

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



---

**Programa de Posgrado en Ciencias  
en Ciencias de la Tierra con orientación en Sismología**

---

**Estudio del movimiento del suelo a partir de dos explosiones  
de cantera y de ruido sísmico en la zona sur de Ensenada  
B.C.**

Tesis  
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**German Martínez Romo**

Ensenada, Baja California, México  
2016

Tesis defendida por  
**German Martínez Romo**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. José Antonio Vidal Villegas**  
Director de tesis

**M.C. José Guadalupe Acosta Chang**

**M.C. Luis Humberto Mendoza Garcilazo**

**Dr. José Gómez Valdés**



---

**Dr. Juan García Abdeslem**  
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

---

**Dra. Rufina Hernández Martínez**  
Directora de Estudios de Posgrado

*German Martínez Romo © 2016*

*Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.*

Resumen de la tesis que presenta **German Martínez Romo** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias de La Tierra con orientación en sismología.

**Estudio del movimiento del suelo a partir de dos explosiones de cantera y de ruido sísmico en la zona sur de Ensenada B. C.**

Resumen aprobado por:

---

Dr. José Antonio Vidal Villegas  
Director de tesis

El propósito del estudio es determinar el periodo natural y la estructura del subsuelo (0 – 30 m), en el Ex Ejido Chapultepec y alrededores (al sur de Ensenada, Baja California). Esta localidad ha tenido un desarrollo habitacional importante en los últimos 10 años y se desconocían los parámetros mencionados, los cuales son útiles para el diseño de estructuras sismo-resistentes. Se realizaron 2 campañas de adquisición de ruido ambiental y se registraron 2 explosiones de cantera detonadas en la zona de estudio. Para la técnica de cocientes H/V se utilizaron sensores de velocidad de periodo corto (2 s, SARA) y periodo intermedio (10 s, PMD) obteniendo registros de ruido de 30 minutos en cada sitio. Para la técnica SPAC, los registros de ruido (de 30 a 50 minutos de duración) se obtuvieron con equipo SARA y arreglos circulares de 60 m de diámetro. Las explosiones fueron registradas en 4 acelerógrafos distribuidos alrededor de los sitios de detonación. Para el procesamiento descrito a continuación, usamos el software libre Geopsy. En el caso de la técnica de Nakamura, los registros se dividieron en segmentos de 40 segundos en las 3 componentes. Para cada uno de éstos se calculó su transformada de Fourier; la componente H se obtuvo de la raíz cuadrática media de las 2 componentes horizontales. El valor H/V se obtiene de promediar los cocientes obtenidos para cada segmento. Respecto a la técnica SPAC, se determinó la curva de dispersión de ondas Rayleigh, primero calculando el coeficiente de correlación entre la estación de referencia y la de interés. Posteriormente, se calculó la velocidad de fase de la onda Rayleigh para obtener la curva de dispersión. De un proceso de inversión obtuvimos el perfil de velocidades de ondas de corte. La velocidad pico de partícula ( $V_{pp}$ ), se determinó como sigue: primero se integró los acelerogramas, para obtener los sismogramas, a continuación se obtuvo la resultante vectorial de las tres componentes. Del sismograma resultante medimos la  $V_{pp}$ . Por otro lado, a partir del espectro de amplitud del sismograma horizontal que presentó la velocidad máxima, medimos la frecuencia correspondiente a la mayor amplitud espectral. La  $V_{pp}$  y la frecuencia medida, las comparamos con la Norma Internacional USBM R18507. De la comparación de estos valores con la Norma Internacional notamos que no se rebasaron los límites permitidos. Del uso de las técnicas H/V y SPAC, obtuvimos zonificaciones en función del periodo dominante del suelo y la  $V_{s30}$ . De esta última calculamos la densidad, valor máximo del módulo de cortante y el valor máximo del módulo de Young. Los perfiles de velocidad muestran valores promedio de la  $V_{s30}$  de 145 a 550 m/s. Los periodos naturales están comprendidos desde 0.4 hasta 6 Hz. De estos resultados deducimos que en la zona hay tres tipos de suelo: roca blanda o suelo muy denso, suelo rígido y suelo blando. La  $V_{pp}$ , obtenida fue de 3.8 mm/s y la frecuencia de 2.7 Hz. De la comparación de estos valores con la Norma Internacional notamos que no se rebasaron los límites permitidos.

**Palabras clave:** Vibración ambiental, sismógrafos, acelerógrafos, cocientes H/V, peligro sísmico.

Abstract of the thesis presented by **German Martinez Romo** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Science, focusing on seismology.

**A study of ground motion from one quarry blast, and ambient noise in the south area of Ensenada, B.C.**

Abstract approved by:

---

Dr. José Antonio Vidal Villegas  
Thesis director

The purpose of this study is to determine the natural period and subsurface structure (0-30 m) in the Ex Ejido Chapultepec Area (south of Ensenada, Baja California). This town has had a major housing development in the last 10 years and the aforementioned parameters were unknown, which are useful for the design of earthquake-resistant structures. Two acquisition campaigns were carried out to record environmental noise and 2 quarry explosions detonated in the study area were also recorded. For the H/V spectral ratio technique, short-period seismometers (2 s, SARA) and intermediate-period seismometers (10 s, PMD) were used to obtain noise records of 30-minutes-length at each site. For the SPAC technique, noise records (30-to-50 minutes-length) were obtained with SARA equipment in combination with circular arrangements of 60 m of diameter. The explosions were recorded in 4 accelerometers distributed around the blast sites. For data processing, we used the free software Geopsy. In the case of Nakamura technique, records of the 3 components were divided into segments of 40 s. For each one of these, their Fourier transform was calculated. The H component was obtained from the root mean square of the 2 horizontal components. The average H/V ratio was obtained from the H/V ratios obtained for each segment. Regarding the SPAC technique, the dispersion curve of Rayleigh waves was determined by first calculating the correlation coefficient between the reference station and the station of interest. Subsequently, the phase velocity of the Rayleigh wave was calculated to obtain the dispersion curve. From an inversion process we obtained the velocity model of the shear waves ( $V_{s30}$ ). The peak particle velocity ( $V_{pp}$ ), was determined as follows: first, the recorded accelerograms were numerically integrated, to get the seismograms. Then we obtained the vector resultant of the three components of the seismograms. From the resulting seismogram we measured the  $V_{pp}$ . On the other hand, from the horizontal peak amplitude spectrum, computed from the seismograms where we measured the maximum velocity, we measured the frequency of the higher spectral amplitude. The  $V_{pp}$  and the measured frequency were compared to the International Standard USBM R18507. The  $V_{pp}$  obtained was 3.8 mm/s and frequency of 2.7 Hz. From the comparison of these values with the International Standard noticed that the allowed limits are not exceeded. The use of the H/V ratios and SPAC technique, allows obtain two maps: one of dominant period depending on the soil and other of the  $V_{s30}$  values. From this last parameter we calculated the density, maximum shear modulus value and the maximum value of Young's modulus. The velocity profiles show  $V_{s30}$  average values of 145 - 550 m/s. Natural periods ranged from 0.4 to 6 Hz. From these results, we concluded that in the area there are three types of soils: soft rock, or very dense soil, hard soil and soft soil.

**Key words:** Ambiental vibration, accelerographs, H/V ratios, SPAC technique.

## **Dedicatoria**

**A mis padres Rosa María Romo y J. de J. Rogelio Martínez Reyes Retana que han sabido llevarme por buen camino a pesar de las adversidades que hemos tenido que enfrentar.**

**A mis hermanos Rogelio y Gastón que me han apoyado desde que tengo uso de razón y son mi guía y mi ejemplo a seguir, gracias a ustedes es que he intentado superarme cada día.**

**Pa' ti, que con tu apoyo consejos y cariño me has impulsado a buscar ser mejor cada día.**

## Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico a lo largo de mi trabajo de tesis. (**Núm. de becario 338023**).

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

Agradezco al Dr. Antonio Vidal Villegas por haberme guiado en este proceso de tesis, por brindarme sus consejos y sus recomendaciones, pero sobre todo su amistad.

A los miembros de mi comité Luis Humberto Mendoza Garcilazo, José Guadalupe Acosta Chang y José Gómez Valdés, gracias por sus observaciones siempre con la intención de mejorar mi trabajo.

A Euclides y Gustavo por el apoyo técnico y la enseñanza en cuanto a la instrumentación que necesite en la elaboración de mi trabajo de campo.

A Erick Ramírez, Rogelio Arce, Leandro Pérez, Rocky, Luisito y Juan Carlos Robles por su apoyo en el proceso de toma de datos e interpretación de resultados.

En especial agradezco a Favio Cruz Hernández por su apoyo en la metodología, toma de datos e interpretación de los resultados. Gracias prácticamente fuiste otro miembro más del comité

Al personal administrativo que hicieron más ágiles mis trámites y mi estadía en CICESE, en particular agradezco a María de la Cruz González, Gabriela Hernández y Ana Rosa Soto.

## Tabla de contenido

|  | Página    |
|--|-----------|
| Resumen en español.....  | iii       |
| Resumen en inglés.....   | v         |
| Dedicatorias.....  | vii       |
| Agradecimientos.....   | viii      |
| Lista de figuras.....  | ix        |
| Lista de tablas.....   | xv        |
| <br>   |           |
| <b>Capítulo1. Introducción.....</b>                              | <b>1</b>  |
| 1.1 Estudios Previos.....  | 2         |
| 1.1.1 Cocientes Espectrales H/V.....                             | 2         |
| 1.1.2 Velocidad de ondas de Corte Vs30.....                      | 4         |
| 1.1.3 Velocidad Pico de Partícula.....                           | 5         |
| 1.2 Ubicación Geográfica.....                                    | 5         |
| 1.3 Justificación.....   | 7         |
| 1.4 Objetivo General.....  | 7         |
| 1.4.1 Objetivos Particulares.....                                | 7         |
| 1.5 Estructura de la Tesis.....                                  | 8         |
| <br>   |           |
| <b>Capítulo 2. Marco Geológico y Tectónico.....</b>              | <b>9</b>  |
| 2.1 Geología Superficial.....                                    | 9         |
| 2.2 Principales Fallas de la Región y Sismicidad.....            | 12        |
| 2.2.1 Falla Agua Blanca.....                                     | 12        |
| 2.2.2 Sistema de Fallas San Miguel – Vallecitos – Calabazas..... | 12        |
| 2.2.3 Zona de Fallas San Clemente-San Isidro.....                | 13        |
| 2.2.4 Falla Coronado Bank.....                                   | 13        |
| 2.2.5 Otras Fallas.....  | 16        |
| <br>   |           |
| <b>CAPITULO 3 METODOLOGÍA.....</b>                               | <b>17</b> |
| 3.1 Marco Teórico.....   | 17        |
| 3.1.1 Ruido Ambiental y Ondas Superficiales.....                 | 17        |
| 3.2 Método SPAC (Spatial Analysis Autocorrelation).....          | 18        |
| 3.3 Método de Nakamura.....                                      | 19        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.4 Método Vpp .....  | 22        |
| 3.5 Programación.....                                       | 23        |
| <b>Capítulo 4 Adquisición de datos .....</b>                | <b>25</b> |
| 4.1 Adquisición SPAC .....                                  | 25        |
| 4.4 Adquisición H/V .....                                   | 31        |
| 4.5 Explosiones de cantera .....                            | 33        |
| 4.6 Equipo utilizado .....                                  | 35        |
| <b>Capítulo 5 Procesamiento de datos y resultados .....</b> | <b>36</b> |
| 5.1 SPAC.....   | 36        |
| 5.1.1 Sismogramas.....                                      | 36        |
| 5.1.2 Elipticidad .....                                     | 44        |
| 5.2 Cocientes Espectrales H/V .....                         | 46        |
| 5.3 Explosión de cantera.....                               | 49        |
| <b>Capítulo 6. Conclusiones .....</b>                       | <b>53</b> |
| <b>Literatura citada .....</b>                              |           |

## Lista de figuras

| Figuras   | Página |
|---|--------|
| 1 Mapa topográfico de la zona de estudio de Ibarra (2004). Los puntos verdes representan los sitios de adquisición de ruido sísmico usados para estimar cocientes espectrales. ....   | 3      |
| 2 Zonificación de las diferentes geologías de la ciudad de Ensenada de acuerdo a Gastil et al. (1975), y la velocidad de las ondas de corte estimada por Soares (2003). El área de estudio de la presente tesis está indicada por el perímetro que forman las líneas paralelas. ....  | 4      |
| 3 Mapa de ubicación de la zona de estudio. La explosión de cantera se ubica en la zona sur de la ciudad de Ensenada y colinda en casi todas sus direcciones con zonas residenciales y agrícolas (Maneadero). Los polígonos indican las colonias y los triángulos las estaciones de aceleración instaladas para registrar la explosión (indicada con asterisco)..... | 6      |
| 4 Sección del mapa geológico de Gastil et al. (1975) que muestra la zona de estudio. Además, se indica los sitios (triángulos en color) en donde se registró la explosión de cantera (asterisco).....   | 10     |
| 5 Mapa con las fallas principales de la región de la Zona de Deformación Activa (ZDA). Se muestran las 3 provincias estructurales (Stock et al., 1991) y la división entre ellas (ZDA), Provincia Estructural del Golfo (PEG) y el Bloque Peninsular Estable (BPE).....   | 11     |
| 6 Mapa de la actividad sísmica de 2000 a 2016 para sismos mayores a 3 en MI). En el recuadro rojo se muestra la zona de estudio. En la parte superior está indicada una ampliación del recuadro rojo. E = Estero S= Soledad M = Maximinos O.N. = Ojos Negros.....   | 14     |
| 7 Mapa de la sismicidad ( $M < 3$ ) del área de estudio (círculos) obtenida del catálogo de RESNOM desde 1976 al presente año. Así mismo, se indica las fallas reportadas por Pérez et al. (2004). ....   | 15     |
| 8 Arreglo típico usado para el método SPAC.....   | 18     |
| 9 Modelo geológico, la zona gris representa el basamento y la punteada representa la capa de sedimentos. Los triángulos representan registros del movimiento del suelo. Hr = Espectro de Fourier del movimiento horizontal en roca, Vr = Espectro de Fourier del movimiento Vertical en roca.....   | 20     |
| 10 Diagrama de flujo para obtener el periodo natural del suelo (Jaramillo, 2012).....   | 21     |
| 11 Valores límite de velocidad para diferentes frecuencias par a evitar daño en estructuras de acuerdo a U.S. Bureau of mines en USBM R1 8507 (Siskind et al. 1980) .....   | 23     |
| 12 Esquema típico de explosión .....  | 23     |
| 13 Esquema de trabajo del módulo dinver presente en el programa Geopsy.....   | 24     |
| 14 Esquema de adquisición de datos de vibración ambiental.....  | 25     |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 15 | Respuesta en Frecuencia del sensor SARA (SLO6).....   | 25 |
| 16 | Imagen del sitio CONALEP.....   | 26 |
| 17 | Imagen del sitio Macroplaza.....  | 26 |
| 18 | Imagen del sitio Tecnológico.....   | 27 |
| 19 | Imagen del sitio Cerro.....   | 27 |
| 20 | Imagen del sitio Campito.....   | 28 |
| 21 | Imagen del sitio Parque.....  | 28 |
| 22 | Imagen del sitio Motel Tony.....  | 29 |
| 23 | Imagen del sitio El Faro.....   | 29 |
| 24 | Resumen de los sitios donde se realizó el método SPAC.....  | 29 |
| 25 | Geometría típica de un arreglo de sensores para el método SPAC. En la figura también se observan las fuentes de señales que se aprovechan en el estudio y el nivel de resolución que se puede obtener (Figura tomada de Hayashi, 2005).....   | 30 |
| 26 | Sitios donde se tomaron muestras de ruido para el cálculo de los cocientes espectrales H/V.   | 32 |
| 27 | Disposición de la geometría de las estaciones utilizadas para registrar la explosión. Las flechas verdes representan los sitios de ubicación de los acelerógrafos, mientras que el círculo rojo representa el sitio de detonación. Se muestran las series de tiempo (3 componentes Z, N, E) obtenidas. También se indica la fecha de la explosión (dd/mm/aaaa) y el tiempo de origen calculado de la detonación (hh:mm:ss)..... | 34 |
| 28 | Equipo utilizado para el registro de los datos de la presente tesis: (a) Grabadora y sismómetro PMD, (b) Grabadora y sismómetro Sara, (C) Grabadora Reftek-130 y acelerómetro Episensor.....  | 35 |
| 29 | Paquetes de 15 minutos de registro del sitio CONALEP.....   | 37 |
| 30 | Registro continuo del sitio CONALEP.....  | 37 |
| 31 | Selección de ventanas implementando el algoritmo sta/lta.....   | 38 |
| 32 | Posición de los sensores según geometría dispuesta en el sitio CONALEP.....   | 39 |
| 33 | Coefficientes de correlación para las diferentes distancias entre estaciones del sitio CONALEP, tomando en cuenta el arreglo de la Figura 15.....   | 40 |
| 34 | Ejemplo de distintas distancias entre pares de estaciones del arreglo instalado en el sitio CONALEP, con 8 estaciones, 1 central y 7 perimetrales.....  | 40 |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 35 | Velocidades de fase obtenidas a partir de los coeficientes de correlación de la Figura 17. Las líneas punteadas y continuas representan los límites en donde la curva de dispersión es confiable.....   | 41 |
| 36 | En la Fig. a se aprecia la curva de dispersión experimental (negra) contra curvas teóricas (rojo, verde, azul y rosa) y en la Fig. b el perfil del suelo resultante de la inversión de las curvas de dispersión, mostrando en negro el mejor ajuste. ....   | 42 |
| 37 | . Mapa de zonificación de la Vs30 . En el mapa se incluye también las diferentes unidades geológicas de la región. Los valores escritos a un lado de la litología corresponden a la Vs30 calculada. ....  | 43 |
| 38 | Curvas de elipticidad de ondas Rayleigh en un semi-espacio estratificado, para los primeros 5 modos de la onda Rayleigh. Los picos corresponden al desvanecimiento de la componente vertical, mientras que los valles pronunciados corresponden al desvanecimiento de la componente horizontal. (Prado 2014) .....  | 44 |
| 39 | Inversion de la curva de elipticidad para el sitio. En a) se puede observar los modulos de la curva de elipticidad teorica y experimental. En b) los modelos del subsuelo para la velocidad de Vp y en c) los modelos del subsuelo para la vrlocidad de ondas de corte Vs. En la Figura b) y c) el modelo con la menor desviacion estandar se muestra con color negro. .... | 45 |
| 40 | Comparación de los modelos de velocidades obtenidos a partir de la inversión de la curva de elipticidad (a) y del método SPAC (b).....  | 46 |
| 41 | Curvas de respuesta en amplitud del sismómetro PMD y el sismómetro SLO6 incluido como parte del equipo SARA .....   | 47 |
| 42 | Distribución de las curvas de isoperiodos de naturales del suelo en la zona sur de Ensenada.....  | 48 |
| 43 | Resultantes vectoriales de las 3 componentes para cada una de las estaciones: (a) B081, (b) B086, (c) B086, (d) B08B .....  | 49 |
| 44 | Valores máximos de la Vpp en función de la frecuencia domínate del suelo. ....  | 50 |
| 45 | Espectro de furrier de la estación más cercana a la población.....  | 51 |

## Lista de tablas

| Tabla |  | pagina |
|-------|--|--------|
| 1     | Sitios seleccionados para realizar la técnica SPAC.....                            | 33     |
| 2     | Coordenadas de los sitios de adquisición.....                                      | 36     |
| 3     | Ubicación de los acelerógrafos usados para el registro de la explosión.....        | 40     |
| 4     | Parámetros de entrada del algoritmo sta/lta.....                                   | 43     |
| 5     | Resumen de las frecuencias obtenidos con ambos sensores para sitios similares..... | 53     |
| 6     | Velocidades pico de partícula estimadas a partir de la ecuación 9.....             | 58     |
| 7     | Comparación de la Vpp registrada y la Vpp calculada.....                           | 58     |

## Capítulo1. Introducción

---

La ciudad de Ensenada no se caracteriza por construcciones verticales de más de tres niveles. Sin embargo, su crecimiento tanto en población como en infraestructura urbana se ha disparado; con el aumento de los edificios altos y la infraestructura (carreteras, puentes, etc.) el riesgo de la ocurrencia de daños a causa de un terremoto es mayor. Es bien sabido que la geología superficial toma un papel importante en la respuesta sísmica de los edificios. Si estos son construidos sobre suelos blandos, estarán más expuestos a experimentar movimientos sísmicos mayores que si estuvieran en suelos rígidos, debido al efecto de sitio (modificación de la señal sísmica en amplitud, duración y frecuencias). A su vez, el construir sin tener en cuenta las características dinámicas del suelo (periodo natural y velocidad de corte) hace que aumente la vulnerabilidad de la zona y considerando que una gran parte de los hogares son autoconstruidos, sin considerar al reglamento de construcción del estado, promueve que los hogares sean propensos a sufrir daños ante la ocurrencia de un sismo importante. La situación se agrava ante la pobre planificación de crecimiento urbano, como ocurre en la mayoría de las colonias de la ciudad de Ensenada, donde éstas se establecen sin estudios previos del subsuelo que les brinde información necesaria (resistencia a la presión, tipo de suelo, humedad, compresibilidad, entre otros), para realizar construcciones sismoresistentes.

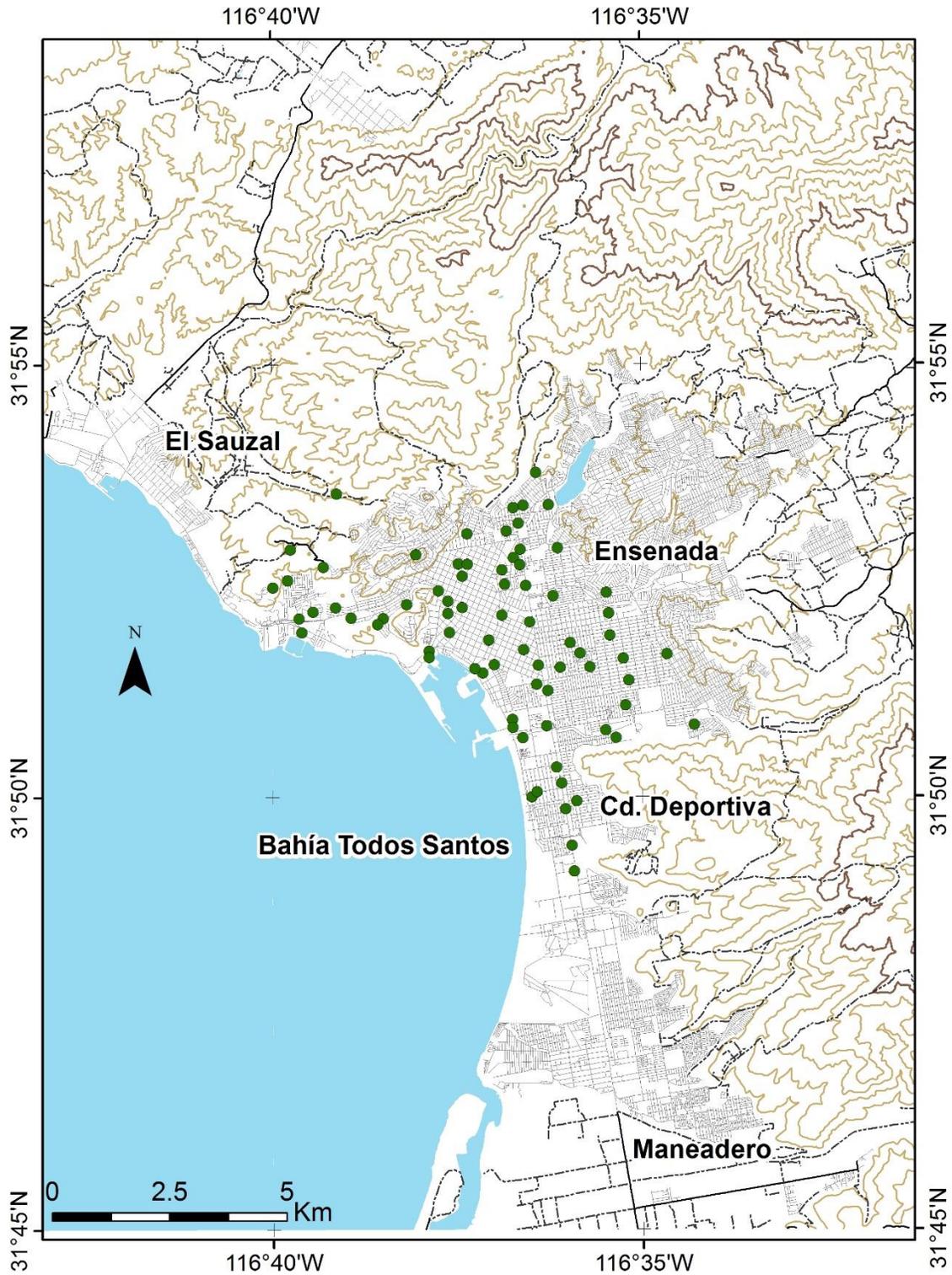
La presente tesis tiene por objeto realizar una zonificación sísmica de la zona sur de Ensenada (Ex Ejido Chapultepec y sus alrededores) en función del periodo natural del suelo y la velocidad de corte (profundidad alrededor de 30 m); así como también evaluar el movimiento del suelo a partir del registro de dos explosiones de cantera (1,400kg y 2,500 kg). Los métodos a utilizar para obtener los parámetros mencionados son: Cocientes Espectrales H/V, Autocorrelación Espacial (SPAC) y Velocidad Pico de Partícula. Los dos primeros utilizan como fuente vibración ambiental, lo que es una ventaja en lugares donde no es posible utilizar fuentes activas (explosiones), como es el caso de centros urbanos (Tapia, 2009). El movimiento del suelo será evaluado a través del valor máximo de la resultante vectorial de las tres componentes de los registros de velocidad, comúnmente conocido como Velocidad Pico de Partícula.

## 1.1 Estudios Previos

El trabajo de Ibarra (2004) ha servido de punto de partida para la presente tesis, ya que buscamos complementar el mapa de zonificación de periodos dominantes abarcando la zona de Ex Ejido Chapultepec y alrededores, hasta el arroyo San Carlos. Por su parte el estudio de Soares (2003) nos ha aportado información inicial de la  $V_{s30}$ , que nos permitirá comparar resultados obtenidos de distintas técnicas. Mientras que el estudio realizado por Chang (2005) ha servido de guía para poder realizar el análisis de la velocidad de partícula, tratando de seguir su metodología y recomendaciones.

### 1.1.1 Cocientes Espectrales H/V

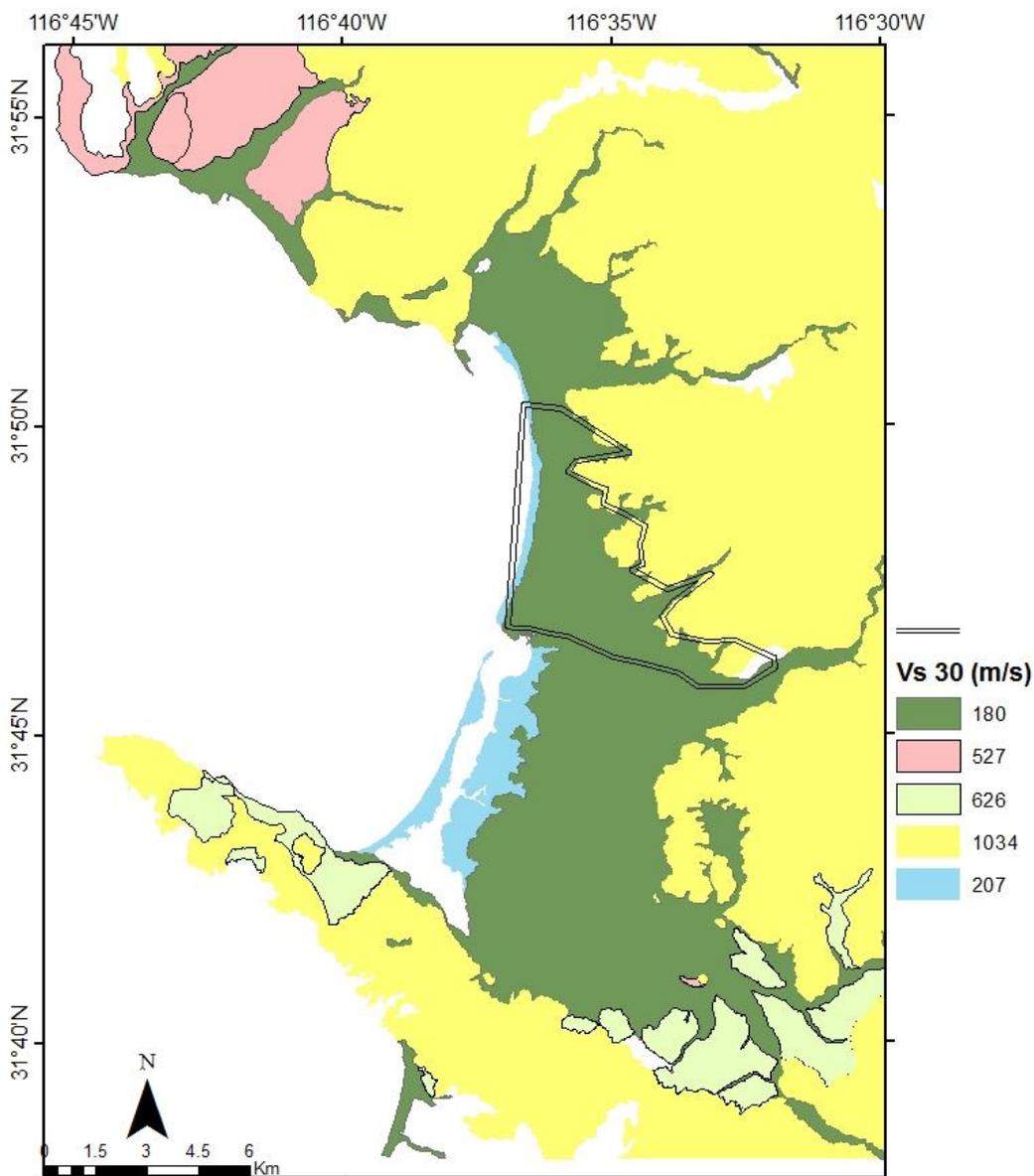
Ibarra (2004) realizó un estudio, donde estimó los periodos fundamentales del suelo (periodo de la armónica con mayor amplitud del movimiento del suelo). Es de importancia conocer dichos periodos ya que las estructuras civiles son dañadas en mayor medida por los movimientos sísmicos cuando el período fundamental de vibración de la estructura es similar al período fundamental de vibración del suelo donde ésta se encuentra desplantada (Ibarra, 2004). Es por esto último que es relevante conocer de forma detallada la variación del periodo del suelo y de las estructuras establecidas sobre él. Es necesario verificar frecuentemente que el periodo no cambie ante la influencia de cargas dinámicas. El estudio de Ibarra (2004) fue realizado con una base de datos de ruido ambiental en 75 sitios con registros de varias horas de duración en la ciudad de Ensenada; abarcando desde “El Sauzal” hasta la “Ciudad Deportiva” (Figura 1). En la presente tesis, este último sitio se tomó como punto de partida, hasta llegar al inicio del Valle de Maneadero. El área que se forma entre la Ciudad Deportiva y Valle de Maneadero se ha seleccionado como área de estudio de la presente tesis. A partir de ahora cuando se mencione la zona sur de Ensenada, se referirá al área de estudio de la presente tesis. Consideramos extender el trabajo que realizó Ibarra (2004) hacia el sur porque es donde ha crecido la mancha urbana. Por lo que es indispensable tener estudios del comportamiento dinámico del suelo para poder implementar modelos de estructuras y cimentaciones adecuados para la zona.



**Figura 1** Mapa topográfico de la zona de estudio de Ibarra (2004). Los puntos verdes representan los sitios de adquisición de ruido sísmico usados para estimar cocientes espectrales.

### 1.1.2 Velocidad de ondas de Corte $V_{s30}$

Soares (2003) realizó la estimación de la velocidad promedio de ondas de corte en los primeros 30 metros de profundidad partir de observaciones directas de las curvas dromocrónicas con arreglos que amplifican la energía de las ondas S. En la Figura 2 se muestra que en nuestra área de estudio la velocidad de ondas reportada por Soares es de 180 m/s. Este valor se utilizará solo como referencia para efectos de comparación.



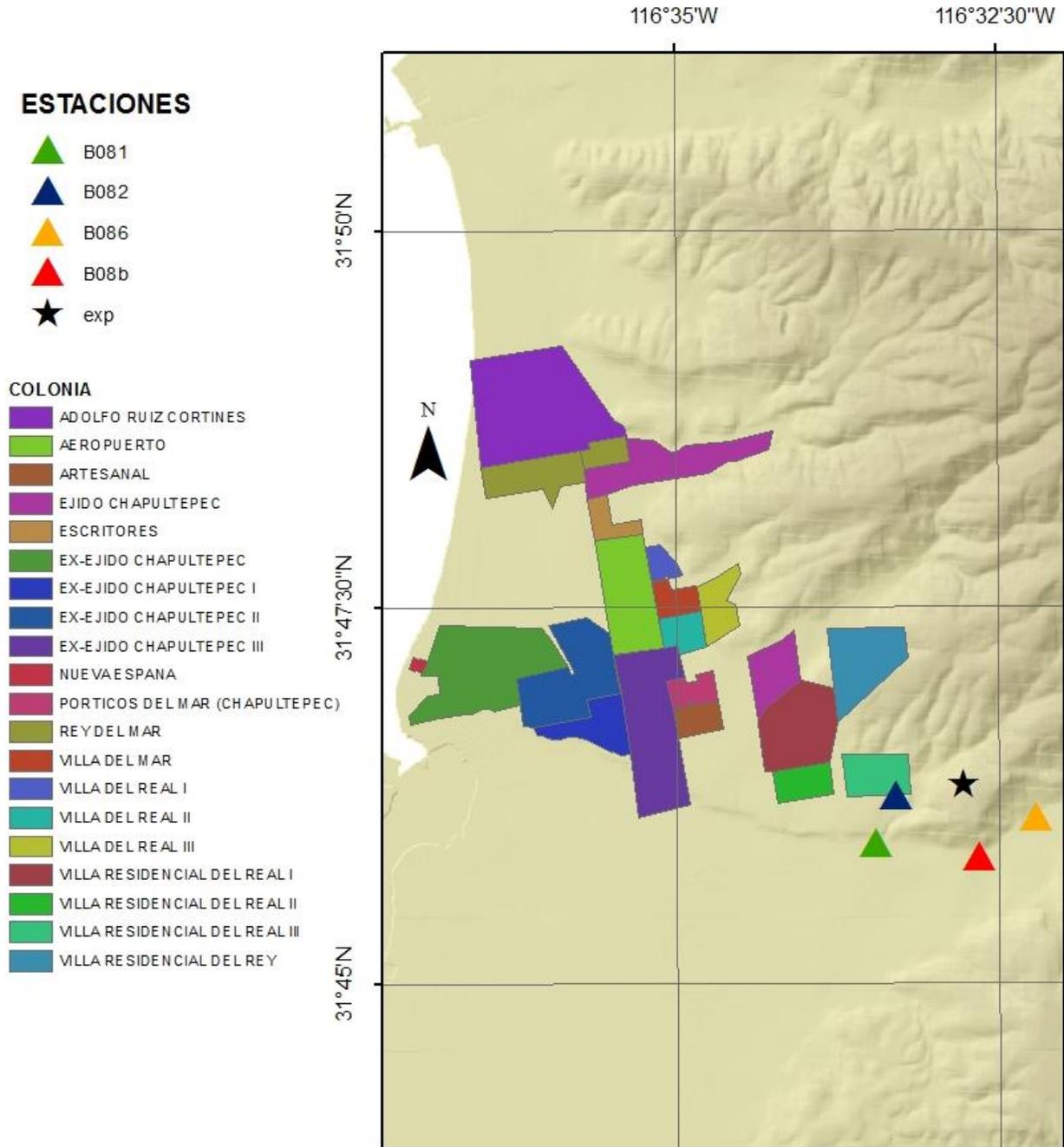
**Figura 2.** Zonificación de las diferentes geologías de la ciudad de Ensenada de acuerdo a Gastil et al. (1975), y la velocidad de las ondas de corte estimada por Soares (2003). El área de estudio de la presente tesis está indicada por el perímetro que forman las líneas paralelas.

### 1.1.3 Velocidad Pico de Partícula

Los estudios de explosiones en Baja California son escasos, por lo cual no se cuenta con datos previos en la zona estudio del presente trabajo. Sin embargo, en 2005 el Grupo de Sismología Aplicada a la Ingeniería del Departamento de Sismología de CICESE realizó el análisis de una explosión. En este análisis, comprobaron que los efectos que la explosión generaba se encontraban dentro de los límites de las normas competentes (**U.S. Bureau of mines en USBM R1 8507**). A su vez determinaron una ecuación predictiva para la velocidad pico de partícula ( $V_{pp}$ ) a través de un análisis de regresión lineal en función de la distancia escalada (la raíz cuadrada de la distancia del punto de detonación al sitio donde se quiere conocer la  $V_{pp}$ ) y la cantidad de carga a detonar por retardo.

## 1.2 Ubicación Geográfica

El área de estudio se localiza al sur de la ciudad de Ensenada, delimitada por el Ex-Ejido Chapultepec y el inicio del Valle de Maneadero. Cuenta con alrededor de 1,000 viviendas y trece colonias entre las que destacan Escritores, Aeropuerto, Chapultepec y de las más recientes Villas 1-7, Villas del Rey 1-2 y Pórticos (Figura 3). Conecta con el centro de la ciudad de Ensenada a través de la carretera Ensenada-Maneadero. Hasta el 2010 se tenía cuantificada una población económicamente activa de 10,000 personas. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía 26 de junio de 2013).



**Figura 3.** Mapa de ubicación de la zona de estudio. La explosión de cantera se ubica en la zona sur de la ciudad de Ensenada y colinda en casi todas sus direcciones con zonas residenciales y agrícolas (Maneadero). Los polígonos indican las colonias y los triángulos las estaciones de aceleración instaladas para registrar la explosión (indicada con asterisco)

### 1.3 Justificación

Debido al rápido crecimiento de la población de Ensenada y al poco espacio disponible en la zona centro, el desarrollo de la ciudad ha sido hacia el sur de ésta, donde no hace más de 15 años atrás el desarrollo era escaso. Ahora se pueden apreciar centros comerciales, plazas, escuelas, unidades médicas y una concentración poblacional importante y en constante crecimiento. Todas estas construcciones están cimentadas en su mayoría en suelos sedimentarios de acuerdo a la de la geología superficial descrita por Gastil et al. (1975). Estos sedimentos pueden en un momento dado, tras la ocurrencia de un sismo, amplificar el movimiento del terreno. Es por ello que se pretende con ayuda de vibraciones ambientales utilizar la técnica SPAC (autocorrelación espacial) y cocientes espectrales para conocer las características dinámicas del suelo ( $T$ ,  $V_{s30}$ ). Adicionalmente, decidimos estudiar los efectos de una explosión realizada en un cerro cercano a la colonia Villas del Real II para conocer la  $V_{pp}$ .

### 1.4 Objetivo General

El propósito del presente trabajo, es caracterizar la respuesta sísmica del suelo en donde se está concentrando la población de la zona sur de la ciudad de Ensenada. Los parámetros que se desean conocer son:

- Periodos dominantes del movimiento de suelo.
- Velocidad pico de partícula.
- Velocidad de propagación de ondas de corte de los primeros 30 m del subsuelo.

#### 1.4.1 Objetivos Particulares

- Determinar las aceleraciones máximas, las velocidades máximas y los desplazamientos máximos provocados por dos explosiones de cantera, llevadas a cabo en la zona sur de la ciudad de Ensenada.

- Localizar el epicentro y tiempo de origen de una explosión con la mayor precisión posible (latitud, longitud y tiempo origen).
- Estimar los valores pico de los cocientes espectrales H/V y el período natural del sitio.
- Estimar las velocidades de onda de corte  $V_{s30}$  y la velocidad pico de partícula

## 1.5 Estructura de la Tesis

En el Capítulo 2 se abordará el tema de la geología superficial así como también de los procesos tectónicos que dan origen a la sismicidad que afecta al área de estudio.

En el Capítulo 3 se hablará de la metodología que se usó para desarrollar la presente tesis, desde las técnicas utilizadas, sitios elegidos, campañas de adquisición y descripción del paquete de cómputo utilizado

En el Capítulo 4 se mostrarán los resultados obtenidos: mapas de zonificación con los parámetros que se desean conocer. Además se hará una interpretación de los resultados obtenidos.

En el Capítulo 5 las Conclusiones y recomendaciones son presentadas.

## Capítulo 2. Marco Geológico y Tectónico

---

### 2.1 Geología Superficial

La geología regional está definida por un gran evento orogénico ocurrido en el Jurásico Tardío - Cretácico, que consistió en el emplazamiento de rocas batolíticas asociadas a un arco volcánico (Gastil, 1975; en Gil, 2010). La mayor parte de los emplazamientos batolíticos ocurrieron durante y después de los depósitos y emisiones magmáticas que dieron origen a la Formación Alisitos (Morán, 1982). A lo largo de valle de Maneadero y las zonas aledañas se ubican tres tipos de depósitos: prebatolíticos, batolíticos y postbatolíticos.

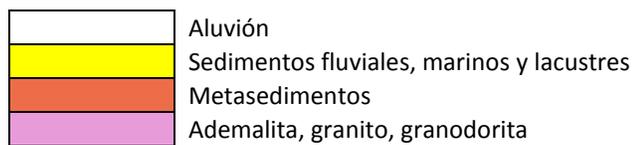
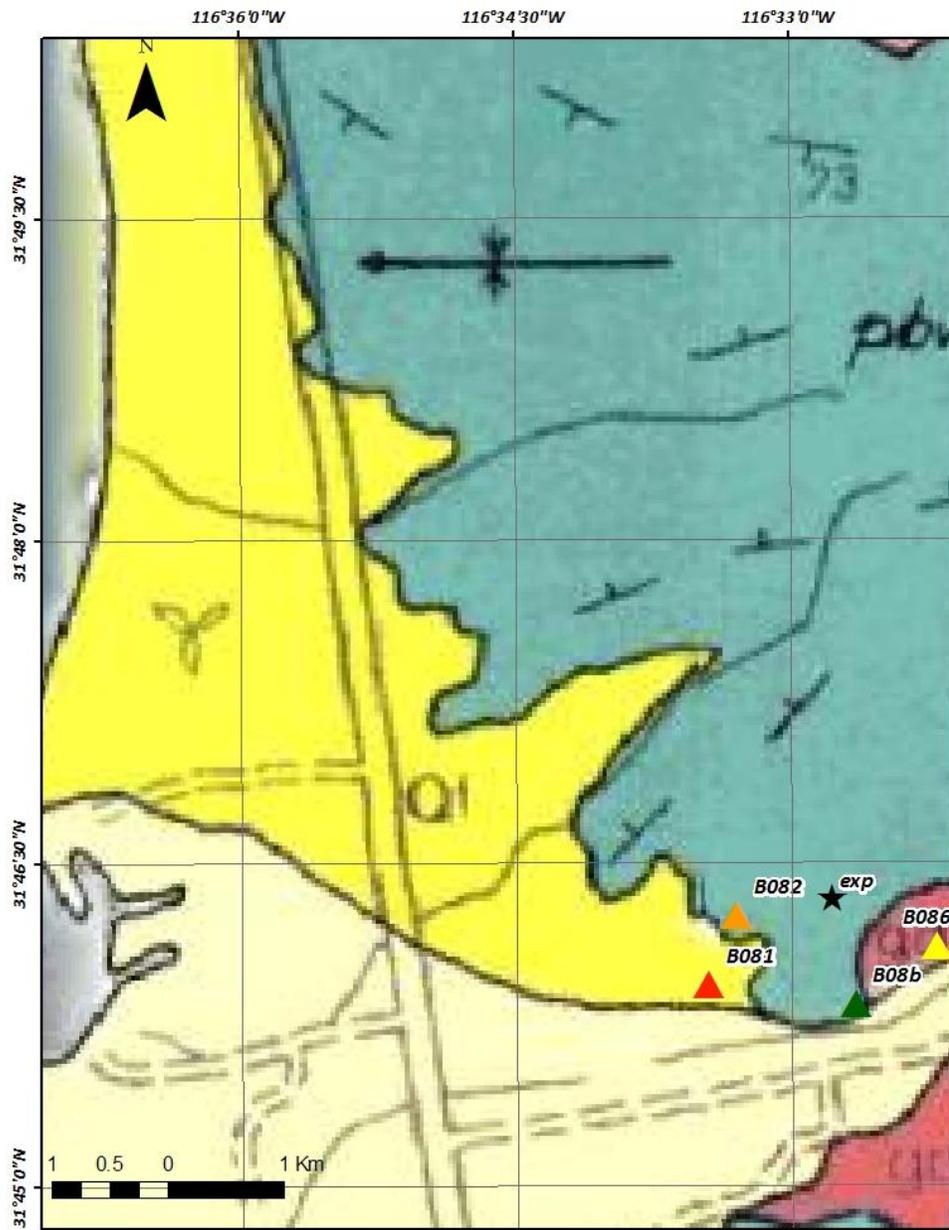
Las rocas prebatolíticas pertenecen a depósitos del Jurásico, donde el principal proceso de deposición fue actividad volcánica calco-alcalino (Demant y Robin, 1975). Hacia el oriente del Valle de Maneadero, la Formación Alisitos está representada por Calizas (Gastil, 1975; en Gil, 2010). Las rocas batolíticas están conformados por plutones, en su mayoría de composición granodioríticas, diorítica y gabroica (Gastil, 1975; en Gil, 2010), este tipo de afloramiento se localiza en las orillas del Arroyo San Carlos.

Las rocas postbatolíticas comprenden rocas marinas del Cretácico Superior, rocas volcánicas del Cenozoico Superior; terrazas marinas, aluvión del Cuaternario y abanicos aluviales (Allen, 1960).

En la Figura 4 se puede apreciar la geología superficial según la clasificación de Gastil *et al.* (1975). Geológicamente hablando el norte de la península de Baja California se puede dividir en tres provincias estructurales: la extensional del Golfo, el bloque peninsular estable y la zona de deformación activa (Stock *et al.*, 1991). (Figura 5)

La Zona de Deformación Activa se caracteriza por tener una geología compleja debido a que experimenta la deformación que ocurre por la separación del Golfo de California y por el sistema de fallas de San Andrés. Es común encontrar metasedimentos con la presencia de aluvión además de afloramientos de rocas como el granito, la diorita graniodorita y tonalita (Gastil *et al.*, 1975).

La ciudad de Ensenada y la zona rural al sur se localizan sobre una planicie llena de sedimentos producto de la erosión de las Sierras peninsulares, sobre la cual hay material aluvial (Pérez *et al.*, 2004).



**Figura 4.** Sección del mapa geológico de Gastil et al. (1975) que muestra la zona de estudio. Además, se indica los sitios (triángulos en color) en donde se registró la explosión de cantera (asterisco).

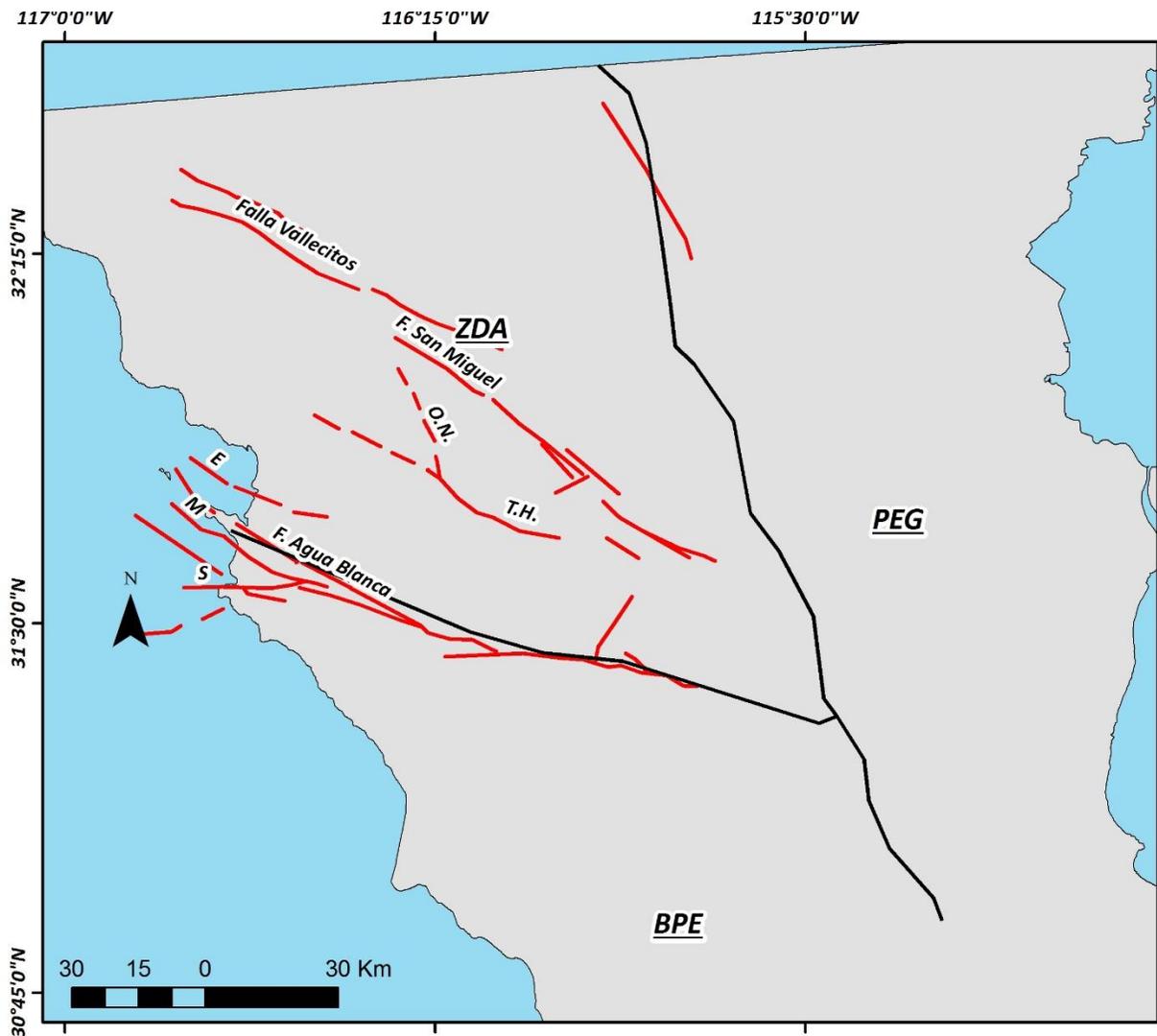


Figura 5. Mapa con las fallas principales de la región de la Zona de Deformación Activa (ZDA). Se muestran las 3 provincias estructurales (Stock et al., 1991) y la división entre ellas (ZDA), Provincia Estructural del Golfo (PEG) y el Bloque Peninsular Estable (BPE).

Se sabe que la península de Baja California está sufriendo un proceso de separación relativo al resto del país, con una velocidad de 6 cm por año (Díez, 1995) ya que pertenecen a diferentes placas tectónicas, mientras que Baja California pertenece a la placa del Pacífico el resto de México pertenece a la placa de Norteamérica. Este fenómeno causa sismos principalmente en el sistema de fallas San Andrés-Golfo de California, pero esto no quiere decir que sea la única región activa sísmicamente hablando de Baja California.

En lo que respecta al municipio de Ensenada, son varias las fallas descubiertas hasta el día de hoy con presencia de sismicidad, Falla Sierra Juárez, Falla San Pedro Mártir, Zona de Fallas San Miguel-Vallecitos-

calabazas, Falla Tres Hermanos, Falla de Ojos Negros y Falla Agua Blanca. A continuación se describe de forma breve las características de las principales fallas antes mencionadas para entender el régimen tectónico de la zona de estudio y caracterizar el tipo de sismicidad.

## **2.2 Principales Fallas de la Región y Sismicidad**

Las fallas Agua Blanca, San Miguel-Vallecitos, Tres Hermanos y Ojos Negros son potencialmente peligrosas para los asentamientos humanos de la ciudad de Ensenada, debido a su cercanía. Se tienen registros históricos de cuatro eventos de magnitud mayor que 6. El impacto de estos sismos fue poco, debido a la poca densidad poblacional de la zona de Ensenada y un pequeño número de estructuras civiles.

### **2.2.1 Falla Agua Blanca**

Esta falla, tiene un movimiento de rumbo, además presenta características de falla normal con fuertes desplazamientos verticales que dan origen a la formación de valles, como es el caso de Santo Tomas y Maneadero (Wong *et al.*, 1987). Krause (1961, 1965) tras haber interpretado datos magnéticos infiere que la falla Agua Blanca continúa hacia el norte hasta el lado este de las Islas Coronado. Desde que se empezó a registrar la sismicidad de la falla Agua Blanca, no se le asocia sismos de magnitud moderada ( $5 \leq M \leq 7$ ). Esta aparente ausencia de sismicidad no puede tomarse como único parámetro para decir que la falla no tiene la capacidad de generar sismos fuertes. Estudios geológicos han demostrado una gran superficie de ruptura y deslizamiento en la época del holoceno. (Hatch, 1987; Rockwell *et. al.*, 1987). Ortega (1988) infiere que sismos de  $M=6.7 - 7.0$  deben recurrir frecuentemente en la falla, con un intervalo de recurrencia de 75 a 200 años y un desplazamiento de 0.5 a 1.0 m. Estos resultados indican que la Falla Agua Blanca es un elemento tectónico activo importante en el Norte de Baja California, México, y tiene la capacidad de producir terremotos de magnitud moderada ( $5 \leq M \leq 7$ ), a pesar de la ausencia de una sismicidad histórica significativa.

### 2.2.2 Sistema de Fallas San Miguel – Vallecitos – Calabazas.

Está constituido por cuatro fallas: Calabazas, Vallecitos, San Miguel y Tres Hermanos (Castillo, 2002). Es un sistema con alta actividad sísmica y se le asocian los terremotos de 5.7 en 1949 (falla Vallecitos) y los de San Miguel de magnitudes 6.8 y 6.6 en 1954 y 1956 respectivamente, el sismo de Pino Solo de 1975  $M_L = 5.1$  y el sismo de Cañón de la Presa en 1978  $M_L = 3.5$  (Castillo, 2002; Wong et al., 1987). A la falla San Miguel se le considera como una de las más activas del municipio de Ensenada. Es una estructura de desplazamiento lateral derecho y rumbo  $N60^\circ W$  que se extiende desde el sur de San Miguel hasta el oriente del Valle San Rafael. Es una falla escalonada que forma pendientes bajas, desplaza el drenaje y abanicos aluviales, genera manantiales y en ella se definen líneas de vegetación (Castillo, 2002). El inicio de la actividad de la falla San Miguel se sitúa en el Mioceno medio y su velocidad actual es de 0.1-3 mm/año (Castillo, 2002). La falla Vallecitos es la continuación NW de la falla San Miguel, es una falla dextral que geomorfológicamente forma escarpes y se observa al occidente del Valle de las Palmas. En la unión de la falla Vallecitos con la de San Miguel se puede apreciar microsismicidad (Frez y Frías, 1998). Por otro lado, la localización de la falla Calabazas está pobremente definida. Se trata de una falla dextral, que tiene expresiones geomorfológicas tales como escarpes, escalones y crecimiento de depósitos aluviales. Es visible desde el Plutón Pinal hasta el Valle de las Palmas.

**Falla Ojos Negros** No se tiene gran detalle de la falla Ojos Negros pero destaca su alto contenido de microsismicidad.

### 2.2.3 Zona de Fallas San Clemente-San Isidro.

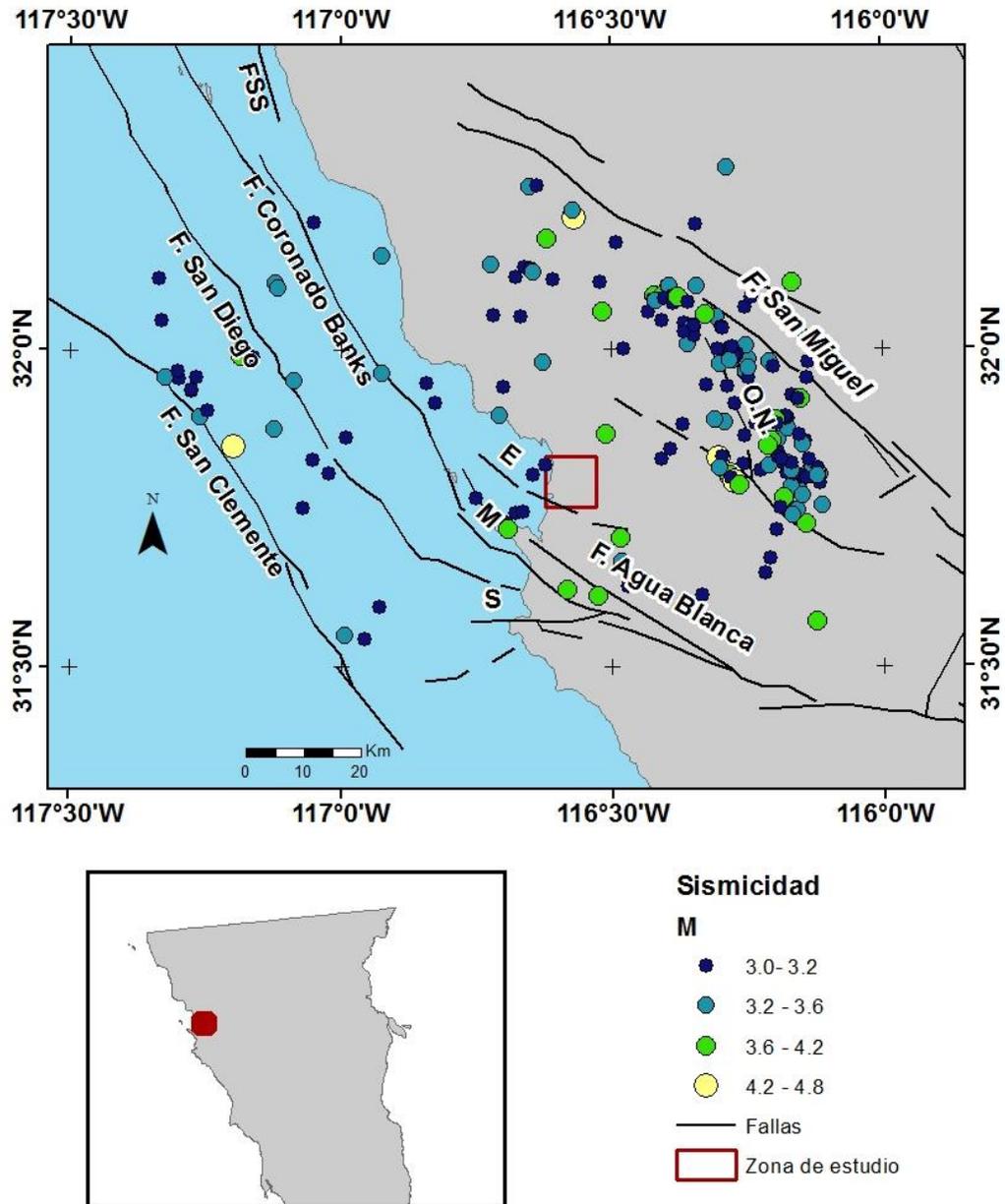
Legg y Keneddy (1979) concluyeron que la magnitud máxima que puede producir esta falla es de un sismo de 7.5 ( $M_L$ ). Tiene varios antecedentes de sismos importantes, el de mayor magnitud que se tiene registrado fue de 5.9 ( $M_L$ ) en 1951. Desde este año a la fecha los sismos más importantes varían su magnitud en un rango de entre 4 – 5 (Wong et al., 1987). Cuenta una longitud de más de 300 km. Se encuentra localizada en la parte occidental del borde continental y se encuentra delimitada por las fallas San Isidro y San Clemente, las cuales se han identificado como fallas de rumbo ( $N40^\circ W$ ). Ha sido identificada por Legg *et al.* (1991) usando perfiles de sísmica de reflexión, reflectores acústicos y mecanismos focales. La falla San Clemente es lateral derecha y a ella se asocian vetas hidrotermales, cañones y abanicos submarinos. Se desconoce su razón de desplazamiento (Legg *et al.*, 1991).

#### **2.2.4 Falla Coronado Bank.**

Se une con la falla Agua Blanca en la bahía de Ensenada. Ambas fallas tienen una orientación N30°W en la zona marina y de N70°W dentro de la península. Este cambio en la orientación de las fallas es la diferencia principal entre las estructuras del Borde Continental y las Peninsulares. Esta falla se localiza al oeste de punta Salsipuedes. Hacia el norte se bifurca entre las Islas de Coronado (Wong *et al.*, 1987).

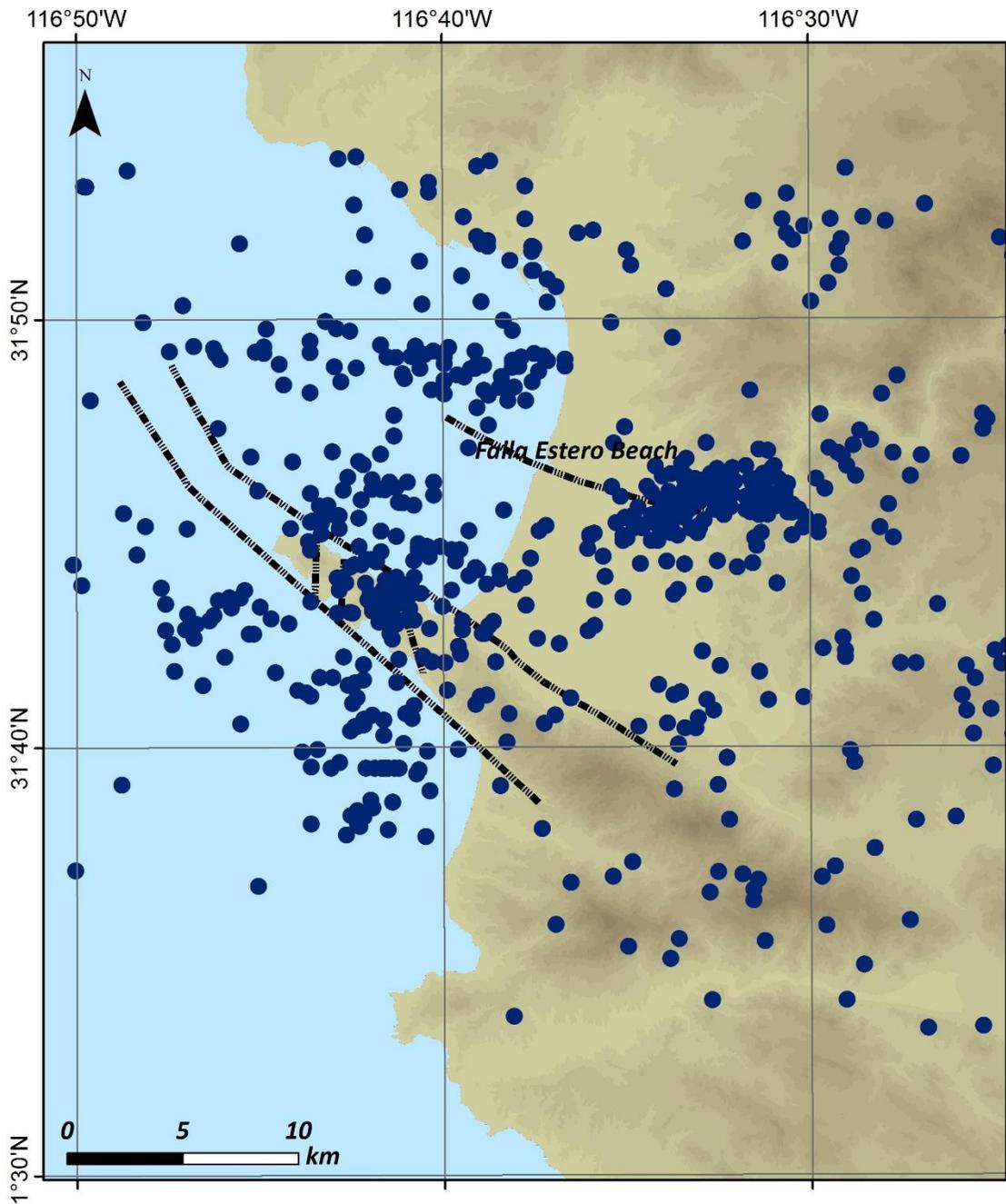
En general la sismicidad de la zona de deformación activa (Figura 5) se considera de magnitud baja ( $M < 3$ ), la mayoría de sus fallas tienden a desplazarse de forma lateral derecho. Es de destacar debido a la cercanía con el área de estudio por un lado, la falla Agua Blanca por su largo silencio sísmico y por otro la falla Ojos Negros, por su intensa actividad microsísmica. Se destaca la presencia de un sismo de magnitud entre  $4 \leq M \leq 4.8$  en el océano.

A continuación se muestra un mapa de la actividad sísmica en el intervalo de magnitud moderada ( $5 \leq M \leq 7$ ), de la región norte de Ensenada y alrededores (Figura 6), con el fin de evidenciar la actividad sísmica presente en la zona.



**Figura 6.** Mapa de la actividad sísmica de 2000 a 2016 para sismos mayores a 3 en  $M_l$ ). En el recuadro rojo se muestra la zona de estudio. En la parte superior está indicada una ampliación del recuadro rojo. E = Estero S= Soledad M = Maximinos O.N. = Ojos Negros.

En la Figura 7 se puede apreciar la microsismicidad de la región NW de Ensenada desde 1979 obtenida del catálogo de RESNOM, la cual aunque de baja magnitud ( $M_l < 3$ ) es considerable en cantidad (más de 400 eventos). Se puede apreciar además tres grupos, donde la actividad de punta banda está asociada a la falla Agua Blanca y sus diferentes ramales, dejando inciertos los orígenes de las agrupaciones de los demás eventos.



**Figura 7.** Mapa de la sismicidad ( $M < 3$ ) del área de estudio (círculos) obtenida del catálogo de RESNOM desde 1976 al presente año. Así mismo, se indica las fallas reportadas por Pérez *et al.* (2004).

### 2.2.5 Otras fallas.

Pérez *et al.* (2004) realizaron un estudio con datos gravimétricos en la zona de Punta Banda y el Valle de Maneadero. De la interpretación de sus resultados, propusieron fallas geológicas indicadas en la Figura

7. Suarez Vidal (comunicación personal), tomó como referencia la presencia de enjambres sísmicos para proponer una falla la cual nombró como Estero Beach (Figura 7). La propuesta de Suarez pudo confirmarse con el estudio de gravimetría de Pérez *et al.* (2004). La falla Estero Beach se encuentra en el extremo sur de la zona de estudio de la presente tesis.

## Capítulo 3 Metodología

---

Las metodologías para obtener los objetivos de esta tesis son las siguientes: SPAC, método de Nakamura y Velocidad pico de la partícula. La fuente de datos para SPAC y el método de Nakamura fue obtenida a partir de ruido ambiental; la fuente de  $V_{pp}$  fue una explosión de cantera. A continuación, exponemos un breve resumen sobre la ventaja del uso de ondas Rayleigh.

Las ondas superficiales son ondas que viajan a través de la superficie de un semiespacio. La presencia de una superficie libre hace que estas ondas sean muy diferentes a las ondas de cuerpo, como las ondas de compresión y las de corte. La existencia de las ondas Rayleigh fue predicha por Jhon Stutt en 1885, conocido como Lord Rayleigh. Después de su descubrimiento han surgido muchas contribuciones acerca de la propagación de las ondas superficiales y de procesos de inversión para obtener modelos de medios estratificados. Actualmente las ondas superficiales, especialmente de Rayleigh son ampliamente utilizadas para ensayos no destructivos y caracterizar el efecto de sitio.

Los métodos más populares que utilizan como fuente de ondas el ruido ambiental son, por ejemplo ReMi (Louie, 2001), SASW (Nazarian, 1983), SPAC (Aki, 1957), entre otros. En este trabajo nos enfocaremos al uso del método SPAC en el que se usan las curvas de dispersión de las ondas Rayleigh con el propósito de obtener la velocidad de ondas de corte.

### 3.1 Marco Teórico.

#### 3.1.1 Ruido Ambiental y Ondas Superficiales.

**Ondas Superficiales.** Una onda superficial se genera a partir de la interacción constructiva de las ondas P y S en las interfaces de un semiespacio. Las ondas superficiales se propagan de forma paralela a la superficie con una amplitud que decae con la distancia a la interface. Existen dos tipos de ondas que se propagan en la superficie las Rayleigh ( $P, S_v$ ) y las Love ( $S_h$ ) (Espíndola y Jiménez, 1994). Las ondas superficiales tienen dispersión y su propagación se describe con una velocidad de fase y una velocidad del grupo. Las ondas superficiales de muy largos periodos se tratan como ondas estacionarias, o modos normales, donde es necesario considerar el tamaño finito de la Tierra. (Stein y Wysession, 2009).

**Ruido Ambiental.** Diferentes fuentes naturales y artificiales generan ruido sísmico ambiental. Se puede definir al ruido ambiental como una señal sísmica en ausencia de señales trascendentales de interés, tales como terremotos. El ruido ambiental es parte del registro y trae consigo información, tanto de la fuente que lo genera así como del medio por el que se transporta. Depende del propósito que se tenga, el ruido se convierte en parte importante del trabajo o también una señal que puede enmascarar la energía de interés. (Zambrano, 2009).

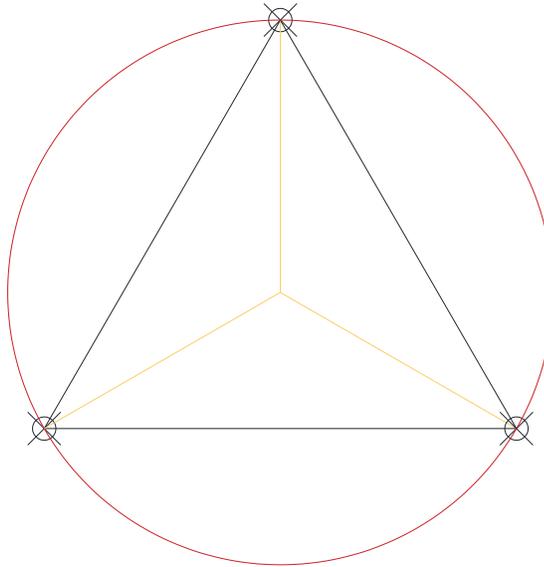
### 3.2 Método SPAC (*Spatial Analisis Autocorrelation*)

Tiene el propósito de obtener el modelo estructural somero del subsuelo a partir de registros de microtemores (vibración ambiental). Para ello se requiere registrarlos simultáneamente en varias estaciones que conforman un arreglo instrumental. Con esa información y mediante el procesado que describiremos a continuación se obtiene la curva de dispersión de ondas superficiales que posteriormente se usa para determinar la estructura de velocidades buscada. (Aki, 1957)

El método SPAC descrito por Aki (1957) consiste en un arreglo de estaciones dispuesto en forma circular con el fin de observar vibración ambiental como se muestra en la Figura 8. La función de autocorrelación que encontró está dada por:

$$\Phi(r, \theta, \omega) = \overline{u(0, 0, \omega, t) \times u(r, \theta, \omega, t)}, \quad (1)$$

Siendo  $\omega$  la frecuencia angular,  $t$  el periodo,  $r$  el radio del círculo,  $\theta$  el ángulo de rotación del punto  $i$  al  $i+1$ .



**Figura 8.** Arreglo típico usado para el método SPAC

La función de autocorrelación nos ayuda a determinar la dependencia de la señal en un mismo intervalo de tiempo pero distribuida en el espacio, esto para determinar los armónicos característicos contenidos en la serie de tiempo y su periodicidad.

Aki (1957), denominó al promedio azimutal de la función de autocorrelación (ecuación 2) como coeficientes de autocorrelación para una misma distancia radial.

$$c(f) \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[irk \cos(\theta - \Phi)] = j_0 \left( \frac{2\pi fr}{v(f)} \right) \quad (2)$$

Donde  $j_0$  es la función Bessel de primera especie y de orden cero,  $v(f)$  es la velocidad de fase de la frecuencia,  $r$  es el radio que forma el arreglo,  $\theta$  es el azimut,  $k$  es el número de onda y  $\Phi$  es Azimut de propagación de una onda plana a través del arreglo. El coeficiente también puede determinarse directamente en el dominio de la frecuencia utilizando la transformada rápida de Fourier con la siguiente expresión:

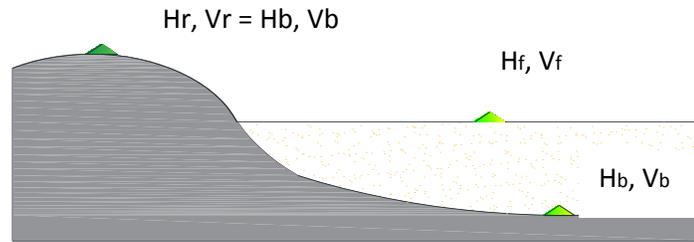
$$\bar{\Phi}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Re[S_{cx}(w, r, \theta)]}{\sqrt{S_c(w)} S_c(w, r, \theta)} d\theta \quad (3)$$

Donde  $S_{cx}$  es el espectro de potencia cruzado entre los dos puntos de observación,  $S_c$  es el espectro de potencia en el centro del arreglo y  $S_c$  es el espectro de potencia en el punto a la distancia  $r$  en la dirección  $\theta$

### 3.3 Método de Nakamura

Nakamura (1989) propuso una técnica para eliminar el efecto de la Fuente y de trayectoria para estimar el efecto de sitio. Esta técnica se basa en suponer una capa de sedimentos sobre el basamento rocoso, al realizar el cociente espectral entre la componente horizontal y vertical, puede identificarse la frecuencia preferencial de vibración de la capa de sedimentos; en cuanto la amplitud estará relacionada con el contraste de impedancias entre el basamento y los sedimentos (Figura 9).

Lachetl y Bard (1994) realizaron un análisis numérico para validar el método propuesto por Nakamura. Dentro de las principales conclusiones, afirman que sin importar la fuente, la técnica de Nakamura, muestra un pico espectral en la frecuencia preferencial de vibración de los sedimentos. La curva de elipticidad de las ondas Rayleigh tiene influencia en la forma de la relación H/V. Esto muestra que la relación H/V da una indicación fiable de la frecuencia de resonancia de una estructura de capas horizontales. Por el contrario, la amplitud del pico de H/V es sensible no sólo para el contraste de impedancias, sino también a parámetros tales como el coeficiente de Poisson. Por lo tanto, su uso para la determinación de la amplificación del movimiento horizontal parece prematuro desde un punto de vista estrictamente teórico.



**Figura 9.** Modelo geológico, la zona gris representa el basamento y la punteada representa la capa de sedimentos. Los triángulos representan registros del movimiento del suelo.  $H_r$  = Espectro de Fourier del movimiento horizontal en roca,  $V_r$  = Espectro de Fourier del movimiento Vertical en roca.

La técnica propuesta por Nakamura puede explicarse de la siguiente forma

$$T_h^*(\omega) = \frac{T_h(\omega)}{T_v(\omega)} \quad (5)$$

Donde

$T_h^*(\omega)$  es la función de transferencia del suelo.

$T_h(\omega)$  es la función de transferencia del movimiento horizontal del suelo.

$T_v(\omega)$  es la función de transferencia del movimiento vertical del suelo.

$$T_h^*(\omega) = \frac{T_h(\omega)}{T_v(\omega)} = \frac{H_f(\omega)/H_b(\omega)}{V_f(\omega)/V_b(\omega)} = \frac{H_f(\omega)}{V_f(\omega)} \frac{1}{H_b(\omega)/V_b(\omega)} \quad (6)$$

Donde

$H_f(\omega)$  es el espectro de Fourier de la componente horizontal en la superficie

$V_f(\omega)$  es el espectro de Fourier de la componente vertical en la superficie

$H_b(\omega)$  es el espectro de Fourier de la componente horizontal en la base

$V_b(\omega)$  es el espectro de Fourier de la componente vertical en la base

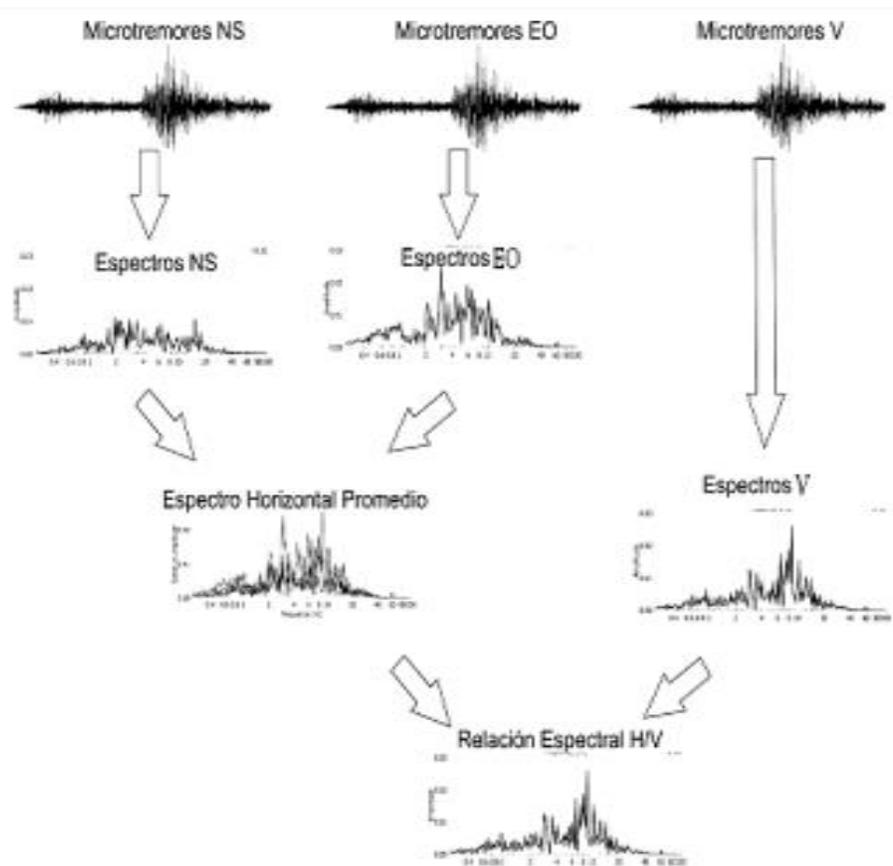
Nakamura postula que el ovimiento de las componentes verticales y horizontales en la base son semejantes

$$H_b(\omega)/V_b(\omega) = 1 \quad (7)$$

Sustituyendo en la ecuación 6 la ecuación puede reescribirse de la siguiente forma

$$T_h^*(\omega) = \frac{T_h(\omega)}{T_v(\omega)} = \frac{H_f(\omega)}{V_f(\omega)} \quad (8)$$

A continuación en la Figura 10 se muestra los pasos a seguir para obtener el cociente H/V



**Figura 10.** Diagrama de flujo para obtener el periodo natural del suelo (Jaramillo 2012)

### 3.4 Método Vpp

La velocidad pico de partícula ( $V_{pp}$ ) a diferentes frecuencias es el parámetro internacional más común para describir el movimiento del suelo producido por una explosión. La  $V_{pp}$  es utilizada como referencia para describir los daños que provocaría una voladura en un sitio dado. Dependiendo de la cantidad de explosivo, la geometría del arreglo y la distancia entre la fuente y la zona de interés, las estructuras estarán siendo alteradas por las vibraciones que el suelo experimenta a consecuencia de la explosión. Actualmente no hay una norma regional (Baja California) que indique la  $V_{pp}$  máxima; sin embargo, hay observaciones estadísticas para distintos tipos de suelo que indican las velocidades máximas permisibles y los efectos asociados a dicha velocidad, (Bollinger, 1980; Persson *et al.*, 1994).

(Persson, 1994) realizó un análisis de regresión lineal y estableció una ecuación predictiva para el sur de California, la cual fue utilizada en el presente trabajo para estimar la  $V_{pp}$ . Esta ecuación está en función de la distancia de la fuente al sitio de interés y de la cantidad de explosivo usado por retardo.

La ecuación está dada por:

$$V_{pp} = 1729 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.6} \quad (9)$$

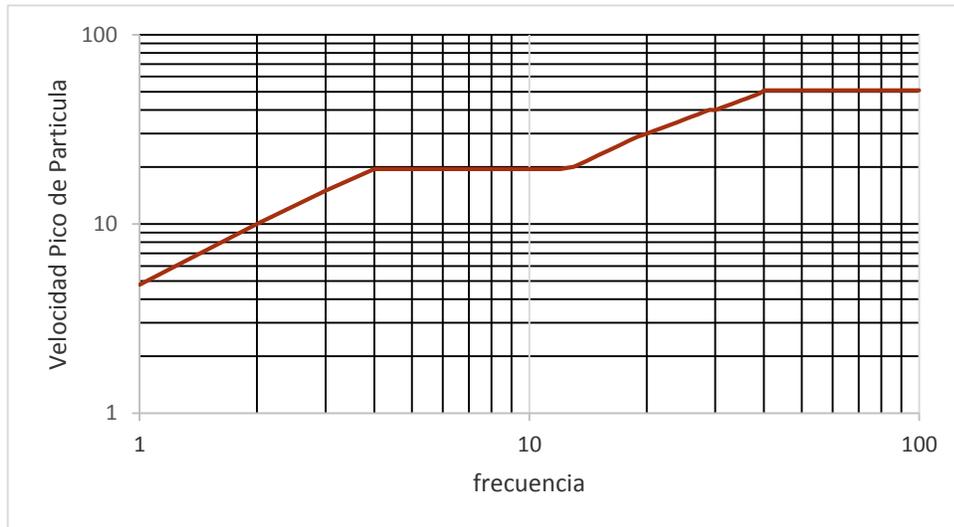
Donde:

$V_{pp}$  = velocidad pico de partícula en mm/s

$D$  = la distancia entre la estructura y la voladura en metros

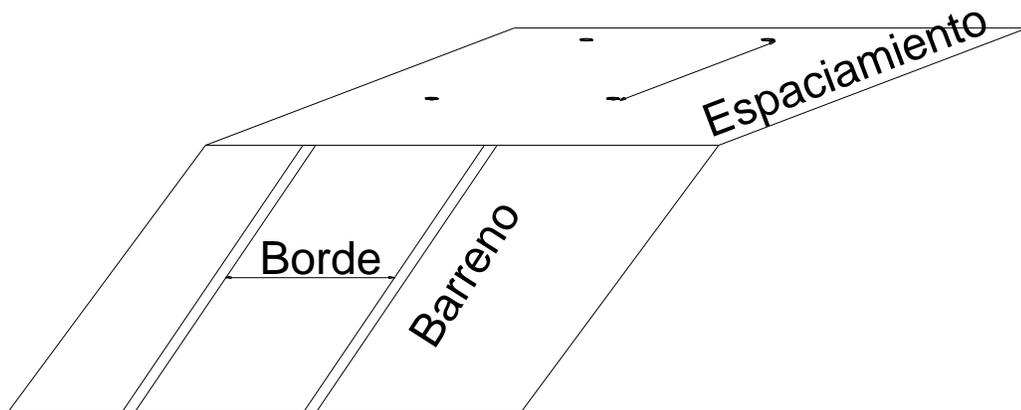
$W$  = la cantidad de explosivos por retardo en kg.

Según el autor de la ecuación el valor jamás deberá de ser mayor a 50 mm/s (Figura 11), en caso contrario se deberá de disminuir la carga, ya que la distancia se considera fija. Es aquí donde entra en un papel principal el tiempo de retardo, ya que este puede disminuir drásticamente el valor de la  $V_{pp}$ .



**Figura 11** Valores límite de velocidad para diferentes frecuencias par a evitar daño en estructuras de acuerdo a U.S. Bureau of mines en USBM R1 8507 (Siskind *et al.* 1980)

El rango de frecuencias registrados en vibraciones inducidas por voladuras está entre 0.5 y 200 Hz. En algunos casos la frecuencia predominante está asociada con el borde y la velocidad de onda P (Figura 12)



**Figura 12.** Esquema típico de explosión

### 3.5 Programación

En la presente tesis, se utilizó el software GEOPSY para realizar las metodologías que emplean el ruido ambiental (SPAC Y H/V). Para procesar la explosión se utilizó el programa SEISAN y un código realizado en ambiente de Matlab.

Geopsy es un software de distribución gratuita para la investigación y las aplicaciones geofísicas creado durante el proyecto europeo SESAME. Este proyecto ha proporcionado las herramientas para el procesamiento de las vibraciones ambientales con el fin de caracterizar la respuesta del sitio. Geopsy ha sido distribuido desde el año 2005 (Wathelet, 2005). Progresivamente, las técnicas más convencionales (tales como SPAC, MASW o refracción) se incluyeron para ofrecer una mayor variedad de procesamiento. Cuenta también con una plataforma integral y gratuita para la interpretación de experimentos geofísicos. A continuación se muestra un esquema del algoritmo de trabajo de Geopsy para invertir la curva de dispersión de las ondas Rayleigh. (Figura 13).

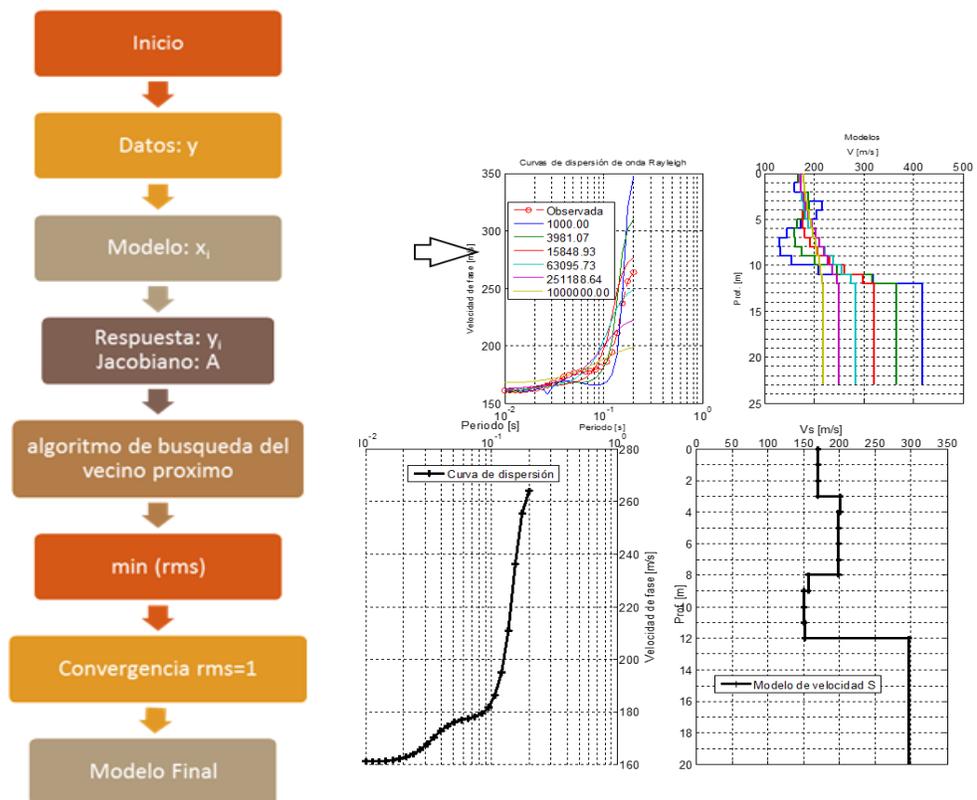


Figura 13 Esquema de trabajo del módulo *dinver* presente en el programa Geopsy

## Capítulo 4 Adquisición de datos

### 4.1 Adquisición SPAC

Se llevaron a cabo campañas de adquisición con 8 sensores triaxiales SARA con una frecuencia natural de 2 Hz. Se tomó de 30 minutos a 45 minutos a 100 m.p.s. en cada sitio (Figura 14). La ganancia del sensor se puede apreciar en la Figura 15.



Figura 14. Esquema de adquisición de datos de vibración ambiental.

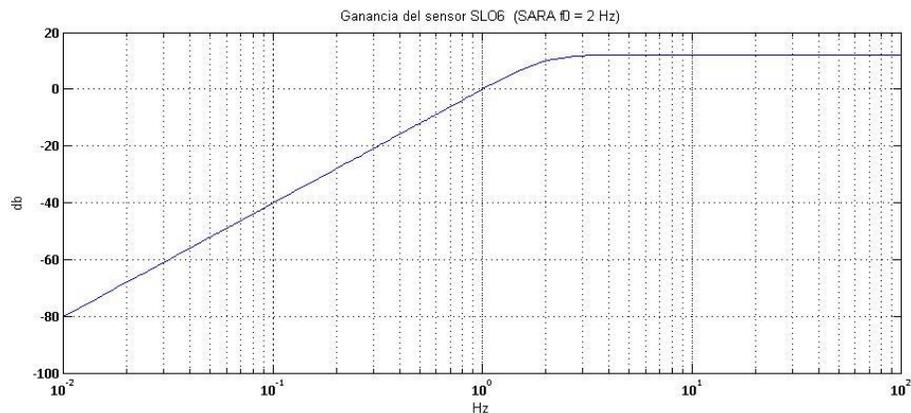


Figura 15. Respuesta en Frecuencia del sensor SARA (SLO6)

Los sitios seleccionados fueron tomados en cuenta por su fácil acceso y superficie, ya que para llevar a cabo el experimento se requiere aproximadamente 400 m.<sup>2</sup> A su vez, se intentó tener la mayor cobertura norte – sur, este – oeste del área. Y por último se buscó tener al menos un registro por cada variación de geología superficial según el mapa de Gastil *et al* (1975).

#### 4.1.1 Descripción de los sitios

**CONALEP.**- Se optó por este sitio gracias a su amplio espacio libre, ubicado a unos 180 m. de la costa, y a unos 2000 metros del cerro. El tipo de suelo es firme, sin presencia de pendientes pronunciadas. La presencia de viento y el paso de peatones son importantes, no se detectó influencia de vehículos.



Figura 16 Imagen del sitio CONALEP

**Macroplaza.** - Este sitio presento problemas en cuanto al espacio, por lo que se optó por utilizar un arreglo en forma de 'ele', el terreno no era muy firme y la presencia de vegetación es considerable, situado a 500 m, del cerro ya 170 metros de la Av. Reforma

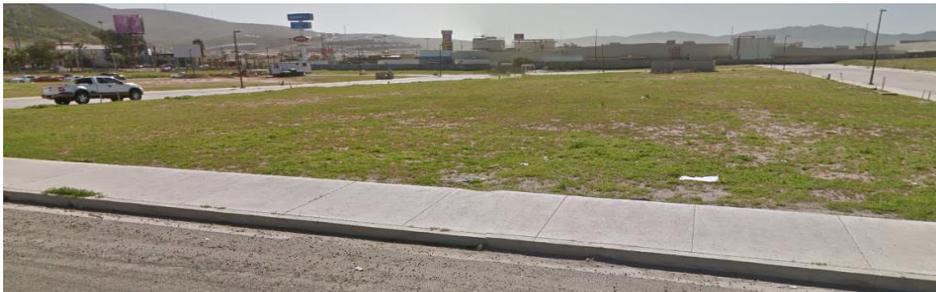


Figura 17. Imagen del sitio Macroplaza

**Tecnológico.-** Situado a 1300 m del cerro es un sitio que no presenta problemas de espacio, el terreno presentaba muchas irregularidades, se retiró la capa vegetal en los puntos donde se colocó el equipo



**Figura 18** Imagen del sitio Tecnológico

**Cerro.-** Situado a 100 m. del cerro no hubo limitación de espacio, en este sitio se utilizó un arreglo lineal de 100m con un equipo de sísmica de reflexión de 24 canales, la presencia de maquinaria de construcción era muy marcada.



**Figura 19.** Imagen del sitio Cerro

**Campito.-** Terreno que se apreciaba nivelado, con suelo compactado, sin presencia de vegetación y sin problemas de espacio separado 1200 m. con respecto del cerro.



**Figura 20** Imagen del sitio Campito

**Parque.-** Terreno muy accidentado, con mucha vegetación, se apreciaba firme en todas sus zonas, se encuentra a 550 m, del cerro



**Figura 21** Imagen del sitio Parque

**Motel Tony.-** Es un sitio que presento problemas de espacio, se tuvo que adaptar el equipo a una forma cuadrada, el terreno se notaba suelto, poco consolidado y con presencia de vegetación, a 17m. de la calle principal de Chapultepec con un alto volumen vehicular



**Figura 22** Imagen del sitio Motel Tony

**El Faro.-** Es el sitio más alejado del cerro, con casi 5000 m. de distancia, era un terreno poco consolidado con presencia de vegetación, y alta actividad humana.



**Figura 23.** Imagen del sitio El Faro

En la Figura 24 se muestra el resumen de los sitios que se consideraron para realizar el método SPAC.

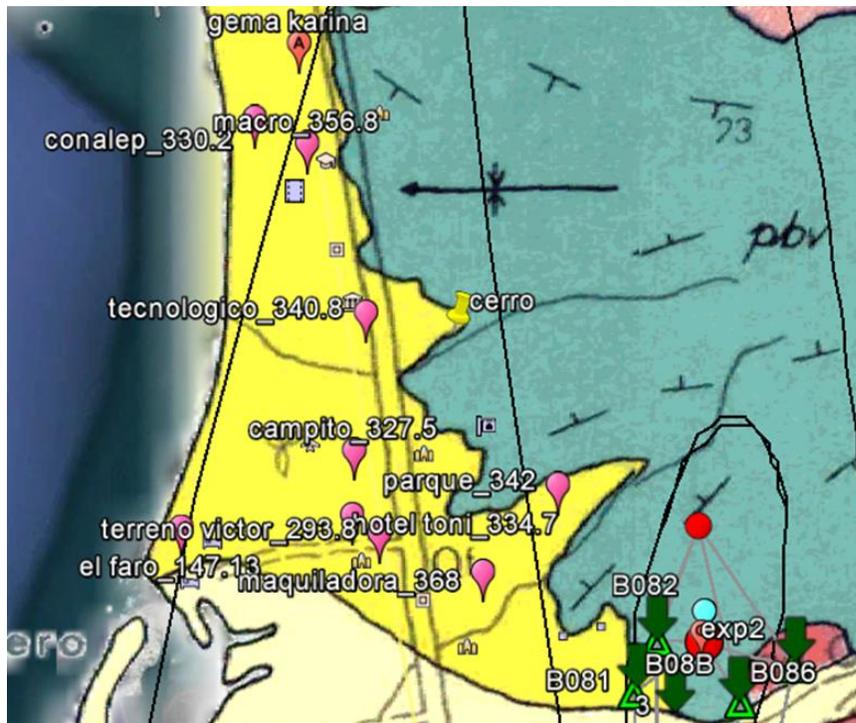
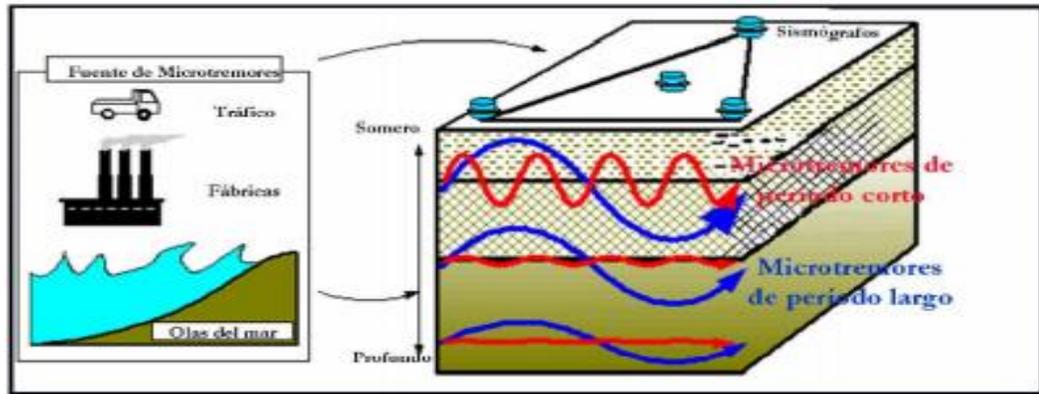


Figura 24. Resumen de los sitios donde se realizó el método SPAC

#### 4.1.2 Geometría de los arreglos

La disposición de los sensores tiene su justificación en el grado de resolución que se desea obtener, es decir, los sensores con una distancia de separación grande, captarán longitudes de ondas mayores que sensores que se encuentren más juntos. Longitudes de ondas cortas mostrarán información de las capas más someras, mientras que las longitudes de onda más largas, darán información de los estratos más profundos (Figura 25).



**Figura 25.** Geometría típica de un arreglo de sensores para el método SPAC. En la figura también se observan las fuentes de señales que se aprovechan en el estudio y el nivel de resolución que se puede obtener (Figura tomada de Hayashi, 2005).

En la tabla 1 se muestra el nombre de los arreglos y la geometría que se decidió utilizar para cada sitio.

**Tabla 1.** Sitios seleccionados para realizar la técnica SPAC

| Sitio | Nombre         | Arreglo          |
|-------|----------------|------------------|
| 1     | MACROPLAZA     | ARREGLO EN L     |
| 2     | TECNOLOGICO    | ARREGLO CIRCULAR |
| 3     | CONALEP        | ARREGLO CIRCULAR |
| 4     | TERRENO VICTOR | ARREGLO EN X     |
| 5     | EL FARO        | ARREGLO CIRCULAR |
| 6     | CAMPITO        | ARREGLO CIRCULAR |
| 7     | MOTEL TONY     | ARREGLO CUADRADO |
| 8     | CERRO          | ARREGLO LINEAL   |
| 9     | MAQUILADORA    | ARREGLO CIRCULAR |
| 10    | MERCADO        | ARREGLO CIRCULAR |
| 11    | PARQUE         | ARREGLO CIRCULAR |

#### 4.4 Adquisición H/V

Tomando como referencia los sitios donde se realizó el método SPAC y otros sitios se han llevado a cabo dos campañas de adquisición. La primera con un sismómetro SARA triaxial de frecuencia natural ( $f_0 = 2$  Hz, periodo corto) y la segunda con un sismómetro PMD triaxial de frecuencia natural ( $f_0 = 10$  Hz,

periodo intermedio) con la finalidad de corroborar los resultados y el alcance del primer sensor. En la tabla 2 aparecen las coordenadas y el nombre de los sitios que se han seleccionado para usar la técnica de Nakamura.

**Tabla 2.** Coordenadas de los sitios de adquisición

| <b>Sitio</b>        | <b>Latitud</b> | <b>Longitud</b> | <b>T<sub>0</sub></b> |
|---------------------|----------------|-----------------|----------------------|
| Cerro               | -116.581668    | 31.8056773      | 0.27                 |
| Calle J Vasconcelos | -116.589976    | 31.7999483      | 0.70                 |
| Campo               | -116.595147    | 31.788976       | 1.25                 |
| C. D.               | -116.591482    | 31.8272626      | 0.34                 |
| CONALEP             | -116.606414    | 31.8247294      | 0.84                 |
| Parque              | -116.568061    | 31.7850256      | 0.16                 |
| Esc. Campo Militar  | -116.605435    | 31.8088116      | 1.60                 |
| Hotel Tony          | -116.595296    | 31.7814521      | 1.96                 |
| Macroplaza          | -116.601338    | 31.8231979      | 0.44                 |
| Tecnologico         | -116.588901    | 31.801686       | 0.45                 |
| Playa Monaliza      | -116.616343    | 31.784666       | 1.23                 |
| Mercado Mayorista   | -116.587129    | 31.7820935      | 0.83                 |
| Terreno Victor      | -116.59164     | 31.7794556      | 1.61                 |
| ZM2                 | -116.610822    | 31.8041007      | 2.00                 |
| P6                  | -116.592643    | 31.8179918      | 0.18                 |
| P7                  | -116.610577    | 31.7894662      | 2.85                 |
| Costco              | -116.59534     | 31.817432       | 0.69                 |
| Faro                | -116.617462    | 31.779644       | 1.71                 |
| ZM1                 | -116.610231    | 31.8064265      | 2.22                 |

Y a continuación se muestra un mapa de los puntos desplegados en la ciudad (Figura 26).

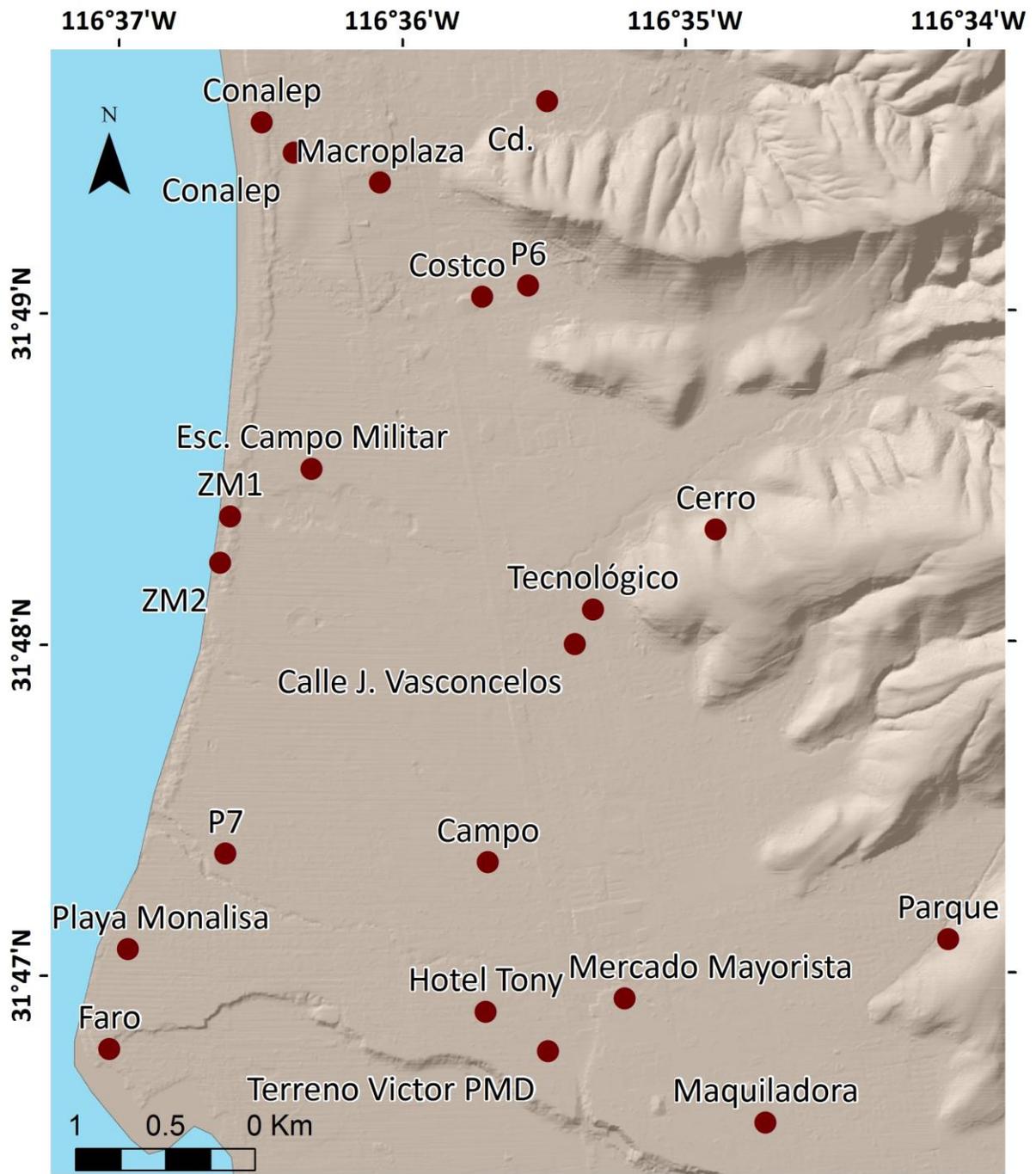


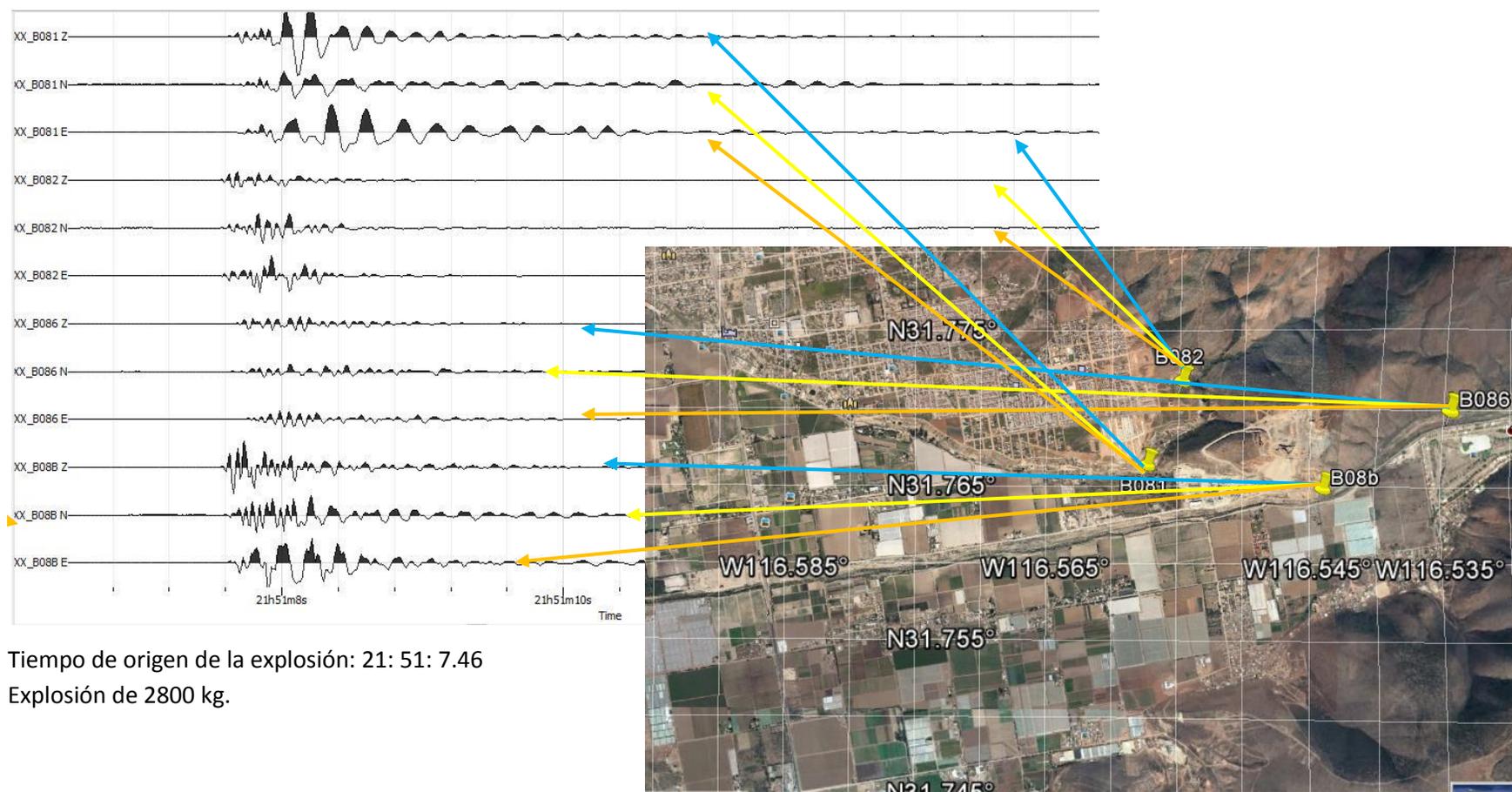
Figura 26. Sitios donde se tomaron muestras de ruido para el cálculo de los cocientes espectrales H/V.

## 4.5 Explosiones de cantera

Se llevó a cabo una explosión de cantera que se registró con sensores de aceleración dispuestos en un arreglo mostrado en la Figura 27. Las coordenadas de instalación y el sitio de la explosión se muestran en la Tabla 3. El sitio de ubicación de la explosión se determinó a partir de los primeros arribos de las ondas P, usando el programa SEISAN en combinación con el modelo de corteza propuesto por Nava y Brune (1982).

**Tabla 3.** Ubicación de los acelerógrafos instalados para el registro de la explosión (Exp), de la cual se incluye también su localización.

| <b>Estación</b> | <b>Latitud</b>    | <b>Longitud</b>    |
|-----------------|-------------------|--------------------|
| B082            | 31° 46' 15.25'' N | 116° 33' 18.11'' W |
| B081            | 31° 45' 55.84'' N | 116° 33' 27.36'' W |
| B08B            | 31° 45' 50.45'' N | 116° 32' 39.27'' W |
| B086            | 31° 46' 06.47'' N | 116° 32' 12.58'' W |
| B086            | 31° 46' 06.47'' N | 116° 32' 12.58'' W |
| Exp             | 31° 46' 15.6'' N  | 116° 32' 52.08'' W |



Tiempo de origen de la explosión: 21: 51: 7.46

Explosión de 2800 kg.

**Figura 27.** Disposición de la geometría de las estaciones utilizadas para registrar la explosión. Las flechas verdes representan los sitios de ubicación de los acelerógrafos, mientras que el círculo rojo representa el sitio de detonación. Se muestran las series de tiempo (3 componentes Z, N, E) obtenidas. También se indica la fecha de la explosión (dd/mm/aaaa) y el tiempo de origen calculado de la detonación (hh:mm:ss). Las líneas Azul (Vertical), Amarillo (Norte) y Naranja (Este) indican el sismograma correspondiente a cada estación.

## 4.6 Equipo utilizado

La Figura 28 muestra el tipo de equipo utilizado para el registro del ruido ambiental. El equipo PMD (a) fue utilizado para el registro de ruido usado en el cálculo de H/V. El equipo SARA (b) se utilizó en la toma de registros de ruido usando diferentes geometrías de arreglos para la técnica SPAC y H/V. La combinación de la instrumentación Grabadora Reftek-130 y acelerómetro Episensor fue utilizado para el registro de la explosión de cantera.



a)



b)



c)

**Figura 28** Equipo utilizado para el registro de los datos de la presente tesis: (a) Grabadora y sismómetro PMD, (b) Grabadora y sismómetro Sara, (C) Grabadora Reftek-130 y acelerómetro Episensor.

## Capítulo 5 Procesamiento de datos y resultados

---

### 5.1 SPAC

A continuación se mostrará, como un ejemplo del cálculo realizado, el procedimiento para obtener la curva de dispersión de las ondas Rayleigh en el sitio CONALEP. Este mismo cálculo se realizó en 10 sitios adicionales. A continuación, en la sección de resultados, se mostrará un mapa de zonificación para el área de estudio en función de la velocidad promedio de ondas de corte de los primeros 30 m del subsuelo ( $V_{S30}$ ).

#### 5.1.1 Sismogramas.

Se programó la grabadora SARA para que grabara paquetes de información de 15 minutos continuos de registro. Con el programa Geopsy procedimos a juntar los paquetes grabados para tener un único registro continuo por sitio. Lo explicado anteriormente se puede apreciar en las Figuras 29 y 30.

Para conservar las partes más estacionarias del ruido ambiental y evitar los procesos transitorios (como paso de peatones, tráfico cercano, maquinaria) se modificaron los parámetros indicados en la Tabla 4 en un módulo de Geopsy para elegir las secciones más estables de los registros. Este módulo consiste en un algoritmo conocido como *antitrigger*, el cual detecta transitorios, los cuales no son considerados para el procesado.

Suárez *et al.* (2012) explican:

El procedimiento para detectar transitorios se basa en una comparación entre dos promedios de amplitudes de la señal analizada. Uno de ellos es un promedio de periodo corto (*sta*, por las siglas de *short term average*), o sea, el promedio de la amplitud de la señal durante un periodo corto de tiempo, denotado "*tsta*" (típicamente 0,5 – 2,0 s). El otro es un promedio de periodo largo (*lta*, por las siglas de *long term average*), o sea, el promedio de la amplitud de la señal durante un periodo largo de tiempo, denotado "*tlta*" (típicamente varias decenas de segundos). Cuando el cociente *sta/lta* excede un umbral previamente establecido, se considera que se detecta un "evento".

En nuestro caso, el “evento” es el transitorio, el que una vez detectado, no se considera en el procesamiento.

El criterio de selección de ventanas fue tomado de las recomendaciones de SESAME (2004). Un ejemplo del uso del algoritmo de selección se muestra en la Figura 31, mientras que los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 4.

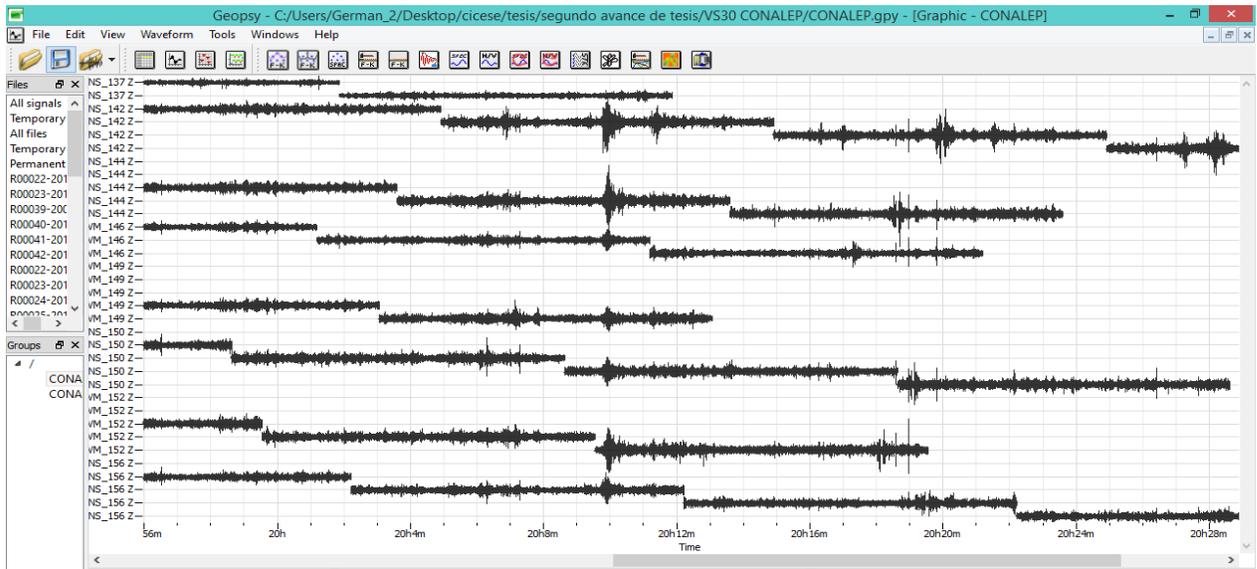


Figura 29. Paquetes de 15 minutos de registro del sitio CONALEP.

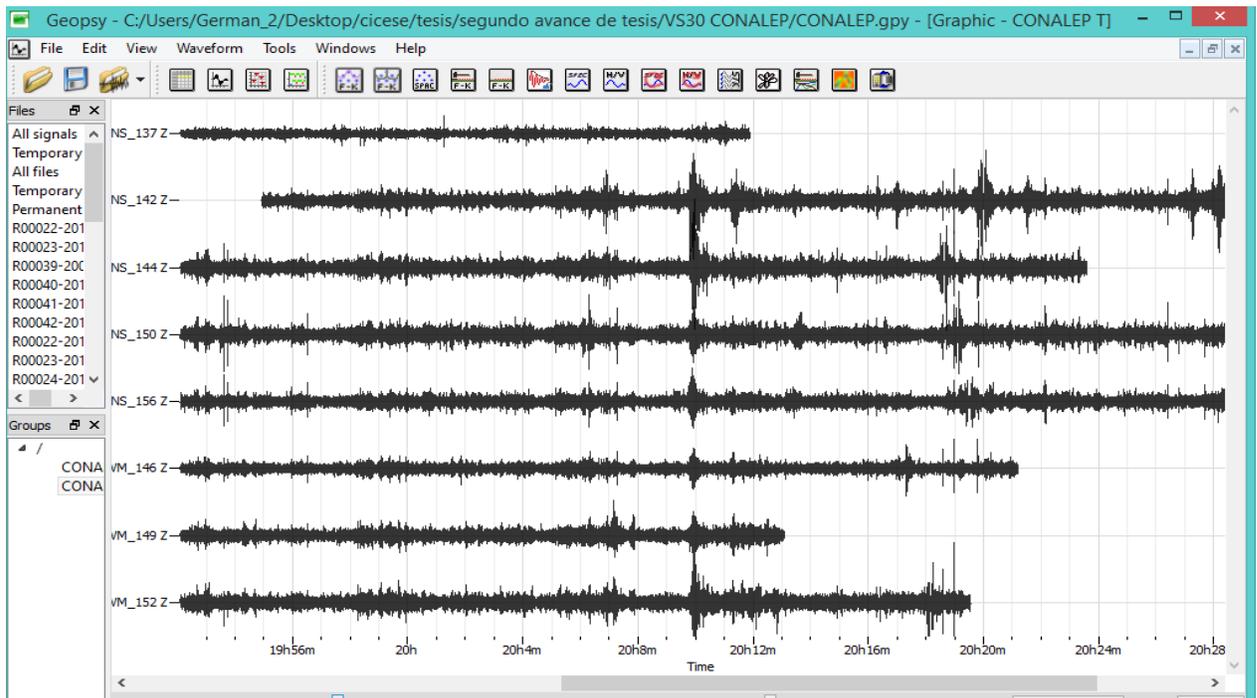


Figura 30. Registro continuo del sitio CONALEP.

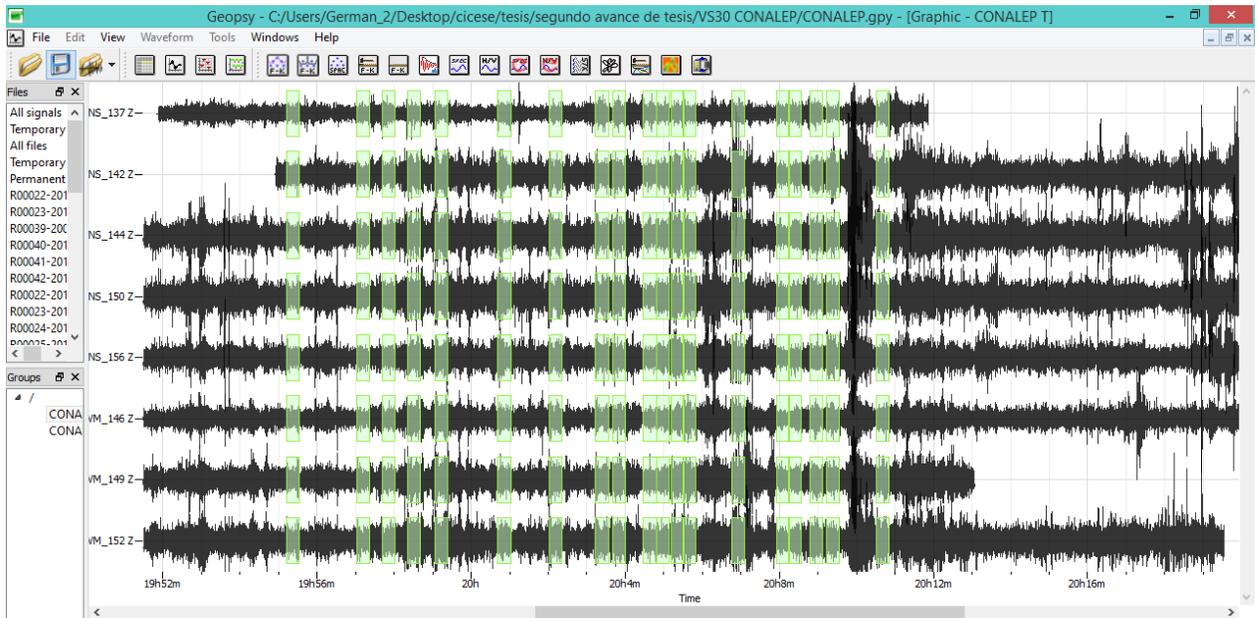
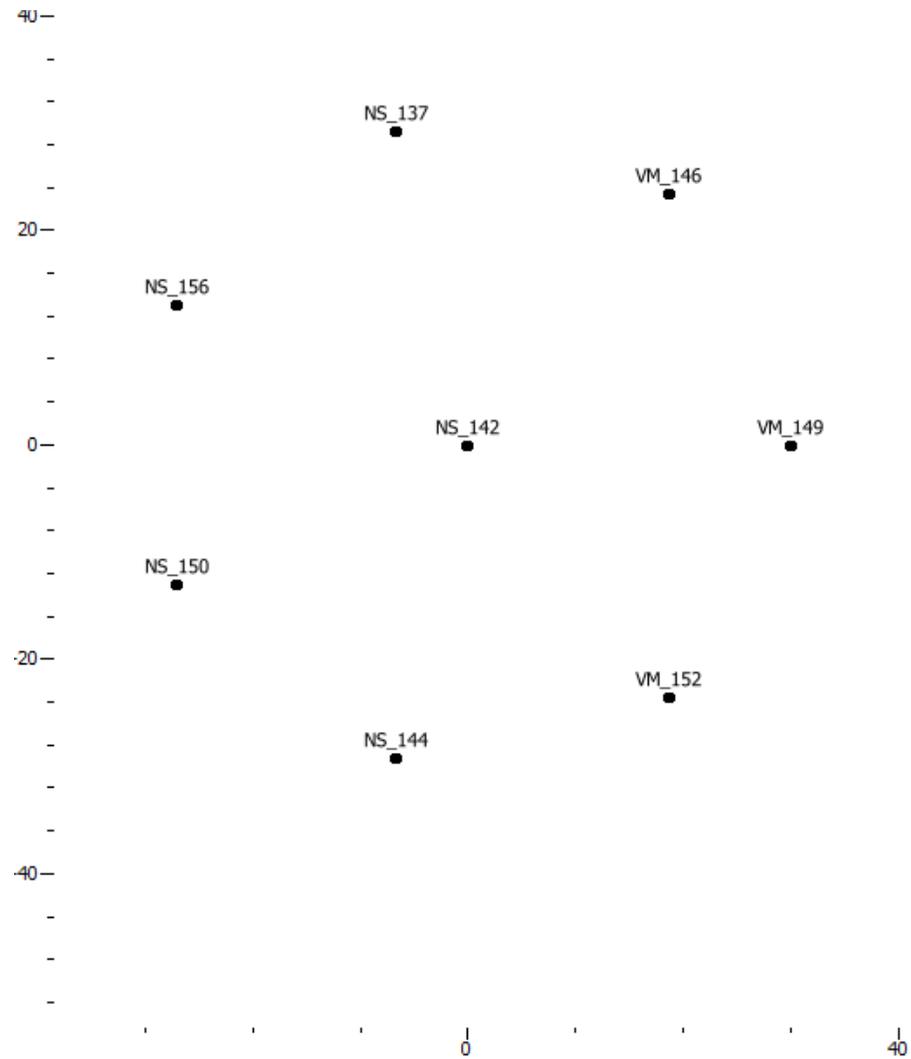


Figura 31. Selección de ventanas implementando el algoritmo *sta/Ita*.

**Tabla 4.** Parámetros de entrada del algoritmo *sta/Ita*

|  |         |
|--|---------|
| Longitud de la ventana (s)                                 | 20 - 40 |
| Traslape de las ventanas (% de la longitud de la ventana)  | 10      |
| Longitud de la ventana para el promedio de corto plazo (s) | 1       |
| Longitud de la ventana para el promedio de largo plazo (s) | 25      |
| Nivel mínimo para el umbral de <i>sta/Ita</i>              | 0,5     |
| Nivel máximo para el umbral de <i>sta/Ita</i>              | 2       |

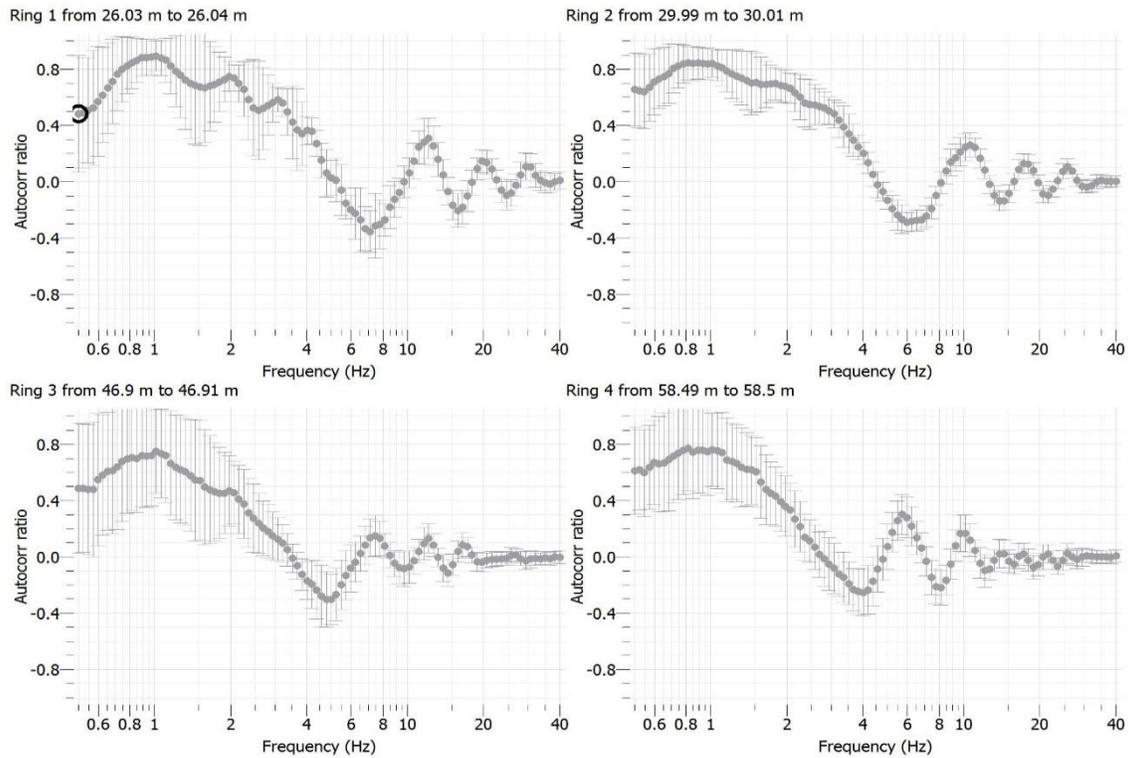
Una vez seleccionadas las ventanas de ruido, se estableció la posición de los sensores con respecto a un punto de referencia, según la geometría empleada en el sitio de interés. En la Figura 32 se puede apreciar la geometría establecida de las estaciones del sitio CONALEP. En este caso, usamos como referencia la estación NS\_142 y la posición de los otros sitios se estableció con respecto a este sitio.



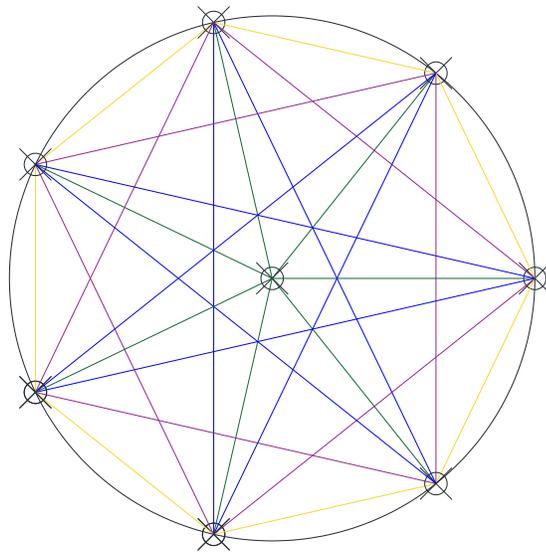
**Figura 32.** Posición de los sensores según geometría dispuesta en el sitio CONALEP.

Con los dos procesos anteriores (selección de las ventanas y geometría del arreglo) realizados, se puede obtener la función de autocorrelación normalizada descrita en el capítulo de Metodología. La función de autocorrelación nos proporciona información de las frecuencias características de la onda Rayleigh. Si la función no tiene una estructura con máximos y mínimos bien definidos, la señal que estamos estudiando no tiene periodicidad por tanto no es adecuada para realizar el método SPAC.

En la Figura 33 se puede apreciar las funciones de autocorrelación para las diferentes distancias encontradas en el arreglo circular del sitio CONALEP. En la Figura 34 se especifican las distintas distancias entre pares de estaciones del arreglo instalado en el sitio CONALEP.



**Figura 33** Coeficientes de correlación para las diferentes distancias entre estaciones del sitio CONALEP, tomando en cuenta el arreglo de la Figura 15.

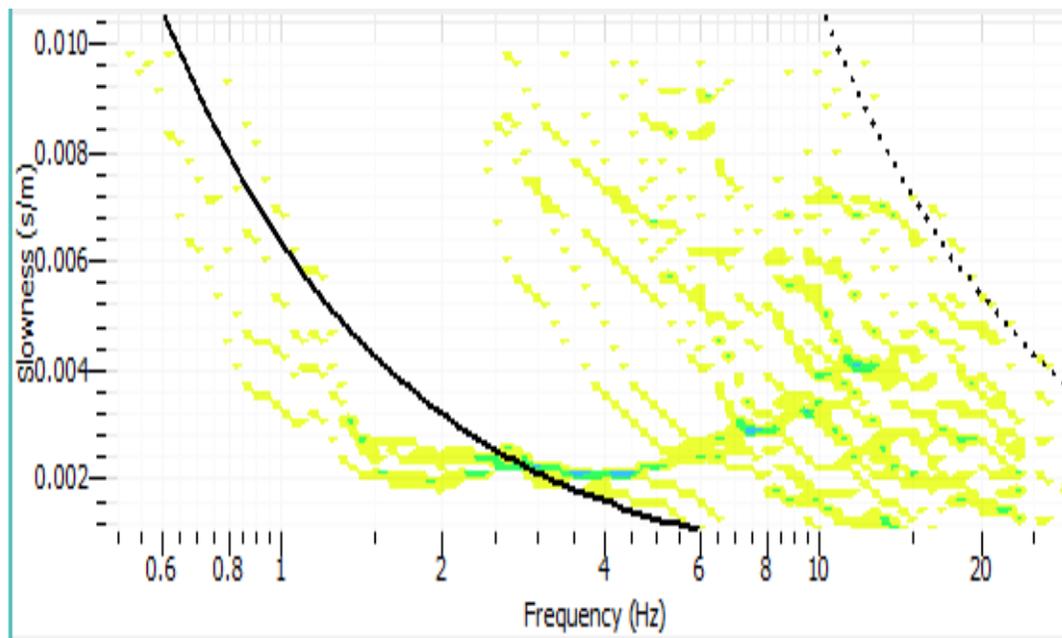


**Figura 34.** Ejemplo de distintas distancias entre pares de estaciones del arreglo instalado en el sitio CONALEP, con 8 estaciones, 1 central y 7 perimetrales.

Con los coeficientes de las funciones de autocorrelación se puede inferir la velocidad de fase de la onda Rayleigh utilizando la ecuación 2, esto es:

$$c(f) \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[irk \cos(\theta - \Phi)] = j_0 \left( \frac{2\pi fr}{v(f)} \right) \quad (2)$$

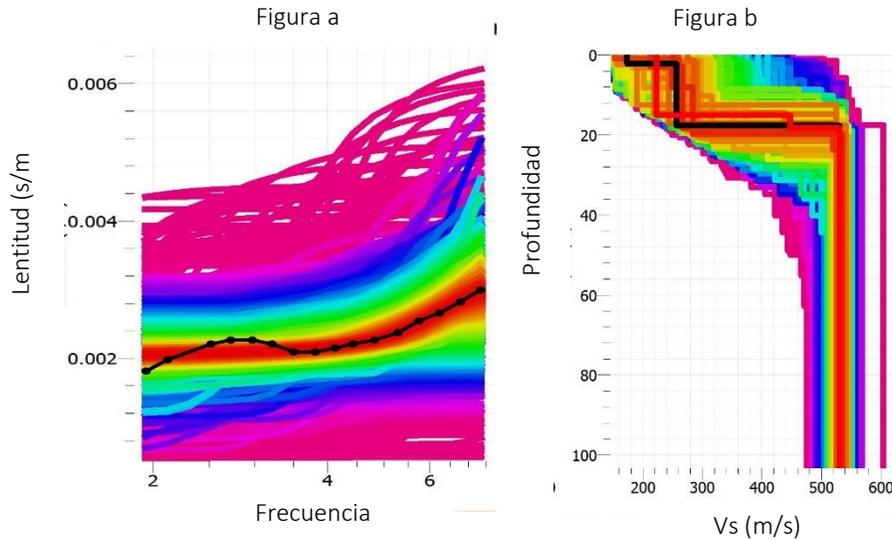
Sustituyendo los coeficientes de autocorrelación y despejando la velocidad de fase del argumento de la función Bessel se obtiene la dispersión de las ondas Rayleigh para las frecuencias características contenidas en el ruido sísmico (Figura 35).



**Figura 35.** Velocidades de fase obtenidas a partir de los coeficientes de correlación de la Figura 17. Las líneas punteadas y continuas representan los límites en donde la curva de dispersión es confiable.

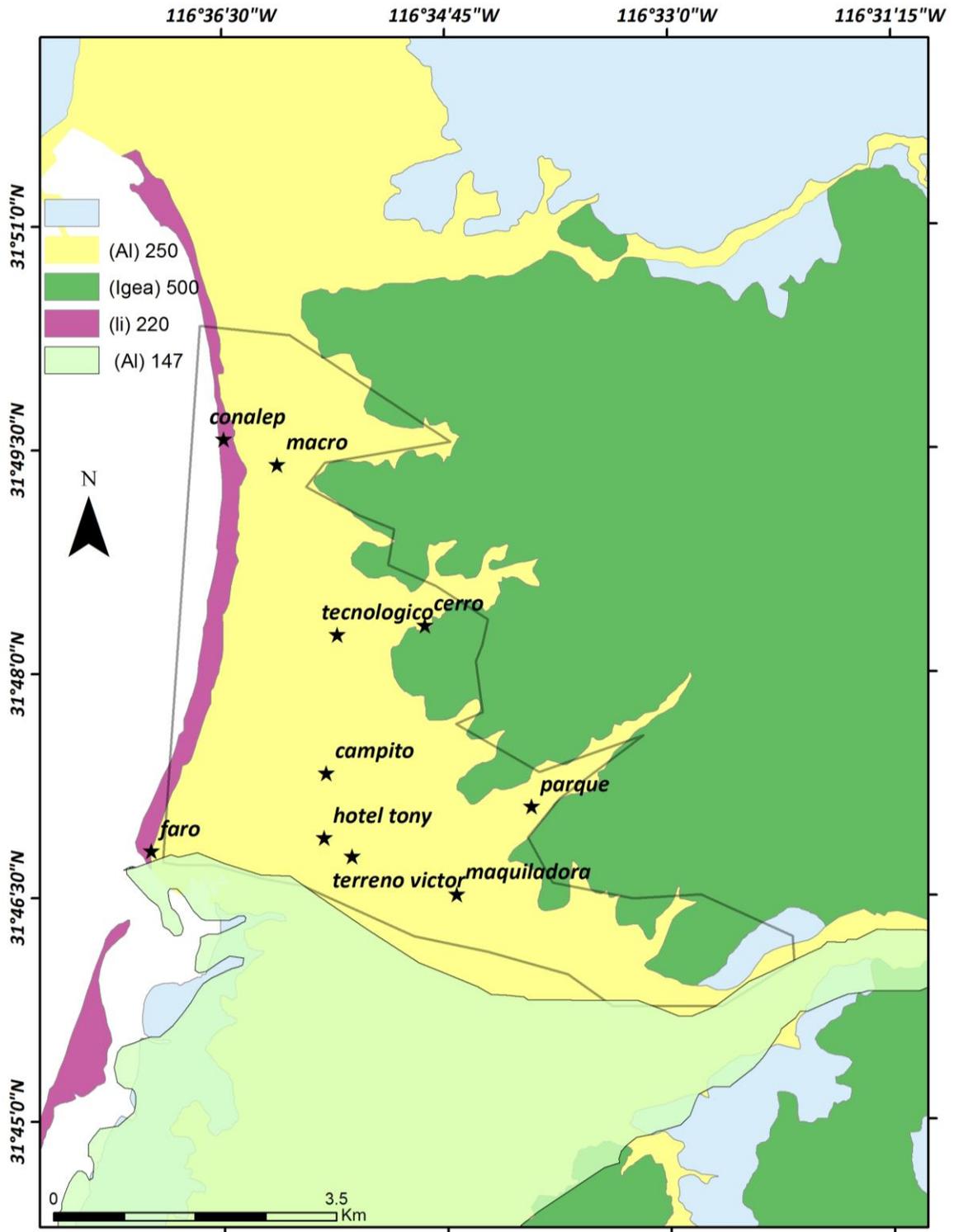
Con apoyo del primer descenso de la función de autocorrelación (cruce por cero) se selecciona la curva de dispersión que entrará al proceso de inversión. Este proceso se llevó a cabo con el módulo *dinver* presente en el paquete de Geopsy. *Dinver* genera 2500 modelos de curvas de dispersión, cada uno de los modelos teóricos son comparados con el modelo experimental por medio de la desviación estándar. Cada modelo que genera *dinver* tiene una desviación estándar más pequeña que el anterior. Con cada

curva de dispersión se obtiene un modelo del subsuelo en función de la velocidad de corte. Un ejemplo del proceso de inversión de las curvas de dispersión obtenidas para el sitio CONALEP se aprecia en la Figura 36.



**Figura 36.** En la Fig. a se aprecia la curva de dispersión experimental (negra) contra curvas teóricas (rojo, verde, azul y rosa) y en la Fig. b el perfil del suelo resultante de la inversión de las curvas de dispersión, mostrando en negro el mejor ajuste.

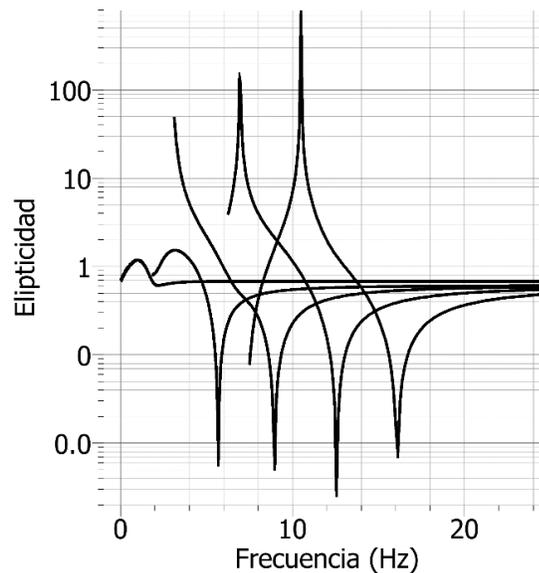
Los perfiles de velocidad obtenidos para todos los sitios se muestran en el Anexo A. Una vez obtenido el perfil de velocidades de ondas de corte se calcula el promedio de la Vs en los primeros 30 m ( $V_{s30}$ ). Con el cálculo de la  $V_{s30}$  para los distintos sitios en los que se adquirieron los datos, se realizó un mapa de zonificación para el Ex Ejido Chapultepec y sus alrededores. El mapa se muestra en la Figura 37.



**Figura 37** . Mapa de zonificación de la  $V_{s30}$ . En el mapa se incluye también las diferentes unidades geológicas de la región. Los valores escritos a un lado de la litología corresponden a la  $V_{s30}$  calculada.

### 5.1.2 Elipticidad

Las curvas de elipticidad son una medida del cambio del movimiento elíptico de las ondas Rayleigh con respecto a la profundidad (Prado, 2014). La elipticidad depende de la frecuencia y muestra un valor máximo (pico) alrededor de la frecuencia fundamental. Este pico tiene relación con el desvanecimiento de la componente vertical del movimiento elíptico. Con este desvanecimiento ocurre un cambio en el sentido de rotación del movimiento elíptico en el modo fundamental de las ondas Rayleigh. En la Figura 38 se puede apreciar los modos fundamentales de la elipticidad de las ondas Rayleigh (Prado 2014).

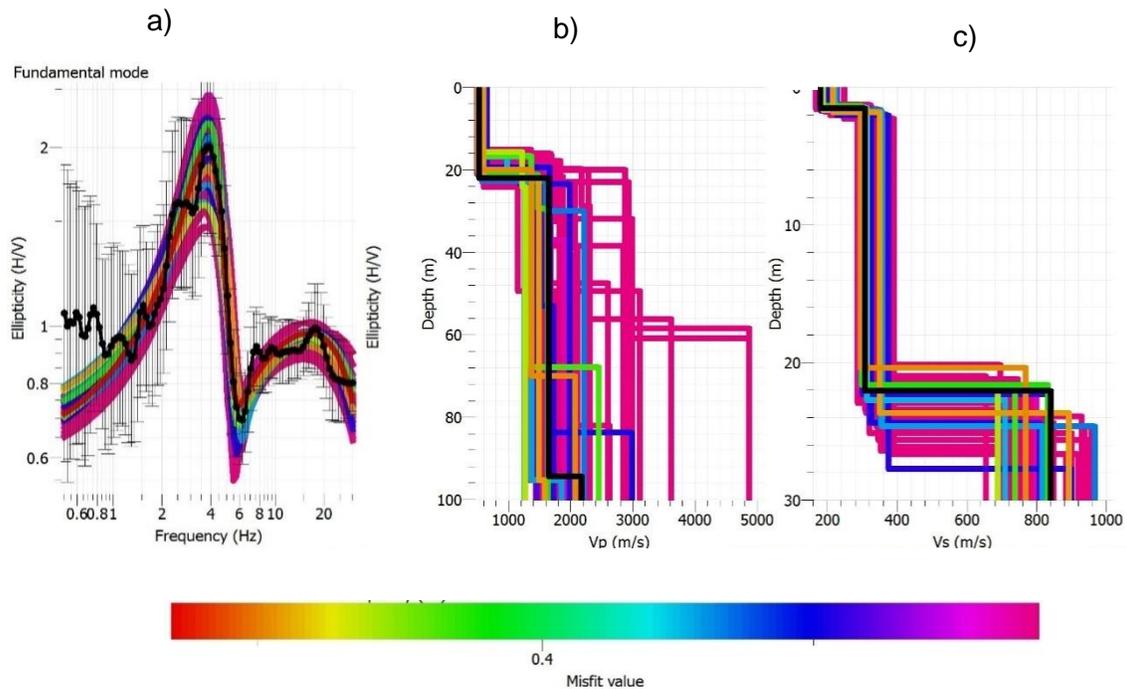


**Figura 38.** Curvas de elipticidad de ondas Rayleigh en un semi-espacio estratificado, para los primeros 5 modos de la onda Rayleigh. Los picos corresponden al desvanecimiento de la componente vertical, mientras que los valles pronunciados corresponden al desvanecimiento de la componente horizontal. Figura tomada de Prado (2014).

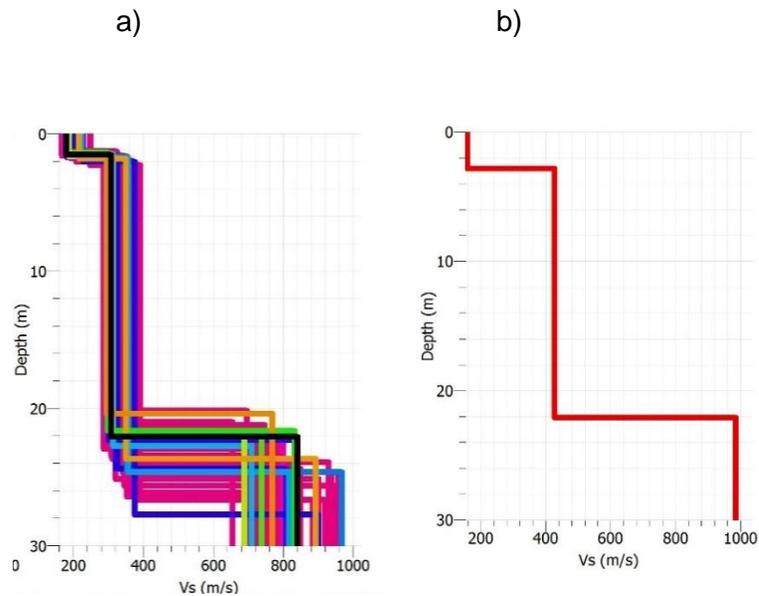
Bard (1998), considera que el ruido sísmico se compone principalmente de ondas superficiales. Por lo que se puede suponer que el cociente H/V tiene relación con la elipticidad de las ondas Rayleigh debido a su predominancia en la componente vertical. En otras palabras, los cocientes espectrales son más útiles que solo para el simple cálculo de la frecuencia fundamental de un sitio. En este caso, el cociente espectral H/V puede utilizarse como una medida de la elipticidad de las ondas Rayleigh en la superficie de un medio estratificado. De ahí que pueda ser utilizado para determinar un perfil de  $V_s$  (Arai y Tokimatsu, 2004; Fäh *et al.*, 2001).

En este trabajo se ha utilizado la inversión de la curva de elipticidad obtenida de los cocientes espectrales para poder generar un modelo estratificado en función de la velocidad de corte. Esto con la finalidad de validar la selección del modelo obtenido de la inversión de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh (SPAC).

A continuación se muestra el ajuste de las curvas de elipticidad teóricas con la observada para el sitio "Cerro". De cada ajuste se ha obtenido un modelo del subsuelo, pero solo se muestra el que tuvo el ajuste óptimo (menor desviación estándar entre la curva observada y calculada). En la Figura se muestra la comparación entre el modelo obtenido de la inversión del H/V y las curvas de dispersión de las ondas Rayleigh.



**Figura 39.** Inversión de la curva de elipticidad para el sitio. En a) se puede observar los modelos de la curva de elipticidad teórica y experimental. En b) los modelos del subsuelo para la velocidad de  $V_p$  y en c) los modelos del subsuelo para la velocidad de ondas de corte  $V_s$ . En la Figura b) y c) el modelo con la menor desviación estándar se muestra con color negro.



**Figura 40.** Comparación de los modelos de velocidades obtenidos a partir de la inversión de la curva de elipticidad (a) y del método SPAC (b).

De la comparación mostrada en la Figura 35, se puede apreciar una similitud importante de los modelos obtenidos de dos procesos de inversión distintos. Debido a la ausencia de estudios de mecánica de suelos o de perfiles litológicos en el área de estudio, hemos decidido comparar los perfiles obtenidos con dos métodos diferentes para darle más credibilidad a nuestro estudio.

## 5.2 Cocientes Espectrales H/V

Para el cálculo de los cocientes espectrales H/V, se llevaron a cabo dos campañas de adquisición. La primera de ellas con el equipo SARA ( $f_0 = 2$  Hz) y la segunda con PMD ( $0.1 \leq f_0 \leq F_{Nyq}$  Hz). Las curvas de respuesta en frecuencia de los instrumentos se muestran en la Figura 41.

Figura a

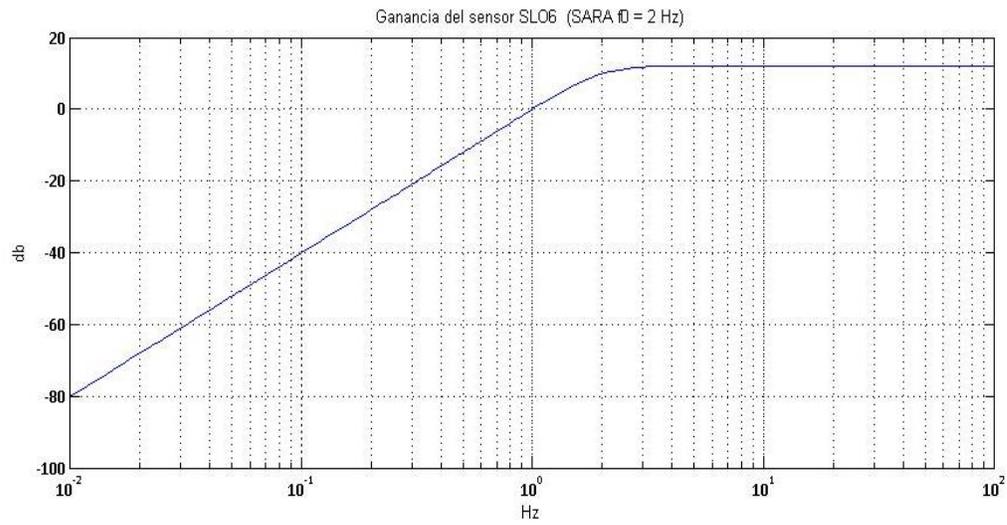
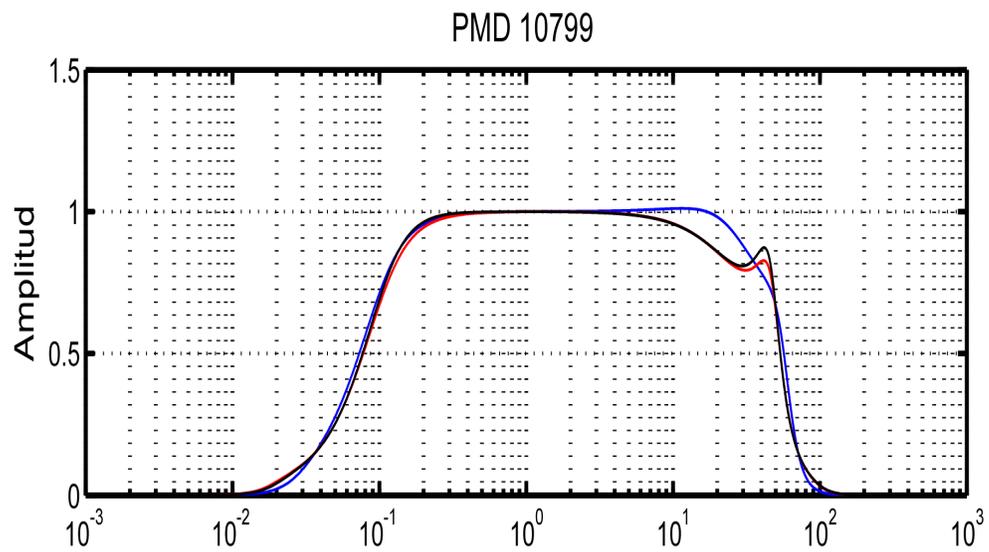


Figura b



**Figura 41.** Curvas de respuesta en amplitud el sismómetro SLO6 incluido como parte del equipo SARA (Figura a) y del sismómetro.PMD (Figura b).

El procesamiento de los datos de ruido para el cálculo de H/V consistió en lo siguiente:

- i) Remoción de la media del registro (corrección de orden cero).
- ii) Selección automática de ventanas basado en el algoritmo  $sta / lta$  (fueron los mismos parámetros usados en la eliminación de picos en la técnica SPAC).
- iii) Aplicación de un suavizador cosenoidal en los extremos de la señal (*taper*).
- iv) Cálculo de la transformada de Fourier y suavizado (smooth) de la misma para cada ventana.
- v) Cálculo del promedio de los espectros de Fourier de todas las ventanas y finalmente.
- vi) Cálculo de los cocientes espectrales H/V (donde H son las componentes horizontales combinadas).

La manera de calcular la componente H a partir de las componentes horizontales y posteriormente obtener el H/V, está dado de la siguiente manera:

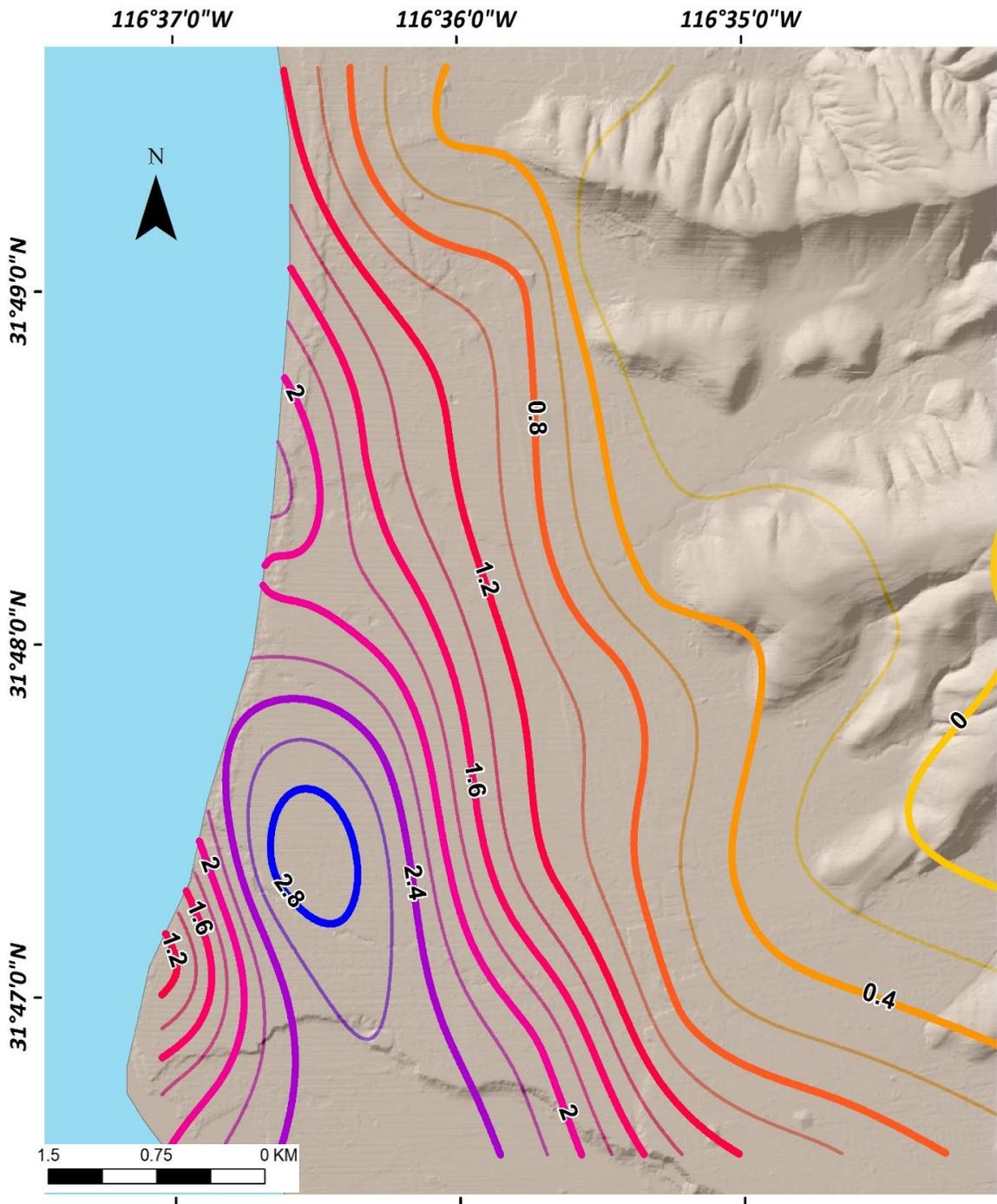
$$\frac{H}{V} = \sqrt{\frac{(H_{NS})^2 + (H_{EO})^2}{2V^2}} \quad (10)$$

Los cocientes H/V fueron obtenidos con Geopsy y con Matlab para efectos de comparación, encontrando prácticamente resultados iguales. En la Tabla 5 se muestra el resumen de las frecuencias obtenidas con ambos sensores para los mismos sitios.

**Tabla 5.** Resumen de las frecuencias obtenidos con ambos sensores para sitios similares

| Sitio          | Sara        | PMD         |
|----------------|-------------|-------------|
| Campito        | <b>0.63</b> | <b>0.55</b> |
| Cerro          | <b>3.7</b>  | <b>3.4</b>  |
| Conalep        | <b>1</b>    | <b>1.35</b> |
| Macroplaza     | <b>2.4</b>  | <b>2</b>    |
| Mercado        | <b>1.2</b>  | <b>0.98</b> |
| Parque         | <b>6.2</b>  | <b>6</b>    |
| Terreno Victor | <b>0.61</b> | <b>0.63</b> |

En la Figura 42 se muestra el mapa de zonificación en función del periodo natural del suelo.



**Figura 42** Distribución de las curvas de isoperíodos de naturales del suelo en la zona sur de Ensenada.

### 5.3 Explosión de cantera

Como ya se mencionó previamente, otro de los objetivos de esta tesis fue obtener la velocidad pico de partícula ( $V_{pp}$ ). Para obtener este parámetro se hizo la integración de los registros de aceleración en el dominio del tiempo para después determinar la resultante vectorial de cada estación (ecuación 11).

$$R = \sqrt{(N - S)^2 + (E - O)^2 + (V)^2}$$

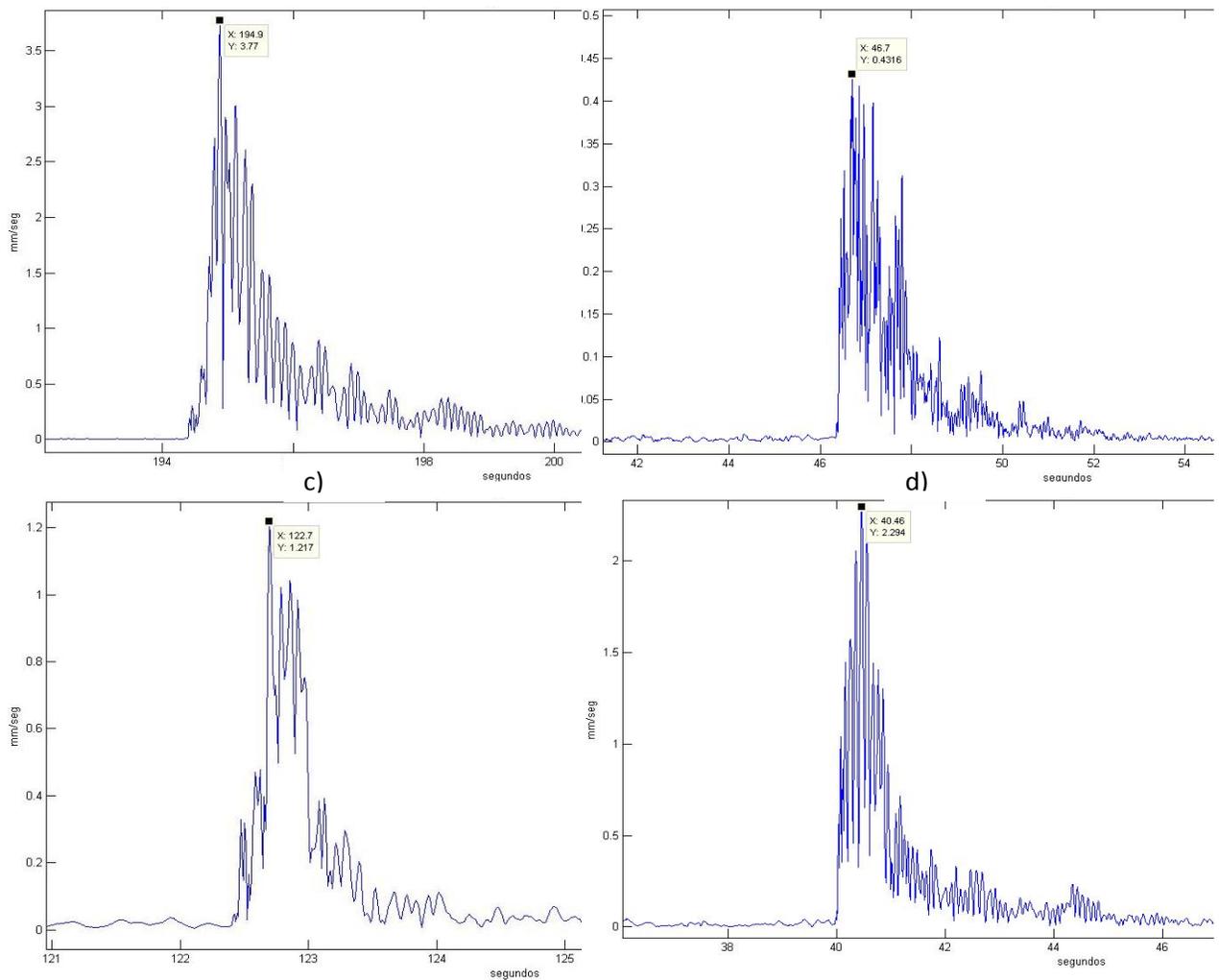
11

Las resultantes

vectoriales obtenid a)

b)

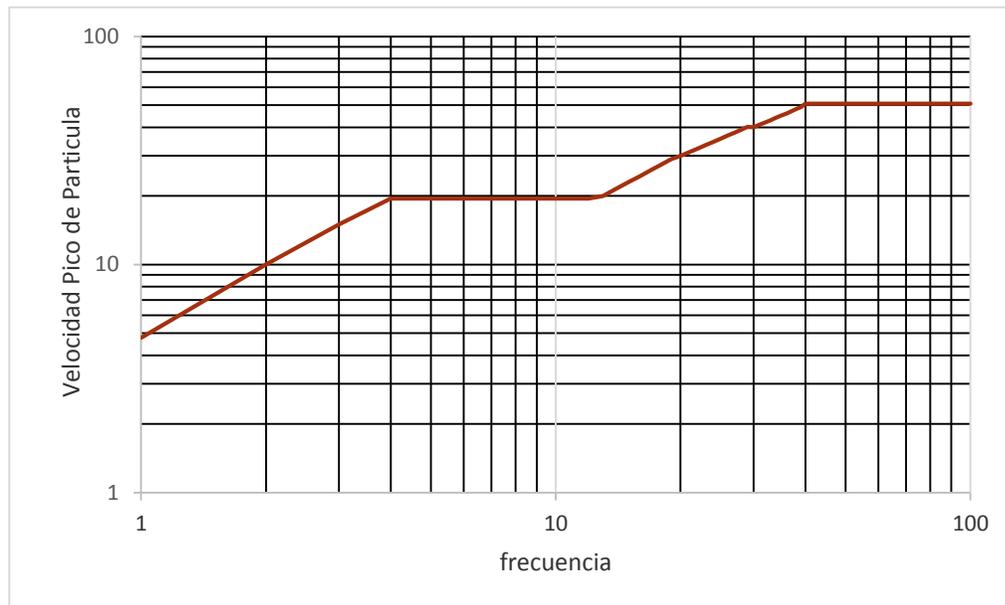
con la ecuación 11 se muestran en la Figura 43.



**Figura 43** Resultantes vectoriales de las 3 componentes para cada una de las estaciones: (a) B081, (b) B086, (c) B086, (d) B08B.

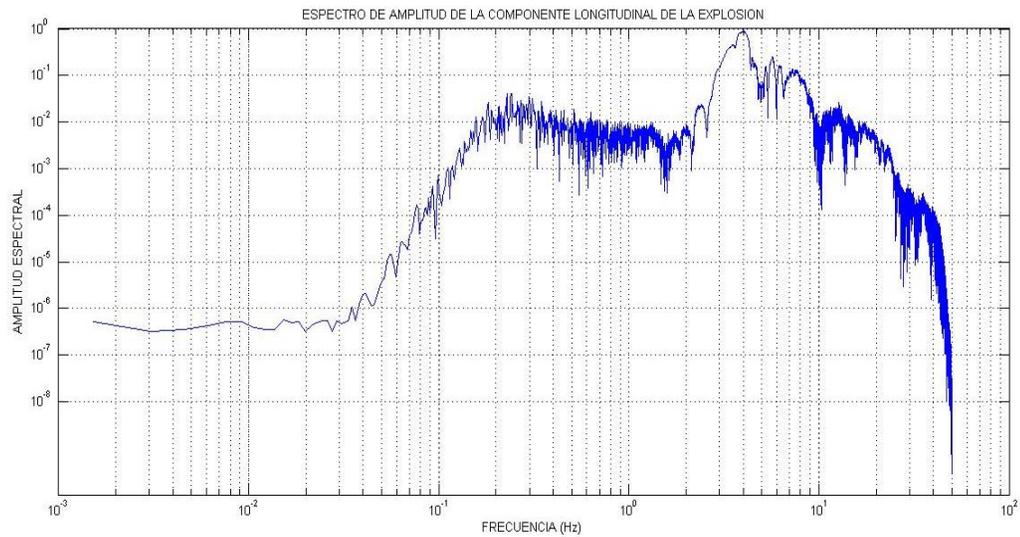
Una vez identificados los valores máximos de las resultantes vectoriales de los registros de velocidad, los comparamos con los valores recomendados por las normas competentes (USBM R18507). Dvorak (1962) mostró que para el rango de frecuencias bajas ( $f < 1$  Hz) no existen daños estructurales para velocidades menores a 12 mm/s. Siskind *et al.* (1980) demostró que para frecuencias altas ( $f > 40$  Hz) existe un riesgo pequeño de generar daños con velocidades menores de 75 mm/s. Crawford y Ward (1965) demostraron que las estructuras de concreto correctamente diseñadas pueden resistir velocidades de hasta 100 mm/s sin sufrir ningún tipo de fractura.

En nuestro caso, utilizaremos los límites establecidos por el *United States Bureau of Mines* (USBM, por sus siglas en inglés) norma R1-8507, los cuales son los más empleados a nivel mundial para el análisis de daños ocasionados por explosiones de minas y canteras. En la Figura 44 se muestran los valores máximos de la Vpp en función de la frecuencia dominante del suelo.



**Figura 44.** Valores máximos de la Vpp en función de la frecuencia dominante del suelo.

A continuación en la Figura 45 se muestra el espectro de Fourier de la estación más cercana a la población (Villas de Real II). Notando que la frecuencia con mayor amplitud se encuentra a 4.0 Hz.



**Figura 45.** Espectro de furrier de la estación más cercana a la población

Teniendo la frecuencia dominante del movimiento del suelo se puede encontrar el valor máximo de la  $V_{pp}$  recomendado por la norma R1-8507 el cual es 12 mm/s. A continuación se muestra el resumen de velocidades máximas de partícula para los distintos sitios de registro (Tabla 6).

**Tabla 6** resumen de velocidades máximas de partícula para los distintos sitios de registro.

| est  | Vpp registradas en<br>mm. |
|------|---------------------------|
| b081 | 3.77                      |
| b082 | 1.217                     |
| b086 | 0.4316                    |
| b08b | 2.294                     |

Como no fue posible determinar una ecuación predictiva por la disposición de las estaciones de registro (que se dispusieron así porque inicialmente solo se usarían para la localización de la explosión), se compararon los resultados que arroja la ecuación predictiva de la  $V_{pp}$  empleada en el sur de California (ecuación 9). Esta ecuación predice la  $V_{pp}$  en función de la cantidad de explosivo por retardo y de la distancia del sitio de interés al sitio de detonación.

$$V_{pp} = 1729 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.6} \quad (9)$$

Donde:

Vpp = velocidad pico de partícula en mm/s

D = la distancia entre la estructura y la voladura en metros

W = la cantidad de explosivos por retardo en kg.

Con el uso de la ecuación 9 se han estimado las Vpp mostrados en la siguiente tabla.

**Tabla 7** velocidades pico de partícula estimadas a partir de la ecuación 9

| est  | distancias | Cargas | Vpp<br>estimada |
|------|------------|--------|-----------------|
| b081 | 1030       | 250    | 3.3             |
| b082 | 610        | 250    | 7.2             |
| b086 | 1120       | 250    | 2.9             |
| b08b | 830        | 250    | 4.5             |

La comparación de la Vpp registrada y la Vpp calculada se muestra a continuación (Tabla 8).

**Tabla 8.** Comparación de la Vpp registrada y la Vpp calculada.

| est  | Vpp registradas en<br>mm. | Vpp estimada en<br>mm. |
|------|---------------------------|------------------------|
| b081 | 3.77                      | 3.3                    |
| b082 | 1.217                     | 7.2                    |
| b086 | 0.4316                    | 2.9                    |
| b08b | 2.294                     | 4.5                    |

## Capítulo 6. Conclusiones

---

El propósito de este estudio fue determinar el periodo natural y la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 m del subsuelo en la zona conocida como el Ex Ejido Chapultepec y sus alrededores (ubicados al sur de Ensenada, Baja California). Debido a que esta zona ha tenido un desarrollo habitacional importante en los últimos 10 años y que a pesar de ello no se había determinado el periodo natural y la  $V_{s30}$ , necesarios para el diseño de estructuras sismo-resistentes, fue necesario realizar el presente trabajo.

Se obtuvieron mapas de zonificación sísmica, por un lado, en función de la velocidad de ondas de corte de los primeros 30 metros del subsuelo ( $V_{s30}$ ) y, por otro, del periodo natural del suelo ( $T_0$ ) para el Ex Ejido Chapultepec y sus alrededores. Adicionalmente, se determinó la velocidad pico de partícula en la colonia Villas del Real II. La  $V_{s30}$  muestra una correlación con la geología descrita por Gastil *et al.*, (1975). La zona en la que predomina roca o suelos consolidados se encontraron valores altos ( $V_{s30}$  de alrededor de 500 m/s), mientras que, en las zonas sedimentarias, se obtuvieron valores bajos ( $V_{s30}$  de alrededor de 150 m/s). Soares (2003) había reportado una velocidad uniforme entre la zona de sedimentos comprendida entre Ensenada y Maneadero. Sin embargo, en el presente estudio, se encuentra un contraste de velocidades muy marcado para el Ex Ejido Chapultepec y un sitio denominado El Faro Beach, por lo cual hemos decidido incluir la capa de aluvión reportada por Gastil *et al.* (1975). Al incluir esta capa, obtenemos una mejor correlación entre la geología y las velocidades reportadas en la presente tesis, de las cuales la más baja corresponde al sitio El Faro Beach. Como la  $V_{s30}$  se relaciona directamente con el módulo de corte (resistencia al corte) podemos inferir que este sitio pudiera verse más afectado ante la ocurrencia de un sismo importante.

El análisis espectral realizado (cocientes H/V) fue apropiado para determinar los periodos dominantes de vibración del suelo, los cuales son útiles en ingeniería civil. Los periodos encontrados para el área de estudio varían de 0.2 a 2.8 s. Estos periodos muestran un aumento en la dirección Este – Oeste y muestran una relación con la geología superficial de la zona. En roca, los periodos son bajos ( $0.16 \leq T_0 \leq 0.2$  s) mientras que en sedimentos el periodo es alto ( $1.5 \leq T_0 \leq 2.8$  s).

En el caso de la explosión de cantera, aunque hubiera sido deseable determinar una relación de la velocidad pico de la partícula con la distancia, al no contar con un arreglo lineal de estaciones y con la carga por retardo, no fue posible determinarla. El arreglo de estaciones usado fue para determinar la localización y el tiempo de origen de la explosión. Por otro lado, obtuvimos valores de la  $V_{pp}$  más altos

en acelerómetros más aleados de la explosión que en los que se encontraban a una distancia menor. Una posible explicación a lo obtenido pudiera ser el efecto de directividad. Adicionalmente, el valor de la  $V_{pp}$  calculado está por debajo de las recomendaciones de las normas internacionales. Lo anterior sugiere que la explosión no afectaría a las estructuras cercanas ni a la población. No fue posible encontrar alguna relación entre los valores de la ecuación predictiva usada para California y los valores registrados. Como trabajo futuro recomendamos estimar una ecuación propia del área de estudio con un número mayor de sensores y un arreglo lineal.

Los resultados reportados pueden utilizarse solo como referencia general del área estudiada. Para un mayor detalle de  $V_{s30}$ , y  $T_0$  en un punto específico, se recomienda realizar estudios particulares. Los mapas obtenidos sólo son aplicables como valores de referencia para anteproyectos de construcción. En caso de tener un proyecto ejecutivo, es necesario determinar la  $V_{s30}$  y el  $T_0$  para el sitio específico de ejecución del proyecto.

En particular, es de resaltar el sitio denominado Macroplaza en el que se encontraron resultados anómalos tanto en la  $V_{s30}$  como en el  $T_0$ . Para descartar que los resultados hayan sido influenciados debido, en el caso del  $T_0$ , a la respuesta del sismómetro SARA ( $f_0 = 2$  Hz), se programó una segunda campaña de adquisición de datos de ruido con un sensor de un ancho de banda mayor (PMD,  $0.1 \text{ Hz} \leq f \leq f_{Nyq}$ ). Los resultados obtenidos muestran concordancia con los resultados previamente calculados. De lo anterior concluimos que los sensores de periodo corto fueron confiables para determinar los periodos reportadas en el presente trabajo ( $0.2 \leq f_0 \leq 2.8$ ).

Los arreglos geométricos utilizados (circular, lineal, en ele, en equis) para calcular la curva de dispersión fueron apropiados. Por lo cual, concluimos que el tipo de arreglo a usar puede ser versátil y puede adaptarse según la disposición de espacio. El número de estaciones utilizada en los arreglos geométricos tiene una influencia importante en la curva de dispersión. Los arreglos en que se utilizaron un número mayor de sensores permitieron obtener curvas de dispersión mejor definidas. El criterio usado para elegir el modelo de capas del subsuelo (producto de la inversión de la curva de dispersión), fue considerar la menor desviación estándar entre la curva de dispersión teórica y la experimental.

## Literatura citada

---

- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary waves, with spatial reference to microtremors. *Earthquake Research Institute*, XXXV(3), 415-456.
- Aki, K. Richards, P. (1980). *Quantitative seismology: Theory and Methods*. W. H Freeman y Co. San Francisco, 557 pp
- Allen, S. (1960) "Agua Blanca fault- A major transverse structure of northern Baja California, México", *Bulletin of the Geological Society of America*. (71): 457-482 pp.
- Arai, H., Tokimatsu, K., 2004. S-wave velocity profiling by inversion of microtremors H/V spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 95 (1), 53 – 63.
- Bard, P.-Y., (1998). Microtremors measurements: a tool for site effect estimation? *Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Yokohama, Japan, pp. 1251 – 1279.
- Bollinger, G. A. (1980). *Blast vibration analysis*. SIU Press.
- Crawford, R., Ward, H. S. (1965). Dynamic strains in concrete and masonry walls. *Building Research Note*, 54, 14.
- Cruz-Castillo, M. (2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México. *GEOS, Unión geofísica mexicana*, 22, 37-42.
- Demant, A., Robin, C. (1975) "Las fases del vulcanismo en México; una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el cretácico" *Revista Inst. Geol. U.N.A.M.*, 75 (1), 66 -79 pp.
- Diez, C. L. (1990). *Baja California desde el principio*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Dvorak, A. (1962). Seismic effects of blasting on brick houses. *Proce Geofyrikeniha Ustance Ceskoslavenski Academic*, 169, 189-202.
- Espíndola, J. M., Jiménez, Z. (1994). *Terremotos y ondas sísmicas (Vol. 1)*. UNAM.
- Fäh, D., Kind, F., Giardini, D., 2001. A theoretical investigation of average H/V ratios. *Geophysical Journal International* 145 (2), 535 – 549.
- Frez, J., Frías-Camacho, V. M. (1998). Mapas anuales de sismicidad para la región fronteriza de ambas Californias. *GEOS*, 18(2), 112-130
- Gastil, R. G., Phillips, R. P., & Allison, E. C. (1975). Reconnaissance geology of the state of Baja California. *Geological Society of America Memoirs*, 140, 1-201.
- Gil, L. (2010) "Modelo numérico para determinar el impacto por la operación de pozos costeros en la zona del acuífero de Maneadero" *Tesis de maestría, CICESE*, 179 pp.
- Hatch, M. E., 1987. *Geology of the San Miguel Fault Zone, Northern B. C. México*. San Diego State University, M. Sc. Thesis. S.D.S.U.

- Hayashi, K., Matsuoka, T., & Hatakeyama, H. (2005). Joint analysis of a surface-wave method and micro-gravity survey. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 10(2), 175-184.
- Heredia, A. I. (2005). Estudio de atenuación de las ondas sísmicas en el noroeste de Baja California. Ensenada, Baja California, México: Colección de tesis, CICESE.
- Ibarra, G. (2004). Microzonación de Periodos Dominantes del Suelo de los Principales Centros Urbanos de Baja California (Doctoral dissertation, Tesis Magíster en Ciencias de la Tierra. Centro de Investigación y de Estudios Superiores de Ensenada. México.
- Jaramillo, A., Piña, J., Aguilar, R. (2012). Aplicación del método de cocientes espectrales para la reconfiguración detallada del mapa de Isoperiodos en la cuenca del valle de México. Memoria XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.
- Krause, D. C. (1961). Geology of the sea floor east of Guadalupe Island. *Deep Sea Research* (1953), 8(1), 28IN4-38IN7.
- Krause, D. C. (1965). Tectonics, bathymetry, and geomagnetism of the southern continental borderland west of Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 76(6), 617-650.
- Lachetl, C., Bard, P. Y. (1994). Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique. *Journal of Physics of the Earth*, 42(5), 377-397.
- Legg, M. R., Kennedy, M. P. (1979). Faulting offshore San Diego and northern Baja California. *Earthquakes and other perils, San Diego region*. San Diego Assoc. of Geologists, 29-46.
- 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(2), 347-364..
- Morán, D. (1982) "Geología de la República Mexicana" INEGI. 88 pp.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).
- Nava, F. A. and J. N. BRUNE, 1982. An earthquake-explosion reversed refraction line in the Peninsular Ranges of southern California and Baja California Norte. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63, 1689-1698.
- Nazarian, S., Stokoe, I. I., Kenneth, H., Hudson, W. R. (1983). Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems (No. 930).
- Ortega, A. (1988). Neotectónica de un sector de la falla de Agua Blanca. Valle de Agua Blanca (Rancho La Cocina-Rancho Agua Blanca) Baja California, México: Tesis de Maestría en Ciencias, CICESE.
- Perez Flores, M. A., Suárez, V. F., Gallardo Delgado, L. A., González Fernandez, A., Vázquez, R. (2004). Structural pattern of the Todos Santos Coastal Plain, based on geophysical data. *Ciencias Marinas*, 349-364.
- Persson, P. A., Holmberg, R., Lee, J., Coursen, D. L., Davis, W. C. (1994). Book review: rock blasting and explosives engineering. *Journal of Energetic Materials*, 12(1), 85-88.

- Prado Morales, L. E. A. (2014). Estimación de una estructura tridimensional de velocidad de onda s y periodo fundamental en la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, 70 pp.
- Rockwell, T. K., Hatch, M. E., Schug, D. L. (1987). Late Quaternary rates: Agua Blanca and borderland faults. US Geological Survey final technical report, contract no. 14-08-0001, 22012, 65.
- SESAME (2004). "Guidelines for the implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations," Research Report WP12, Available online at: <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm>.
- Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W., Dowding, C.H. (1980). STRUCTURE RESPONSE AND DAMAGE PRODUCED BY GROUND VIBRATION FROM SURFACE MINE BLASTING. Report of Investigations - United States, Bureau of Mines, (8507), 78 p. Cited 11 times
- Soares J. (2003) Aplicación de la microzonación sísmica a la seguridad de estructuras críticas en la ciudad de Ensenada, B.C Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Stein, S., Wysession, M. (2009). An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure. John Wiley & Sons.
- Stock, J. M., Martín-Barajas, A, Suárez-Vidal, F., Miller, M. M. (1991). "Miocene to Holocene extensional tectonics and volcanic stratigraphy of NE Baja California, Mexico." En: Walawender, Michael J. y Hanan, B., eds., "Geological excursions in Southern California and Mexico": San Diego, California, San Diego State University Department of Geological Sciences.": 44-67.
- Suárez, L. E., Pando, M. A., & Ritta, R. J. (2012). Ambient Vibration Measurements for Estimation of Site Fundamental Periods—Case History of the City of Mayagüez, Puerto Rico. WCEE. Lisbon.
- Wathelet, M. (2005). GEOPSY Geophysical Signal Database for Noise Array Processing. Software, LGIT, Grenoble, Fr. Available online at: <http://www.geopsy.org>
- Wong, V., Legg, M., Suárez, F. (1987). Sísmicidad y tectónica de la margen continental del sur de California (USA) y Baja California Norte (México). Geofísica Internacional, 26(3).
- Zambrano, O. (2009). Determinación del modelo geofísico del subsuelo, mediante la adquisición de datos de ruido sísmico ambiental y sísmica de refracción, de la zona suroeste del área metropolitana de Mérida. Trabajo Final de Grado, Esc. de Ingeniería Geológica, Universidad de Los Andes.