretarse los tiempos de tránsito de las ondas compresionales en función de la distancia entre los receptores.

Una de las condiciones para la aplicación de la refracción sísmica es que exista un aumento monótono de la velocidad con la profundidad en el subsuelo.

### **2.1.1 Principios básicos de la refracción sísmica**

- **Principio de Huygens**

El principio de Huygens es utilizado para entender la propagación de frentes de ondas en un medio. Este principio propone que cualquier punto en dicho frente de onda genera una nueva perturbación que se extiende en todas las direcciones, cuyo origen se encuentra centrado en el punto en sí. Por tanto, un frente de ondas, en un tiempo determinado, puede considerarse como la suma de todos los frentes de ondas secundarios generados puntualmente, que avanza en la misma dirección que el que la generó. Cada nuevo frente de onda es susceptible a su vez de ser núcleo de un nuevo frente de ondas. En base al principio enunciado, es posible determinar la posición

del frente de onda en cualquier instante de tiempo, siempre que se conozca al menos una posición del frente de ondas para un tiempo determinado.

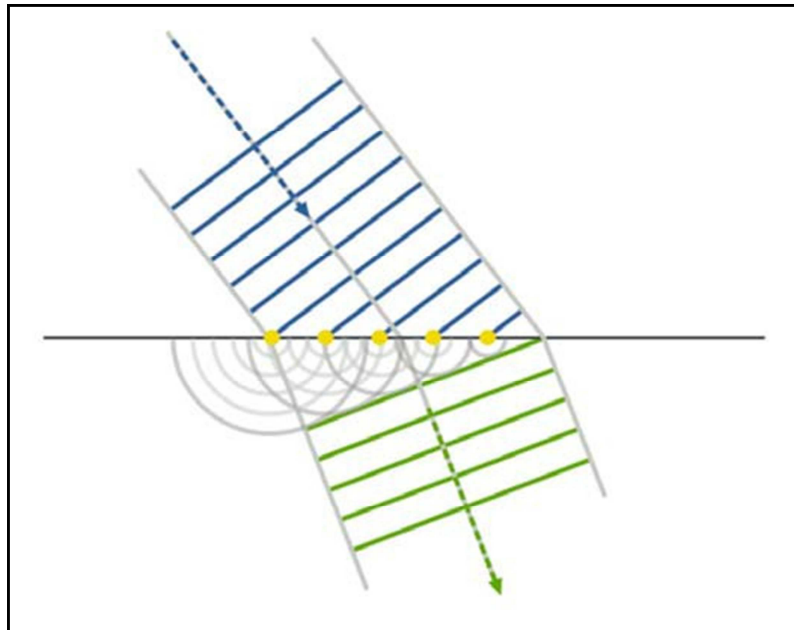


Figura 01: Se observa la generación de frentes de ondas secundarios en una superficie refractora, para una onda plana. Nótese que la envolvente de los varios frentes de ondas secundarios representa un frente de onda principal (tomada de [http://es.wikipedia.org/wiki/Principio de Huygens](http://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Huygens))

### • Ley de Snell

También conocida como la ley de refracción. Cuando una onda propagada en un medio se encuentra con una interfaz entre dicho medio y otro, pueden ocurrir los siguientes fenómenos:

1) Parte de la onda es reflejada en la interfaz mientras que otra parte de la onda es refractada durante la transmisión al siguiente medio.

2) Existe una reflexión total de la onda en la interfaz. Este fenómeno se conoce como reflexión total interna.

3) En el caso de metamateriales, puede ocurrir una refracción total de la onda, debido a un índice de refracción negativo en uno de los medios.

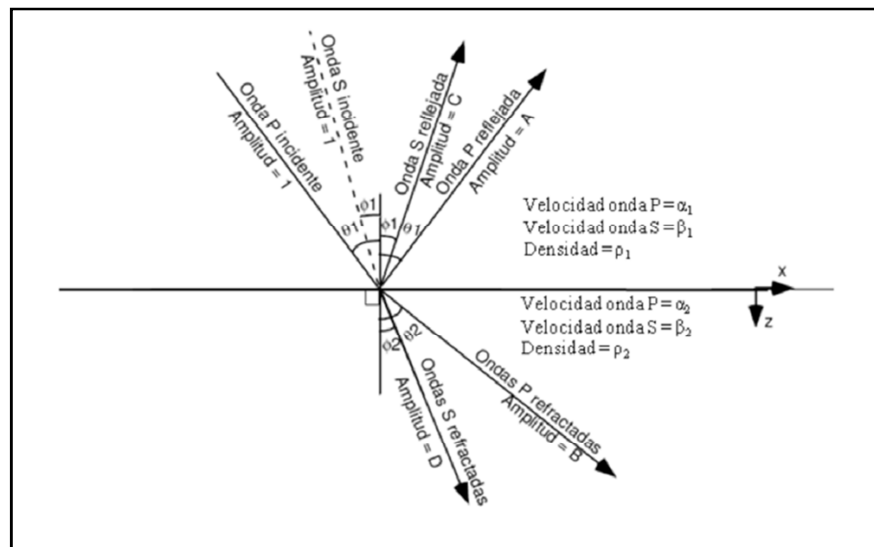


Figura 02: El fenómeno de reflexión y refracción para ondas P y S entre dos medios de propiedades elásticas diferentes (modificado de Sheriff y Geldart, 1991).

La Ley de Snell caracteriza las relaciones angulares de una onda (acústica, óptica, etc.) durante los procesos de reflexión y refracción en la interfaz de dos medios isotrópicos, cuyas propiedades son

distintas. En el caso de la refracción sísmica, son de interés las propiedades elásticas de los medios. Dado un primer medio con  $\alpha_1, \beta_1, \rho_1$ ; y un segundo medio con  $\alpha_2, \beta_2, \rho_2$  (Figura 02), el ángulo de incidencia del rayo de ondas P sobre la interface de los dos medios es  $\theta_1$ , el ángulo de refracción de la onda P en el segundo medio es  $\theta_2$ , el ángulo de reflexión de la onda S es  $\phi_1$ , y el ángulo de transmisión de la onda de cizalla en el segundo medio es  $\phi_2$ . Snell demostró que el ángulo incidente de la onda P es igual al ángulo de reflexión de esa onda en el primer medio. Entonces se cumple la siguiente condición:

$$\frac{\sin\theta_1}{\alpha_1} = \frac{\sin\phi_1}{\beta_1} = \frac{\sin\theta_2}{\alpha_2} = \frac{\sin\phi_2}{\beta_2} = P \quad \text{Ecuación 01}$$

Siendo  $P$  el parámetro de rayo. Esta expresión exige que el número de onda, que puede ser visto como la velocidad aparente a lo largo de la interface entre los dos medios, sea igual.

Teniendo como fundamento tanto al principio de Huygens como al principio de Fermat, se puede determinar el principio conocido como la ley de Snell. Esta dicta que la relación entre los senos de los ángulos de incidencia y refracción equivale a la relación entre las velocidades de ambos medios, o equivalente al

inverso de la relación entre los índices de refracción de los medios.

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Ecuación 02}$$

• **Fenómeno de refracción crítica**

La refracción crítica es un fenómeno donde la porción refractada de una onda viaja a lo largo de la interfaz entre dos medios, cuyos índices de refracción son distintos. Partiendo de la ley de Snell, en término de velocidades:

$$\sin \theta_1 \cdot V_2 = \sin \theta_2 \cdot V_1 \quad \text{Ecuación 03}$$

si

$$\theta_2 = 90^\circ \quad \text{Ecuación 04}$$

se cumple entonces

$$\sin \theta_1 = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Ecuación 05}$$

Donde  $\theta_1$  define el ángulo de incidencia para que se cumpla la condición de refracción crítica.

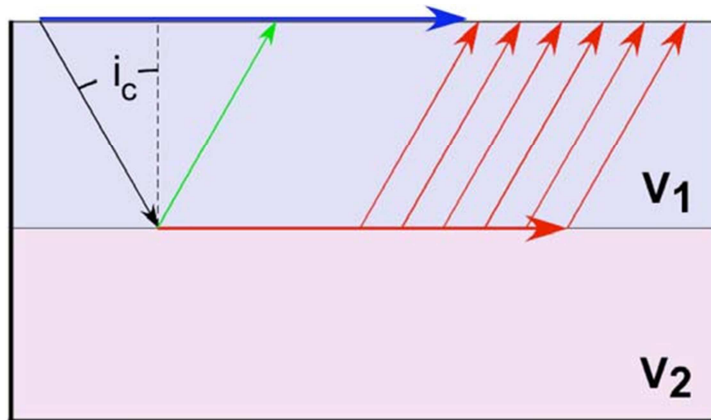


Figura 03: Fenómeno de refracción crítica (rojo) en dos medios de velocidades  $V_1$  y  $V_2$ . En azul se presenta la onda directa y en verde una onda reflejada.

En la Figura 03 la onda refractada críticamente describe un ángulo de  $90^\circ$  respecto a la normal, con  $i_c = \theta_1$  (Ecuación 05). En verde se presenta la porción reflejada de la onda, y en azul la onda directa. En la refracción crítica se debe tomar en cuenta, que cuando una onda viaja a través de la interfaz entre dos medios, la velocidad de fase de la onda corresponde a la velocidad del medio infrayacente ( $V_2$ ). Es de hacer notar, que a partir de la refracción crítica se generan nuevos frentes de ondas, de forma continua, que emergen hacia la superficie. Estos frentes son designados como ondas de cabecera, siendo esta las que llegan hasta los sensores (geófonos).

## **2.2 Refracción por microtemores**

Los microtemores son las vibraciones constantes en la superficie de la Tierra y son generados por actividad humana y fenómenos naturales, entre las más importantes fuentes naturales está el oleaje, el viento, la presión atmosférica y la actividad volcánica, entre otros; y las fuentes artificiales son, el tráfico vehicular y/o trenes, el paso de peatones, maquinaria industrial, etc.

Los microtemores se caracterizan por contener básicamente ondas superficiales del tipo Rayleigh y Love de ahí que permiten caracterizar las estructuras geológicas de los suelos, dado que las fuentes sísmicas están distribuidas al azar.

La técnica de refracción por microtemores aplicada por Louie en el 2001, utiliza tendido y equipo para registro, similar al de la prueba de refracción sísmica, pero se analizan las ondas con una técnica matemática que permite separar las ondas Rayleigh de otras ondas elásticas y finalmente determina la variación de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) a profundidad.

Para la realización de la prueba de refracción por microtemores se coloca un tendido lineal con 12 o más geófonos; el registro de la vibración se realiza con un

sismógrafo digital, y se registra tanto vibración natural como vibración artificial.

El rango de frecuencia de los microtemores se presentan entre 0.01 a 30 Hz, aunque la banda de interés está entre 0.1 a 10 Hz; es decir el rango en el cual parte de la energía se transmite como ondas Rayleigh y cuyos modos y velocidades de propagación se pueden estimar y medir con arreglos instrumentales y así conocer las características de los parámetros elásticos de la corteza terrestre.

Para aplicar este método se deben realizar los siguientes tres pasos: el análisis espectral de velocidades, la selección de la dispersión fase-velocidad de la onda Rayleigh y el modelado de la velocidad de onda de corte.

### **2.2.1 Análisis espectral de velocidad**

El análisis espectral está basado en la transformación p-tau o “slantstack”. Esta transformación toma una sección de registros de sismogramas múltiples, con amplitudes relacionadas con la distancia y el tiempo (x-t), y las convierte a amplitudes relacionadas con el parámetro de rayo p (inverso de la velocidad aparente), y un intercepto de tiempo tau, otros autores usaron la transformada p-tau como un paso inicial para el análisis de la velocidad de refracción en ondas P (Louie, 2001).

### **2.2.2 Selección de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh**

Para lograr una normalización de las imágenes p-f, se calcula un cociente espectral de energía. El cociente se calcula en cada combinación lentitud-frecuencia tomando el valor de la energía en ese punto y dividiéndolo entre la suma de la energía para todos los valores de lentitud en esa frecuencia. Entonces, la selección de velocidades de fase en las frecuencias donde se observa claramente una pendiente pronunciada en el cociente espectral permite identificar la curva de dispersión deseada (Louie, 2001).

### **2.2.3 Modelado de la Velocidad de la Onda de Cizalla**

El método de refracción por microtremores realiza un modelado interactivo hacia delante de la curva de dispersión (en modo fundamental), seleccionada a partir de las imágenes p-f, haciendo uso de un código adaptado de Saito (1979, 1988) por Yuehua Zeng (1992) en Louie (2001). El modelado itera en la velocidad de fase a cada periodo (o frecuencia), reporta cuándo no se ha encontrado una solución con los parámetros de iteración y puede modelar inversiones de velocidad (Louie, 2001).

## 2.3 Parámetros dinámicos del subsuelo

Conocidos también como constantes elásticas o módulos elásticos, son un conjunto de parámetros que definen las propiedades y comportamiento de un material que se somete a esfuerzos y sufre deformaciones, y luego recupera su forma original después de que los esfuerzos cesan. Estas constantes son importantes en la sismología debido a que la velocidad de las ondas sísmicas depende de las mismas y de la densidad de las rocas. Asimismo, son empleadas para la caracterización de sitios en la geotecnia aplicada a ingeniería civil.

### 2.3.1 Relación de Poisson ( $\nu$ )

Es la relación entre los cambios unitarios de área de la sección transversal y la deformación longitudinal.

La velocidad de propagación de las ondas sísmicas están relacionadas con las propiedades elásticas del medio de propagación; entonces, la relación de Poisson queda dada como:

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad \text{Ecuación 06}$$

### 2.3.2 Módulo de Cizalla o Rigidez (**Gmax**)

Es la relación entre el esfuerzo transversal unitario y el desplazamiento relativo de los planos de deslizamiento; mientras que la expresión que lo define está dada por:

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad \text{Ecuación 07}$$

La densidad del medio se puede obtener en campo o con aproximaciones usando las  $V_p$  y/o  $V_s$  en fórmulas empíricas.

La velocidad de onda de corte  $V_s$  se obtiene en las diversas pruebas geofísicas, y corresponde a deformaciones angulares pequeñas ( $10^{-4}\%$ ), por esta razón el módulo de rigidez cortante que se puede calcular partiendo de esta velocidad es el máximo o inicial y se simboliza como **G<sub>0</sub>** o **Gmax**. Tradicionalmente en el campo de la geotecnia se ha considerado que el módulo de cortante máximo ( $G_{\max}$ ) se puede utilizar únicamente en problemas dinámicos, como cimentación de maquinarias o sismos de muy bajas magnitudes. Sin embargo, investigaciones realizadas en los últimos años (Jardine et al., 1986; Batagglio y Jamiolkowsky, 1987; Burland, 1989; Fahey y Carter, 1993; Mayne, 2001) han demostrado que

valores de  $G_{max}$  corregidos para niveles de deformación apropiados, pueden ser de utilidad para problemas geotécnicos estáticos, como es el diseño de cimentaciones (Lazcano, 2007).

### **2.3.3 Módulo Elástico o Young ( $E_{max}$ )**

Es la relación entre esfuerzo unitario y la deformación longitudinal unitaria, esto es para la compresión y tensión respectivamente.

$$E_{max} = 2G_{max} (1 + \nu) \qquad \text{Ecuación 08}$$

Tanto  $G_{max}$  como  $E_{max}$  son valores máximos, para deformaciones angulares ( $\gamma$ ) del orden de  $10^{-4}\%$ . Sin embargo, se ha encontrado que la deformación angular promedio en cimentaciones bien diseñadas es de alrededor de  $10^{-1}\%$ .

Para el análisis de asentamiento de zapatas y losas de cimentación en arenas es conveniente que se use el módulo cortante que corresponde a una deformación angular de  $10^{-1}\%$ . Fahey y Carter (1993) y Mayne (2001) proponen un valor de  $G_{10^{-1}\%}$  igual al 20% del de  $G_{max}$ . (Lazcano, 2007).

### 2.3.4 Módulo de Volumen o Bulk (K)

La relación lineal entre el cambio fraccional del volumen y la presión hidrostática aplicada a una masa de material geológico, está gobernada por el Módulo de Incompresibilidad Volumétrica o de Bulk “K”, tal que:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad \text{Ecuación 09}$$

## 2.4 Capacidad de carga

La capacidad de carga para cimientos someros puede ser descrita en función de la velocidad de las ondas de corte  $V_s$  medidas en sitio mediante métodos geofísicos, de acuerdo con una expresión empírica basada en una variedad de casos de estudio, que incluyen datos de pozo, pruebas de laboratorio y prospección geofísica. Dicha expresión concuerda consistentemente con los resultados de la teoría clásica empleada en la investigación de dicho parámetro (capacidad de carga), y ha probado ser confiable y segura (Tezcan *et al.*, 2006).

$$q_a = 0.1 \rho V_s / n \quad \text{Ecuación 10}$$

Para diferentes tipos de roca o suelos, se dan diferentes factores de seguridad, añadiendo también un factor de corrección según el ancho de zapata.

<b>Tipo</b>	<b>Rango de Vs (m/seg)</b>	<b>n</b>	<b>qa (KN/m<sup>2</sup>)</b>
Roca dura	$V_s \geq 4000$	$n = 1.4$	$q_a = 0.071 \rho V_s$
Roca blanda	$750 \leq V_s \leq 4000$	$n = 4.6 - 0.0008 V_s$	$q_a = 0.1 \rho V_s / n$
suelos	$750 \geq V_s$	$n = 4$	$q_a = 0.025 \rho V_s \alpha$

Factor de seguridad  $n$  para suelos y rocas (Tezcan *et al.*, 2006).

$$\alpha = 1.00 \quad \text{para } (0.0 \leq B \leq 1.20 \text{ m})$$

$$\alpha = 1.13 - 0.11 B \quad \text{para } (1.2 \leq B \leq 3.00 \text{ m})$$

$$\alpha = 0.83 - 0.01 B \quad \text{para } (3.0 \leq B \leq 12.0 \text{ m})$$

Factor de corrección ( $\alpha$ ) de uso para suelos, según ancho de zapata (B)

## 2.5 Cálculo de densidad empírica usando $V_p$

La estimación de la densidad es muy necesaria en exploración de hidrocarburos y para ello se han ideado formulas empíricas para el cálculo de densidades de suelos y rocas a partir de ondas compresionales y de corte.

$$\rho_p = \rho_0 + 0.002V_p$$

*Ecuación 11*

Dónde:

$\rho_p$  = peso unitario KN/m<sup>3</sup>.

$V_p$  = Velocidad de la Onda P en m/seg.

$\rho_0$  = el peso unitario de referencia (KN/m<sup>3</sup>).

Los valores de  $\rho_0$  dependen del tipo de material.

$\rho_0$  = 16 para material suelto de arenas, limos o arcillas.

$\rho_0$  = 17 para arena densa y grava.

$\rho_0$  = 18 para calizas, lutitas, conglomerados.

$\rho_0$  = 20 para arenisca craquelada, tobas esquistos.

$\rho_0$  = 24 para rocas duras.

## **2.6 Asentamientos en suelos granulares según teoría clásica**

En suelos granulares y muy permeables los asentamientos son básicamente instantaneos.

$$S_t = S_i$$

Donde:

$S_t$  = Asentamiento total

$S_i$  = Asentamiento inicial o instantaneo

En suelos granulares, los asentamientos vienen a ser asentamientos totales que sufrira la simentación. Los asentamientos dependeran de los valores del módulo de elasticidad principalmente y relación de Poisson.

Según la teoría clásica podemos utilizar la siguiente expresión:

$$S_i = [Bq(1 - \nu^2)I_s]/E_s \qquad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

$S_i$ : Asentamiento instantáneo

$B$ : Menor dimensión de la cimentación

$q$ : Presión aplicada

$\nu$ : Relación de Poisson

$I_s$ : Coeficiente de influencia debido a la geometría (para cimentación cuadrada = 1)

$E_s$ : Módulo elástico

Usualmente se especifica para zapatas de edificios comerciales un asentamiento total admisible de 1 pulgada, siendo este un movimiento permisible.

## **CAPITULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Geología del área de estudio**

Se realizó mapeo geológico de la zona de estudio y alrededores a escala de 1:5000, encontrándose al oeste la formación Huaylillas, al sur la toba Pachía, al este y suroeste se tienen unos depósitos de origen aluvial y como relleno de la quebrada Caramolle encontramos un depósito proluvial de arenas tobáceas estratificadas de grano medio a fino. Los depósitos aluviales están soportadas por una matriz de arena tobácea, la fracción gruesa está conformada por fragmentos angulosos y subangulosos de andesitas, cuarcitas grises e ignimbritas; esta fue erosionada parcialmente para en su lugar depositarse las arenas tobáceas como relleno del cauce de la quebrada Caramolle, y es en este contexto geológico donde se realizó los trabajos de exploración sísmica.

***(Ver anexos - plano TC-02)***

##### **3.1.1 Sedimentología y estratigrafía**

###### **3.1.1.1 Formación Huaylillas**

La formación Huaylillas consiste de una secuencia de flujos ignimbríticos de composición riolítica que se interdigitan con niveles

sedimentarios de arenas tobáceas con pómez flotando. Esta formación fue definida por J. Wilson y W. García (1962), y se observan en las laderas y la cascada de la quebrada Caramolle.

La formación Huaylillas se correlaciona con las Formaciones Chilenas Putani y Oxaya en la base y en el tope respectivamente, las cuales están datadas para el Oligoceno terminal al Mioceno Inferior:  $24.2 \pm 0.1$  Ma a  $19.4$  Ma (Ar-Ar) en sanidina; (Wörner et al., 2000). Otra datación fue realizada en el área de Moquegua en la base de la Formación Huaylillas, que arrojó  $25.3 \pm 0.8$  Ma (K-Ar) sobre biotita; (Tosdal et al., 1981).

#### **3.1.1.2 Toba Pachía**

Son depósitos de coladas piroclásticas, que varían de soldadas a friables de colores violáceos a blancas, con alto contenido de pómez. Al sur de la zona de estudio se encuentran cubiertos por depósitos de origen aluvial procedente de la quebrada Caramolle.

Esta toba es conocida como Pérez y Lauca, en Bolivia y Chile respectivamente, donde están datadas para  $2.7-2.8$  Ma (Plioceno Superior) por (Wörner et al, 2000).

### **3.1.1.3 Depósitos cuaternarios**

Se observan dos eventos sedimentarios; el primero es un depósito aluvial constituido por fragmentos angulosos y subangulosos de andesitas, cuarcitas grises e ignimbritas, soportados por una matriz de arena tobácea, y se dispone como relleno de la quebrada Caramolle, al sur del área de estudio se la observa sobreyaciendo a la toba Pachía. Los depósitos aluviales fueron erosionadas parcialmente por ingresos temporales de agua dando lugar a los depósitos proluviales que litológicamente están constituido por arenas tobáceas de grano medio a fino, siendo estos sedimentos los que rellenan parcialmente el valle de la quebrada originando una llanura donde finalmente se hace el trabajo de prospección sísmica.

### **3.1.2 Geomorfología**

La zona de estudio se situa en un contexto geomorfológico general de Pampas Costeras, y localmente en el flanco derecho del valle del río Caplina, donde la quebrada Caramolle erosiona las ignimbritas de la formación Huaylillas hasta unirse al valle del río Caplina.

El área de estudio está representado por un canal con relleno de arenas tobáceas y superficie subhorizontal con leve inclinación hacia el suroeste con anchos que van desde 180m. a 250m., En esta quebrada se sitúan parte de la población del Distrito de Ciudad Nueva y Pocollay

### **3.2 Sísmica de refracción**

Consta de dos campañas de campo, en la primera se realizó líneas transversales a la quebrada Caramolle, realizándose 7 líneas constituidas por 37 tendidos con espaciamiento de 3 metros entre geófonos con un total de 12 geófonos. La segunda campaña constó de 6 líneas cortas previa a la ejecución de calicatas, estas líneas cortas tuvieron un espaciamiento entre geófonos de 1 metro.

#### **3.2.1 Adquisición de datos de refracción sísmica**

La adquisición de datos se realizó con un sismógrafo modelo ES-3000 de la empresa GEOMETRICS. El equipo fue facilitado por la E.A.P. de Ingeniería Geológica – Geotecnia, para la realización del presente trabajo.

En la primera campaña se emplearon tendidos de 12 canales (geófonos de 14 Hz) con 3 metros de separación entre receptores. Se usó como fuente un

martillo, éste se impactó sobre una placa metálica cuadrada produciendo estas ondas elásticas. Adicional al sismógrafo se usó una laptop donde se tiene instalado el paquete de adquisición *Seismodule* y una batería de 12 voltios.

El sismógrafo tiene una resolución de 24 bits y permite tasas de muestreo de 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0 y 2.0 ms. Los registros fueron grabados empleando tasas de muestreo de 0.125 ms y longitudes de registro de 0.5 s. Se tomaron 3 registros por cada tendido de refracción, el número de disparos ayudo a realizar una mejor interpretación y obtener mejor calidad de los perfiles. Cabe resaltar que la geometría del arreglo instalada es la máxima que permite el cable de adquisición de dicho equipo (33 m.), pero es suficiente para los fines ingenieriles y en nuestro caso la profundidad investigada es de 10.7 metros aproximadamente.

### **3.2.2 Procesamiento mediante el SeisImager**

El *SeisImager* es el paquete de computación generado por *Geometrics*, casa que fabricó el equipo de adquisición usado en este estudio. El paquete está conformado por cuatro módulos que sirven para analizar datos de refracción y para el análisis de ondas de superficie, entre otros. Estos módulos se llaman

*Pickwin*, *Plotrefa*, *WaveEq*, *Geoplot* y son los módulos que conforma el programa *SeisImager/2D*.

- **Selección de primeras llegadas**

El módulo utilizado para este proceso es el *Pickwin* y es el primer paso que se realiza sobre la data sísmica cruda. Esta selección se basa en la determinación de la primera perturbación registrada, asociada a la señal sísmica para cada canal (geófono) en el registro sísmico. Esta perturbación se reconoce como la primera alza y descenso en la amplitud de la señal sísmica.

El programa puede seleccionar las primeras llegadas de manera automática y manual, cuando realizamos la selección de manera automática debemos monitorear este proceso, pues puede estar afectado por el ruido sísmico y realizar selecciones erradas, es conveniente ajustar la selección de las primeras llegadas manualmente.

La selección de la primera llegada se realiza individualmente para cada disparo asociado a un tendido sísmico. Los puntos seleccionados como primeras llegadas pueden ser considerados como coordenadas en razón de tiempo y distancia, y

representa la primera perturbación en un tiempo y distancia determinada del punto de disparo.

Los datos guardados en el campo están en formato Seg-2, estos datos son cargados con la opción *File/Open SEG2 file*; hecho esto se abre el registro sísmico y luego con la opción *Pick first arrival/pick first breaks* se seleccionan las primeras llegadas, estas se marcan con segmentos rojos horizontales pequeños para cada canal, es necesario ajustar las primeras llegadas manualmente para una mejor obtención de resultados, la unión de todos los segmentos de rectas definen la distribución de las primeras llegadas en el registro.

Posterior a la selección de las primeras llegadas para los tres registros se grabó dicha selección de las primeras llegadas con la opción *File/Save Pick File*, para posteriormente ser abierta con el módulo *Plotrefa*.

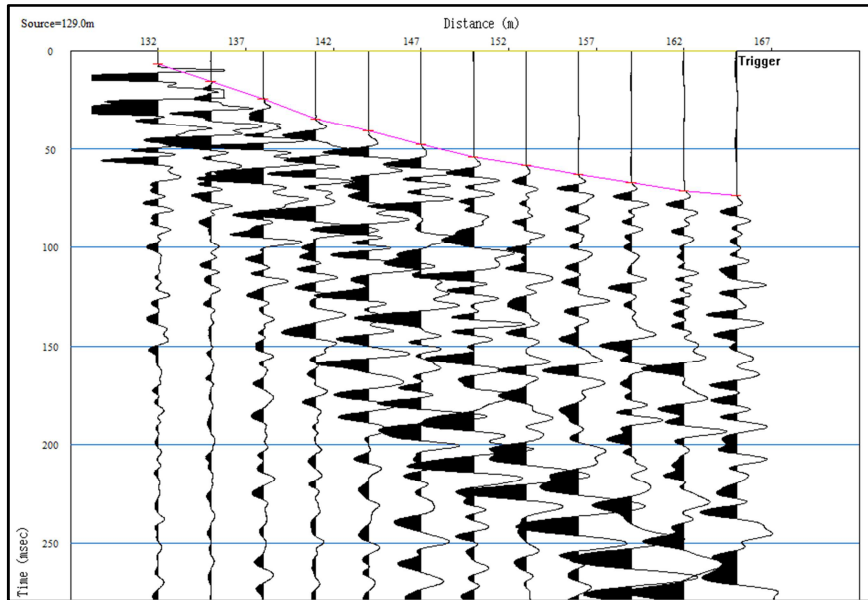


Figura 04: Selección de primeras llegadas de perfil sísmico en color rojo.

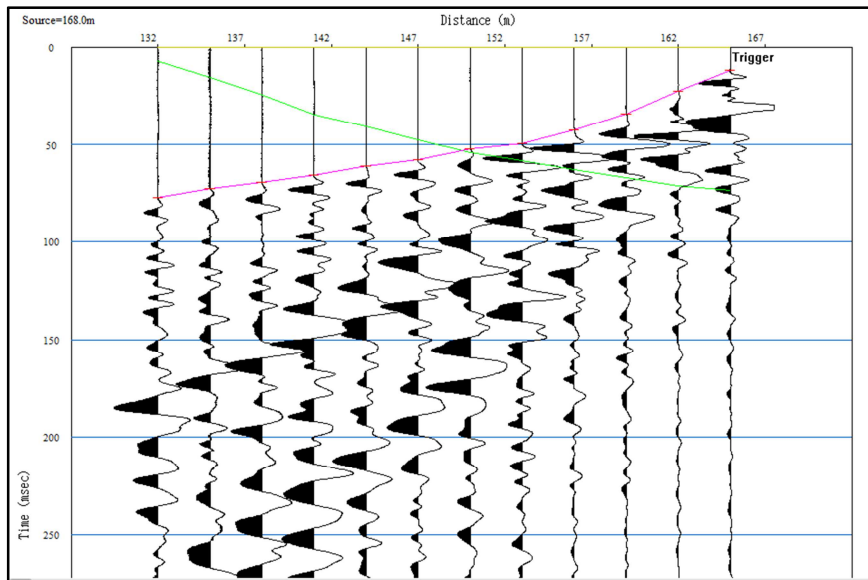


Figura 05: Selección de primeras llegadas del contradisparo, en rojo primeras llegadas registro actual y verde primeras llegadas del registro anterior.

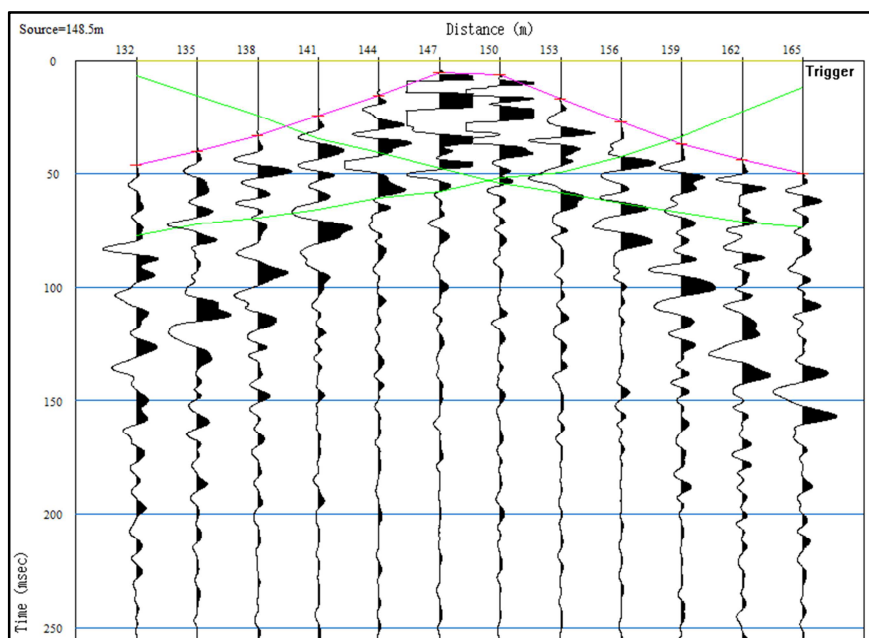


Figura 06: Selección de primeras llegadas del disparo ubicado en medio del tendido en rojo, primeras llegadas disparo y contradisparo en verde.

- **Inversión sísmica bajo la modalidad de tomografía sísmica**

La finalidad de la inversión sísmica es generar un modelo, el cual determina la variación lateral de la velocidad presente en el tendido.

Con el módulo *Plotrefa*, abrimos nuestro archivo de primeras llegadas generadas con el módulo *Pickwin*, seguidamente generamos un modelo inicial para realizar una tomografía sísmica con la opción *Tomography/Generate initial model*, con la opción

*Tomography/Inversion* obtenemos una tomografía sísmica del tendido, adicionalmente estos resultados se pueden guardar en formato .txt para trabajarlo en otros programas, en nuestro caso se trabajaron en mapinfo 10.5 y discover 12, por la facilidad de unir vario tendidos en una sola sección sísmica.

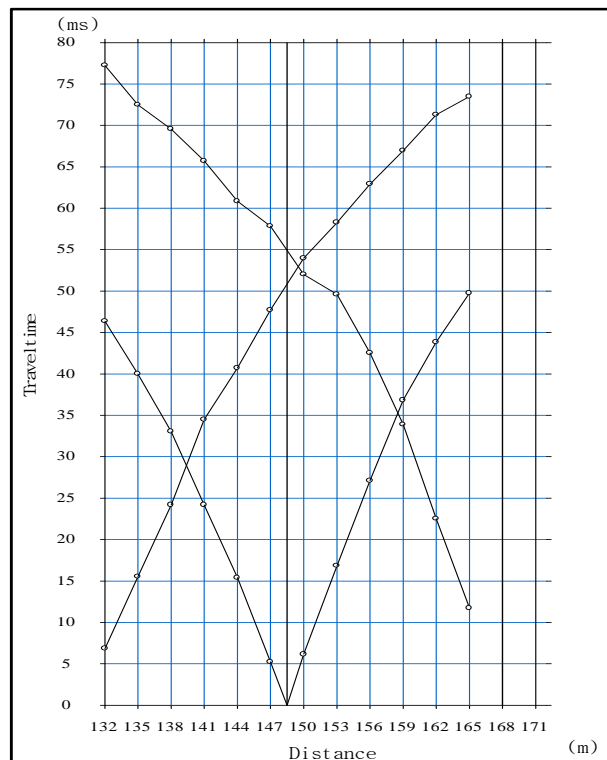


Figura 07: Curvas camino-tiempo obtenido de las primeras llegadas.

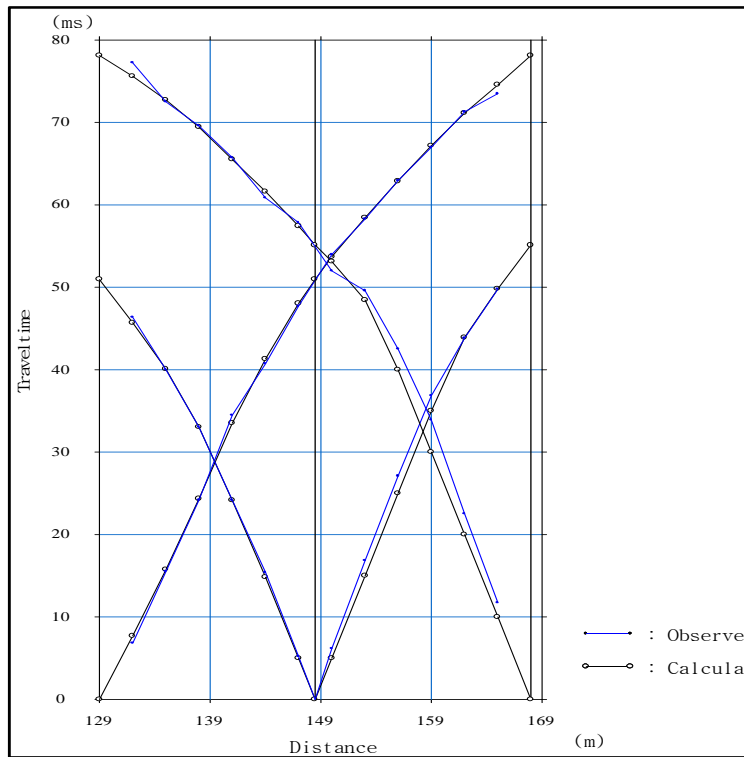


Figura 08: Curva camino-tiempo con las rectas de velocidades obtenidas por el software SeisImager, en el proceso de inversión.

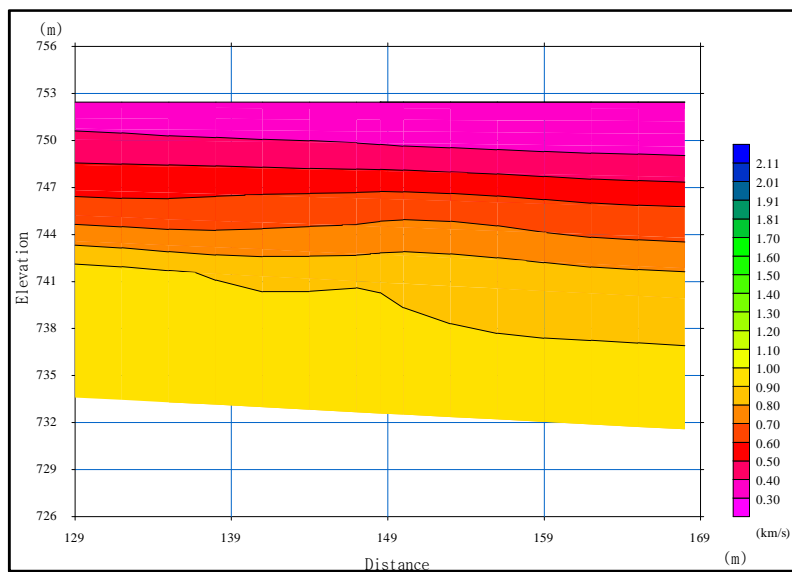


Figura 09: Presenta el modelo tomográfico.

### **3.3 Sísmica de microtemores**

Al igual que la sísmica de refracción, la Sísmica de microtemores se desarrolló en dos campañas con el mismo equipo y mismo arreglo, la primera en líneas transversales a la quebrada, y la segunda como líneas cortas en lugares específicos para ejecución de calicatas, los ensayos se realizaron con las mismas características de arreglo y distribución que la refracción sísmica.

#### **3.3.1 Adquisición de datos de Sísmica de microtemores**

Una de las ventajas fundamentales del método de microtemores, fue que la adquisición de los datos pudo hacerse empleando el mismo equipo de refracción sísmica tradicional.

En este trabajo se usaron un total de 12 canales. Las frecuencias de los geófonos son de 14 Hz; no obstante, se pueden emplear geófonos de frecuencias menores (4.5 Hz) para estudios de mayor profundidad.

Los registros fueron grabados utilizando tanto ruido ambiental únicamente (fuente pasiva) como golpes de martillo (fuente activa) adicionales al ruido ambiental. Esto último se hizo con el objetivo de

aumentar el contenido de altas frecuencias en la señal grabada y así mejorar la señal en esa banda.

La tasa de muestreo fue de 2 ms y los registros tuvieron una longitud de 8 s., que es la longitud máxima de muestreo del equipo usado. Se tomaron 5 registros con fuente activa y 5 con fuente pasiva para cada punto.

### **3.3.2 Procesamiento de los datos de sismica de microtemores**

Dentro del paquete *SeisImager* se encuentran los módulos *Pickwin* y *WaveEq*; estos fueron usados para proceso de los registros en perfiles unidimensionales de  $V_s$  para diferentes profundidades, los valores de  $V_s$  son calculados para el punto medio de los tendidos.

Usando el módulo *Surface Wave Analysis Wizard* cargamos los diez archivos sísmicos en el *Pickwin*, en este módulo utilizamos la opción *Surface-wave analysis (S)* para hacer el análisis espectral de los registros y obtener la curva de dispersión de ondas Rayleigh, luego en el módulo *WaveEq* se hace el modelamiento de las ondas de corte ( $V_s$ ). Al igual que los datos de refracción estos también se pueden guardar en formato .txt para trabajarlo en otro programa de cómputo.

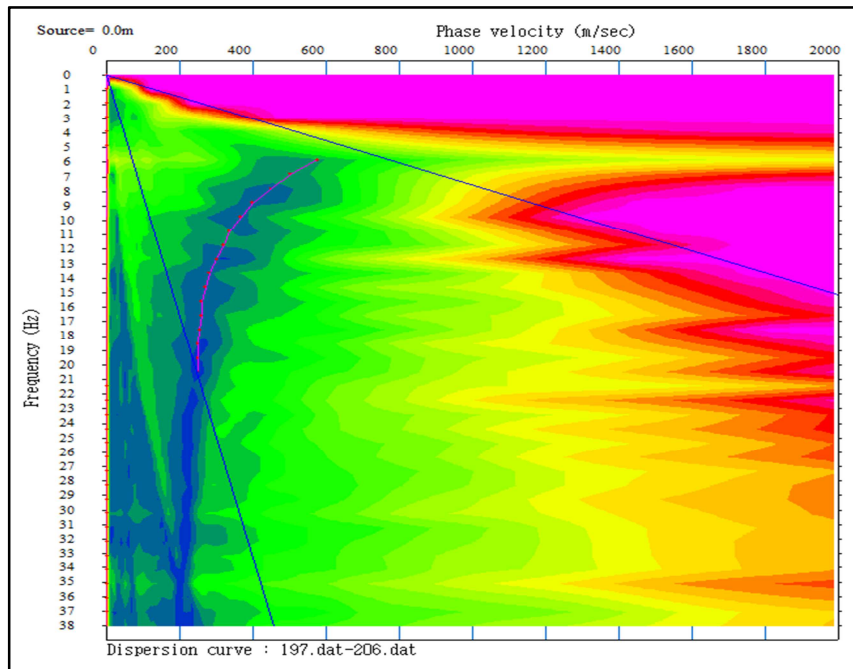


Figura 10: Se muestra el análisis espectral de registros sísmicos y selección de curva de dispersión de ondas Rayleigh.

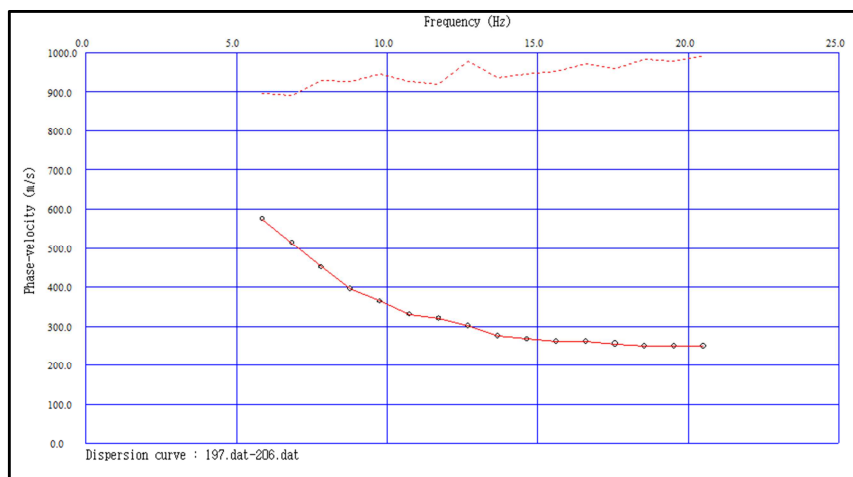


Figura 11: Curva de dispersión de ondas Rayleigh.

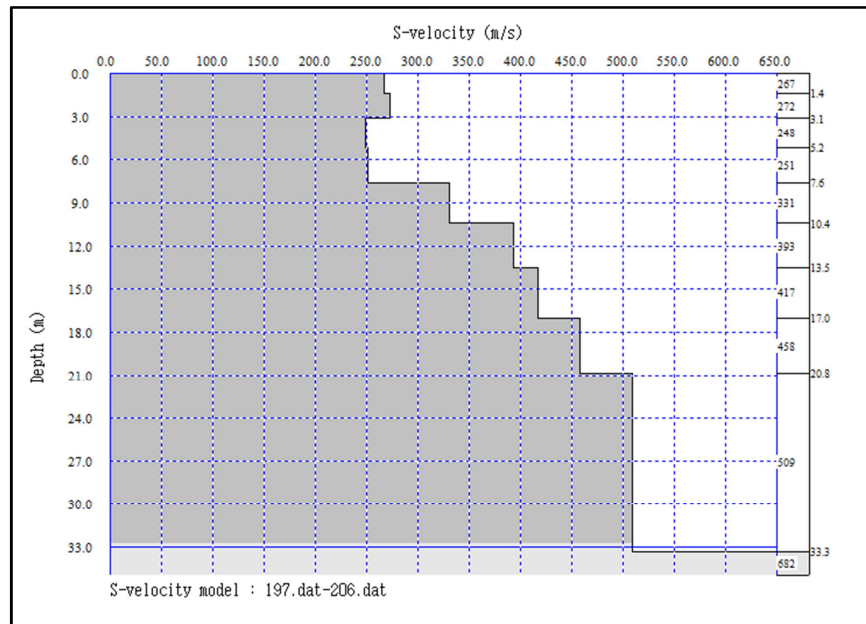


Figura 12: Modelamiento de las velocidades Vs.

### 3.4 Cálculo de parámetros dinámicos

Los parámetros dinámicos del suelo fueron calculados a una profundidad de dos metros para cada calicata y toda la zona de estudio, haciendo uso de los perfiles de velocidades de ondas compresionales (sísmica de refracción) y de ondas de corte (análisis de microtremores). Adicionalmente se calculó los parámetros dinámicos a cuatro metros de profundidad en cada ubicación de calicata. Para dicho cálculo se emplearon las ecuaciones que se presentan en el CAPITULO II (marco teórico).

### **3.5 Cálculo de características físicas y de resistencia del suelo**

#### **3.5.1 Métodos clásicos**

En el área de estudio se realizó seis calicatas con profundidad de dos metros, donde se calculó la densidad de campo con el método del cono de arena, luego en laboratorio se realizó ensayo granulométrico, peso específico de sólidos, límites de consistencia y el ensayo de corte directo para la obtención del ángulo de fricción y cohesión del material. El terreno no presenta grava o material grueso que podría hacer no representativo nuestro ensayo de corte directo.

Para el cálculo de la capacidad de carga se usó una plantilla Excel, donde se realizaron los cálculos según Terzaghi, Meyerhof, Hansen y Vesic. No se realizó corrección del ángulo de fricción del suelo para condiciones sísmicas según los criterios de Vesic y Sano, puesto que esas correcciones se aplican exclusivamente a terrenos sin cohesión bastante densos, y sería errado aplicarlas a terrenos sueltos o medianamente densos, donde las vibraciones sísmicas producen el fenómeno opuesto al del aumento del volumen, con aumento del grado de densidad y del ángulo de rozamiento. En nuestro caso se trata de arenas poco densas.

### **3.5.2 Métodos geofísicos**

Calculados los valores de  $V_p$  y  $V_s$ , se realizó un plano de isovalores de la relación  $V_p/V_s$  para dos metros de profundidad, este es un índice de calidad de material, siendo los valores más altos los que representan suelos de mayor calidad.

También se generó un plano de isovalores a 2 metros de profundidad con la relación de Poisson, donde los valores más altos nos muestran un material más rígido y de mayor calidad mientras que los valores que se acercan a cero muestran un alejamiento del comportamiento elástico.

El cálculo de capacidad de carga se realizó con la relación empírica planteada por Tezcan, para dos metros de profundidad en la ubicación de las seis calicatas.

También se calculó la capacidad de carga para cuatro metros de profundidad en cada calicata, en este cálculo se utilizó densidad hallada por el método empírico.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E INTERPRETACION

#### 4.1 Calicatas

Se ejecutaron 6 calicatas distribuidas sobre toda la zona de trabajo.

<b>CUADRO DE UBICACIÓN DE CALICATAS</b>			
CALICATA	ESTE	NORTE	COTA
C1	370549	8013948	764.5
C2	370590	8013748	753.3
C3	370624	8013538	741.1
C4	370466	8013436	736.1
C5	370466	8013277	731.2
C6	370363	8013112	723.5

Tabla 01: muestra las coordenadas de ubicación y cota de las calicatas.

##### 4.1.1 Densidad de campo

En las calicatas ejecutadas de 2 metros de profundidad cada una, se determinó la densidad de campo con el cono de arena y la humedad con el método del Speedy, posteriormente en laboratorio se realizó los demás ensayos de suelos.

<b>CUADRO RESUMEN DE CARACTERISTICAS FISICAS DEL SUELO</b>						
Calicatas	<b>C 1</b>	<b>C 2</b>	<b>C 3</b>	<b>C 4</b>	<b>C 5</b>	<b>C 6</b>
Densidad Húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	1.49	1.70	1.63	1.49	1.60	1.65
Porcentaje de humedad (%)	0.10	0.10	0.50	0.20	0.45	0.33
Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )	1.49	1.70	1.63	1.48	1.59	1.65
Peso específico del sólido (gs/cc)	2.63	2.58	2.65	2.59	2.57	2.61
Relación de vacíos ( e )	0.76	0.52	0.63	0.75	0.61	0.59
Porosidad (n)	0.43	0.34	0.39	0.43	0.38	0.37
Grado de saturación (S)	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01

Tabla 02: Muestra las características físicas del suelo.

En esta tabla podemos apreciar que las densidades húmedas de las arenas, presentan valores entre 1.49g/cm<sup>3</sup> hasta 1.70g/cm<sup>3</sup>, calificadas como sueltas a semicompactas y proceden de la erosión de las ignimbritas de la formación Huaylillas, también podemos apreciar que se trata de suelos con muy baja humedad no mayor a 0.5%; el peso específico de los sólidos es muy próximo a la del cuarzo y vidrio volcánico que son los principales componentes de la ignimbrita, sumada a bajas cantidades de pómez. Las calicatas que presentan densidades más bajas es a causa de una relación de vacíos más alta y por ende mayor porosidad a causa de una compactación pobre y mayor presencia de pómez.

#### **4.1.2 Clasificación de suelos**

Para la clasificación de suelos se realizó ensayo de granulometría para cada calicata. También se

determinó que los suelos no cuentan con límites de consistencia.

### CURVAS GRANULOMETRICAS

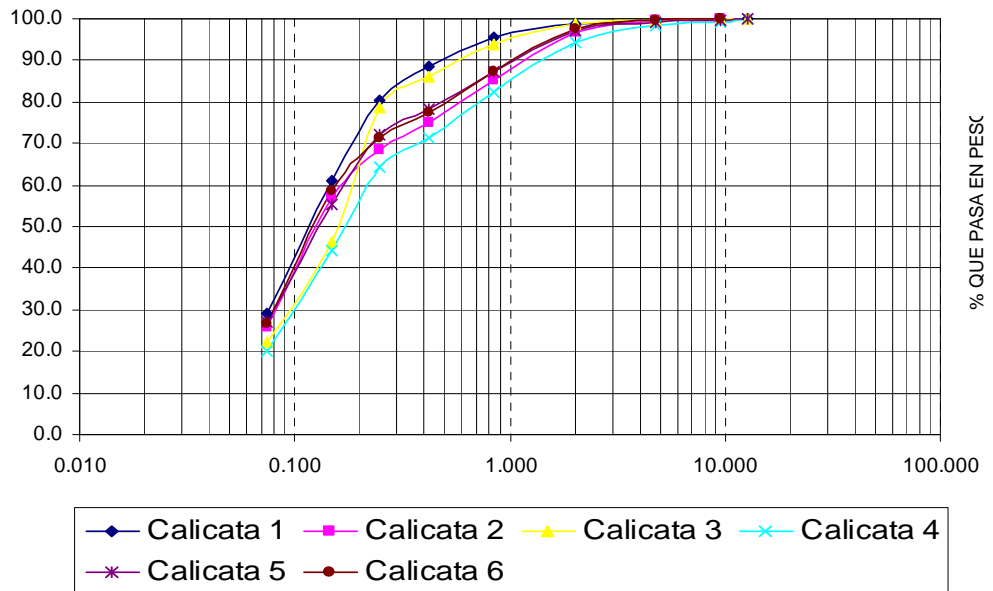


Figura 13: Muestra las curvas granulométricas para las seis calicatas ejecutadas.

En la imagen anterior se muestran las seis curvas granulométricas siendo muy similares entre sí, el motivo de esto es que todas las muestras pertenecen a un mismo horizonte de arenas tobáceas. Podemos apreciar en todas las curvas que en promedio el 25% del suelo pasa por la malla 200, indicándonos la presencia de un suelo con alto contenido de finos, mientras que el 100% de los suelos pasan por el tamiz

de ½”, la cantidad de suelo grueso es muy escasa siendo el promedio que pasa por el tamiz 10 el 97%. En base a Los resultados de la granulometría de los suelos se realizó la clasificación de los mismos llegando a los siguientes resultados.

CLASIFICACION DE SUELOS						
CALITATA	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
SUCS	SM	SM	SM	SM	SM	SM
AASHTO	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4

SM	Grupo: Suelo de partículas gruesas; Subgrupo: Arenas - Arenas Limosas
A-2-4	Terreno de fundación excelente a bueno

Tabla 03: Muestra la clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

La clasificación de suelos es igual para todas las calicatas puesto que corresponden a un mismo nivel de arenas tobáceas que se encuentra rellenando la quebrada Caramolle, según la clasificación SUCS es un SM, grupo de suelos de partículas gruesas y subgrupo de arenas – arenas limosas, esto corresponde con el material observado en el campo.

Según la clasificación AASHTO el suelo estudiado pertenece al grupo A-2-4 con una valoración de terreno de fundación excelente a bueno.

### 4.1.3 Parámetros dinámicos

Los parámetros dinámicos se calcularon a dos y cuatro metros de profundidad con las relaciones expuestas en el capítulo II.

Calicata	vp (m/s)	vs (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\nu$	G <sub>max</sub> (Mpa)	E <sub>max</sub> (Mpa)	K <sub>max</sub> (Mpa)
C1	407.77	243	1.49	0.22	88.11	215.80	130.63
C2	429.14	220	1.70	0.32	82.31	217.60	203.46
C3	473.63	256	1.63	0.29	107.10	277.09	223.79
C4	428.07	242	1.49	0.27	87.06	220.29	156.32
C5	423.21	256	1.60	0.21	104.80	253.92	146.68
C6	477.30	251	1.65	0.31	104.05	272.38	237.51

Tabla 04: Presenta los parámetros dinámicos a dos metros de profundidad, usando densidad del suelo tomada en campo.

Calicata	vp (m/s)	vs (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\nu$	G <sub>max</sub> (Mpa)	E <sub>max</sub> (Mpa)	K <sub>max</sub> (Mpa)
c1	567.69	259	1.75	0.37	117.17	320.72	406.69
c2	617.48	243	1.76	0.41	103.74	292.21	531.54
c3	601.34	251	1.75	0.39	110.48	308.12	486.81
c4	635.05	290	1.76	0.37	148.05	405.15	512.57
c5	677.26	268	1.77	0.41	127.06	357.59	642.02
c6	658.82	253	1.77	0.41	113.00	319.44	615.56

Tabla 05: Parámetros dinámicos del suelo a cuatro metros de profundidad, usando densidad obtenida por el método empírico.

Se calculó los parámetros dinámicos en las seis calicatas a dos metros de profundidad a partir de las Vp, Vs y densidad del suelo obtenida en campo. Para el cálculo a cuatro metros de profundidad se usó la densidad hallada con la relación empírica de la ecuación 11.

Los valores de Poisson ( $\nu$ ) calculados a dos metros están entre 0.21 y 0.32, estos resultados son

normales para este tipo de material, mientras que para cuatro metros los valores oscilan entre 0.37 a 0.41, mostrando un comportamiento más elástico a mayor profundidad. Los valores del módulo de Cizalla ( $G_{max}$ ) y Young ( $E_{max}$ ), son valores máximos encontrados para deformaciones angulares muy pequeñas. Y para su aplicación en diseño de cimentaciones en arenas este debe ser corregido, y nuestro nuevo valor será el 20% del  $G_{max}$ . También se calculó el módulo de volumen, al igual que los anteriores debe ser corregido antes de su uso.

#### **4.1.4 Capacidad de carga**

El cálculos de la capacidad carga fue realizado a dos metros de profundidad por el método tradicional y geofísico; con el método geofísico también se calculó la capacidad de carga a cuatro metros de profundidad. Para los cálculos se simulo una zapata cuadrada de 1 metro de lado a dos y cuatro metros de profundidad.

Para el cálculo con método tradicional de uso el ángulo de fricción interna, cohesión y densidad del suelo, los dos primeros calculados en laboratorio y en tercero en campo. Para el cálculo por el medio geofísico se usó la velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ) y densidad del suelo, reemplazándolas en la *ecuación 10* propuesta por Tezcan. Para el cálculo a cuatro metros

de profundidad se usó la densidad obtenida por la relación empírica de la ecuación 11, estas operaciones se realizaron para las seis calicatas.

Calicata	este (m)	norte (m)	Vs (m/s)	$\rho$ (KN/m <sup>3</sup> )	Tezcan (KN/m <sup>2</sup> )	Tezcan (Tn/m <sup>2</sup> )
c1	370549	8013948	243	14.60	354.78	36.20
c2	370590	8013748	220	16.60	365.20	37.27
c3	370624	8013538	256	15.97	408.83	41.72
c4	370466	8013436	242	14.62	353.80	36.10
c5	370466	8013277	256	15.68	401.41	40.96
c6	370363	8013112	251	16.17	405.87	41.42

Tabla 06: Muestran los resultados de carga última obtenidos a dos metros de profundidad usando geofísica, se usó densidad hallada en campo.

Calicata	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\rho$ (KN/m <sup>3</sup> )	Tezcan (KN/m <sup>2</sup> )	Tezcan (Tn/m <sup>2</sup> )
c1	567.69	259	17.14	443.35	45.24
c2	617.48	243	17.23	418.38	42.69
c3	601.34	251	17.20	431.35	44.02
c4	635.05	290	17.27	500.32	51.05
c5	677.26	268	17.35	464.63	47.41
c6	658.82	253	17.32	437.69	44.66

Tabla 07: Resultados de carga última obtenidos para cuatro metros de profundidad usando geofísica, la densidad para este cálculo es hallada empíricamente.

Calicata	densidad (KN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (KN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	Meyerhoff (KN/m <sup>2</sup> )	Vesic (KN/m <sup>2</sup> )	Hansen (KN/m <sup>2</sup> )	Terzaghi (KN/m <sup>2</sup> )
c1	14.60	3.18	29.10	1245.50	928.11	932.38	860.72
c2	16.60	1.08	30.30	1447.44	1097.25	1102.75	980.80
c3	15.97	2.45	29.32	1323.49	994.77	999.24	895.84
c4	14.62	3.53	28.50	1179.50	879.30	883.05	782.74
c5	15.68	4.31	30.48	1679.11	1226.87	1232.58	1082.41
c6	16.17	4.41	30.90	1826.97	1330.49	1336.72	1114.46

Tabla 08: Presenta los valores de carga última a dos metros hallada con el método clásico propuesto por distintos autores.

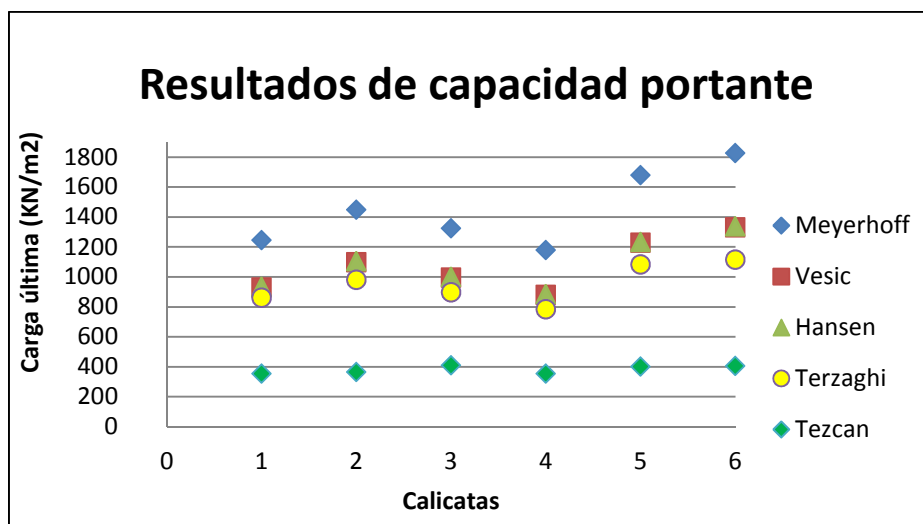


Figura 14: Muestra los resultados obtenidos a dos metros de profundidad con métodos clásicos y geofísico.

	<i>Meyerhoff</i> (KN/m <sup>2</sup> )	<i>Vesic</i> (KN/m <sup>2</sup> )	<i>Hansen</i> (KN/m <sup>2</sup> )	<i>Terzaghi</i> (KN/m <sup>2</sup> )	<i>Tezcan</i> (KN/m <sup>2</sup> )
<i>Meyerhoff</i> (KN/m <sup>2</sup> )	1				
<i>Vesic</i> (KN/m <sup>2</sup> )	0.997	1			
<i>Hansen</i> (KN/m <sup>2</sup> )	0.997	1.000	1		
<i>Terzaghi</i> (KN/m <sup>2</sup> )	0.981	0.988	0.988	1	
<i>Tezcan</i> (KN/m <sup>2</sup> )	0.691	0.690	0.689	0.681	1

Tabla 09: Muestra los coeficientes de correlación de los resultados obtenidos a dos metros de los distintos métodos.

De los valores obtenidos y presentados en las tablas podemos observar que el terreno en el cual se trabajó posee capacidad portante aceptable para cimentaciones urbanas, además existe una buena correlación de valores entre los datos obtenidos tradicionalmente y los datos obtenidos por geofísica, siendo esta última más conservadora que los métodos tradicionales.

Estos resultados demuestran que el método geofísico es un método a ser tomado en cuenta para el cálculo de la capacidad portante siendo además un método de fácil aplicación, barato, rápido y no invasivo, que nos permite llegar a grandes profundidades.

#### **4.1.5 Asentamiento según la teoría elástica en suelos granulares**

Se ha determinado el asentamiento a dos metros de profundidad en cada calicata según la teoría elástica, para una zapata cuadrada de un metro de lado, como presión se ha aplicado la carga última calculada por el criterio de Terzaghi y se ha reducido el módulo elástico máximo al 20% para su aplicación. En nuestro suelo por tratarse de arenas porosas se considera el asentamiento inicial como asentamiento total.

Calicata	B(cm)	Terzaghi Qu (Kg/cm <sup>2</sup> )	Is	E (Kg/cm <sup>2</sup> )	v <sup>2</sup>	Si (cm)
c1	100	8.78	1	440.09	0.050	1.894
c2	100	10.00	1	445.75	0.104	2.011
c3	100	9.14	1	465.08	0.086	1.795
c4	100	7.98	1	449.24	0.070	1.652
c5	100	11.04	1	517.83	0.045	2.036
c6	100	11.36	1	555.47	0.095	1.851

Tabla 10: Muestra los asentamientos inmediatos para dos metros de profundidad en las seis calicatas.

Los valores de asentamiento están en el rango de 1.6 a 2 centímetros, siendo el asentamiento que se especifica como permisible en edificios comerciales de 1 pulgada (2.54 centímetros). Bajo ésta premisa confirmamos que el suelo del área de estudio es apto para realizar cimentaciones urbanas. Nótese que estamos aplicando la carga última hallada por Terzaghi y de aplicar la carga admisible el asentamiento sería menor.

## **4.2 Perfiles Sísmicos**

En el área del trabajo se realizó siete líneas sísmicas transversales a la quebrada Caramolle con el objetivo de generar perfiles de velocidad de ondas Vp y Vs.

El valor de las Vp ha sido calculado desde la superficie hasta 10.7 metros de profundidad aproximadamente para cada geófono, mientras que las Vs son calculadas en un solo perfil de velocidades por cada arreglo de 33 metros y con una profundidad de investigación de 23 metros, este perfil de velocidades es calculado para el punto medio del arreglo.

### **4.2.1 Perfil uno**

Se ubica en la parte norte del área y es la más corta con una longitud de 66 metros de largo y, compuesta por dos arreglos de 33 metros cada uno; las

Vp van desde los 300m/s hasta 939m/s, los valores más altos pertenecen a los depósitos aluviales que se presentan a 9 metros de profundidad, mientras que los valores más bajos pertenecen a la arena tobácea que se presentan desde la superficie, la profundidad investigada con las Vp es de 10.7 metros.

El comportamiento de las Vs es similar al de las Vp con un ascenso gradual con la profundidad, y velocidades que van 247m/s a 469m/s; al igual que las Vp estas nos indican que los sedimentos aluviales están por debajo de 9 metros. La profundidad media de investigación con las Vs es de 23 metros.

El incremento gradual de las Vp en las arenas tobáceas es producto de la compactación de los suelos por la carga de la columna vertical del mismo y el posible incremento de líticos.

***(Ver anexos - plano TC-03)***

#### **4.2.2 Perfil dos**

Es la sección más larga y tiene 264 metros, está compuesta por 8 tendidos de 33 metros cada uno. En el extremo oeste de esta sección las Vp van desde 300m/s en superficie hasta 1912m/s a 10 metros de profundidad, observándose un cambio brusco a los 5.6 metros de 495m/s a 1162m/s, este salto representa el

contacto de las arenas tobáceas con las Ignimbritas de la formación Huaylillas.

En el lado este de la sección se observa otra elevación brusca de las Vp a partir de cinco metros de profundidad, elevándose hasta 1509m/s, este cambio representa el paso de las arenas tobáceas a los depósitos aluviales con posible compactación por sales. Esta brecha aluvial se aprecia al este de la quebrada siendo parte del cono aluvial del primer evento de relleno de la quebrada Caramolle. En el resto de la sección las Vp manifiestan presencia de los depósitos aluviales a partir de los 8 metros en promedio, y en estos primeros metros se observa un crecimiento de forma gradual de las Vp con la profundidad, la probable causa es la compactación de suelo y posible aumento de líticos o cementación por sales de las arenas tobáceas.

Las Vs siguen un comportamiento similar a las Vp aumentando en profundidad y cambiando con la litología; los rangos de Vs en el lado oeste de la sección van de 288m/s en superficie, hasta 579m/s a 23 metros de profundidad, estos valores altos pertenecen a la Ignimbrita del Huaylillas. En el lado este de la sección las Vs van de 274m/s a 500m/s; los valores más altos corresponden a los sedimentos aluviales; cabe resaltar que en el mapeo geológico realizado se

observó Ignimbritas de la formación Huaylillas en el extremo oeste de esta sección.

***(Ver anexos - plano TC-04)***

#### **4.2.3 Perfil tres**

Esta sección tiene 231 metros de largo y está compuesto por 7 tendidos de 33 metros cada uno, al igual que las otras 6 secciones esta se dispone en sentido trasversal a la quebrada Caramolle.

El comportamiento de las  $V_p$  es ascendente con la profundidad teniendo rangos de velocidad entre 300m/s y 950m/s, este comportamiento es uniforme con excepción del lado este de la sección, donde se observa un crecimiento de las  $V_p$  a 8 metros de profundidad, llegando a tener 1202m/s, estas velocidades altas representarían la presencia de las brechas de origen aluvial. En el resto de la sección el cambio litológico de arenas tobáceas a sedimentos aluviales se aprecia a los 9 metros en promedio. Las  $V_s$  son crecientes con la profundidad y velocidades de entre 254m/s hasta 456m/s, los valores más altos están en el lado este de la sección, y corresponden a los sedimentos aluviales.

Similar a todas las líneas la profundidad de investigación con la Vp es de 10.7 metros y de 23 metros para las Vs.

***(Ver anexos - plano TC-05)***

#### **4.2.4 Perfil cuatro**

Con una longitud de 165 metros y compuesto por 5 tendidos de 33 metros cada uno, se dispone transversal a la quebrada Caramolle.

Las Vp aumentan con la profundidad de forma continua, siendo las más bajas de 300m/s en superficie, y de 1170m/s a 10 metros de profundidad, estos valores altos sugieren la presencia de sedimentos aluviales, a lo largo de toda la sección, en especial hacia el lado este.

Los valores de las Vs van desde 270m/s a 530m/s, este valor alto se encuentra al extremo este de la sección a 23 metros de profundidad y concuerda con los valores asignados a los depósitos aluviales.

***(Ver anexos - plano TC-06)***

#### **4.2.5 Perfil cinco**

Tiene una longitud de 198 metros y consta de 6 tendidos de 33 metros cada uno, al igual que en las demás secciones el suelo en superficie es una arena tobácea de grano medio.

Las  $V_p$  en superficie son de 300m/s e incrementa gradualmente en profundidad, producto de compactación por la carga de la columna de suelo. Los valores más altos de las  $V_p$  ascienden a 1079 m/s a 10 metros de profundidad, estos valores corresponden a los depósitos aluviales que en general están por debajo de 8 metros.

Las  $V_s$  oscilan entre 234m/s a 543m/s en la superficie y fondo respectivamente, estas velocidades más altas se observan en lado oeste de la sección.

***(Ver anexos - plano TC-07)***

#### **4.2.6 Perfil seis**

Con una longitud de 132 metros y compuesta por 4 tendidos, ésta se dispone transversal a la quebrada Caramolle.

En superficie las  $V_p$  son de 300m/s la que va aumentando con la profundidad, las  $V_p$  más altas se

presentan en el lado oeste de la sección y llegan a 1134m/s, estas velocidades corresponden a los sedimentos aluviales que están por debajo de 8 metros. Hacia el lado este de la sección se aprecia  $V_p$  por encima de 900m/s denotando también presencia de los sedimentos aluviales.

Las  $V_s$  van de 252m/s a 503m/s, los valores más altos se dan a 23 metros de profundidad y al este de la sección.

***(Ver anexos - plano TC-08)***

#### **4.2.7 Perfil siete**

Con 165 metros de longitud, compuesta por 5 tendidos de 33 metros cada uno, es la sección ubicada más al sur del área de estudio.

En el lado oeste de la sección las  $V_p$  van desde 301m/s en superficie hasta 1330m/s a 10 metros de profundidad, los valores superficiales corresponden a arenas tobáceas hasta los 6 metros de profundidad donde se observa un cambio brusco en las  $V_p$  de 830m/s a 1325m/s, estas valores altos de  $V_p$  corresponden a las ignimbritas de la formación Huaylillas, mientras en el lado este de la sección muestra un comportamiento uniforme de las  $V_p$ , desde 320m/s en superficie hasta 1050m/s en las zonas más

profundas, donde los valores altos corresponden a los depósitos aluviales que se muestran en forma de barras a 6 metros de profundidad.

Las Vs van desde 249m/s a 742m/s, desde la superficie hasta 23 metros de profundidad, donde los valores más altos probablemente correspondan a los depósitos aluviales con mayor abundancia y tamaño de líticos.

***(Ver anexos - plano TC-09)***

#### **4.1 Índice de calidad de material usando geofísica**

Usando las Vp, Vs y densidad del suelo se elaboraron mapas de isovalores de las relaciones **Poisson** y **Vp/Vs**, estos mapas muestran la calidad del suelo.

##### **4.1.1 Plano de isovalores de la relación de Poisson**

Los valores de Poisson nos muestran también la calidad del suelo, para nuestra zona de trabajo los valores están entre 0.046 hasta 0.28. Las zonas con valores más altos y mejor calidad de suelo se ubican al sur y al noreste del área de trabajo, los valores más bajos están en la parte central y norte del área. Valores más altos están representados por el color azul, mientras los más bajos están de color rojo, cuando estos

valores se acercan a cero nos indica que el material se aleja del comportamiento elástico.

***(Ver anexos - plano TC-010)***

#### **4.1.2 Plano de isovalores de la relación $V_p/V_s$**

Se generó un plano de isovalores de la relación  $V_p/V_s$  a dos metros de profundidad para determinar la calidad del suelo. Los valores van desde 1.42 hasta 1.83, valores más altos se encuentran al sur y al noreste del área de trabajo representado en color azul, y los valores más bajos se ubican al centro y norte del área estudiada y está representada en color rojo, los valores más altos nos indican una mayor calidad del suelo y los más bajos menor calidad, en este caso nuestro intervalo de valores es corto y el color rojo no denota necesariamente mala calidad de suelo, mostrando únicamente que este es de menor calidad que las zonas de color azul.

***(Ver anexos - plano TC-11)***

## **CONCLUSIONES**

1. Litológicamente el área de estudio está constituida por Ignimbritas de la formación Huaylillas, tobas de la formación Pachía, brechas sedimentarias de origen aluvial y depósitos proluviales de arenas tobáceas de grano medio a fino, estas dos últimas rellenan la quebrada Caramolle.
2. Según los planos de isovalores de Poisson y  $V_p/V_s$ , los suelos de mejor calidad se ubican al sur y al noreste del área de trabajo, y los suelos con menor calidad están en la parte central y norte.
3. Los valores de las  $V_p$  en los perfiles sísmicos, se comportan de forma ascendente con la profundidad, siendo los valores superficiales los más bajos con 300m/s en arenas tobáceas, y los más altos en Ignimbritas a 10.7 metros de profundidad, al oeste de la sección 2 llegando a 1912m/s.
4. El rango de las  $V_p$  en las arenas tobáceas es de 300m/s hasta aproximadamente 850m/s, por encima de este rango tenemos las velocidades que corresponden a los depósitos aluviales, hasta 1200m/s, los valores superiores a este último pertenecen a las Ignimbritas de la formación Huaylillas.
5. Las  $V_s$  van desde 234m/s a 742m/s, donde las arenas tobáceas tienen valores de entre 234m/s hasta 400m/s, valores por

encima de este corresponden a los depósitos aluviales, mientras los valores de la ignimbrita están por encima de 500m/s.

6. Los valores de capacidad de carga última en los suelos, calculados por el método tradicional y el método geofísico, tienen un coeficiente de correlación lineal de 0.7 que se considera un coeficiente alto, demostrando la validez del método geofísico y siendo además sus valores más conservadores que los obtenidos por el método tradicional.
7. Se determinó que el suelo estudiado cuenta con resistencia aceptable y haciendo uso de buenas técnicas constructivas se pueden hacer edificaciones de hasta dos pisos usando zapatas aisladas.

## **RECOMENDACIONES**

1. Para realizar edificaciones habitacionales de más de dos pisos en el área estudiada, se recomienda no hacer uso de zapatas aisladas, más bien recurrir a mejores técnicas constructivas como zapatas corridas o losas de cimentación.
2. Realizar trabajos de correlación de capacidad de carga para diferentes litologías y con diferentes métodos, para ajustar el método geofísico a nuestra realidad geológica.
3. Estar entrenado para realizar trabajos de refracción y microtremores así como para su interpretación, puesto que estos procedimientos son muy sensibles a errores.
4. Extender los estudios al resto de las áreas urbanas de Tacna, en especial a los distritos de Ciudad Nueva y Pocollay, acentuados en gran parte sobre la toba Pachía y arenas tobáceas.
5. Se recomienda a la E.A.P. de Ingeniería Geológica – Geotécnica, adquirir líneas de adquisición de datos más largas, geófonos más sensibles (4.5 Hz) y en mayor número (24 canales) para poder investigar a mayores profundidades, pudiendo ser aplicado para encontrar estructuras geológicas y hallar el periodo natural de los suelos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Álvarez, A.2003. “Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil” publicación técnica no. 229, secretaria de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte.
- Álvarez, A. Garnica, P. Pérez, A. 2003. Evaluación indirecta de los módulos elásticos de rigidez in situ y la relación entre  $v_p/v_s$  y el ángulo de fricción interna publicación técnica Nro. 225, secretaria de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte.
- Cahuana, R., Tesis, 2009. Refracción sísmica y Remi aplicados a la obtención de parámetros dinámicos del suelo en un estudio geológico – geotécnico en “La florida” Distrito de Alto de la Alianza – Tacna, universidad Jorge Basadre Grohmann.
- Douglas, W. Lambert, R.G., use of refraction microtremor (remi) data for shear wave velocity determination at an urban bridge rehabilitation site, geotechnology, inc.,
- Flores, A; Sempere, T. 2002. “Avances sobre la historia geológica del valle Tacna”. XI congreso peruano de geología, resúmenes, p. 10.
- Flores, A.; Jacay, J.; Roperch, P.; Sempere, T. 2002. Un Evento volcánico de edad Plioceno superior en la región de Tacna: La Ignimbrita de Pachía. XI Congreso Peruano de Geología, resúmenes, p. 122.
- Geometrics – “ES-3000, Geode™ y StrataVisor™ NZ/NZC Manual del Operador P/N 28519-01 Rev K” Geometris – “Seismic ControllerUser’s Guide”

- Guariguata, G. 2008. Tesis, Levantamiento sísmico de refracción somera en el área occidental de El Hatillo, al norte del poblado de Urumaco, estado Falcón, Universidad Simón Bolívar, Venezuela,
- INDECI – 2004. Proyecto INDECI PNUD PER 02/51. “Mapa de Peligros de la Ciudad de Tacna”. Tacna-Perú.
- Jaén, Hugo; Ortiz, Guillermo. 1963. “Carta Geológica Nacional, Geología de los cuadrángulos de Tacna y la Yarada”. Lima-Perú.
- Lazcano, S. 2007. Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie, México.
- Linares G. 2005. “introducción y aplicación del método de sísmica de microtremores en áreas urbanas” Universidad Simón Bolívar - Venezuela.
- Louie, J. N. 2001. Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays. Bulletin of the Seismological Society of America, 91: 347-364.
- Mayne, P. W. 2001. “Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced insitu tests”, Proc. Int. Conf. on In-Situ Measurements of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia, 27-48.
- Ministerio De Transporte, Comunicaciones, Vivienda Y Construcción (MTC). 2000. “Manual de Ensayos de Materiales EM 2000 Volumen I y II”. Lima - Perú.
- Redpath, B. B. 1973. Seismic refraction exploration for engineering site investigations. Technical Report E-73-4. Explosive Excavation Research Laboratory, Livermore, California.

- Salinas, E. 1985. Evolución Paleogeográfica del Sur del Perú a la luz de los métodos de análisis sedimentológico de las series del departamento de Tacna. Universidad San Agustín de Arequipa, tesis de grado, 200 p.
- Tezcan, S. S., Keceli, A., y Z. Ozdemir. 2006. Allowable bearing capacity of shallow foundations base on shear wave velocity. *Geotechnical and Geophysical Engineering*, 24: 203-218.
- Thamesis, T. 2008. “Aplicación de métodos sísmicos: vibraciones naturales y refracción de microtremores para caracterización de sitio en estudios de ingeniería civil”- Universidad Simón Bolívar - Venezuela
- Tosdal R, Farrare E. & Clark A. (1981): “K-Ar Geochronology of the Late Cenozoic volcanic rocks of the Cordillera Occidental, southernmost Perú”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 10, p 157-173.
- UNJBG (ESGE) – INDECI. 2001. “Estudio Mapa de Peligros de la Ciudad de Tacna – Cono Norte”. Tacna-Perú.
- Wörner G, Hammerschmidt K, Henles-Kunst F, Lezaun J & Wilke H. (2000), “Geochronology ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , K-Ar and  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  exposure ages) of Cenozoic rocks from northern Chile (18-22°S): implications for magmatism and tectonic evolution of the central Andes” *revista geológica de Chile*, vol. 27, N° 2.
- Yauri S. (2006). Microtremores, Compendio de Trabajos de Investigación CNDG – Biblioteca Instituto Geofísico del Perú. V. 7 p. 43 -56

## **FOTOS**

**Foto 01:** Geófono vertical de 14Hz, conectado a cable de adquisición de datos

**Foto 02:** Adquisición de registros sísmico con sismógrafo ES-3000.

**Foto 03:** Tendido sísmico, previo a ejecución de calicata, separación entre geófonos 1 metro.

**Foto 04:** Generación de ondas sísmicas con comba a tres metros del primer geófono del tendido.

**Foto 05:** Ensayo para obtención de densidad del suelo por el método del cono de arena.

**Foto 06:** Remoldeo de muestra para ensayo de corte directo.

**Foto 07:** Ensayo de corte directo consolidado drenado.

## **ANEXOS**

- **TC-01** - Plano de ubicación del área de estudio.
- **TC-02** - Plano geológico.
- **TC-03** - Perfil sísmico de velocidades de ondas P y S e interpretación geológica, línea uno.
- **TC-04** - Perfil sísmico de velocidades de ondas P y S e interpretación geológica, línea dos.
- **TC-05** - Perfil sísmico de velocidades de ondas P y S e interpretación geológica, línea tres.
- **TC-06** - Perfil sísmico de velocidades de ondas P y S e interpretación geológica, línea cuatro.
- **TC-07** - Perfil sísmico de velocidades de ondas P y S e interpretación geológica, línea cinco.
- **TC-08** - Perfil sísmico de velocidades de ondas P y S e interpretación geológica, línea seis.
- **TC-09** - Perfil sísmico de velocidades de ondas P y S e interpretación geológica, línea siete.
- **TC-10** - Plano de isovalores de la relación de Poisson.
- **TC-11** - Plano de isovalores de la relación  $V_p/V_s$ .

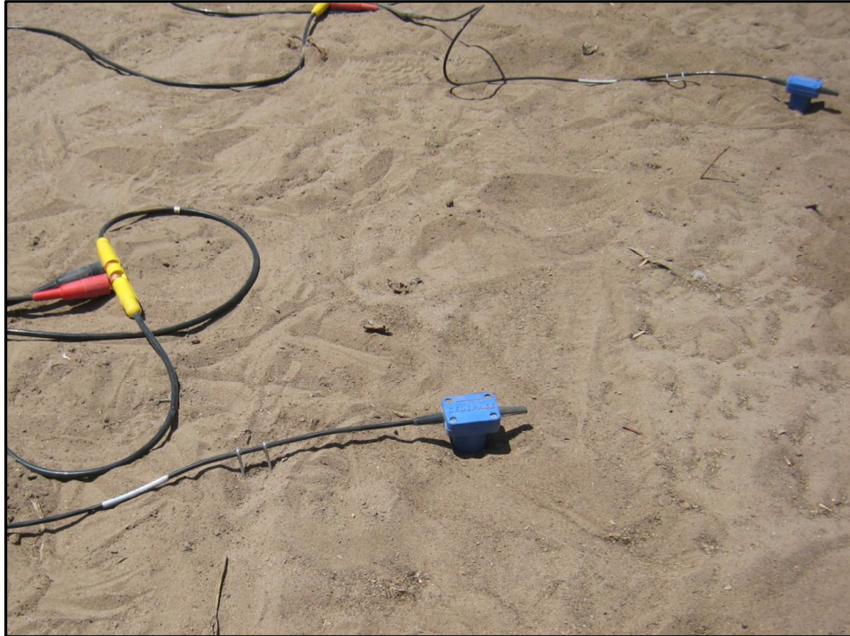


Foto 01: Geófono vertical de 14Hz, conectado a cable de adquisición de datos.



Foto 02: Adquisición de registros sísmico con sismógrafo ES-3000.

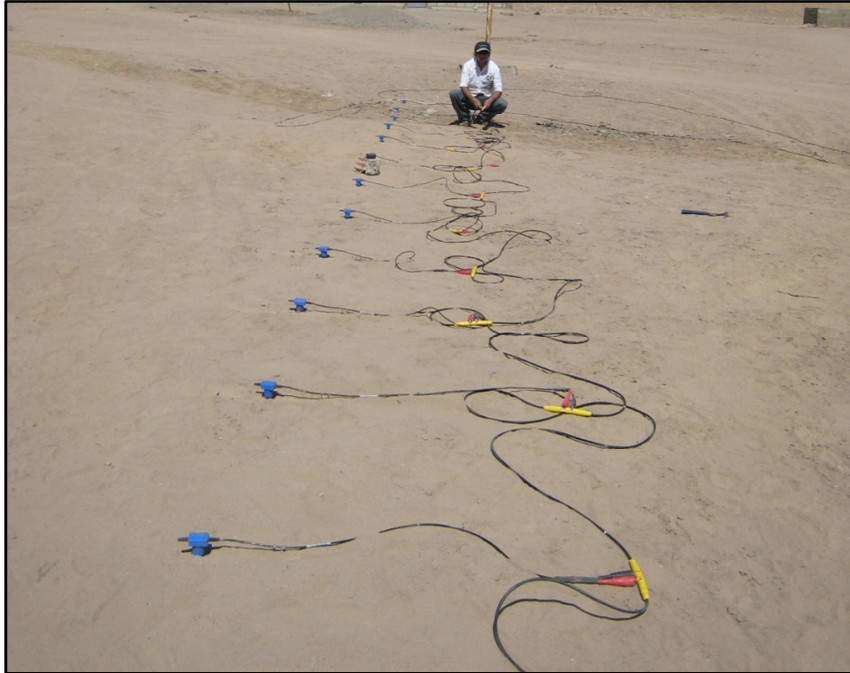


Foto 03: Tendido sísmico, previo a ejecución de calicata, separación entre geófonos 1 metro.



Foto 04: Generación de ondas sísmicas con comba a tres metros del primer geófono del tendido.



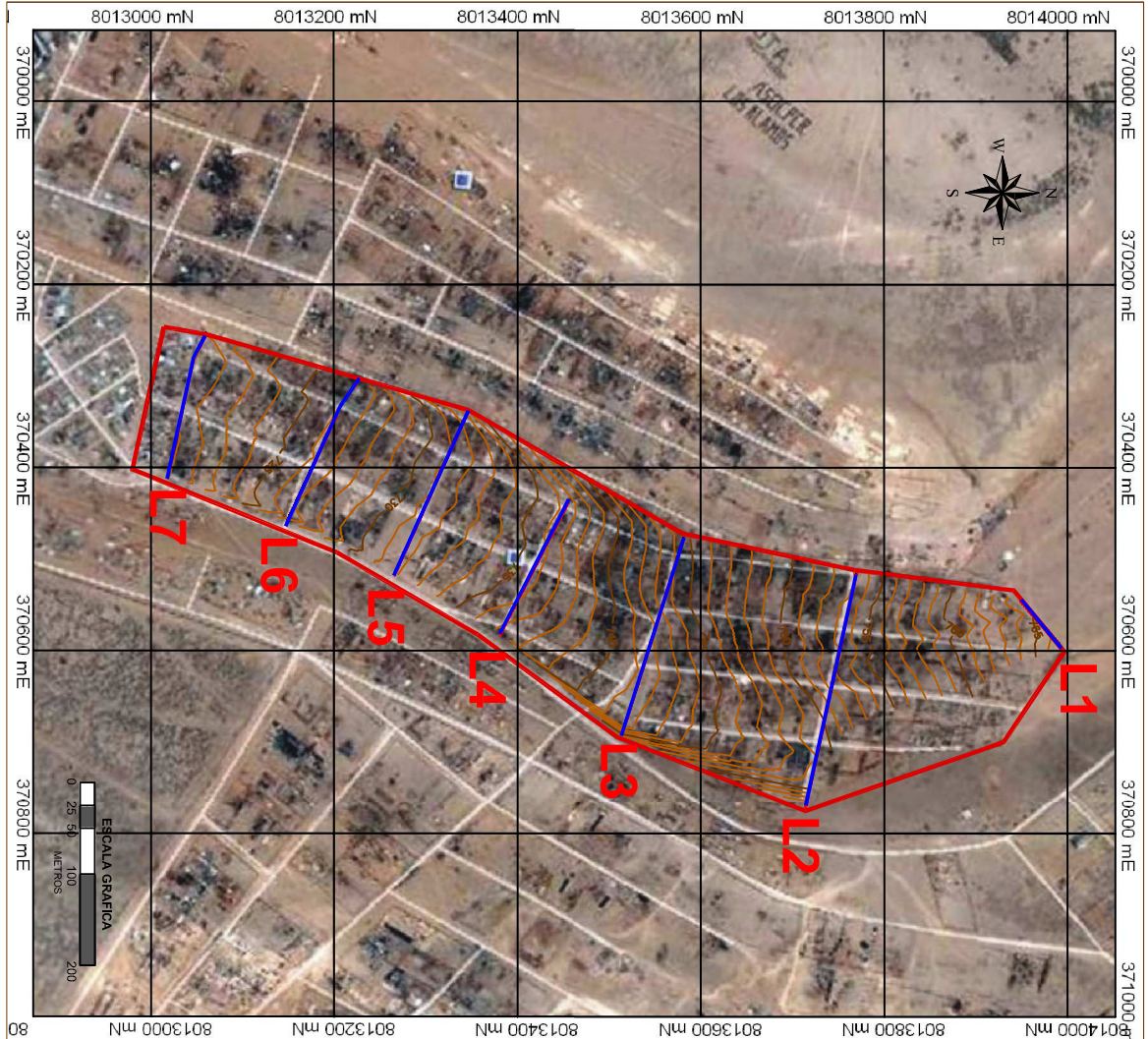
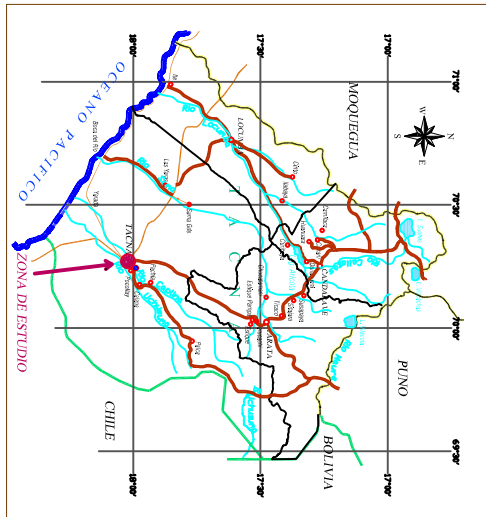
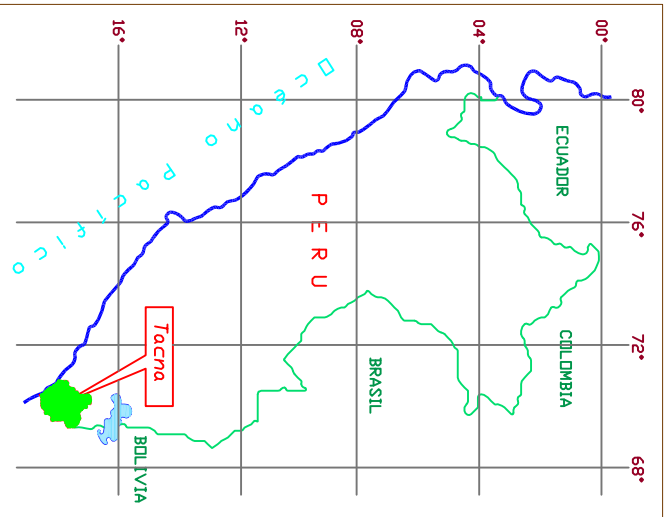
Foto 05: Ensayo para obtención de densidad del suelo por el método del cono de arena.



Foto 06: Remoldeo de muestra para ensayo de corte directo.



Foto 07: Ensayo de corte directo consolidado drenado.



**LEYENDA**

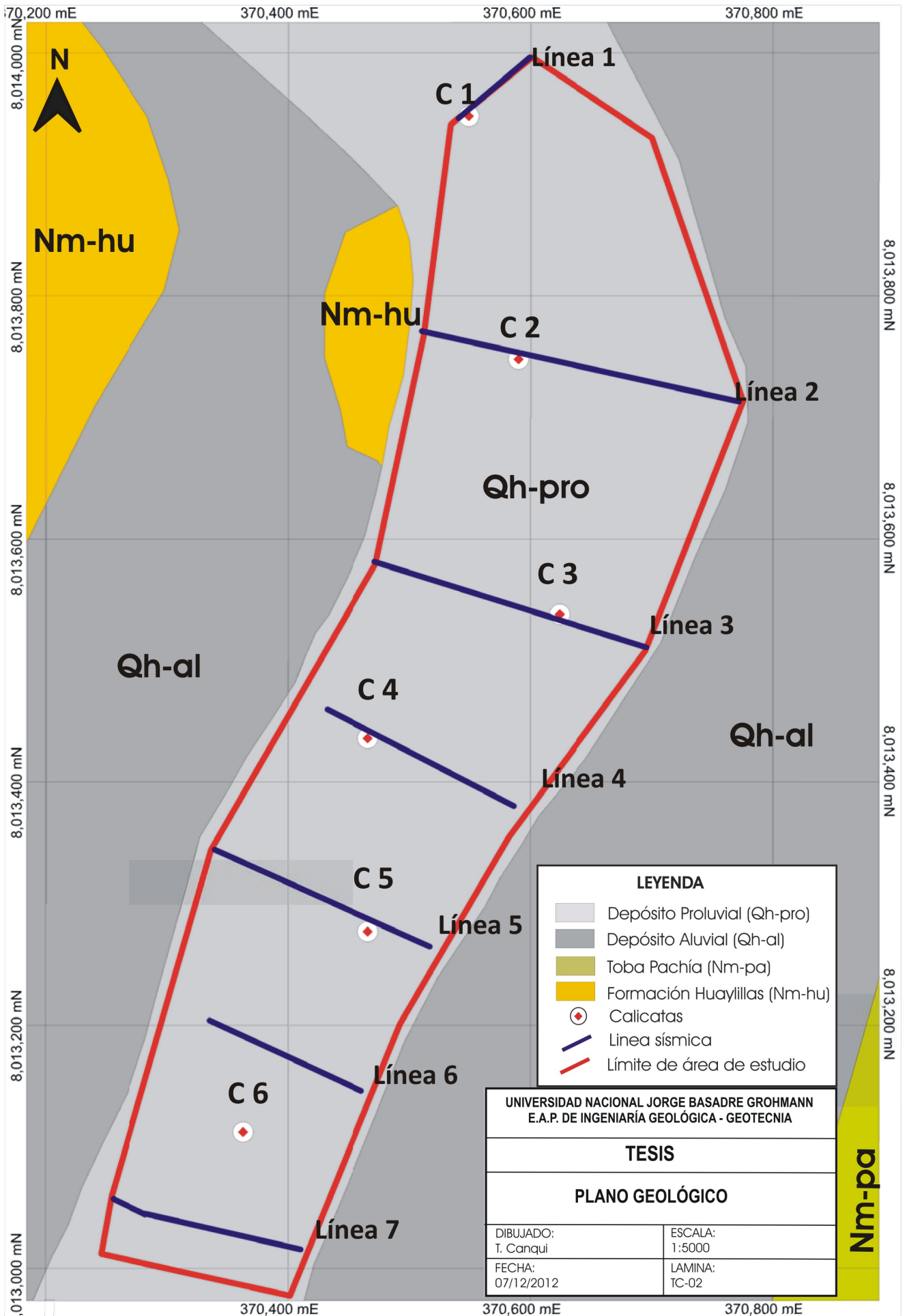
- ○ ○ Capital del Departamento
- ○ ○ Capital de Provincia
- ○ ○ Capital de Distrito
- Limite Internacional
- Limite Departamental
- Limite Provincial
- Carretera Panamericana
- Carretera Asfaltada
- Carretera Afirmada
- Zona de estudio

UNIVERSIDAD NACIONAL "JORGE BASADRE GROHMANN" - TACNA  
 ESCUELA DE INGENIERIA GEOLOGICA-GEOLOGIA

TESIS

**UBICACION DEL AREA DE ESTUDIO**

LAMINA TC - 01

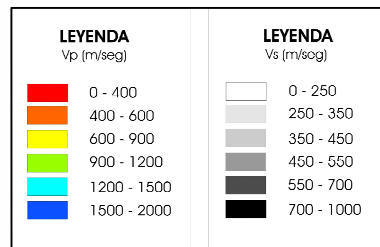
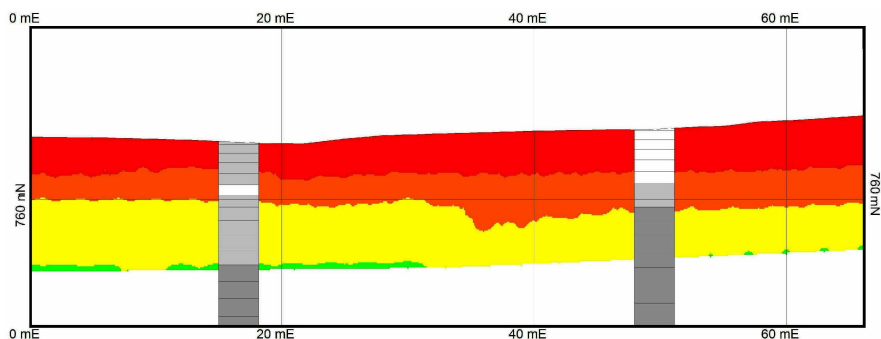


LEYENDA	
	Depósito Proluvial (Qh-pro)
	Depósito Aluvial (Qh-al)
	Toba Pachía (Nm-pa)
	Formación Huayllillas (Nm-hu)
	Calicatas
	Línea sísmica
	Límite de área de estudio

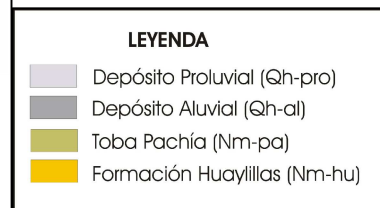
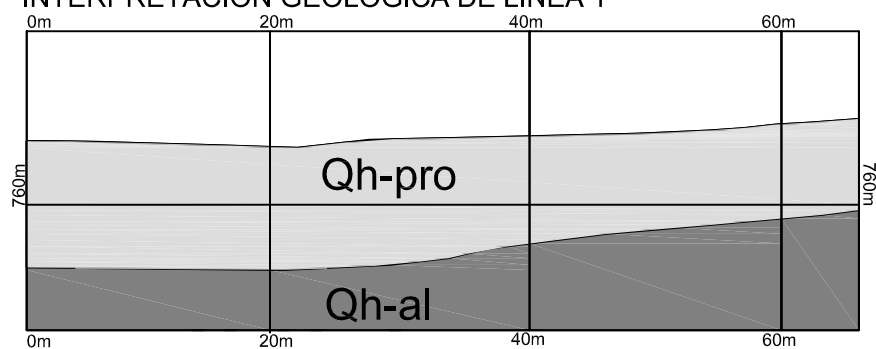
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN E.A.P. DE INGENIARÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA	
TESIS	
PLANO GEOLÓGICO	
DIBUJADO: T. Canqui	ESCALA: 1:5000
FECHA: 07/12/2012	LAMINA: TC-02

**Nm-pa**

## PERFIL SÍSMICO DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S, LINEA 1

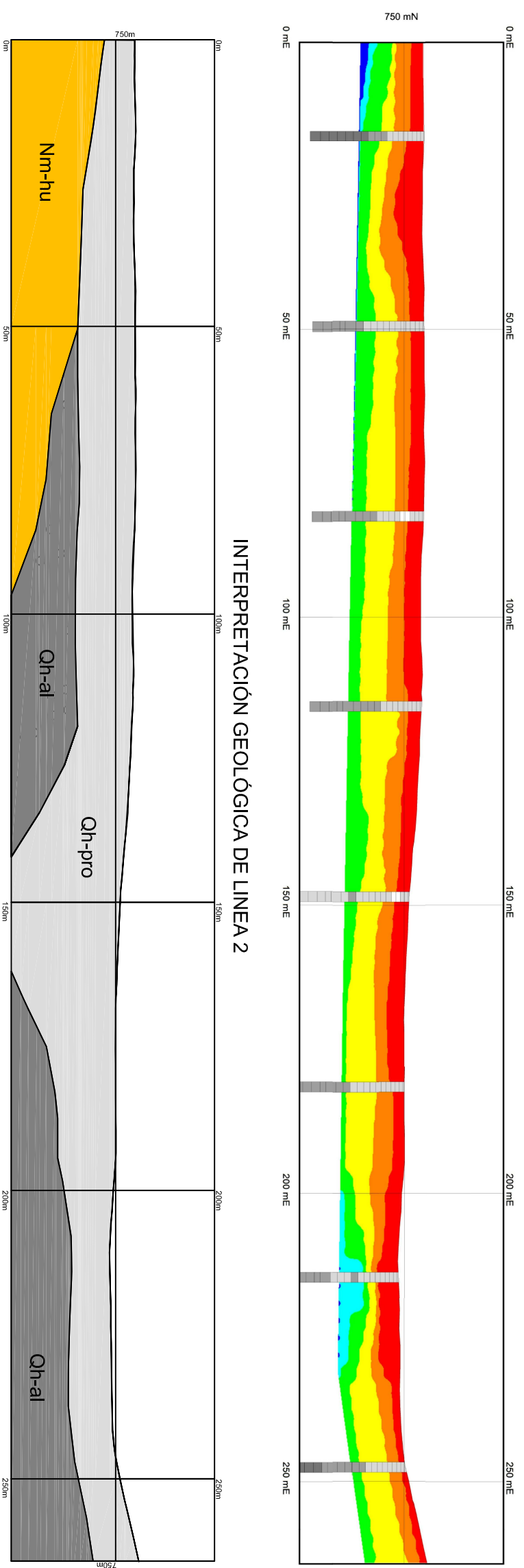


## INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE LINEA 1



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN E.A.P. DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA	
<b>TESIS</b>	
PERFIL DE VELOCIDADES DE ONDAS SÍSMICAS E INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA	
PERFIL 1 DE LINEA 1	
DIBUJADO: T. Canqui	ESCALA: 1: 600
FECHA: 06/08/2013	LAMINA: TC-03

### PERFIL SÍSMICO DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S, LINEA 2

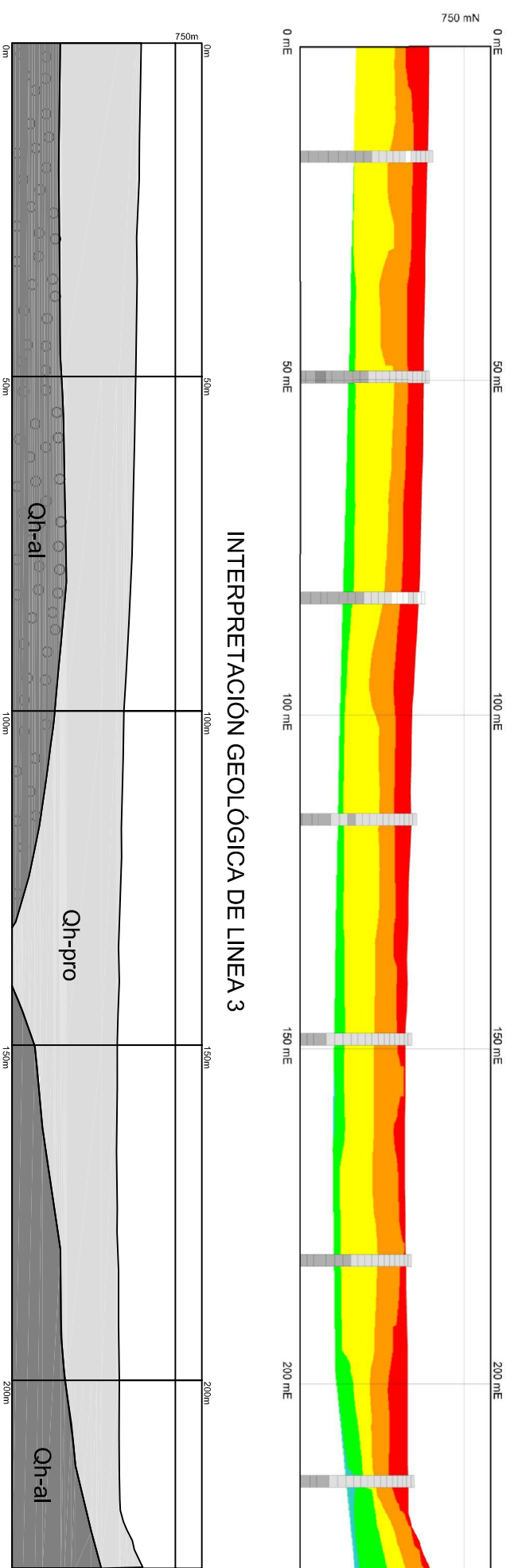


### INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE LINEA 2

<b>LEYENDA</b> Vp (m/sesj)	<ul style="list-style-type: none"> <li>0 - 400</li> <li>400 - 600</li> <li>600 - 900</li> <li>900 - 1200</li> <li>1200 - 1500</li> <li>1500 - 2000</li> </ul>	<b>LEYENDA</b> Vs (m/sesj)	<ul style="list-style-type: none"> <li>0 - 250</li> <li>250 - 350</li> <li>350 - 450</li> <li>450 - 550</li> <li>550 - 700</li> <li>700 - 1000</li> </ul>
<b>LEYENDA</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Depósito Proluvial (Qh-pro)</li> <li>Depósito Aluvial (Qh-al)</li> <li>Toba Pochia (Nm-po)</li> <li>Formación Huayllics (Nm-hu)</li> </ul>			

<b>UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ BASABRE GORHAMAN</b>	
E.A.P. DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA	
<b>TESIS</b>	
<b>PERFIL DE VELOCIDADES DE ONDAS SÍSMICAS E INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA</b>	
PERFIL 2 DE LINEA 2	
DIBUJADO:	ESCALA:
T. Compuq	1 : 900
FECHA:	LÁMINA:
06/08/2013	<b>TC-04</b>

### PERFIL SÍSMICO DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S, LINEA 3

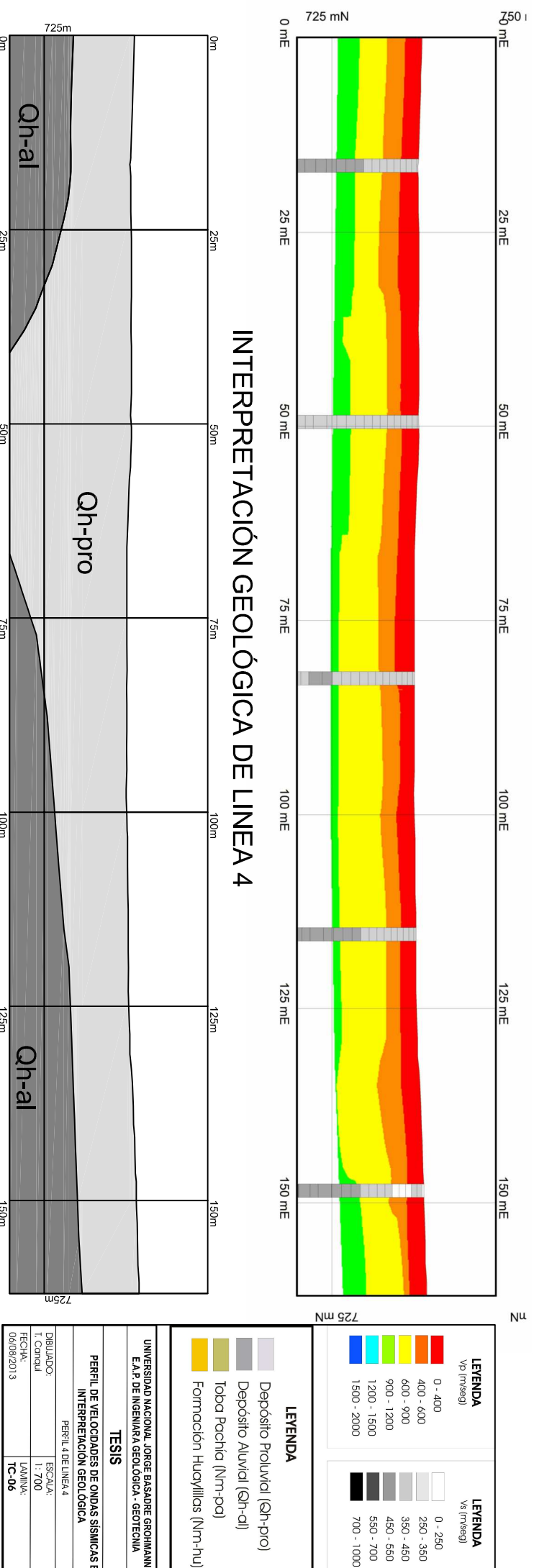


### INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE LINEA 3

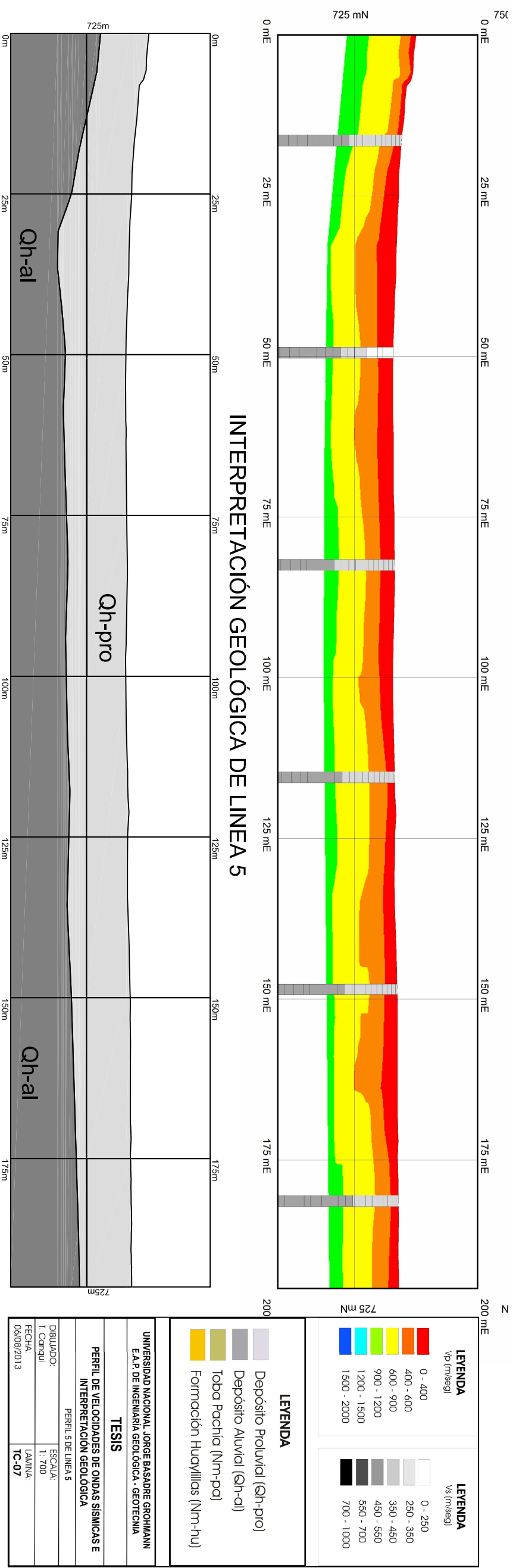
<b>LEYENDA</b> Vp (m/sesj)	<ul style="list-style-type: none"> <li>0 - 400</li> <li>400 - 600</li> <li>600 - 900</li> <li>900 - 1200</li> <li>1200 - 1500</li> <li>1500 - 2000</li> </ul>	<b>LEYENDA</b> Vs (m/sesj)	<ul style="list-style-type: none"> <li>0 - 250</li> <li>250 - 350</li> <li>350 - 450</li> <li>450 - 550</li> <li>550 - 700</li> <li>700 - 1000</li> </ul>
<b>LEYENDA</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Depósito Proluvial (Qh-pro)</li> <li>Depósito Aluvial (Qh-al)</li> <li>Toba Pochia (Nm-po)</li> <li>Formación Huayllics (Nm-hu)</li> </ul>			

<b>UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ BASABRE GORHAMAN</b>	
E.A.P. DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA	
<b>TESIS</b>	
<b>PERFIL DE VELOCIDADES DE ONDAS SÍSMICAS E INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA</b>	
PERFIL 3 DE LINEA 3	
DIBUJADO:	ESCALA:
T. Compuq	1 : 900
FECHA:	LÁMINA:
06/08/2013	<b>TC-05</b>

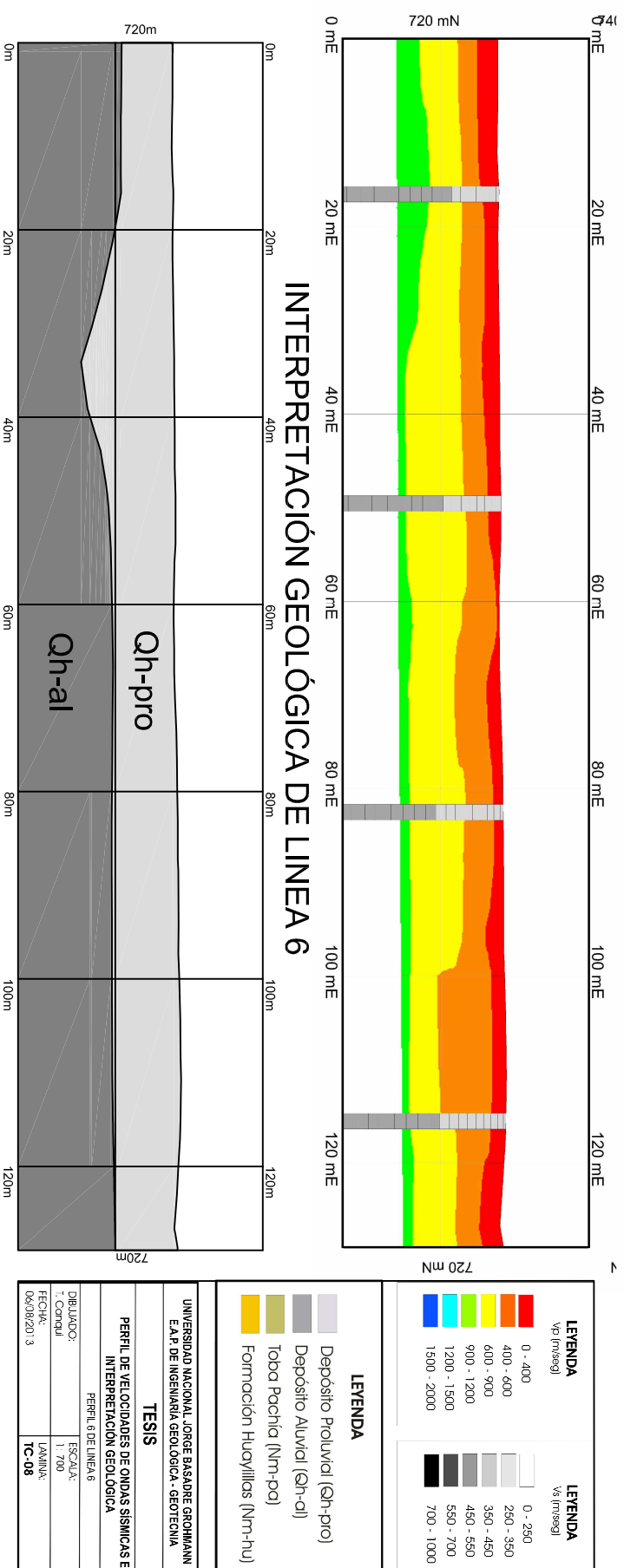
## PERFIL SÍSMICO DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S, LINEA 4



## PERFIL SÍSMICO DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S, LINEA 5



## PERFIL SÍSMICO DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S, LINEA 6



## PERFIL SÍSMICO DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S, LINEA 7

