



**INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO
DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO**

INFORME

INSTRUMENTACIÓN GEOFÍSICA EN LA CIUDAD DE PISCO Y DISTRITOS DE TUPAC AMARU Y SAN CLEMENTE



**Yanet Antayhua
Walter Pari
Twiggi Velezvilla**

Diciembre, 2007

RESUMEN	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Objetivos	4
2. INSTRUMENTACIÓN GEOFÍSICA	5
Sismógrafo GURALP	5
Sismógrafo de Refracción	5
Georadar Pulse EKKO PRO	5
3. REGISTRO DE MICROTREMORES EN LA CIUDAD DE PISCO Y DISTRITOS DE TÚPAC AMARU Y SAN CLEMENTE	6
Determinación de las Frecuencias Predominantes	6
Procedimiento	6
Mapa de Isofrecuencias	6
Isofrecuencias en la ciudad de Pisco y zonas de expansión urbana	7
Isofrecuencias en el distrito de Tupac Amaru	7
Isofrecuencias en el distrito de San Clemente	7
Discusión	7
Conclusiones y Recomendaciones	8
4. REFRACCIÓN SÍSMICA EN LA CIUDAD DE PISCO Y DISTRITOS DE TUPAC AMARU Y SAN CLEMENTE	8
Líneas de Refracción Sísmica en la Ciudad de Pisco	9
Líneas de Refracción Sísmica en el Distrito de Túpac Amaru	11
Líneas de Refracción Sísmica en el Distrito de San Clemente	11
Relaciones de las ondas P, S y las Constantes Elásticas	12
Conclusiones	13
5. LÍNEAS DE GEORADAR EN LA CIUDAD DE PISCO Y DISTRITOS DE TÚPAC AMARU Y SAN CLEMENTE	13
Líneas de Georadar en la Ciudad de Pisco	14
Líneas de Georadar en el Distrito de Túpac Amaru	16
Líneas de Georadar en el Distrito de San Clemente	17
Conclusiones	18
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
LISTA DE TABLAS	19
LISTA DE FIGURAS	19

RESUMEN

Para contribuir a la reconstrucción post-sismo de Pisco del 15 de agosto del 2007, se aplicaron los métodos geofísicos de registro de microtemores, sísmica de refracción y georadar a fin de conocer la respuesta del suelo, espesores de las capas hasta profundidades de 20 a 30 m y el nivel freático en la ciudad de Pisco. Del análisis de 28 microtemores registrados en la ciudad Pisco y zonas de expansión urbana, utilizando la metodología descrita por Nakamura (1989), se determinó que los valores altos de frecuencias (8 a 10 Hz) se presentan básicamente en el extremo oeste, centro (zona de Pisco Playa, Pisco centro) y este (entrada de Pisco) de la ciudad de Pisco; mientras que, los valores altos (11 a 20 Hz) se distribuyen principalmente en el extremo este y sureste de Pisco. En el distrito de Túpac Amaru, las frecuencias predominantes se muestran variables entre 5 y 28 Hz. Los valores de 5 y 6 Hz corresponden básicamente a las diatomitas de la formación Pisco; similares resultados fueron obtenidos para el distrito de San Clemente, donde las frecuencias menores a 7 Hz se ubican sobre las diatomitas y los valores de 10 a 29 Hz en las zonas de transición y conglomerados.

Por otro lado, en el estudio de refracción sísmica se determinó 2 capas elásticas, la primera con velocidades entre 600 m/s a 1,200 m/s hasta un máximo de 19 m de profundidad de material cuaternario aluvial y la segunda, entre 2001 m/s y 2000 m/s hasta 30 m de profundidad; mientras que los estudios de georadar permitieron determinar la profundidad del nivel freático entre 1.4 en el sector de Pisco Playa hasta los 3.2 m en el distrito de Tupac Amaru.

1. INTRODUCCIÓN

La intensa actividad sísmica registrada a lo largo de la costa peruana y por ende la ciudad de Pisco, está asociada principalmente al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. La historia sísmica de esta ciudad data desde la conquista española, donde la ocurrencia de sismos de moderada a baja magnitud, comparada con los de gran magnitud, fueron más frecuentes. Sin embargo, la ocurrencia de dos sismos grandes generó cuantiosas pérdidas humanas y materiales, ejemplos de ellos lo constituyen los sismos ocurridos en 1664 y 1946 donde las ciudades de Pisco e Ica quedaron parcialmente destruidas (Silgado, 1976). El 15 de agosto de 1997, a las 18:40 (hora local), la ciudad de Pisco fue nuevamente afectada por la ocurrencia de un sismo de magnitud moderada ($M_L=7.0$) seguida de numerosas réplicas (informe preliminar, IGP). Este sismo, similar a las anteriores, produjo numerosas pérdidas humanas e innumerables daños materiales principalmente en las construcciones de adobe y barro, colapsando casi el 80 % de los mismos.

Después de ocurrido el sismo de Pisco del 15 de agosto del 2007, instituciones como INGEMMET, INDECI, CONIDA y CESEL se trasladaron a la ciudad de Pisco para realizar estudios geológicos, geotécnicos e instrumentación geofísica, a fin de aportar información básica a utilizarse en la elaboración del mapa de microzonificación y contribuir en el proceso de reconstrucción de la ciudad de Pisco y distritos.

La instrumentación geofísica fue realizada utilizando un sismógrafo de banda ancha, un sismógrafo de refracción y el equipo de georadar; el primero, para registrar microtremores (ruido natural del suelo y ambiental) y conocer la frecuencia predominante del suelo, el segundo para determinar las capas de la que esta compuesto el suelo, a partir de la variación de velocidades de las ondas P (V_p) hasta profundidades de 20 a 30 m. y el tercero para conocer la profundidad a la que se encuentra el nivel freático.

1.1. Objetivos

- Instrumentar con equipos geofísicos la ciudad de Pisco
- Definir zonas con diferentes niveles de efectos de sitio y elaborar mapas de isofrecuencia.
- Identificar la litología superficial a partir de la variación de velocidad de las ondas sísmicas.
- Determinar la profundidad del nivel freático.

2. INSTRUMENTACIÓN GEOFÍSICA

Para realizar la instrumentación geofísica en la ciudad de Pisco, se utilizaron tres equipos diferentes: un sismógrafo de banda ancha y alta sensibilidad para la medición de microtremores, un sismógrafo de refracción para conocer la variación de velocidades y el georadar Pulse EKKO PRO para determinar la profundidad del nivel freático. En la Figura 1, se muestran los equipos utilizados en la instrumentación geofísica de Pisco y distritos de Túpac Amaru y San Clemente.

2.1. Sismógrafo GURALP

El sismógrafo Guralp triaxial (registro en las componentes vertical, Norte-Sur, Este-Oeste) y alta sensibilidad (Figura 1a), esta compuesta de un sensor y registrador integrado en un solo equipo. Este sismógrafo fue adquirido por INGEMMET básicamente para el monitoreo sismo volcánico en la región sur de Perú; sin embargo, su utilidad se amplía también a los aspectos sismo tectónicos y geotécnicos. Una de estas utilidades es el registro de microtemores o vibraciones del suelo de baja amplitud conformada por ondas sísmicas internas y superficiales.

2.2. Sismógrafo de refracción

El equipo de refracción sísmica utilizado en el presente estudio, corresponde a un sismógrafo digital SmartSeis SE y la marca Geometrics, propiedad de CESEL Ingenieros (Figura 1b). Este equipo presenta 24 canales con una resistencia de salida de 600 ohmios y un rango de frecuencia de 10 a 400 Hz. Los filtros que pueden utilizarse a fin de visualizar claramente la señal registrada son de 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz. La fuente de alimentación es de 12 v y la información es almacenada y procesada por una computadora.

2.3. Georadar Pulse EKKO PRO

El Georadar utilizado es un equipo Pulse EKKO PRO, compuesto por tres antenas de 50, 100 y 200 MHz, que permiten obtener información a detalles y profundidades diferentes. Se constituye como una técnica no destructiva que permite realizar una exploración del subsuelo en superficie mediante la emisión de pulsos electromagnéticos (nanosegundos) y al incidir en interfaces u objetos con diferentes propiedades electromagnéticas sufren reflexiones los mismos que son registrados por la antena receptora (Figura 1c). La suma de dichas reflexiones permite obtener una “radiografía” del subsuelo de Pisco y distritos.

3. REGISTRO DE MICROTREMORES EN LA CIUDAD DE PISCO Y DISTRITOS DE TÚPAC AMARU Y SAN CLEMENTE

Para conocer la respuesta dinámica del suelo, el registro de microtemores, es considerado como uno de los métodos más sencillos, debido a su rapidez, bajo costo y resultados confiables. En la ciudad de Pisco y distritos de Túpac Amaru y San Clemente, se seleccionaron los puntos de registro considerando la zona con mayor densidad poblacional y zonas de posible expansión urbana, cada una de ellas con características geológicas variables (limo arcilloso, arenas limosas, gravas, conglomerados, diatomitas).

En la ciudad de Pisco y zonas de expansión urbana (Alto El Molino, Centro Poblado Vista al mar, Casa Blanca y La Yesera), se realizaron un total de 48 puntos de medición de microtemores con ventanas de tiempo variables entre 10 y 15 minutos de registro por punto, dependiendo del nivel de ruido y acceso. Debido a las labores de retiro de escombros producto del colapso de viviendas de adobe, el ruido y acceso en el centro de la ciudad dificultó el registro de microtemores de buena calidad, por lo que el tiempo de registro fue de 15 minutos; mientras que en Alto El Molino, Centro Poblado Vista al mar, Casa Blanca y La Yesera los registros fueron de 10 segundos. En el distrito de Túpac Amaru, ubicado al este de la ciudad de Pisco, se

registraron un total de 12 microtemores (TA1 a TA12), con tiempos de registro de 10 minutos. Estos puntos fueron ubicados sobre zonas de relleno y la formación Pisco. Mientras que, en el distrito de San Clemente, ubicado al Noreste de la ciudad de Pisco, se realizaron 25 mediciones de microtemores que incluyó la zona urbana más afectada por el sismo del 15 de agosto y la zona de expansión urbana del distrito (CA1 a CA6). En la Figura 2, se presenta el mapa catastral y los puntos de registro de microtemores realizados en la ciudad de Pisco, áreas consideradas para la expansión urbana y los distritos de Túpac Amaru y San Clemente. La Foto, muestra un ejemplo del registro de microtemor en el punto PI1 ubicado en la Av José Balta (Pisco Playa).

3.1. Determinación de las Frecuencias Predominantes

Para la determinación de las frecuencias predominantes, se ha seguido la técnica de Nakamura (1989). El procedimiento es el siguiente:

3.1.1. Procedimiento

De cada uno de los registros de microtemores tomadas con 10 y 15 segundos de tiempo, se seleccionaron 2 a 5 ventanas de 20 segundos donde la señal se mostraba más estable. Las señales registradas fueron cambiadas de su formato original Guralp al formato SEISAN para luego ser visualizados en el programa DEGTRA 2000 (Ordaz y Montoya, 2000). Posteriormente, se realizó la corrección por línea base a cada una de ellas y se aplicó el espectro de Fourier en sus tres componentes.

Una vez obtenido el espectro de Fourier se procede utilizar la técnica descrita por Nakamura (1989) donde el principio básico de la técnica es, que solamente las componentes horizontales son afectadas por la estructura local. Entonces, a partir del registro en superficie se obtiene la función de transferencia de las capas del suelo, mediante la relación del espectro de Fourier obtenido para la capa horizontal (H) compuesta por las componentes Norte-Sur, Este-Oeste y la vertical (Z) de un mismo registro; es decir, se calcula el cociente H/V del promedio de H/V correspondiente a las dos componentes (NS y EO), se obtiene la frecuencia (Hertz) y/o periodo predominante (segundos). En la Figura 3a, se presenta la señal de 20 segundos registrado el 18 de septiembre del 2007, así como el espectro de Fourier en sus 3 componentes (Z, NS, EO) obtenido para el punto PI4 y en la Figura 3b, ejemplos de la obtención de la frecuencia predominante mediante la técnica H/V para los puntos PI1 y PI4. Asimismo, en las Tablas 1, 2 y 3, se presentan las frecuencias y periodos predominantes obtenidos en cada punto de registro realizado en la ciudad de Pisco, donde se observa que los valores predominantes en frecuencias y periodos varían de 9 a 20 Hz y de 0.05 a 0.52 s respectivamente.

3.2. Mapas de Isofrecuencias

En la Figura 4, se presenta los valores y curvas de isofrecuencia elaboradas para la ciudad de Pisco, conjuntamente con INDECI y los distritos de Túpac Amaru y San Clemente. Estos valores han sido sobrepuestos en el mapa geológico elaborado por INGEMMET.

3.2.1. Isofrecuencias en la ciudad de Pisco y zonas de expansión urbana

Con el total de valores (28) de frecuencias predominantes obtenidas con la técnica de Nakamura (1989), se realizó las curvas de isofrecuencias. Para obtener una buena densidad de valores de frecuencias en la ciudad de Pisco, se ha adicionado también los obtenidos por la Universidad de Tokio (18) que hacen un total de 46 puntos distribuidos uniformemente. Las curvas de isofrecuencias fueron trazadas considerando la información geológica y geotécnica disponible trabajando conjuntamente con INDECI.

De acuerdo a lo obtenido de las curvas de isofrecuencias, se observan básicamente 2 zonas en la ciudad de Pisco; la primera que involucra la zona de Pisco Playa, Pisco Centro y entrada de Pisco desde la carretera Panamericana, donde los valores de frecuencias predominantes varían entre 8 y 10 Hz. Como puede observarse en la Figura 4, esta zona de bajas frecuencias corresponde a depósitos marinos, arenas limosas y de relleno antrópico.

La segunda zona involucra la zona Este y Sureste de Pisco y los valores de frecuencias predominantes varían entre 10 y 20 Hz. Cabe mencionar que los valores altos (16 a 20 Hz) se ubican principalmente en la zona Sureste entre las avenidas Las Américas y Abraham Valdelomar, los centros poblados de La Yesera, Casa Blanca y de manera puntual en Alto El Molino (línea discontinua). La geología de la zona, muestra claramente que las altas frecuencias (16 a 20 Hz) se encuentran sobre las terrazas fluviales gravosas y lentes de arena con limo.

3.2.2. Frecuencias predominantes en el distrito de Túpac Amaru

En el distrito de Túpac Amaru, aunque no se dispone de suficiente información para realizar las curvas de isofrecuencias, los valores de frecuencias predominantes varían entre 5 y 27 Hz (Figura 4), observándose que los valores altos se presentan en los límites entre la formación Huamaní compuesta por gravillas y costras de sal (Ns-h), y la formación Pisco (Ns-p: diatomitas intercaladas de areniscas finas); mientras que los valores menores a 10 Hz, se presentan en las zonas de dunas, cubiertas eólicas activas (Qe_0) y las diatomitas de la formación Pisco (Ns-p).

3.2.2. Frecuencias predominantes en el distrito de San Clemente

En el distrito de San Clemente, las curvas de isofrecuencia fueron trazados considerando el total de valores obtenidos (Figura 4). De acuerdo a los resultados obtenidos, las frecuencias menores a 10 Hz se localizan principalmente alrededor de la zona urbana donde afloran las diatomitas de la formación Pisco (Ns-p) y areniscas con niveles de limo y gravillas de la formación Huamaní (Ns-h). A diferencia de ésta, los valores mayores a 10 Hz se concentran principalmente en la parte central de la zona urbana donde aflora el conglomerado de la formación Cañete (Q-c).

3.3. Discusión

Es evidente que el registro y análisis de microtemores permiten caracterizar rápidamente la respuesta del suelo con fines geotécnicos y de microzonificación en la ciudad de Pisco y distritos de Tupac Amaru y San Clemente, severamente afectados por el sismo del 15 de agosto del 2007. La información geológica y los valores de frecuencias obtenidas permitieron definir básicamente 2 zonas en la ciudad de Pisco y zonas de expansión urbana (Centros Poblados La Yesera, Casa Blanca y Alto El Molino). La primera, con valores frecuenciales bajos que se correlacionan bien con los depósitos “blandos” (Nakamura, 1989; Ojeda et al, 2001) donde se

incluyen los depósitos marinos, arenas limos y arcillas. La evaluación de daños, evidencia también que en esta zona las construcciones de adobe y concreto colapsaron, adicionándose el fenómeno de licuefacción principalmente en el sector de Pisco Playa. En tanto, la segunda zona, compuesta por materiales más compactos y/o “duros” (Ojeda et al., 2001; Romero et al., 2006), presentan altos valores de frecuencias predominantes como lo observado en la zona Sureste (Av Las Américas y Abraham Valdelomar) donde afloran las gravas. Como era de esperarse la respuesta de este tipo de suelo frente a la ocurrencia del sismo del 15 de agosto fue mejor comparado a la primera zona y los daños en construcciones de adobe fueron menores (observación visual y mapa de daños elaborado por INDECI) y casi ninguno en los de concreto. Los resultados de frecuencias obtenidas en este estudio, son similares a los obtenidos por La Universidad de Tokio y el CISMID (http://shake.iis.u-tokyo.ac.jp/Peru2007/JSCE_JAEE_Report/Index.htm) y son coherentes con la información geotécnica obtenida por INDECI, CESEL Ingenieros y observaciones in situ.

En el distrito de Tupac Amaru y San Clemente, los valores de bajas frecuencias predominantes se evidencian principalmente sobre la formación Pisco, sugiriendo así que este tipo de suelo no es recomendable para realizar construcciones, las observaciones de los mayores daños tanto personales y constructivos realizados durante el trabajo de registro de microtemores sustentan estos resultados. Similar a lo obtenido en la ciudad de Pisco y zonas de expansión urbana, en el distrito de San Clemente, se delimitaron 2 zonas con bajos y altos valores de frecuencias predominantes y presentan una buena correlación con la geología de la zona.

3.4. Conclusiones

De los resultados obtenidos del análisis de microtemores en la ciudad de Pisco, Túpac Amaru y San Clemente, se concluye que:

- Los valores de frecuencias predominantes obtenidas en la ciudad de Pisco, distritos de Tupac Amaru y San Clemente, muestran claramente una correlación con el tipo de material de la que esta compuesto el suelo.
- En la ciudad de Pisco, los valores de 8 a 10 Hz se localizan principalmente donde el suelo esta compuesto por depósitos marinos, arenas limosas y relleno antrópico y los valores altos entre 16 a 20 Hz se ubican principalmente en la zona Sureste entre las avenidas Las Américas y Abraham Valdelomar, los centros poblados de La Yesera, Casa Blanca y de manera puntual en Alto El Molino compuesta por gravas.
- Los valores altos (>10 Hz) en el distrito de San Clemente, se ubican en la parte central de la zona urbana donde afloran los conglomerados de la formación Cañete.
- Los valores bajos (<10 Hz) obtenidos en los distritos de Túpac Amaru y San Clemente se correlacionan principalmente sobre las diatomitas de la formación Pisco, sugiriendo así que dicha formación no es apta para realizar construcciones.

4. REFRACCIÓN SÍSMICA EN LA CIUDAD DE PISCO Y DISTRITOS DE TUPAC AMARU Y SAN CLEMENTE

El método sísmico de refracción empleado en estudios geotécnicos, permite diferenciar la capa superficial (suelo o cobertura del cuaternario) de la capa más compacta, en base a la variación de velocidades. En los estudios geotécnicos los valores de las velocidades sísmicas observados son útiles por sí mismos, ya que pueden dar una idea acerca de otras propiedades de los

materiales subyacentes, como su grado de compactación, sus constantes elásticas, zonas de diferente grado de fracturamiento de roca, etc. Durante el trabajo de campo realizado en la ciudad de Pisco y distritos de Tupac Amaru y San Clemente, se contó con el apoyo de la empresa CESEL Ingenieros, tanto con personal técnico y equipo de refracción sísmica. A continuación, se describe las líneas realizadas.

4.1. Líneas de Refracción Sísmica en la Ciudad de Pisco

En la ciudad de Pisco, zonas de expansión urbana y distritos de Túpac Amaru y San Clemente, se realizaron 20 líneas de refracción con longitudes de 60 y 120 m. respectivamente, a fin de conocer las propiedades elásticas de los materiales de la que están compuestos y el espesor de los mismos. En la Figura 5, se presenta la distribución de las líneas de refracción sísmica (LS) y de Georadar (GPR) de acuerdo al siguiente orden:

a). Perfil elástico LS-13.- Ubicado en Pisco Playa. Presenta dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformada por los depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1 = 700$ m/s y espesores que varían entre 3 y 7 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el material de arenas con gravas poco compactas, con velocidad de $V_2 = 1100$ m/s y espesor mínimo de 19 m. (Figura 6a).

b). Perfil elástico LS-14.- Ubicado en pisco Playa. Conformado por dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, Conformado por los depósitos recientes (Suelo de Cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1 = 700$ m/s y espesores que varían entre 1 m a 7 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el material de arenas con gravas poco compactadas, con velocidad de $V_2 = 1300$ m/s y espesor mínimo de 18 m. (Figura 6b).

c). Perfil elástico LS-15.- Ubicado en la zona urbana de Pisco en la calle Piedemonte. En este perfil se observa la presencia de dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, Conformado por los depósitos recientes (Suelo de Cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1 = 700$ m/seg. y espesores que varían entre 8 m a 11 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el material de arenas con gravas poco compactadas, con velocidad $V_2 = 1600$ m/s y espesor mínimo de 19 m. (Figura 6c).

d). Perfil elástico LS-16.- Ubicado en la zona de expansión Urbana de Pisco. Presenta tres medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformado por los depósitos recientes (material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1 = 800$ m/s. espesores que varían entre 2 y 3 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el material de arenas con gravas poco compactadas, velocidad de $V_2 = 1800$ m/s. y el espesor de esta capa varia de 2 a 8 m. Capa Elástica Profunda, tercer medio que corresponde a gravas y arenas con mayor grado de compactación y velocidades de $V_3 = 2800$ m/s. La profundidad a la que se encuentra esta capa varía desde 6 a 10 m. (Figura 6d).

e). Perfil elástico LS-17.- Ubicado en la zona de expansión urbana de Pisco, zona Suroeste. En este perfil se observa la presencia de dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformada por depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1= 1000$ m/s y espesores que varían entre 0.5 m a 2 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el material de gravas con arenas poco compactas, velocidad de $V_2 = 1900$ m/s y espesor mínimo de 19 m. (Figura 6e).

f). Perfil elástico LS-07.- Ubicado en el Centro Poblado La Yesera. En este perfil se observa la presencia de dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformada por los depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1= 700$ m/s. y espesores que varían entre 3 m a 4 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el material de gravas con arenas poco compactado, con velocidad de $V_2 = 1500$ m/s y el espesor mínimo de 19 m. (Figura 6f).

g). Perfil elástico LS-08.- Ubicado en el Centro Poblado La Yesera. En este perfil se observa la presencia de dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformada por depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1= 700$ m/s. y espesores que varían entre 1 m a 9 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinada por gravas con arenas poco compactas, con velocidad de $V_2 = 1300$ m/s y espesor mínimo de 19 m. (Figura 6g).

h). Perfil elástico LS-09.- Ubicado en el Centro Poblado Casa Blanca. En este perfil se observa la presencia de dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformada por depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1= 700$ m/s y espesores que varían entre 1 m a 3 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinada por gravas y arenas poco compactadas, con velocidad de $V_2 = 1100$ m/s. y espesor mínimo de 18 m. (Figura 6h).

i). Perfil elástico LS-10.- Ubicado en el Centro Poblado de Casa Blanca. Se observa la presencia de dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformada por depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1= 1200$ m/s. y espesores que varían entre 0.5 a 1 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el material de arenas con gravas poco compactadas, con velocidad de $V_2 = 1600$ m/s. y espesor mínimo de 18 m. (Figura 6i).

j). Perfil elástico LS-11.- Ubicado en el Centro Poblado El Molino. Constituido por dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformada por depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1= 800$ m/s. y espesores que varían entre 2 m a 6 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el material de arenas con gravas poco compactadas, con velocidad de $V_2 = 1300$ m/s. y espesor mínimo de 19 m. (Figura 6j).

k). Perfil elástico LS-12.- Ubicado en el Alto El Molino transversal a la línea LS-11. Se observa la presencia de dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformada por depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1= 600$ m/s. y espesores que varían entre 5 m a 7 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio

elástico que está determinado por gravas con arenas poco compactas, con velocidad de $V_2 = 1400$ m/s. y espesor mínimo de 19 m. (Figura 6k).

4.2. Líneas de Refracción Sísmica en el Distrito de Tupac Amaru

a). Perfil elástico LS- 01.- Ubicado en el sector de mayor daño de la calle Miramar del distrito de Túpac Amaru. Presenta dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformada por depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1 = 800$ m/s y espesores que varían entre 2 m a 9 m; dentro de este paquete se incluye el contenido de material de relleno. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el material de arenas con gravas poco compactadas, con velocidad de $V_2 = 1700$ m/s. y espesores mínimos de 19 m. (Figura 7a).

b). Perfil elástico LS-02.- Perfil ubicado en el distrito de Tupac Amaru sector final de la calle Miramar. Presenta dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, la capa superior está conformada por los depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1 = 700$ m/seg. y espesores que varían entre 3 a 14 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el material de gravas con arena compactada, la velocidad promedio es de $V_2 = 1600$ m/s. y espesor del orden de 19 m. (Figura 7b).

c). Perfil elástico LS-03.- Ubicado en el poblado de Amauta donde ha sufrido mayores daños por las fracturas observadas en el suelo. En este perfil se observa la presencia de dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, primer medio está conformada por los depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad baja del orden de $V_1 = 600$ m/s. y espesores que varían entre 4 m y 7 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por arenas con gravas poco compactadas, con velocidad de $V_2 = 1200$ m/s. y espesor mínimo de 18 m. (Figura 7c).

4.3. Líneas de Refracción Sísmica en el Distrito de San Clemente

a). Perfil elástico LS- 04.- Ubicado en el distrito de San Clemente. Presenta dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, primer medio está conformada por los depósitos recientes (material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1 = 600$ m/s. y espesores que varían de entre 1 m a 12 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el material de gravas poco compactas, con velocidad de $V_2 = 1200$ m/s. y espesor mínimo en el orden de los 19 m. (Figura 8a).

b). Perfil elástico LS-05.- Ubicado en San Clemente. Conformado por dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformada por depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1 = 800$ m/s. y espesores que varían de entre 2 a 14 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el

material de arena con gravas poco compactadas, con velocidad promedio de $V_2 = 1300$ m/s. y espesor mínimo de 19 m. (Figura 8b).

c). Perfil Elástico LS-06.- Se encuentra ubicado en el distrito de San Clemente. En este perfil se observa la presencia de dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformada por depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1= 800$ m/s y espesores que varían entre 6 m a 8 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por gravas con arenas compactadas, velocidad de $V_2=1500$ m/s. y el espesor mínimo se encuentra en el orden de los 19 m. (Figura 8c)

d). Perfil elástico LS-18.- Ubicado en el Sector de Camacho en el distrito de San Clemente. Presenta dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformada por depósitos recientes (cobertura de material areno de limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1= 700$ m/s. y espesores que varían entre 7 m a 19 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el material de arenas con gravas poco compactadas, con velocidad de $V_2 = 1700$ m/s y espesor mínimo de 19 m. (Figura 8d).

e). Perfil elástico LS-19.- Ubicado en el Sector de Camacho en el distrito de San Clemente. En este perfil se observa la presencia de dos medios elásticos: Capa Elástica Superficial, conformada por depósitos recientes (cobertura de material areno limoso) del cuaternario, con velocidad del orden de $V_1= 1000$ m/s y espesores que varían entre 3 y 11 m. Capa Elástica Intermedia, segundo medio elástico que está determinado por el material de arenas con gravas poco compactadas, velocidad de $V_2 = 1700$ m/s y el espesor mínimo de 19 m. (Figura 8e).

4.4. Relaciones de las ondas P, S y las Constantes Elásticas

Las ondas sísmicas designadas como ondas elásticas, dependen de la elasticidad de los materiales a través de los que se propagan; en consecuencia, están en función con la rigidez inicial del suelo, así como las constantes dinámicas para la determinación de la respuesta dinámica del suelo. A partir de la velocidad de la onda P obtenida en cada uno de los estratos encontrados en las ciudades de Pisco, zonas de expansión urbana y los distritos de Túpac Amaru y San Clemente, se ha calculado también la velocidad de la onda S (de corte), la razón de Poisson y el módulo de Young (E) y de corte (G) en toneladas por metro cuadrado (T/m²) y son presentados en la Tabla 4.

Las relaciones de propagación de las velocidades V_p y V_s se expresan de la siguiente forma:

$$V_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho} = \sqrt{E / \rho \times ((1-\sigma) / (1+\sigma)(1-2\sigma))}$$

$$V_s = \sqrt{\mu / \rho} = \sqrt{(E / \rho) (1 / 2(1+\sigma))} = \frac{G}{\sqrt{\rho}}$$

Donde:

λ y μ = constantes de Lamé, ρ = densidad del suelo, E = módulo de Young, σ = coeficiente de Poisson y G = módulo de corte

Las constantes elásticas dinámicas σ , E y G se expresan de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2((V_p/V_s) - 1)}$$

$$E = 2(1 + \sigma)G$$

$$G = \rho V_s^2$$

4.5. Conclusiones y Recomendaciones

- Del comportamiento de los medios se ha mostrado que los valores varían de acuerdo al grado de compactación de sus constituyentes desde:

Capa elástica 1: con velocidades de 500 m/s (Línea LS-04) a 1200 m/s (Línea LS-10) suelo de cobertura o areno-limoso.

Capa elástica 2: 1201 m/s (Línea LS-03) a 2000 m/s (Línea LS-039) y corresponden a material de arenas con gravas poco compactas.

Capa elástica 3: con velocidades mayores a 2000 m/s (Línea LS-16) y corresponden a material de gravas compactas.

- Relacionando las velocidades de propagación de las ondas "P" y "S" y los datos de densidades de los materiales en superficie, se ha obtenido las constantes elásticas dinámicas para cada estrato (Tabla 4).
- Se recomienda realizar una perforación diamantina de ± 30 m de profundidad a fin de verificar los valores obtenidos y además sirvan de control litológico-geofísico.
- Se espera que estos valores encontrados sirvan para complementar los trabajos de cimentación de las estructuras analizadas.

5. LINEAS DE GEORADAR EN LA CIUDAD DE PISCO Y DISTRITOS DE TUPAC AMARU Y SAN CLEMENTE

En la ciudad de Pisco, zonas de expansión urbana y distritos de Túpac Amaru y San Clemente, se realizaron 21 líneas con longitudes variables entre 100 a 2110 m. a fin de conocer la profundidad del nivel freático y la constitución geológica de las capas más superficiales de las zonas estudiadas. Considerando que para el estudio se requería información a detalle de los primeros 10 m, se utilizó básicamente la antena de 100 Hz. En la Figura 5, se presenta la distribución de las líneas y en la Tabla 5 sus características principales.

5.1. Líneas de Georadar en la Ciudad de Pisco

a). Línea LGR-01.- Ubicada en la Av. José Balta y es una línea paralela al litoral costero con una longitud de 1380 m de extensión se ha determinado una reflexión planar que correspondería al nivel freático en el orden de los 1,4 m. Se han definido tres capas hasta 5 m de profundidad , la primera se trata de material con granulometría fina de arena limosa seca en superficie, y por debajo húmedas con espesores del orden de los 2.6 m. Subyaciendo a esta capa superficial se ha determinado material areno limoso con gravas, fragmentos rocosos y se encuentran en zonas puntuales, así, estas reflexiones típicas de este material se encuentra entre los 50 a 130 m y de 800 a los 1200 m.; anomalías puntuales se ha determinado en a la distancia de 300, 580 y 790; la tercera capa, se encuentra a mayor profundidad, esta definida por reflexiones típicas de material mas compacto (arenas y gravas ?), dada las mayores velocidades de ondas “P” obtenidas de la refracción sísmica a este nivel (Figura 9a).

b). Línea LGR-02.- Se ubica de sur a norte, en la calle Piedemonte, con una longitud de 1580 m, la profundidad de la napa freática se encuentra en el orden de los 1.7 m; allí, se ha determinado tres capas: la primera, corresponde a material areno limoso con espesores variables de 2 a 3 m; la segunda capa corresponde a arenas más gruesas con poco fragmento rocoso y se ubica en forma puntual entre las distancias 260 a 300 m, 570 a 700 y 800 a 1050 m; entre 1300 a 1550m; asimismo, se ha determinado anomalías puntuales que corresponden probablemente a tuberías subterráneas. La tercera capa corresponde a material con mayor grado de compactación y subyace casi en todo el perfil. La información de cobertura es de 5 m. (Figura 9b).

c). Línea LGR-03.- Se ubica en la calle San Clemente, paralela a la línea LGR-02 y una longitud de 480 m., el nivel freático se encuentra en el orden de los 1.6 a 1.8 m de profundidad. En esta línea, se diferencié tres capas: la primera, constituida por material de cobertura superficial areno limosa seca; la segunda corresponde a arenas con limos y fragmentos rocosos que se encuentran en las distancias 170 a 230 m y 290 a 460 m. Asimismo, se ha determinado tres grupos de anomalías en las distancias 50, 90 y 140 m. que corresponden probablemente a tubos de saneamiento y/o a material conductivo. La tercera capa, corresponde a un material con granulometría más compacta en el rango de los 5 a los 6 m de profundidad a lo largo de toda la sección (Figura 9c).

d). Línea LGR-03 A.- Línea que continúa a LGR-03 y se ubica en la calle Asprillaga paralela a la calle San Clemente, con 400 m de longitud. La profundidad del nivel freático se encuentra en el orden de los 1.6 m. También se ha identificado la presencia de una anomalía plana en las distancias 45 a 150 m., a una profundidad de 2 m. Esta línea presenta tres capas: la primera compuesta por arenas limosas con espesores de 1.3 a 1.8 m; la segunda capa, de materiales con granulometría gruesa, arenas gruesas y gravas que se observan en las distancias 45 a 290 m. La tercera capa esta compuesta de material mas compacto y el material fino, moderadamente compactado, se localiza a las distancias 0 a 45 m y de 300 a 400 m (Figura 9d).

e). Línea LGR-04.- Línea con inicio en la Av. Las Américas hacia el poblado Vista al Mar con una longitud de 1300 m, conocido como zona Industrial. En este sector se encontró que el nivel freático está a 2.0 m de profundidad. Asimismo, se ha determinado tres zonas bien marcadas (no hay influencia de cables eléctricos): la primera capa conformada por material de cobertura constituida por arena limosa, con espesores de 1.5 a 3.2 m; la segunda capa conformada por material con granulometría gruesa y sigue una secuencia uniforme a lo largo del perfil con

espesores de 2 a 5.8 m; se ha determinado una zona con mayor contenido de gravas desde 0 a 280 m; la tercera capa con reflexiones uniformes corresponden a material mas compacto (Figura 9e).

f). Línea LGR-05.- Esta línea se ubica a 400 metros del litoral costero, en el distrito de San Andrés y se dirige de Sur a Norte con una longitud total de 1140 m. El nivel freático fue determinado a una profundidad de 1,5 m. Está conformada por material areno limoso en la parte superficial, con espesores de 1,2 a 2.3 m; la segunda capa corresponde a arenas con granulometría fina 3.5 a 9 m; la tercera capa conformada por arenas con gravas, con mayor grado de compactación; asimismo, se ha determinado anomalías correspondientes a tuberías subterráneas y/o materiales conductivos (Figura 9f).

g). Línea LGR-06.- Línea transversal a la línea LGR-05 realizado en el distrito de San Andrés, con 250 m de longitud, donde el nivel freático se encuentra a una profundidad aproximada de 1.6 m. Esta línea muestra tres capas: la primera de conformada por arenas limosas de 1.2 a 2.3 m de espesor; la segunda capa corresponden a material de arenas con granulometría fina y la tercera conformada por material arenoso con gravas. El final de esta línea corresponde al nivel del agua de mar (playa), donde se nota las discontinuidades a partir de los 200 m. de distancia debido a la salinidad del agua (Figura 9g).

h). Línea LGR-07.- Línea de 900 m de longitud, ubicada muy cerca del AA.HH. Abraham Valdelomar (zona de expansión urbana), en el sector suroeste de la ciudad de Pisco. En esta línea se ha determinado el nivel freático a una profundidad de 1.6 m. y se ha correlacionado con la profundidad del nivel de agua observado en un pozo de agua existente en el hotel Campestre de la zona. Asimismo, se ha determinado dos capas: la primera compuesta por arenas con gravas, donde la zona de gravas se observa casi en todo el perfil con espesores, el cambio de reflexiones de 100 a 750 se debe probablemente a zona agrícola y la segunda corresponde a material gravoso con arenas más compacto (Figura 9h).

i). Línea LGR-08.- Ubicada en el sector Suroeste de Pisco (zona de expansión urbana), con una longitud de 800 m., se ha determinado el nivel freático a una profundidad del 2.4 m se ha determinado una capa de cobertura areno limoso con espesores de 1.5 a 2.6 m; la segunda capa lo conforman el material con granulometría mas gruesa y se ubican a lo largo del perfil con espesores de 2 a 6 m.; la tercera capa definida por arenas y algunos fragmentos rocosos moderadamente mas compactas que reflejan anomalías a las distancias 255 m y 740 m. (Figura 9i).

j). Línea LGR-09.- Se ubica en el AA.HH. Vista al Mar, con una longitud de 2110 m. En esta línea el nivel del acuífero se encuentra a una profundidad de 1.8 a 1.9 m; esta conformado por tres capas: la primera de material arena limosa muy suelta con espesores de 1.2 a 2.3 m; la segunda capa definida por gravas y arenas con espesores de 2 a 4 m. y la tercera capa de material mas compacto. Asimismo, se ha determinado zonas con anomalías importantes que podrían corresponder a tubos enterrados y/o ductos. Existen anomalías puntuales que probablemente estén relacionadas a material heterogéneo de bloques de gran tamaño y se ubican entre las distancias 480 a 580 m. y otros entre los 1785 a 1900 m.; entre 2000 a 2100 m. (Figura 9j).

k). Línea LGR-11.- Se ubica en el Centro Poblado La Yesera, con una longitud de 1280 m. La profundidad del nivel freático fue determinado a 1.7 m, que se correlaciona con la calicata C-11. Se han definido tres capas: la primera con reflexiones planas que corresponden a material de

granulometría fina arenoso limoso con espesores de 1.4 a 2.2 m. de espesor; la segunda corresponde a material de arenas con fragmentos rocosos que se extienden desde la distancia 280 m hasta los 620 m.; asimismo, existe tres anomalías entre los 520 m, 560 m y 630 m, donde se observa reflexiones múltiples que corresponden probablemente a gravas y/o a anomalías propias de ductos de saneamiento. La tercera capa corresponde a material mas compacto y se correlaciona con lo obtenido en el DPL47 (Figura 9k).

l). Línea LGR-12.- Ubicada en el Centro Poblado Los Molinos, con una longitud de 720 m., se ha correlacionado con el DPL-11 y Calicata C23, donde el nivel freático se encuentra a una profundidad de 2.3 a 3.6 m. En esta línea se diferencié tres capas: la primera de material limo arenoso con espesores de 0.3 a 1.2 m; la segunda de material gravoso y arenas con espesores que varían entre 2 y 7 m; la tercera capa lo conforma el material de arenas más compactas. De acuerdo a las velocidades de la onda P, la zona con bloques de roca se encuentra en el sector sur de la línea entre las distancias 0 y 170 m.; asimismo, existen seis anomalías puntuales que corresponderían a material gravoso de tamaño grande y/o zonas conductivas (Figura 9l).

m). Línea LGR-13.- Ubicada de forma transversal a la línea LGR-12 en el Centro Poblado Los Molinos. Correlacionando con el DPL-11 y Calicata C23 y la línea, el nivel freático se encuentra a una profundidad de 3.6 m. Conformada por tres capas: la primera de material areno limoso con espesores de 0.3 a 1.7 m; la segunda que corresponde a material gravoso con arenas de espesores que varían entre 2 a 7 m. y la tercera capa lo conformada por arenas con material mas compacto. La zona de mayor contenido de bloques de roca se encuentra en el sector Norte de la línea entre las distancias 400 m. a 610 m. (Figura 9m).

5.2. Líneas de Georadar en el Distrito de Túpac Amaru

a). Línea LGR-14.- Se ubica en la zona de El Amauta con una longitud de 100 m. y se ha determinado la profundidad del nivel freático a 1.8 m.; desde el inicio de la línea hasta los 35 m. presenta una anomalía plana limitada por una hipérbola (fractura ?) dicha anomalía se encuentra a 2.1 m de profundidad; mientras que a los 40 m se presenta una anomalía de un ducto o podría tratarse de una fractura existente en profundidad en la distancia 98 m. Asimismo se han definido tres capas: la primera con reflexiones planas que corresponden a material de granulometría fina areno arenoso con espesores de entre 1.1 a 2.1 m de espesor; la segunda corresponde a material de arenas con gravas y la tercera capa corresponde a granulometría más gruesa (Figura 10a).

b). Línea LGR-14A.- Se ubica en la zona de El Amauta con una longitud de 180 m. El nivel freático se ha encontrado a 1.9 m de profundidad al inicio del perfil y a 3.4 m al final del perfil. Se ha determinado tres capas: la primera con reflexiones planas que corresponden a material de granulometría fina, areno limoso con espesores del orden de 1.6 m.; la segunda corresponde a material de arenas con algunos fragmentos rocosos que se extienden a lo largo de todo el perfil con mayor incidencia entre 10 m a 90 m de distancia. En los 95 m., se presenta una anomalía que podría corresponder a una fractura hasta los 4.5 m de profundidad y la tercera capa corresponde a material mas compacto (Figura 10b).

c). Línea LGR-16.- Se ubica en el poblado de San Antonio, con una longitud de 1440 m de longitud, se ha determinado la profundidad del nivel freático entre 1.9 m y 2.1 m. En este perfil se definen tres capas: la primera con reflexiones planas que corresponden a material de areno limoso con espesores de 1.4 m.; la segunda corresponde a material arenoso con fragmentos

rocosos que se extienden desde el inicio de la línea hasta los 130 m; otros sectores puntuales se encuentra a 500 m., 610 m., 750, 850 y de 1370 m. a 1460m. donde muestran reflexiones múltiples correspondientes a material gravoso; la tercera capa corresponde a material mas compacto (Figura 10c).

d). Línea LGR-17.- Ubicado en la avenida Miramar, con una longitud de 400 m. y se ubica transversal a la línea LGR-16 se inicia en el sector oeste de la calle. Se ha determinado la profundidad el nivel freático en los 2.4 m. en la parte baja y a mayor profundidad en la parte alta del perfil con 3.1 m. este desnivel se debe en parte al relieve topográfico. En esta línea se han definido tres capas: la primera con reflexiones planas que corresponden a material areno limoso con espesores de 2.8 m; la segunda corresponde a material arenoso con fragmentos rocosos, se observan anomalías puntuales en los 90 m., 120 m., 152 m, 190 y 205 m. que probablemente son causadas por ductos de saneamiento; la tercera capa corresponde a material arenoso con poca grava y mayor grado de compactación (Figura 10d).

5.3. Líneas de Georadar en el Distrito de San Clemente

a). Línea LGR-18.- Se ubica en el distrito de San Clemente, con una extensión de 500 m de longitud, se ha determinado tres capas: la primera con reflexiones planas que corresponden a material de granulometría fina limo arenoso con espesores de 1.4 y 1.7 m.; la segunda, a material arenoso con fragmentos rocosos que se extienden desde el punto de inicio hasta los 65 m; otras anomalías puntuales se encuentra a 260, 300, 360, 420 y 495 m. de distancia; la tercera capa corresponde a gravas con material más compactada (Figura 11a).

b). Línea LGR-19.- Se ubica en el sector de Camacho, con 230 m de longitud. En esta línea se han definido tres capas: la primera con reflexiones planas que corresponde a material de granulometría fina areno limoso con espesores de 1.9 m.; la segunda a material fino con fragmentos rocosos y arena que se extienden desde los 60 m hasta los 220 m. donde muestra reflexiones múltiples correspondientes a material gravoso; la tercera capa corresponde a material de fragmentos rocosos grandes (boloneras?), que se muestra mas compacta a mayor profundidad (Figura 11b).

c). Línea LGR-20.- Se inicia en la carretera Panamericana, con longitud de 110 m. Se ha determinado tres capas: la primera con reflexiones planas que corresponde a material de granulometría fina areno limoso con espesores de 1.1 y 1.3 m.; la segunda corresponde a fragmentos rocosos que se extienden desde el inicio hasta los 70 m; la tercera capa corresponden a material de gravas con arenas poco compactas (Figura 11c).

d). Línea LGR-21.- Se ubica en el distrito de San Clemente, con una longitud de 410 m. y se han definido tres capas: la primera con reflexiones planas que corresponden a material limo arenoso y espesores de 1.4 a 1.7 m., la segunda corresponde a material de arenas con grava que se extienden desde 220 m hasta los 410 m de distancia, que muestran reflexiones múltiples correspondientes a material gravoso y anomalías propias de ductos de saneamiento; la tercera capa corresponde a material de arenas con poca grava (Figura 11d).

5.4. Conclusiones

- Las líneas de Georadar (LGR), muestran patrones de reflexión bien definidas que indican claramente cambios litológicos causados por la constante dieléctrica, permitividad y conductividad eléctrica del medio.
- Del análisis de los Radargramas en el sector Pisco se ha determinado dos interfases que definen tres capas litológicas de material cuaternario aluvial. La primera capa constituida por un suelo areno limoso poco consolidado, le subyace una capa constituida de grava fina, gruesa y bloques con matriz arenoso, debajo de ella, se tiene una capa de suelo con mayor grado de compactación y homogeneidad que presenta baja amplitud y poca dispersión. Así mismo se han determinado anomalías de tipo hiperbólico la mayoría localizadas en la zona urbana que corresponderían a ductos o tuberías.
- En la zona de El Amauta las reflexiones indican que las fracturas generadas por el sismo del 15 de agosto son superficiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Qr of rtri*, Vol 30, No 1, Feb 1989.

Ordaz, M. y C., Montoya (2000). DEGTRA 2000 ver. 2.0.2. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ojeda A., S. Martinez, M.L. Martínez y K. Atakan (2001). A new acelerograph network for the Santa Fe de Bogotá and implication for microzonification. *ISSUE*.

Romero, M., A. Cragno, M. Schmitz, R. Ambrosio (2006). Caracterización de suelos con métodos geofísicos en La Guaira, Macuto, Caraballeda y Tanaguanera, Estado Vargas, Venezuela. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas –FUNVISIS. IMME v.44, n1. Caracas.

Silgado, E. (1976). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). Instituto de Geología y Minería-INGEOMIN. 131p

http://shake.iis.u-tokyo.ac.jp/Peru2007/JSCE_JAEE_Report/Index.htm

Pisco earthquake, Peru, August 15, 2007. Geotechnical aspects.

Sensor & Software. (2006) Guía del Usuario del Equipo Georadar Pulse Ekko Pro .Massisagua. Ontario . Canada.

W-Geosoft (2004) “ Seismic Refraction Processing Software “ Manual de instruccion aplicado para Windows 9X, NT,2000,Xp. Suiza.

Bordhore,J. (2005) “Técnicas Geofísicas de Reconocimiento del Subsuelo: Georadar y Tomografía Eléctrica: Casos prácticos” Rudnik Ingenieros Consultores.España.

Lorenzo. E (1995) “ Prospección Geofísica de Alta Resolución mediante Georadar. Aplicación a Obras Civiles” Universidad de Complutense-Facultad de Ciencias Físicas.Madrid. España.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación de los 48 puntos y los valores predominantes obtenidos en frecuencias (Hz) y periodos (s) para la ciudad de Pisco y zonas de expansión urbana. En los puntos con asteriscos (***) no se obtuvieron registros claros (sin valor).

Tabla 2. Ubicación de los 12 puntos y valores predominantes obtenidos en frecuencias (Hertz) y periodos (segundos) para el distrito de Túpac Amaru. En los puntos con asteriscos (***) no se obtuvieron registros claros (sin valor).

Tabla 3. Ubicación de los 25 puntos y los valores predominantes obtenidos en frecuencias (Hz) y periodos (s) para el distrito de San Clemente. (***) no se obtuvieron registros claros.

Tabla 4. Constantes elásticas obtenidas a partir de las líneas de refracción sísmica en la ciudad de Pisco, Túpac Amaru y San Clemente.

Tabla 5. Características principales de las líneas de Georadar realizadas en la ciudad de Pisco y distritos de Tupac Amaru y San Clemente.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Equipos utilizados en la instrumentación geofísica. a). Sismógrafo de banda ancha. b). sismógrafo de refracción y c). Equipo de Georadar.

Figura 2. Distribución de puntos de medición de microtemores en la ciudad de Pisco y distritos de Túpac Amaru y San Clemente. UT, Universidad de Tokio. PI, Pisco. TA, Túpac Amaru y SC, San Clemente.

Figura 3. a) Señal de microtemor registrado en el punto PI4 y su correspondiente espectro de Fourier para las componentes: vertical (Z), Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EO). b). Frecuencia predominante obtenido a partir de la técnica de Nakamura para los puntos PI1 a PI4. La flecha indica la frecuencia obtenida.

Figura 4. Valores y curvas de isofrecuencia en la ciudad de Pisco, Túpac Amaru y San Clemente superpuesta en el mapa geológico.

Figura 5. Distribución de líneas de refracción sísmica (LS) y de Georadar (LGR).

Figura 6. Interpretación geofísica de las líneas de refracción sísmica realizadas en la ciudad de Pisco y zonas de expansión urbana.

Figura 7. Interpretación geofísica de las líneas de refracción sísmica realizadas en el distrito de Tupac Amaru y Amauta. a y b). En la calle Miramar de Tupac Amaru, c). En la zona de El Amauta.

Tabla 1. Ubicación de los 48 puntos y los valores predominantes obtenidos en frecuencias (Hz) y periodos (s) para la ciudad de Pisco y zonas de expansión urbana. En los puntos con asteriscos (***) no se obtuvieron registros claros (sin valor).

N°	PUNTO	LONGITUD (m)	LATITUD (m)	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (s)
1		368449	8483491	9.6	0.10
2	PI2	368587	8484198	9.0	0.11
3	PI3	368664	8484663	10.2	0.10
4	PI4	368889	8484713	8.9	0.12
5	PI5	369931	8483364	17.3	0.06
6	PI6	369944	8433850	11.4	0.09
7	PI7	369933	8483898	***	***
8	PI8	369963	8484174	***	***
9	PI9	369985	8484388	***	***
10	PI10	369991	8484670	***	***
11	PI11	370580	8483412	***	***
12	PI12	370633	8483747	14.4	0.52
13	PI13	370822	8483929	6.6	0.15
14	PI14	370823	8484527		
15	PI15	371214	8483936	25.3	0.04
16	PI16	371921	8483725	***	***
16	PI17	372129	8483233	***	***
18	PI18	367959	8481238	16.8	0.06
19	PI19	368119	8481418	17.0	0.06
20	PI20	368182	8481806	10.2	0.10
21	PI21	371310	8483502	13.3	0.08
22	PI22	371781	8483424	***	***
23	PI23	372317	8483402	7.7	0.13
24	PI24	372929	8483478	***	***
25	PI25	372566	8482300	15.7	0.06
26	PI26	373325	8482076	***	***
27	PI27	372282	8482426	***	***
28	PI28	372254	8482732	***	***
29	PI29	372004	8482004	12.3	0.08
30	PI30	370993	8482540	17.4	0.06
31	PI31	371190	8483028	***	***
32	PI32	370672	8483122	15.3	0.07
33	PI33	371252	8483244	12.7	0.08
34	PI34	371740	8483618	16.0	0.06
35	PI35	371873	8484694	15.8	0.06
36	PI36	371934	8484798	12.2	0.08
37	PI37	372176	8484900	***	***
38	PI38	372520	8484834	***	***
39	PI39	372630	8484328	12.5	0.08
40	PI40	372506	8484564	***	***
41	PI41	372225	8484620	***	***
42	PI42	372139	8484464	12.1	0.08
43	PI43	370654	8482644	16.9	0.06
44	PI44	370945	8482558	20.8	0.05
45	PI45	370414	8481998	***	***
46	PI46	369372	8482346	***	***
47	PI47	369457	8484536	8.9	0.11
48	PI48	374886	8483702	10.2	0.10

Tabla 2. Ubicación de los 12 puntos y valores predominantes obtenidos en frecuencias (Hertz) y periodos (segundos) para el distrito de Túpac Amaru. En los puntos con asteriscos (***) no se obtuvieron registros claros (sin valor).

N°	PUNTO	LONGITUD (m)	LATITUD (m)	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (s)
1	TA1	375976	8485016	13.5	0.08
2	TA2	376161	8485114	***	***
3	TA3	376183	8484706	5.3	0.19
4	TA4	376339	8484494	12.1	0.08
5	TA5	376054	848410	9.9	0.10
6	TA6	376324	8484086	***	***
7	TA7	375875	8483890	4.2	0.24
8	TA8	375787	8483586	11.6	0.09
9	TA9	375847	8484556	20.2	0.05
10	TA10	375720	8484160	19.9	0.05
11	TA11	376442	8483620	6.0	0.17
12	TA12	376036	8484198	10.7	0.09

Tabla 3. Ubicación de los 25 puntos y los valores predominantes obtenidos en frecuencias (Hz) y periodos (s) para el distrito de San Clemente. (***) no se obtuvieron registros claros.

N°	PUNTO	LONGITUD (m)	LATITUD (m)	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (s)
1	SC1	375067	8487656	***	***
2	SC2	375677	848888	3.3	0.30
3	SC3	375779	848844	1.5	1.00
4	SC4	375742	8488666	1.9	0.50
5	SC5	375631	8488738	2.0	0.50
6	SC6	375848	8488546	***	***
7	SC7	375953	8488160	1.9	0.50
8	SC8	375827	8488168	1.9	0.50
9	SC9	374644	8487748	***	***
10	SC10	374692	8488112	8.1	0.13
11	SC11	375036	8488514	***	***
12	SC12	375109	8488816	12.2	0.08
13	SC13	375406	8488988	6.4	0.17
14	SC14	374264	8487698	3.6	0.25
15	SC15	374411	8487460	2.9	0.30
16	SC16	374787	8486946	***	***
16	SC17	374893	8487196	5.4	0.20
18	SC18	375305	8487252	29.8	0.03
19	SC19	375634	8487346	19.6	0.05
20	SC20	376065	8487436	18.2	0.06
21	SC21	375819	8487914	***	***
22	SC22	375611	8488172	18.7	0.05
23	SC23	375225	8487950	12.3	0.08
24	SC24	375069	8488294	21.6	0.05
25	SC25	375424	8488610	29.1	0.03
26	CA1	374623	8487756	14.4	0.07
27	CA2	373056	8493922	5.4	0.20
28	CA3	373220	8493422	8.2	0.10
29	CA4	373337	8493706	***	***
30	CA5	372935	8494900	8.3	0.10
31	CA6	374962	8494936	***	***

Tabla 4. Constantes elásticas obtenidas a partir de las líneas de refracción sísmica en la ciudad de Pisco, Túpac Amaru y San Clemente.

PERFIL ELÁSTICO	CAPA REFRACTADA	VELOCIDADES		POISSON	MÓDULOS		DENSIDAD (T/m ³)
		Vp (m/s)	Vs (m/s)*		E (T/m ²)	G (T/m ²)	
LS-01 T. AMARU	1	727	420	0.30	60907.0	23425.8	1.3
	2	1253	724	0.27	217539.2	85645.4	1.6
	3	2938	1698	0.25	1324334.9	529733.9	1.8
LS-02 T. AMARU	1	700	405	0.30	56467.0	21718.1	1.3
	2	1600	925	0.25	349125.6	139650.2	1.6
LS-03 AMAUTA	1	600	347	0.30	41485.9	15956.1	1.3
	2	1200	694	0.25	220931.0	88372.4	1.8
LS-04 S.CLEMENTE	1	500	289	0.30	28809.7	11080.6	1.3
	2	800	462	0.25	98191.6	39276.6	1.8
LS-05 S.CLEMENTE	1	700	405	0.30	56467.0	21718.1	1.3
	2	1300	751	0.25	259287.1	103714.8	1.8
LS-06 S.CLEMENTE	1	700	405	0.30	56467.0	21718.1	1.3
	2	1500	867	0.25	345204.7	138081.9	1.8
LS-07 LA YESERA	1	700	405	0.30	56467.0	21718.1	1.3
	2	1500	867	0.25	345204.7	138081.9	1.8
LS-08 LA YESERA	1	700	405	0.30	56467.0	21718.1	1.3
	2	1300	751	0.25	259287.1	103714.8	1.8
LS-09 Casa Blanca	1	600	347	0.30	41485.9	15956.1	1.3
	2	1600	925	0.25	392766.3	157106.5	1.8
LS-10 Casa Blanca	1	1300	751	0.30	194753.4	74905.2	1.3
	2	2000	1156	0.25	613697.3	245478.9	1.8
LS-11 El Molino	1	800	462	0.30	73752.8	28366.5	1.3
	2	1800	1040	0.25	497094.8	198837.9	1.8
LS-12 El Molino	1	600	347	0.30	41485.9	15956.1	1.3
	2	1400	809	0.25	300711.7	120284.7	1.8
LS-13 Pisco Playa	1	700	405	0.30	56467.0	21718.1	1.3
	2	1600	925	0.25	392766.3	157106.5	1.8
LS-14 Pisco Playa	1	700	405	0.30	56467.0	21718.1	1.3
	2	1300	751	0.25	259287.1	103714.8	1.8
LS-15 Piedemonte	1	600	347	0.30	41485.9	15956.1	1.3
	2	1600	925	0.25	392766.3	157106.5	1.8
LS-16 Expa-Pisco	1	800	462	0.30	73752.8	28366.5	1.3
	2	1600	925	0.27	354711.6	139650.2	1.6
	3	2800	1618	0.25	1202846.7	481138.7	1.8
LS-17 Expa-Pisco	1	1000	578	0.30	115238.7	44322.6	1.3
	2	1900	1098	0.25	553861.8	221544.7	1.8
LS-018 S.an Clemente.	1	700	405	0.30	56467.0	21718.1	1.3
	2	1700	983	0.25	443396.3	177358.5	1.8
LS-19 Camacho-S.C.	1	1000	578	0.30	115238.7	44322.6	1.3
	2	1700	983	0.25	443396.3	177358.5	1.8

Tabla 5. Características principales de las líneas de Georadar realizadas en la ciudad de Pisco y distritos de Tupac Amaru y San Clemente.

LÍNEAS	UBICACIÓN	COORDENADAS (UTM)				DISTANCIA (m)
		Punto Inicio		Punto Final		
		LONGITUD	LATITUD	LONGITUD	LATITUD	
LGR-01	Ca. José Balta-Pisco Playa	368459	8483491	368700	8484745	1350
LGR-02	Ca. Piedemonte	369912	8483321	369986	8484818	1580
LGR-03	Ca. San Clemente	370574	8483408	370590	8483951	480
LGR-3A	Ca. Ismael Asprillaga	370831	8483931	370833	8484308	400
LGR-04	Zona Industrial	371096	8483950	372130	8483205	1300
LGR-05	San Andrés	367968	8481236	368332	8482310	1140
LGR-06	San Andrés	368195	8482217	367955	8482307	250
LGR-07	Zona de Expansión Urbana (SO)	369912	8483319	369618	8482445	900
LGR-08	Zona de Expansión Urbana (SO)	369828	8481670	369335	8482300	800
LGR-09	Centro Poblado Vista al Mar	371775	8483424	373694	8484160	2110
LGR-10	Centro Poblado Casa Blanca	372249	8482750	371963	8481969	650
LGR-11	Centro Poblado La Yesera	370995	8482555	371699	8483613	1270
LGR-12	Centro Poblado Alto El Molino	371873	8484696	372564	8484668	720
LGR-13	Centro Poblado Alto El Molino	372130	8484898	372097	8484260	620
LGR-14	Fundo Amauta	375385	8484332	375478	8484299	100
LGR-15	Fundo Amauta	375433	8484317	375563	8484257	180
LGR-16	Distrito Tupac Amaru	376069	8485038	375801	8483581	1440
LGR-17	Distrito Tupac Amaru	375830	8484545	376460	8484365	400
LGR-18	Distrito San clemente	374447	8488063	374895	8488012	510
LGR-19	Distrito San clemente	375018	8487946	375693	8487916	220
LGR-20	Distrito San clemente	374921	8488009	375023	8487993	110
LGR-21	Distrito San clemente	374576	8494924	374423	8494935	405



Figura 1. Equipos utilizados en la instrumentación geofísica. a). Sismógrafo de banda ancha. b). sismógrafo de refracción y c). Equipo de Georadar.

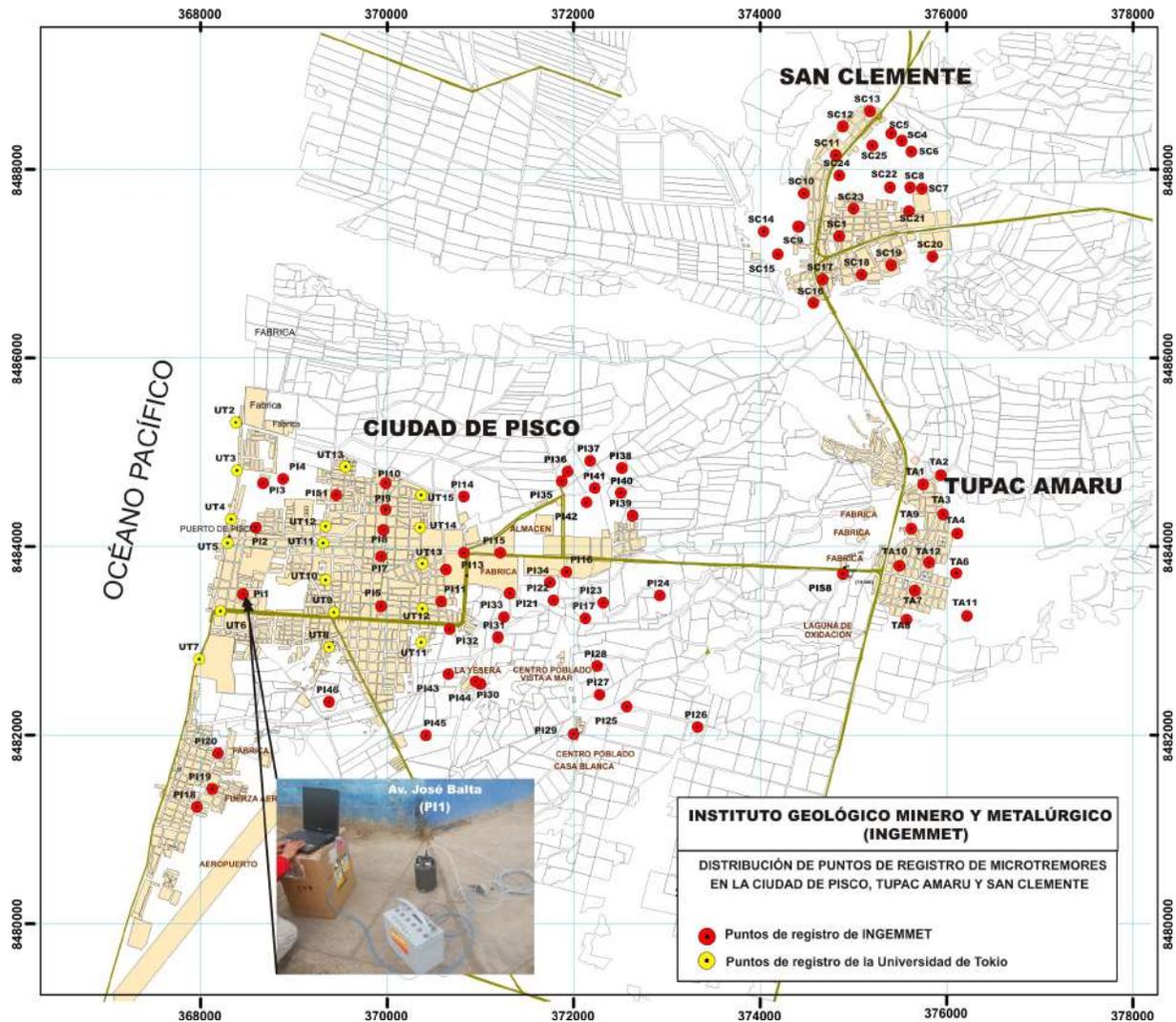


Figura 2. Distribución de puntos de medición de microtremores en la ciudad de Pisco y distritos de Túpac Amaru y San Clemente. UT, Universidad de Tokio. PI, Pisco. TA, Túpac Amaru y SC, San Clemente.

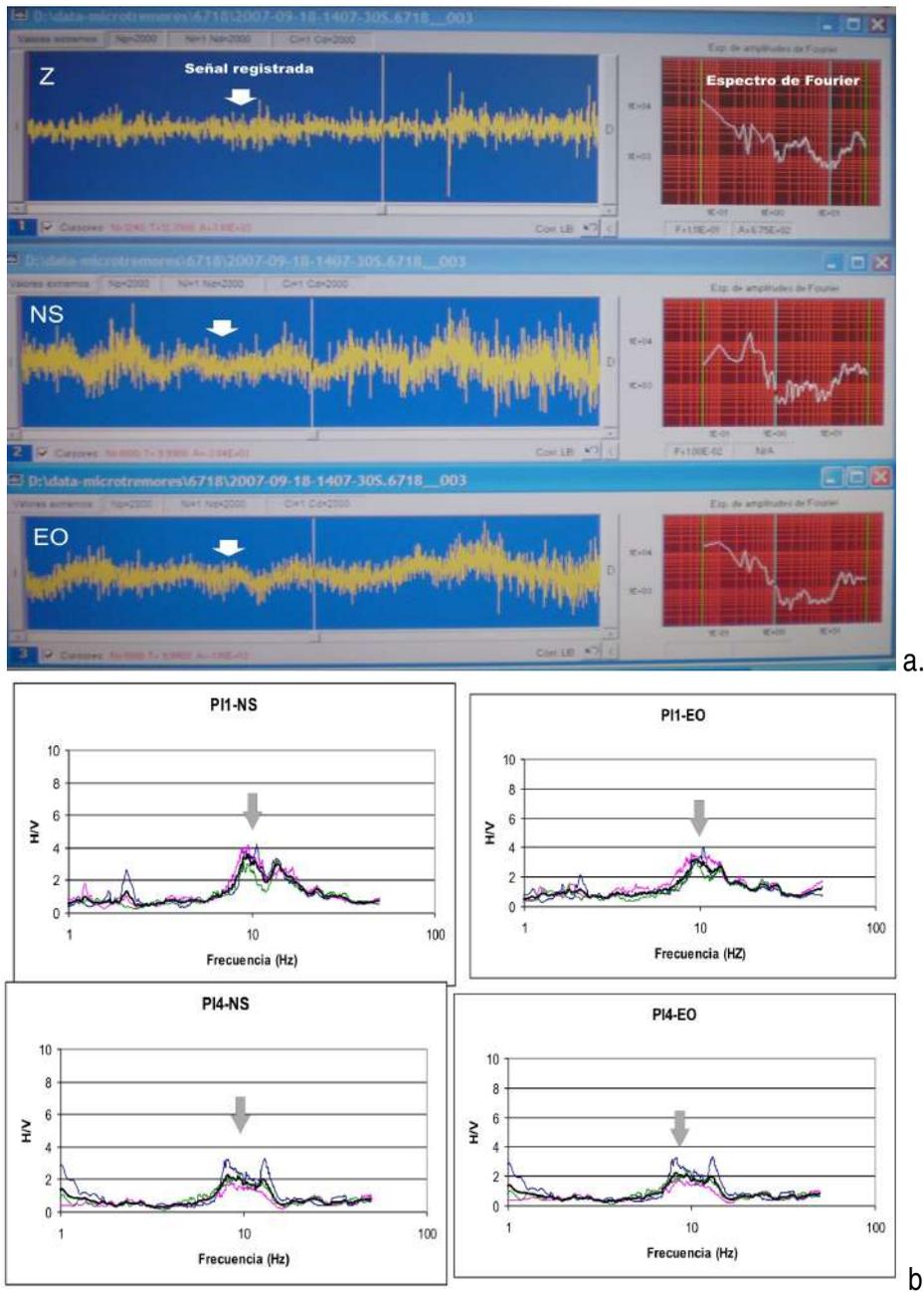


Figura 3. a) Señal de microtremor registrado en el punto PI4 y su correspondiente espectro de Fourier para las componentes: vertical (Z), Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EO). b) Frecuencia predominante obtenida a partir de la técnica de Nakamura para los puntos PI1 a PI4. La flecha indica la frecuencia obtenida.

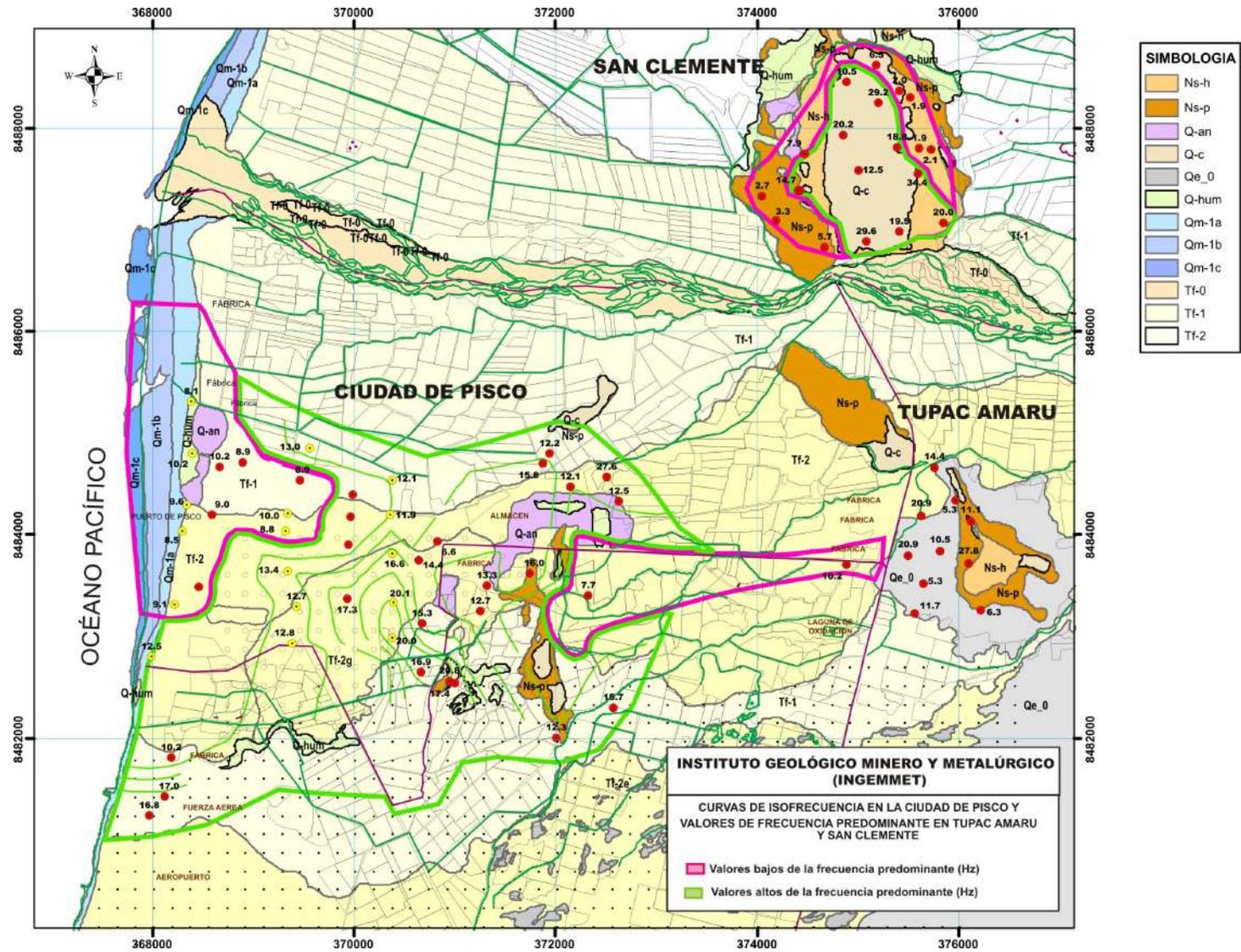


Figura 4. Valores y curvas de isofrecuencia en la ciudad de Pisco, Túpac Amaru y San Clemente sobrepuesta en el mapa geológico.

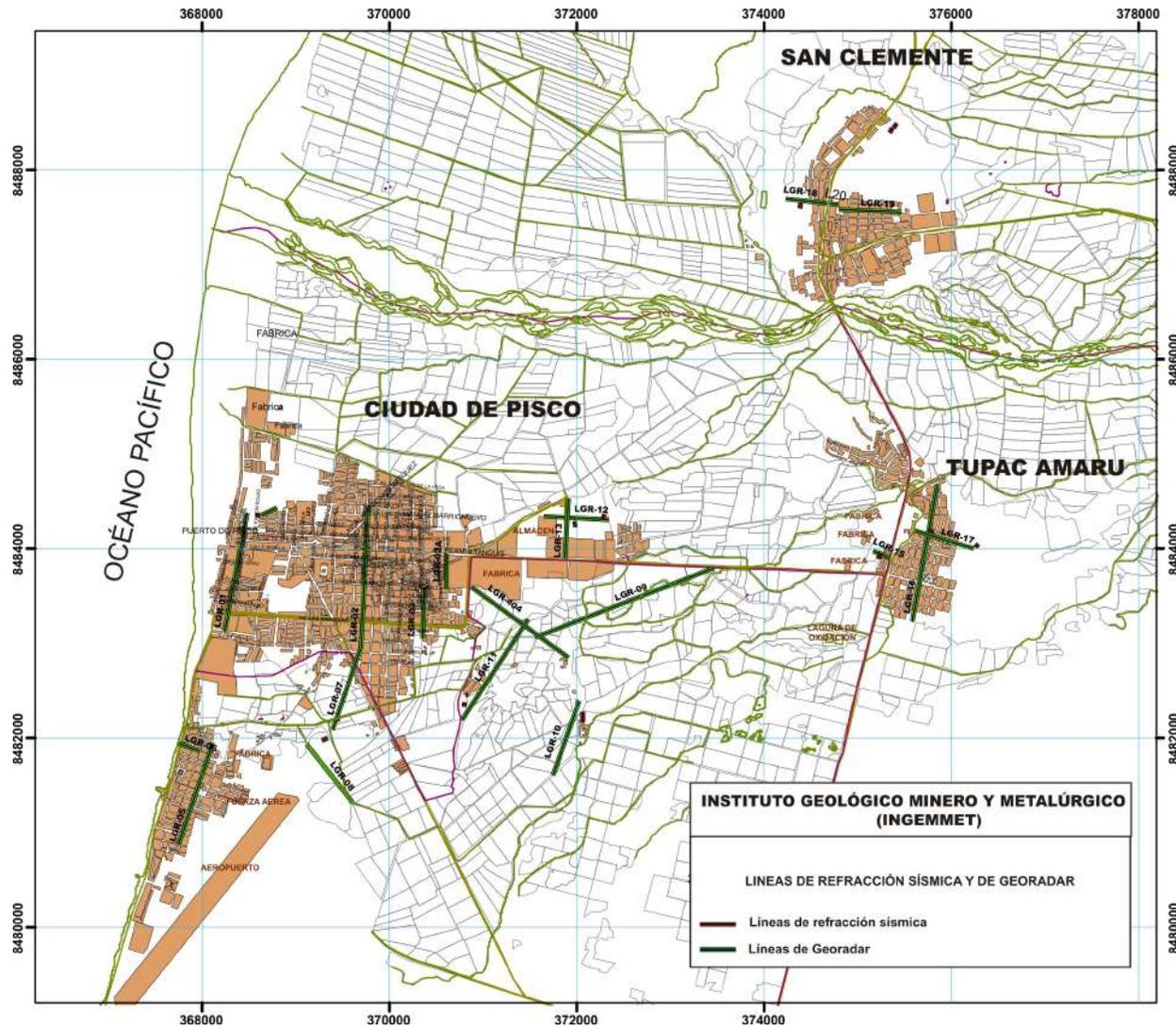


Figura 5. Distribución de líneas de refracción sísmica (LS) y de Georadar (LGR).

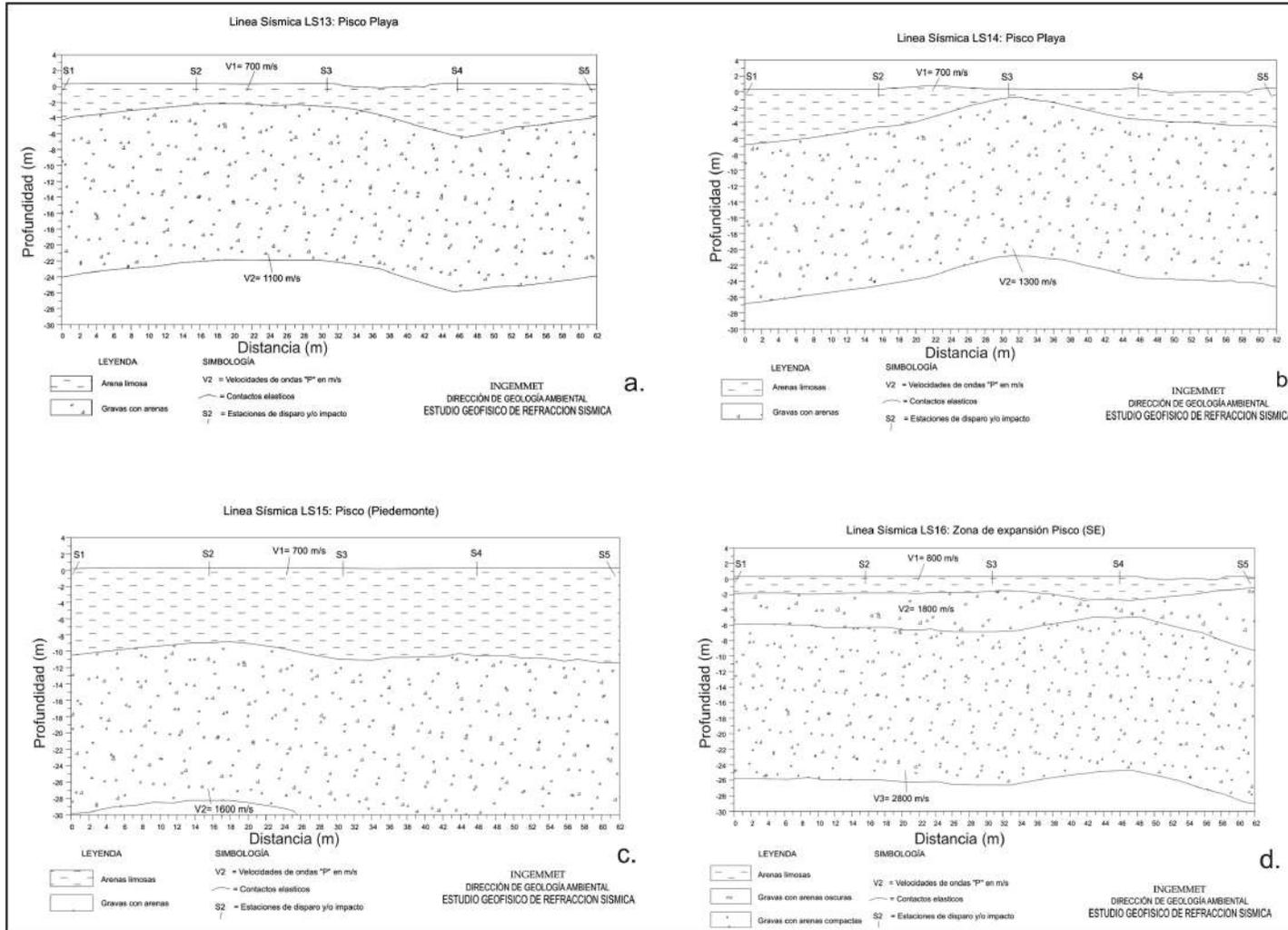


Figura 6. Interpretación geofísica de las líneas de refracción sísmica realizadas en la ciudad de Pisco y zonas de expansión urbana. a y b). En la zona de Pisco Playa, c). En la calle Piedemonte y d). En la zona de expansión urbana (SE).

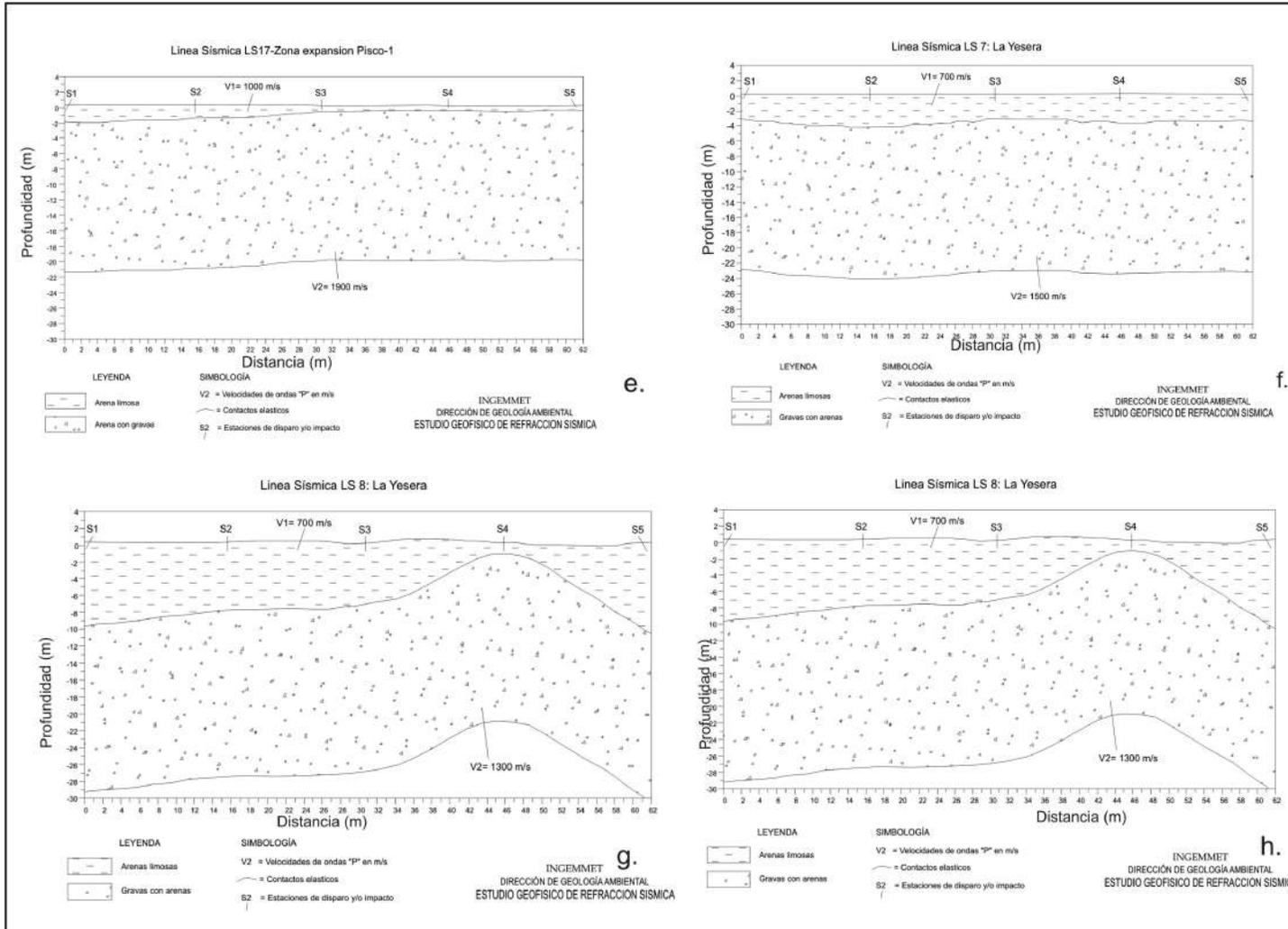


Figura 6. Continuación..... e). Zona de expansión urbana de Pisco. f, g y h). En el Centro Poblado de La Yesera.

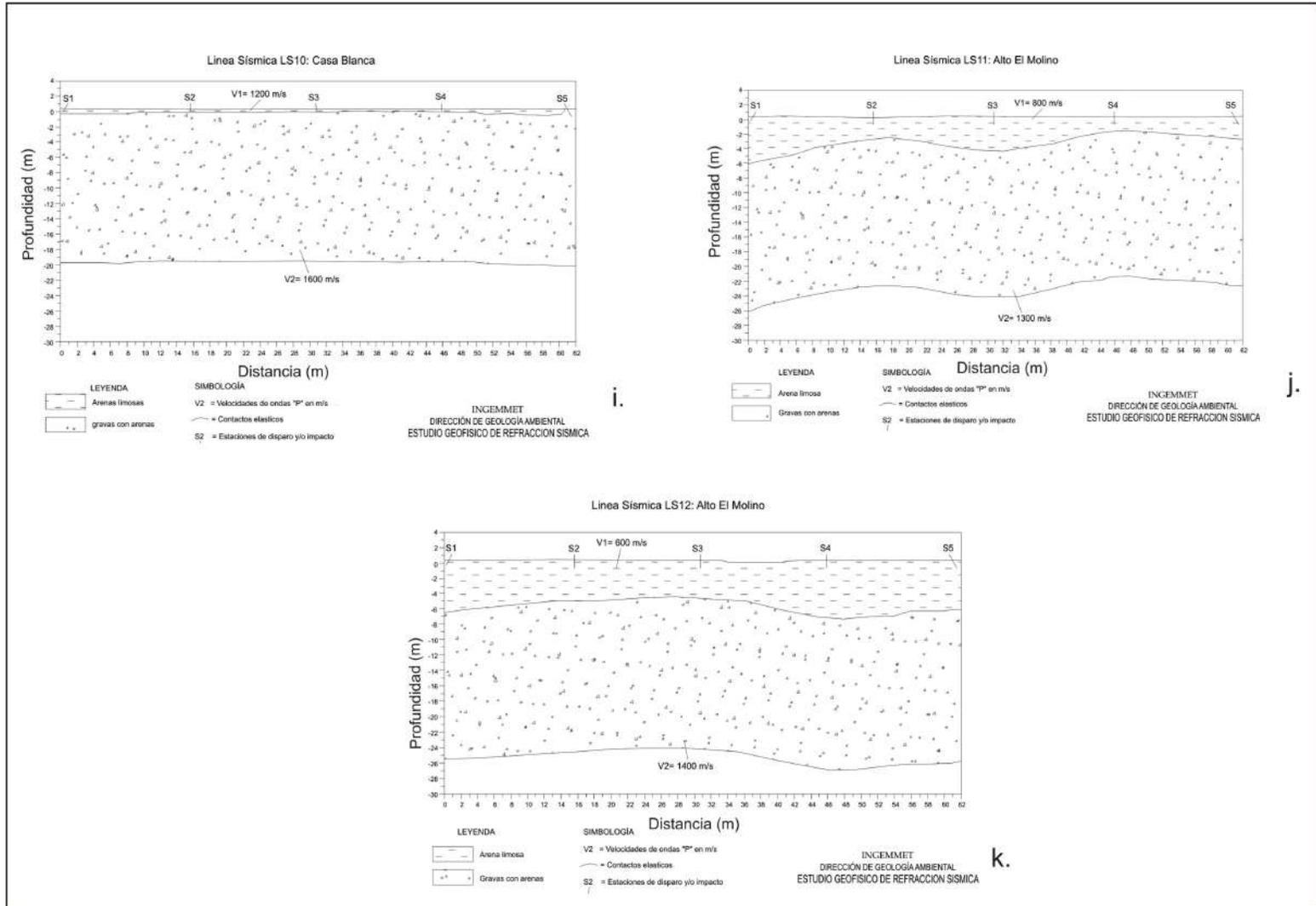


Figura 6. Continuación..... i). En el Centro Poblado Casa Blanca. j y k). En el Centro Poblado Alto el Molino

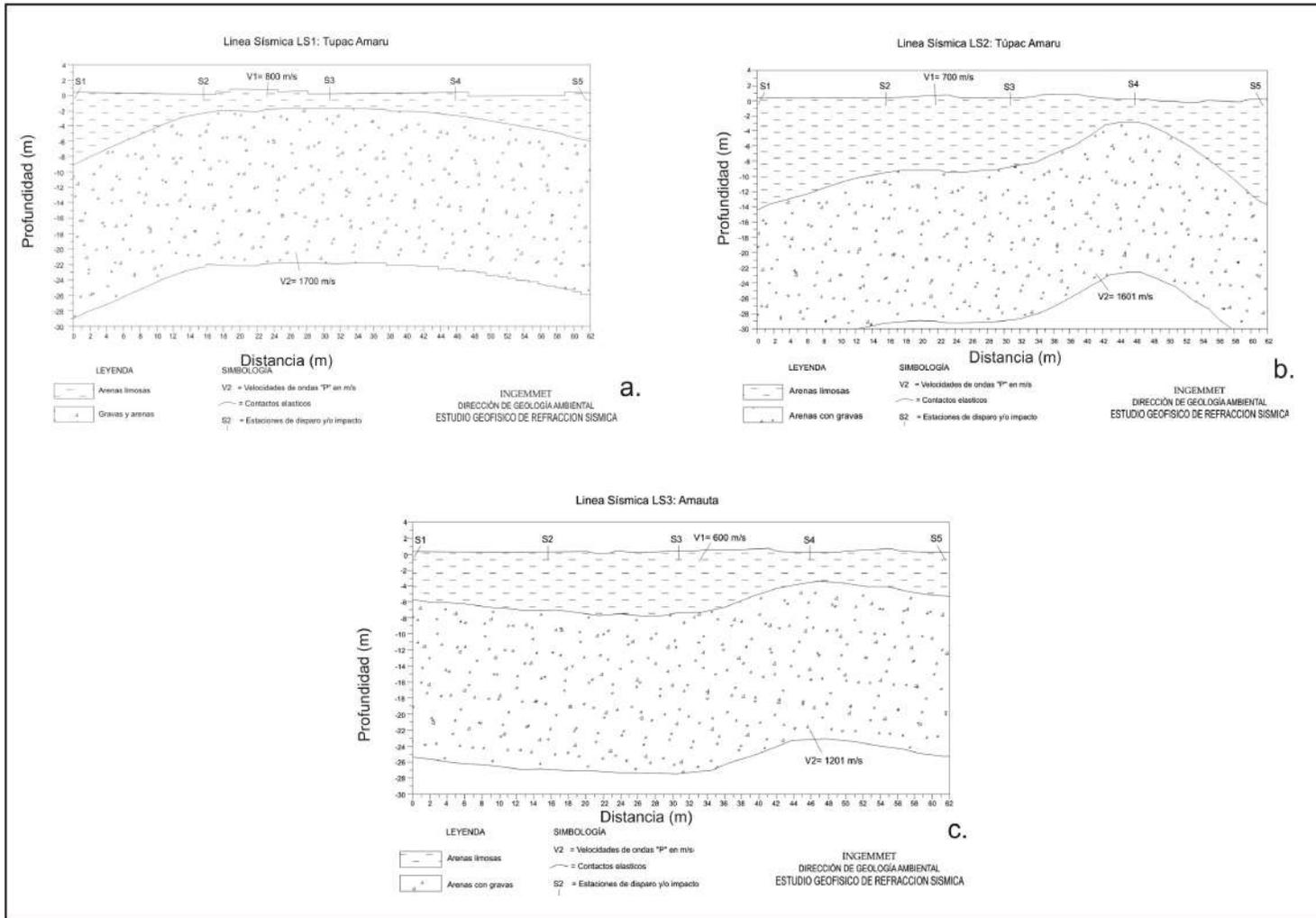


Figura 7. Interpretación geofísica de las líneas de refracción sísmica realizadas en el distrito de Tupac Amaru y Amauta. a y b). En la calle Miramar de Tupac Amaru, c). En la zona de El Amauta.

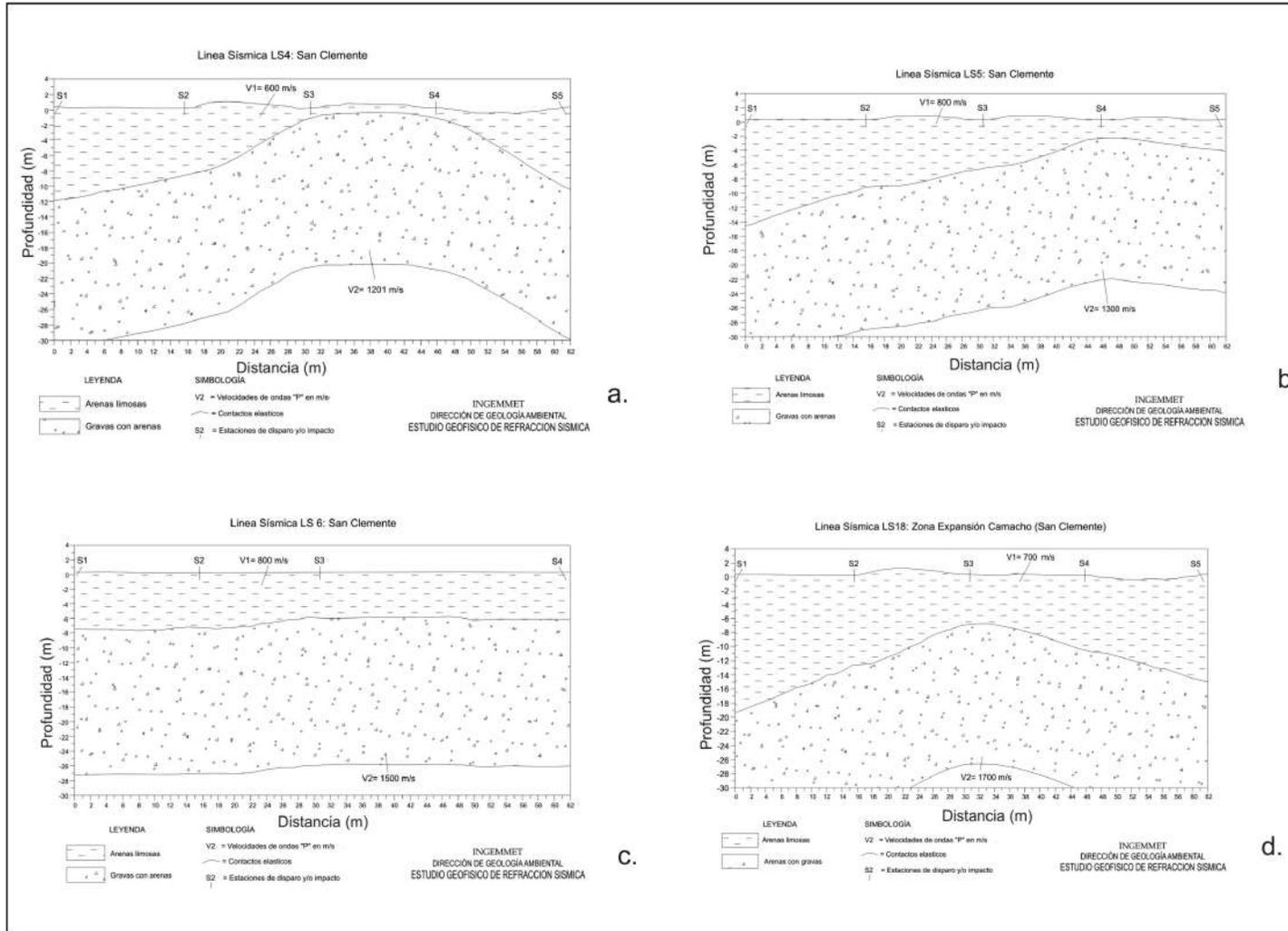
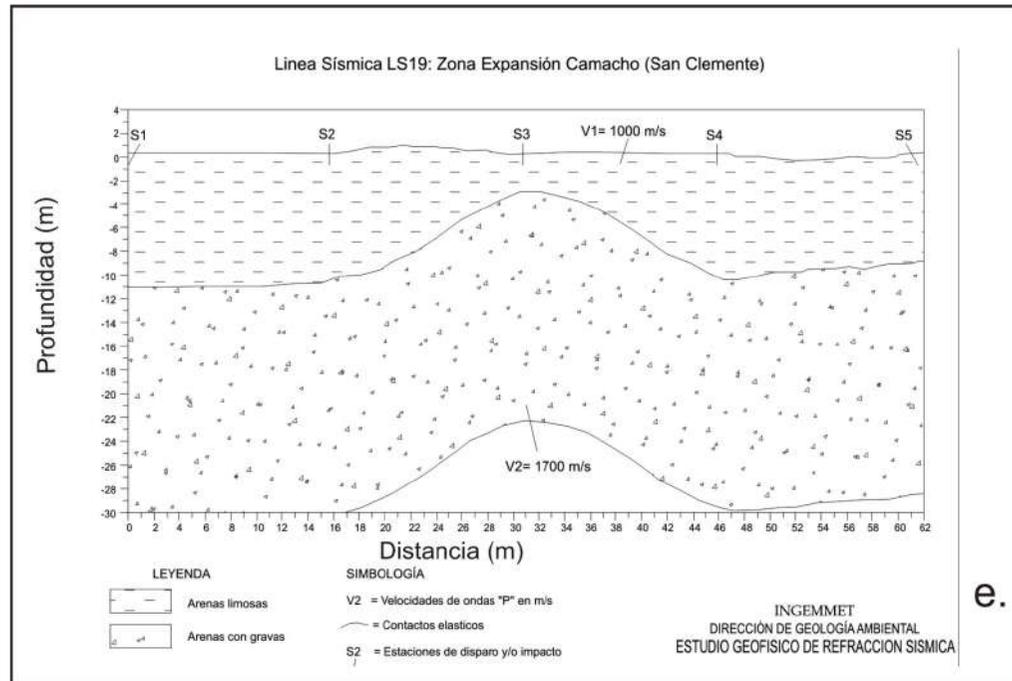


Figura 8. Interpretación geofísica de las líneas de refracción sísmica realizadas en el distrito de San Clemente. a, b y c). En la zona urbana de San Clemente. d y e). En la zona de expansión urbana de San Clemente (Camacho).



e.

Figura 8. Continuación...

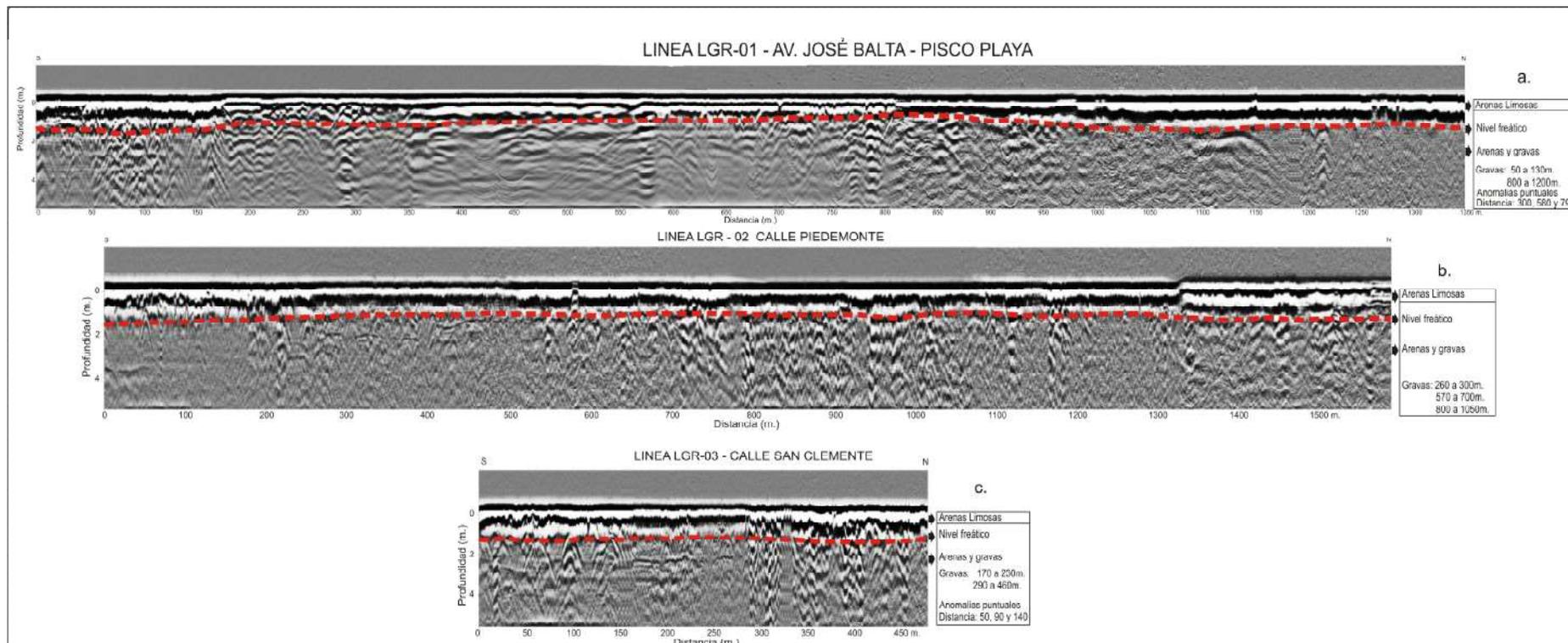


Figura 9. Líneas de Georadar realizadas en la ciudad de Pisco y zonas de expansión urbana. a). En la avenida José Balta (Pisco Playa), en dirección Sur (S) a Norte (N). b). En la calle Piedemonte, en dirección S a N. c). En la calle San Clemente en dirección S a N.

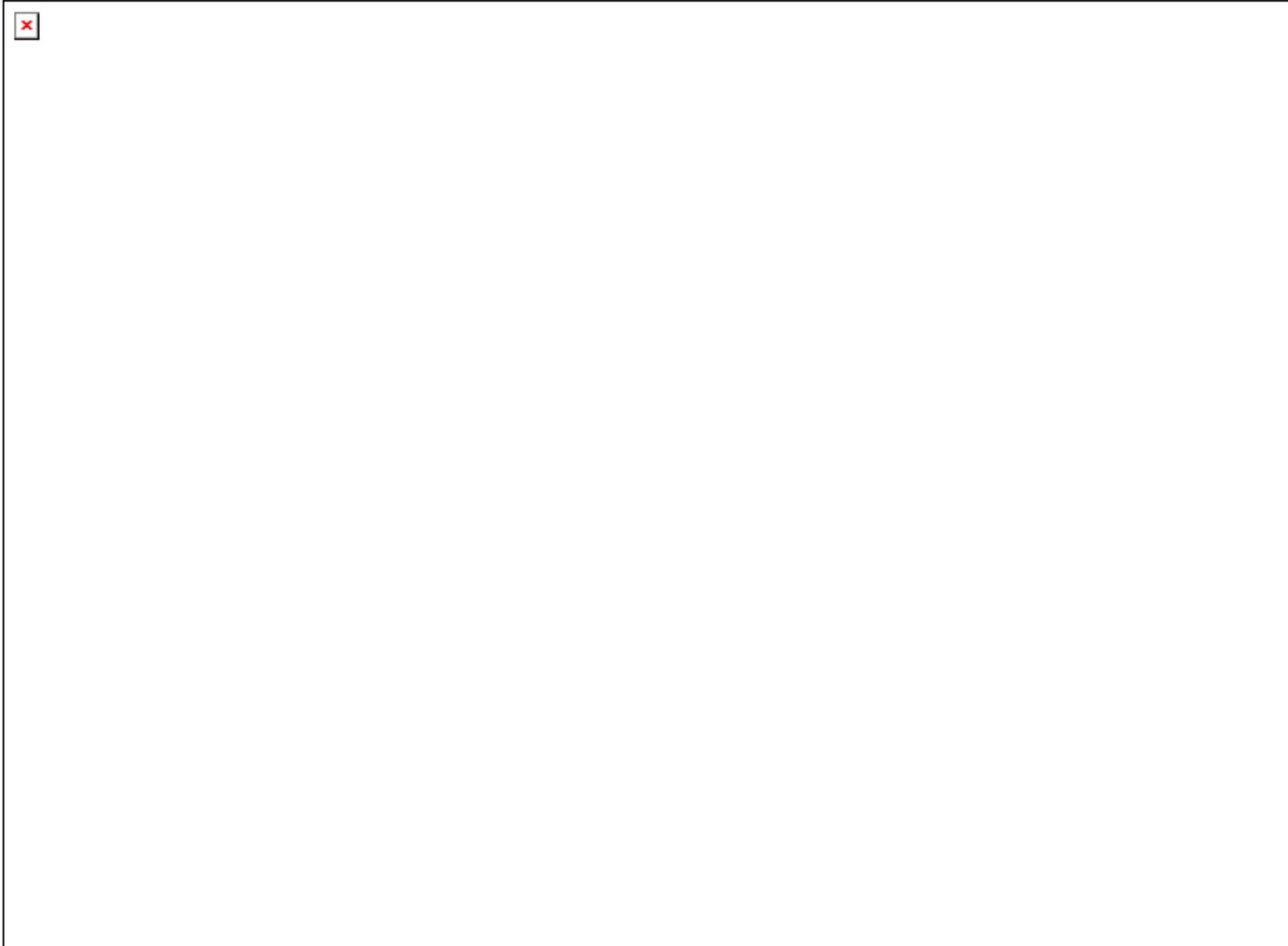


Figura 9. Continuación... d). En la calle Aspillaga (Pisco), en dirección S a N. e). En la zona industrial en dirección Noroeste (NO) a Sureste (SE). f y g). En la zona de San Andrés, en dirección S a N y E a O.

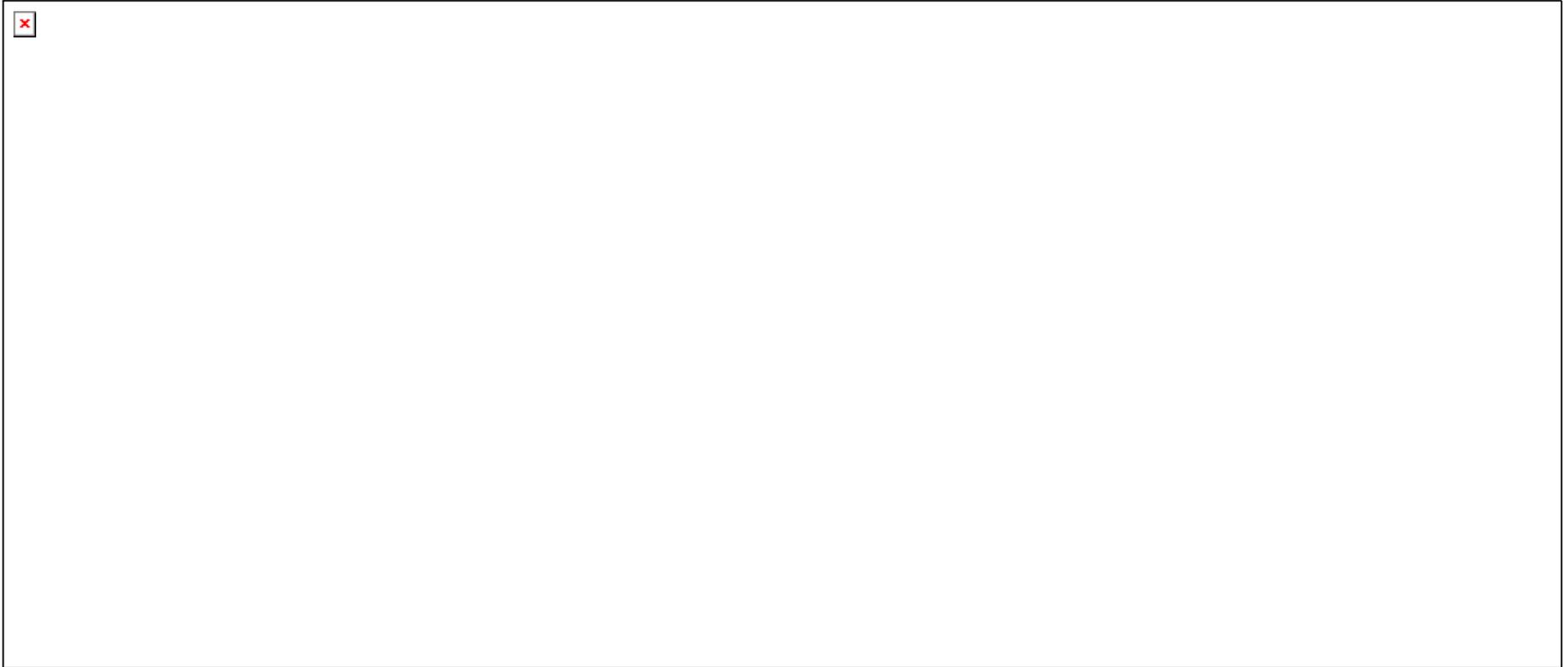


Figura 9. Continuación... h e i). En la zona de expansión urbana, en dirección NE a SO. j). En el Centro Poblado Vista al Mar, en dirección SO a NE y k). En el Centro Poblado de La Yesera, en dirección S a N.

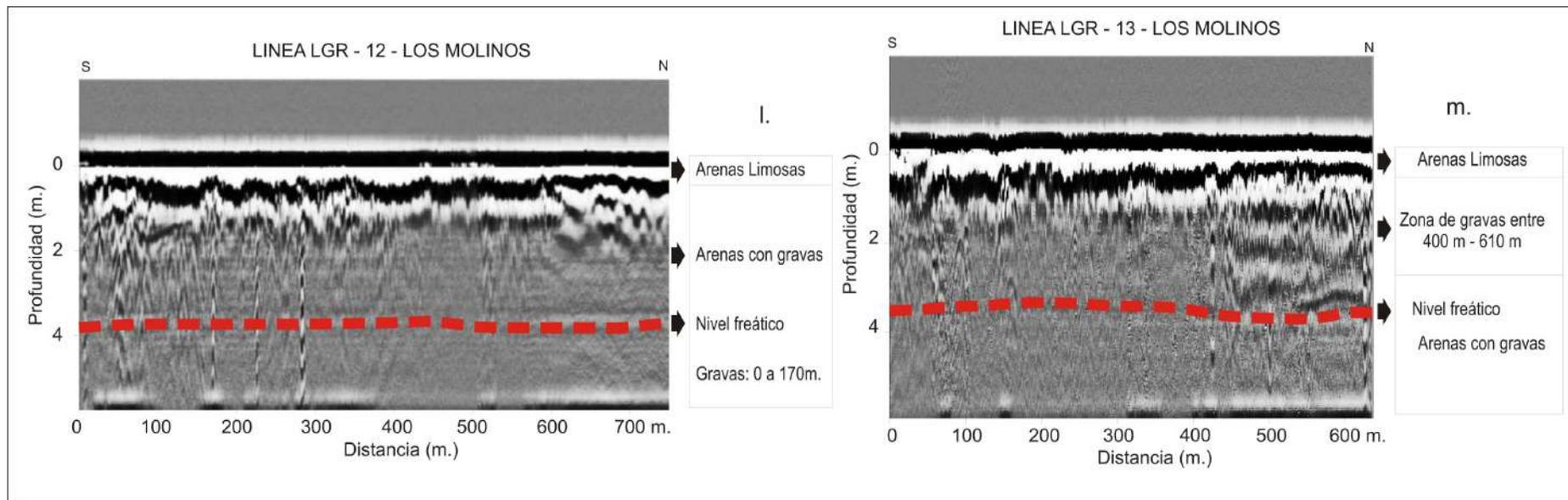


Figura 9. Continuación... l y m). En el Centro Poblado Alto El Molino, en dirección S a N.

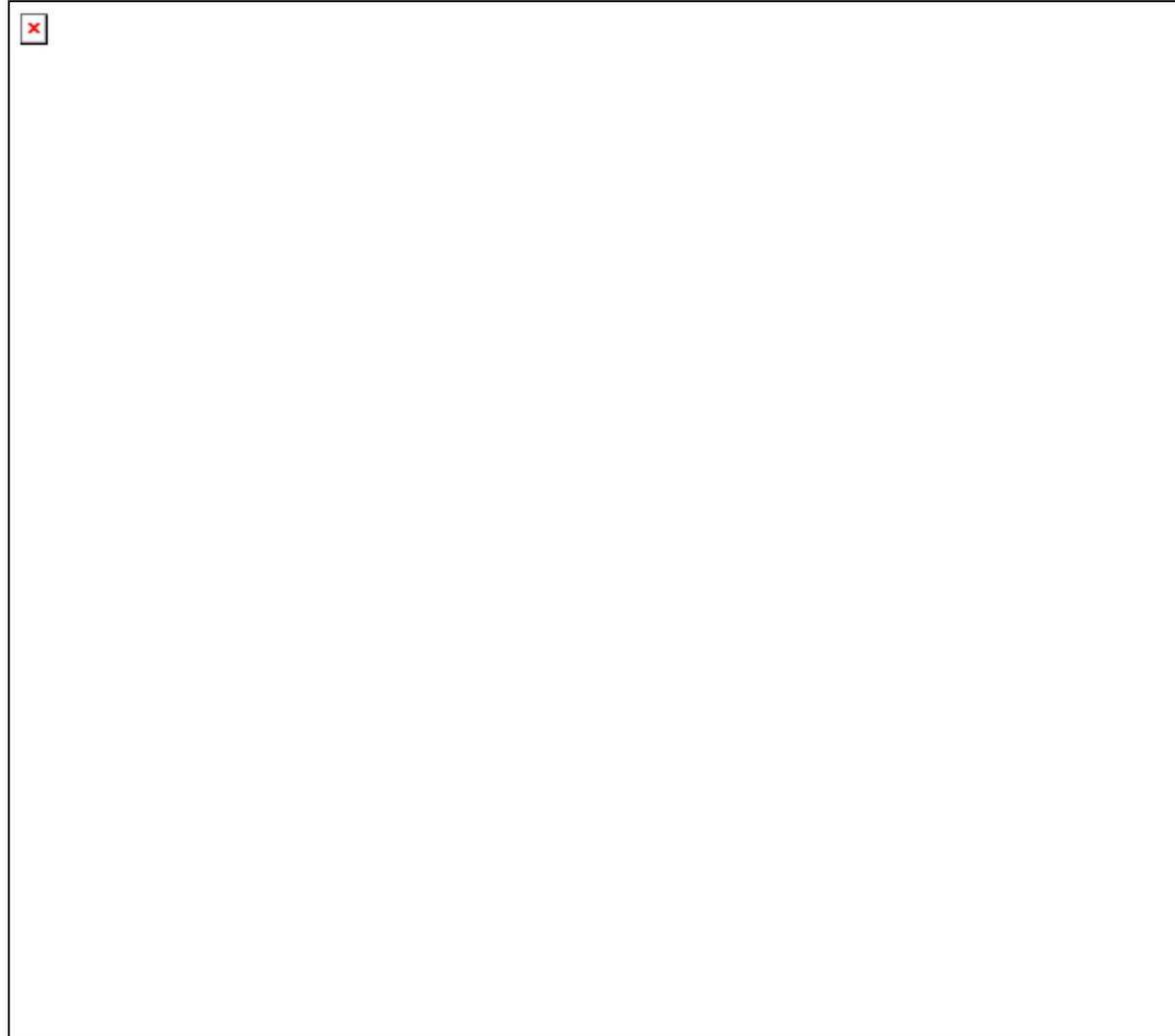


Figura 10. Líneas de Georadar realizadas en El Amauta y el distrito de Tupac Amaru. a y b). En la zona del Amauta, en dirección O a E y NO a SE respectivamente. c y d). En la avenida Miramar, en dirección N a S y E O.



Figura 11. Líneas de Georadar realizadas en el distrito de San Clemente y zona de expansión urbana (Camacho). a, b, c y d). En dirección O a E.