

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



---

**Maestría en Ciencias  
en Ciencias de la Tierra  
con orientación en Geofísica Aplicada**

---

**Identificación de estructuras de interés geotérmico en la cuenca  
Wagner mediante el uso del método de sísmica de reflexión**

Tesis

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

Presenta:

**José Jesús Trejo Arce**

Ensenada, Baja California, México

2020

Tesis defendida por

**José Jesús Trejo Arce**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Antonio González Fernández**

Director de tesis

**Dr. Mario González Escobar**

**Dr. Jesús Arturo Martín Barajas**

**Dr. José Gómez Valdez**



---

**Dr. Javier Alejandro González Ortega**

Coordinador del Posgrado en Ciencias de la  
Tierra

---

**Dra. Rufina Hernández Martínez**

Directora de Estudios de Posgrado

*José Jesús Trejo Arce © 2020*

*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 José Jesús Trejo Arce como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada.

### **Identificación de estructuras de interés geotérmico en la cuenca Wagner mediante el uso del método de sísmica de reflexión**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Antonio González Fernández  
**Director de tesis**

En este trabajo se elabora un modelo conceptual del área de interés geotérmico en la cuenca Wagner, norte del Golfo de California, con base en datos de sísmica de reflexión multicanal de alta resolución adquiridos a bordo del buque oceanográfico Alpha Helix a principios del 2019 y perfiles sísmicos del crucero Ulloa99-5. También se incorporan resultados previos de estudios geológicos y geofísicos para caracterizar el sistema hidrotermal y plantear un modelo conceptual de la dinámica de los fluidos en la cuenca Wagner. Se identificaron y mapearon ventilas hidrotermales, chimeneas y anomalías acústicas asociadas a la circulación de fluidos hidrotermales. La identificación de ventilas hidrotermales se basa en la geometría y las características de facies sísmicas contenidas en la cuenca Wagner, la cual está delimitada por fallas oblicuas extensionales, la falla Consag al oeste y falla Wagner al este y por la falla transformante Cerro Prieto al norte. Este estudio identifica las vías de migración y transporte de fluidos y su relación con la deformación activa y el magmatismo que controlan un sistema hidrotermal en una cuenca marino-deltaica con una alta tasa de depositación. La correlación entre los 3 sectores estructurales de la cuenca y el número y distribución de chimeneas hidrotermales indica que la zona de falla Wagner en el flanco este es hidrotermalmente más activa, correlacionando con los altos valores de flujo de calor previamente realizados.

**Palabras clave:** Sísmica de reflexión 2D, Golfo de California, Cuenca Wagner, Geotermia, Ventilas hidrotermales

Abstract presented by Jose Jesus Trejo Arce as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences with orientation in Applied Geophysics.

**Geothermal structures of interest identification in the Wagner basin using the seismic reflection method**

Abstract approved by:

---

Dr. Antonio González Fernández  
**Thesis Director**

This work proposes a conceptual model for the geothermal area of interest in the Wagner Basin, in the northernmost Gulf of California based on the analysis of high-resolution multichannel seismic reflection data acquired onboard the Alpha Helix oceanographic vessel in early 2019 and profiles seismic from the cruise Ulloa99-5. Previous results from geological and geophysical studies are also incorporated to assess the existence of a possible hydrothermal system and to propose a conceptual model of fluid dynamics in the Wagner basin. Hydrothermal vents, chimneys, and acoustic anomalies associated with fluid circulation and hydrothermal vents were identified and mapped. The identification of hydrothermal vents was based on the geometry and characteristics of seismic facies contained in the Wagner basin, which is an oblique extensional system with the N-S trending Consag fault to the west and the Wagner fault to the east, and the Cerro Prieto transform fault to the north. This study identifies multiple evidences of active pathways of fluid transport through active deformation and magmatism at depth that control an hydrothermal system in a marine-deltaic basin characterized by a high depositional rates. A correlation between three structural sectors in the basin, and the number and distribution of hydrothermal chimneys indicates that the Wagner fault zone in the eastern margin is the most hydrothermally active, and correlate with previous studies of high heat flow in the Wagner basin.

**Keywords: 2D seismic reflection, Gulf of California, Wagner basin, Geothermal energy, Hydrothermal vents**

## **Dedicatoria**

**A mis padres María Elena y Jesús,  
por el apoyo incondicional,  
pero sobre todo por su amor,  
les estoy infinitamente agradecido.**

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría y otorgarme las facilidades para concluirlos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Secretaría de Energía (SENER) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de posgrado.

Al Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, por llevar a cabo la adquisición de datos sísmicos empleados en este trabajo como parte de la Campaña Intensiva de Exploración Geotérmica de las Cuencas Wagner, Consag, Delfín, Guaymas y Alarcón del Sistema de Rifts del Golfo de California.

A mi director de tesis Dr. Antonio González Fernández, por su paciencia, su tiempo y conocimiento brindado para poder concluir este trabajo.

Al Dr. Arturo Martín Barajas por sus valiosos comentarios y sugerencias, su paciencia y ayuda en relación al contenido de este trabajo.

Al Dr. Mario González por su asesoría y colaboración en el procesamiento e interpretación sísmica.

Al Dr. José Gómez Valdez por su disposición y aportes desde otro enfoque.

A Sergio Arregui por su disposición y apoyo técnico brindado en diferentes softwares.

A mis padres por todo su amor y apoyo a lo largo de mi vida.

A Grace, por ser mi compañera por un largo tiempo y apoyarme incondicionalmente en este proceso. Por el amor que me ha brindado y todos los momentos maravillosos que he vivido a su lado.

A la triple A: Oswaldo Sagahón, Cristian Gallegos y Armando Rocha, con quienes tuve la oportunidad de convivir y compartir buenos momentos en Ensenada. Por el apoyo que mostraron en todo momento, sus consejos y apoyo técnico en todo lo relacionado a CICESE. Por su compañía y apoyo crucial en esta etapa de mi vida.

A todos mis amigos y compañeros del área de Ciencias de la Tierra: Eleyra, Laura, Eliana, Abigail, Sebastián, Young Ho, Halia, Fabián, Roció, Lorena, Daniel, Tania, Marco, Ángel, Jorge, Gerardo, Miguel, Roberto, Luz, Abraham y Javi; por todas las pláticas, vivencias, viajes y risas. Fue un placer haber coincidido.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xiv
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Marco geológico.....	3
1.2. Área de estudio.....	5
1.3. Estudios previos relacionados con el sistema hidrotermal.....	7
1.3.1. Flujo de calor.....	7
1.3.2. Sísmica de reflexión.....	9
1.3.3. Geoquímica .....	10
1.3.4. Batimetría .....	11
1.3.5. Método electromagnético de fuente controlada.....	12
1.3.6. Método Magneto-telúrico.....	13
1.4. Objetivos.....	14
1.4.1. Objetivo general.....	14
1.4.2. Objetivos específicos.....	14
<b>Capítulo 2. Metodología.....</b>	<b>15</b>
2.1. Sísmica de reflexión.....	15
2.2. Adquisición de datos.....	16
2.3. Procesado sísmico.....	19
2.4. Pre apilamiento.....	20
2.4.1. Almacenamiento.....	20
2.4.2. Asignación de geometrías.....	20
2.4.3. Edición de registros.....	20

2.4.4. Filtrado de frecuencias.....	21
2.4.5. Filtro FK.....	22
2.4.6. Deconvolucion.....	22
2.5. Apilamiento.....	23
2.5.1. Agrupamiento por CDP.....	24
2.5.2. Análisis de velocidades.....	24
2.5.3. Corrección NMO ( <i>Normal MoveOut</i> ) .....	26
2.5.4. Apilamiento ( <i>Stack</i> ).....	26
2.6. Post apilamiento.....	26
2.6.1. Migración.....	27
2.7. Interpretación.....	27
2.8. Ventilas hidrotermales.....	28
<b>Capítulo 3. Resultados.....</b>	<b>32</b>
3.1. Secciones sísmicas.....	32
3.1.1. Sección Ulloa 10.....	32
3.1.2. Sección Ulloa 06 .....	35
3.1.3. Sección Ulloa 08.....	37
3.1.4. Sección Ulloa 23.....	39
3.1.5. Sección Ulloa 21.....	39
3.1.6. Sección PEMEX 5037 .....	42
3.1.7. Sección Alpha 1 .....	44
3.1.8. Sección Alpha 2 .....	46
3.1.9. Sección Alpha 3 .....	48
3.1.10. Sección Alpha 4 .....	50
<b>Capítulo 4. Discusión.....</b>	<b>53</b>
4.1. Interpretación de anomalías.....	54
4.2. Mapeo de chimeneas hidrotermales.....	56
4.3. Diferencias en la configuración estructural dentro de la cuenca Wagner.....	59
4.4. Manifestación hidrotermal en la falla Wagner.....	61
4.4.1. Modelo Alpha 1.....	61

4.4.2. Modelo Alpha 2.....	63
4.4.3. Modelo Alpha 4.....	64
4.5. Exploración geotérmica de la cuenca Wagner.....	67
4.6. Sistema hidrotermal en la cuenca Wagner.....	69
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>72</b>
<b>Literatura citada.....</b>	<b>74</b>

## Lista de Figuras

- Figura 1.** A) Localización de los campos geotérmicos de Salton Sea, Cerro Prieto y Tres Vírgenes. B) Ambiente tectónico del Norte del Golfo de Baja California y campos geotérmicos (no todos en producción) relacionados a cuencas pull apart. Movimiento relativo de placas de tectónicas en flechas rojas grandes. ....2
- Figura 2.** Mapa tectónico del rift del Golfo de California. El movimiento transtensivo entre las placas Pacífico y Norteamérica forma el sistema de fallas transformantes de movimiento lateral derecho ligadas por cuencas pull-apart. Las fallas, cuencas y centros de dispersión son tomados de Lonsdale (1989), Fenby y Gastil (1991) y Aragón-Arreola (2006).. ....4
- Figura 3.** Ubicación de la cuenca Wagner y principales elementos tectónicos. Configuración del depocentro de la cuenca Wagner en área amarilla, tomada de González-Escobar et al. (2009). Las fallas moradas, verdes y azul corresponden a Cerro Prieto, Consag y Wagner respectivamente, tomadas de Martín-Barajas et al. (2013). Perfiles sísmicos de Ulloa 99 en color negro; perfiles adquiridos para este trabajo en color rojo. ....6
- Figura 4.** Localización del transecto de interés a través de la cuenca Wagner (en rojo). Las fallas y los ejes de las cuencas (en azul) en el norte del Golfo de California son de Fenby y Gastil (1991). .....7
- Figura 5.** Mediciones de flujo de calor a lo largo de un perfil en el mismo transecto de interés (ver Figura 4). Los altos valores de flujo de calor en el flanco este de la cuenca sugieren transporte advectivo asociado a zonas de fallas. ....8
- Figura 6.** Sección sísmica 5037 de PEMEX (Aragón-Arreola y Martín Barajas, 2007), que definió el transecto de interés para detallar la estructura somera de la cuenca de Wagner (Figura 4). Se muestra que la falla Wagner controla el medio graven con un depocentro al SW. Altos valores de flujo de calor se presentan al NE de la falla Wagner que converge al NW con la falla Cerro Prieto .....10
- Figura 7.** Batimetría del área de estudio, resultado de la interpolación realizada a partir de los datos procesados por Díaz Méndez et al., (1999). Cuenca Wagner corresponde a la depresión norte; cuenca Consag corresponde a la depresión sur. ....11
- Figura 8.** Perfil de ecosonda, con orientación similar al principal transecto de interés en Figura 4. Presencia de fallas activas, acumulación de fluidos y burbujas en la columna de agua. ....12
- Figura 9.** Modelo de resistividades resultante del estudio de métodos electromagnéticos de fuente controlada con orientación similar al principal transecto de interés en Figura 4. Se muestra la presencia de conductores someros (colores cálidos), posiblemente relacionados a agua subterránea . ....13
- Figura 10.** Modelo de resistividad resultado de la inversión 2D de datos MT con orientación similar al principal transecto de interés en Figura 4. Muestra la distribución de resistividad eléctrica con una profundidad de hasta 60 km. Se observa un conductor a profundidad pudiéndose interpretar como una fuente de calor ubicada bajo el depocentro de la cuenca Wagner en línea gris. ....14

- Figura 11.** Diagrama de elementos básicos de reflexión marina: buque de investigación, equipo de navegación GPS, fuente y arreglo de hidrófonos .....17
- Figura 12.** Secuencia básica del procesamiento de datos sísmicos de reflexión 2D multicanal .....19
- Figura 13.** Filtrado de frecuencias. (a) Registro sin filtrar. (b) Análisis espectral del registro. (c) Espectro de frecuencias filtrado. (d) Registro sísmico filtrado; visualmente se aprecia la atenuación de ruido ambiental, en especial de baja frecuencia.....21
- Figura 14.** (A) Análisis espectral en el dominio de la frecuencia-número de onda. Se limita un área con un polígono que contenga la energía concentrada de las reflexiones; (B) Respuesta del espectro al aplicarse el filtro. ....22
- Figura 15.** Autocorrelograma. Autocorrelaciona cada raza consigo misma. Se puede ver en el tiempo de retardo hasta los 75 ms el efecto reverberante de la fuente sísmica. ....23
- Figura 16.** Geometrías de puntos de reflejo común (CDP en inglés). Se observa el registro hiperbólico de las trazas por diferencia de tiempo. ....24
- Figura 17.** Análisis de velocidad individual de CDPs. El espectro de semblanza muestra las velocidades de apilamiento. Se deben seleccionar los puntos donde se concentra más la energía (en este caso áreas rojas) los cuales nos mostrarán la tendencia del incremento de velocidades. ....25
- Figura 18.** Diagrama esquemático ilustrando los diferentes tipos de ductos que conectan las ventilas con sills. A) Forma de tubería; B) cónico descendente; C) relacionadas a fallas.....
- Figura 19.** Ejemplo de chimeneas hidrotermales extendiéndose a través de la columna sedimentaria y los efectos que tiene en su camino, lo cual es característico de migración de fluidos (Hamilton et al., 2018). ....30
- Figura 20.** Fragmentos de secciones sísmicas que muestran indicadores como *brightspots*, zonas de blanqueo y chimeneas sísmicas. A) Ejemplo de *brightspot* y zona de blanqueo provocados por ascenso de fluidos. B) Ejemplo de chimeneas sísmicas que muestran reflectores internos deformados por el cambio de velocidad por su contenido de fluido .....31
- Figura 21.** Mapa de ubicación de líneas sísmicas en la zona de la cuenca Wagner utilizadas en este trabajo. Las fallas en azul son de Martín-Barajas et al. (2013), en verde son de Gonzalez-Escobar et al., 2009). ....32
- Figura 22.** Sección Ulloa 10. El flanco SE de la sección (derecha) muestra mejor contraste de amplitud en los reflectores hasta ~1000 ms del lado SE del perfil. Se muestra el patrón de fallas que cortan a los estratos y zonas verticales de bajo contraste que sugieren ascenso de fluidos. El margen NW de la cuenca tiene poco contraste y múltiples del fondo marino. Las emanaciones se ubican en los bordes de un graben con relleno asimétrico del depocentro activo. ....34
- Figura 23.** Sección Ulloa 06. El flanco NW de la cuenca muestra poco contraste, múltiples del fondo marino y poca actividad. Flanco SE incrementa la densidad de afallamiento así como la actividad hidrotermal. Esta sección cruza el eje de la cuenca Wagner, se puede observar gran espesor sedimentario depositado en el depocentro debido al alto aporte de material proveniente del Río Colorado ubicado al Norte.....37

- Figura 24.** Sección Ulloa 08. El flanco NW muestra buen contraste, evidenciando actividad hidrotermal, sin embargo, el flanco SE es más activo por la gran densidad de afallamiento y evidencia de actividad hidrotermal. Destaca un reflector altamente escalonado, el cual adquiere una morfología diferente a partir de la zona de falla Wagner, indicador de actividad hidrotermal.....38
- Figura 25.** Sección Ulloa 23. Eje del depocentro de la cuenca Wagner. Muestra el comportamiento deposicional uniforme de una cuenca sedimentaria Se ilustra el carácter casi simétrico que tiene este perfil, la poca densidad de fallas y carencia de anomalías de alta amplitud o pérdida de continuidad lateral de los reflectores.....41
- Figura 26.** Sección Ulloa 21. Muestra el flanco NE de la cuenca Consag (flanco SW). En contraste a la sección Ulloa 23 (Figura25) presenta reflectores horizontales con perdida de continuidad lateral afectados por anomalías de amplitud en la señal sísmica, indicadores de actividad hidrotermal, próxima a la falla Wagner.....41
- Figura 27.** Sección 5037. Muestra zonas con anomalías de amplitudasociadas a la presencia de estructuras y/o actividad hidrotermal que resulta cuestionable debido a la baja resolución del dato. En zoom, zona de mayor interés hidrotermal. Horizonte se interpreta como basamento acústico. ....43
- Figura 28.** Sección Alpha 1. El margen NW de la cuenca tiene la presencia de múltiples del fondo marino y carece de buen contraste. Parte central corresponde a la zona de falla Wagner donde hay actividad hidrotermal que incluso afecta el fondo marino. El flanco SE es más activo en comparación con NW, la sombra amarilla se interpreta fluido que es capturado por fallas y migra a superficie. ....46
- Figura 29.** Sección Alpha 2. Sección transversal a Alpha 1 (Figura 28), Zona de falla Wagner contenida en sombra amarilla reflexiones caóticas con amplitudes altas y difusividad circundante, tiene un área mayor debido a que cruza la falla Wagner en un ángulo cerrado, presenta también un escarpe notable. Delimitada en línea negra punteada un área con reflectores con mayor resolución con baja actividad hidrotermal a profundidad. ....47
- Figura 30.** Sección Alpha 3. Presenta mayor actividad en el flanco NE, donde se aprecia una zona con pérdida de coherencia y escarpe notable en un área que corresponde a la zona de falla Wagner. La resolución del depocentro se ve afectada probablemente por acumulación de fluidos. ....50
- Figura 31.** Sección Alpha 4. Paralela a la Sección Alpha 3, en general presenta mejor resolución donde destacan las zonas con sombra amarilla. La zona con pérdida de coherencia a profundidad, interpretada como la zona de falla Wagner delimita ambos flancos de la sección, en la cual la presencia de anomalías de amplitud predomina en el flanco NE donde se da principalmente la migración de fluidos a superficie canalizados por fallas y chimeneas hidrotermales asociadas. Horizontes de control ilustran el carácter deposicional de la cuenca Wagner .....52
- Figura 32.** Modelo conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto. Muestra la dinámica que tienen los fluidos en el interior de un semigraben .....53

- Figura 33.** Ejemplos de chimeneas hidrotermales. A) Fragmento de la sección Ulloa 21 con chimeneas que deforman los estratos que atraviezan y con cimas o niveles con amplitud anómala o *brightspots*. B) Expresión sísmica de estructuras tipo chimenea. Los conductos por donde asciende el fluido tienen pérdida de coherencia, mientras que en su tope hacen presencia altas amplitudes, interpretándose como acumulación de fluido. ....55
- Figura 34.** Segmento de la sección Alpha 4. A) Sección sísmica en fase normal; eventos de discontinuidad lateral interpretados como fallas en línea roja. B) Sección sísmica con atributo de fase instantánea; muestra 3 de las chimeneas identificadas en recuadro punteado amarillo, área afectada bajo líneas punteadas negras y flecha blanca indicando la dirección de ascenso hidrotermal.....57
- Figura 35.** Mapeo de chimeneas hidrotermales observadas en la cuenca Wagner; en triángulo rojo se ubica la actividad más evidente y amarillo la actividad con menor expresión en el perfil sísmico. Las fallas principales son de (Martin-Barajas et al., 2013); falla Wagner en línea azul; falla Consag en línea verde; falla de Cerro Prieto en línea morada. Se observa que la actividad más numerosa se ubica al este de la cuenca. ....58
- Figura 36.** Segmento de la sección Ulloa 08 que muestra un horizonte de alta amplitud escalonado por la deformación. La falla Wagner produce el mayor desnivel de este horizonte. La sombra amarilla es pérdida de coherencia causada por actividad hidrotermal. ....60
- Figura 37.** Síntesis de la diferencia en la configuración estructural de la cuenca Wagner. A) Flanco NW es caracterizado por gran cantidad de múltiples y baja resolución a profundidad; delimitado por polígono verde; B) Porción central, principal zona de subsidencia; delimitada por polígono rojo y C) Flanco SE caracterizado por alta actividad hidrotermal; delimitado por polígono amarillo. Secciones sísmicas en línea negra; falla Wagner en línea azul; falla Consag en línea verde; falla de Cerro Prieto en línea morada. ....61
- Figura 38.** A) Perfil de ecosonda correspondiente a sección Alpha 1. Principales rasgos asociados a actividad hidrotermal; zonas de turbidez acústica marcadas con línea roja. B) Mapa de ubicación, en línea roja orientación correspondiente al perfil de ecosonda. ....61
- Figura 39.** Modelo conceptual de la sección Alpha 1 (Figura 28). Zona de falla Wagner en rojo, flechas negras onduladas indican las principales vías de migración de fluidos hidrotermales. Zoom del modelo indica la presencia de un par de ventilas hidrotermales y la dinámica de expulsión de fluido/material hacia superficie. La zona superior en rojo contrasta en amplitud y es debido a la precipitación de minerales en el sedimento a partir de los fluidos hidrotermales.....62
- Figura 40.** Perfil de ecosonda Alpha 2. Muestra zonas de turbidez acústica sobre la línea roja y posibles zonas de burbujeo que producen reflejos de la señal acústica viajando en el agua. B) Mapa de ubicación del perfil de ecosonda Alpha 2.....63
- Figura 41.** Modelo conceptual de la sección Alpha 2 (Figura 29) que atraviesa de forma oblicua a la falla Wagner lo que produce una zona de falla de ~6 km de ancho. Esta zona de falla muestra contraste en ambos lados de la falla. Diferencia entre zonas afectadas por diferente saturación de fluido en líneas quebradas. Flechas negras indican principales vías de flujo hidrotermal a través del área de la falla Wagner. ....64

- Figura 42.** Perfil de datos de ecosonda correspondiente a Alpha 4. Muestra los principales rasgos de actividad hidrotermal. Zonas de turbidez acústica sobre líneas rojas. B) Mapa de ubicación, en línea roja orientación correspondiente al perfil de ecosonda. ....65
- Figura 43.** Modelo conceptual de Alpha 4 (Figura 31). Se indica un contraste de vías de migración de fluidos hidrotermales en los flancos de la cuenca. El flujo es predominante a partir de la zona de falla Wagner hacia el flanco NE. La magnitud de estas vías de migración está clasificada por color. En flechas negras onduladas la dirección de migración del fluido. Principales zonas de acumulación de fluido en sombra azul. Zona de falla en rojo. Los horizontes de control ilustran el comportamiento deposicional que tiene la cuenca Wagner.....66
- Figura 44.** Modelo 2D estimado de la inversión 2D de datos MT. Posición del modelo Alpha 4 en línea blanca; falla Wagner en línea azul; área delimitada por línea roja respectiva a la fuente de calor que alimenta el sistema hidrotermal de la cuenca Wagner atribuida a un conductor profundo en colores cálidos . ....67
- Figura 45.** Integración de evidencias de actividad hidrotermal en la cuenca de Wagner. A) Datos de ecosonda que muestra zonas de turbidez acústica relacionadas a acumulación de fluidos. B) Datos sísmicos de alta resolución con la zona de falla Wagner y las principales vías de migración a superficie de fluidos hidrotermales. C) Modelo de resistividad (Reyes-Ortega, 2016) con la presencia de conductores someros relacionados a agua subterránea (colores cálidos). D) Valores de flujo de calor de Neumann et al., (2017) con estrellas rojas que muestran valores extraordinarios. E) Mapa de ubicación de los perfiles A, B, C y D. ....68
- Figura 46.** Modelo conceptual del sistema hidrotermal en la cuenca Wagner. Se muestran zonas de acumulación subsuperficial en azul, zona de falla Wagner en rojo, y fuente de calor en profundidad en tonos cálidos. Flechas rojas indican la dirección de flujo de ascenso hidrotermal.....70

## Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros de adquisición de los perfiles sísmicos colectados en enero de 2019.....	18
Tabla 2. Navegación de las líneas adquiridas en enero de 2019. ....	18
Tabla 3. Navegación de líneas del crucero Ulloa 99 y la línea 5037 de PEMEX. ....	19

## Capítulo 1. Introducción

---

México tiene un gran potencial de desarrollo de este tipo de energía, con una capacidad termal instalada de 155.82 MWt (Lund y Boyd, 2016) y se posiciona en 6° lugar a nivel mundial en producción de energía eléctrica con una capacidad instalada de 958 MW (Bertani, 2012) operando 4 centrales geotérmicas los cuales producen el 2.3% de la energía nacional (Flores-Armenta et al., 2014).

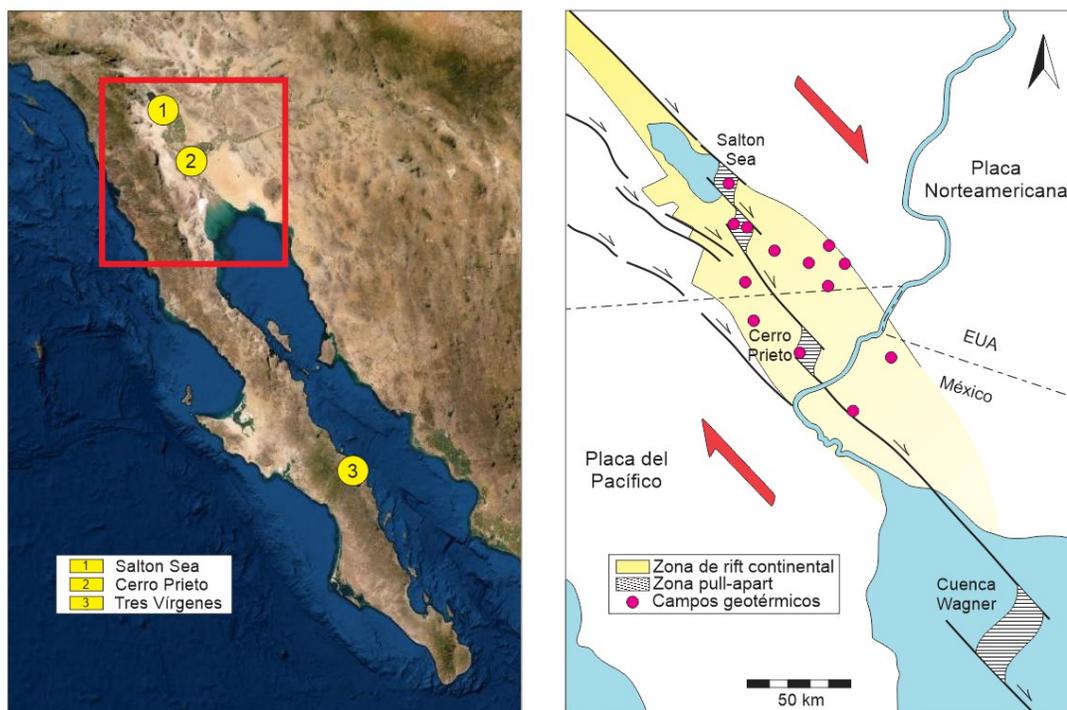
La mayoría de las áreas con potencial geotérmico conocidas en el mundo se encuentran en costa afuera (Armani y Paltrinieri, 2013; Atkins y Audunsson, 2014), por lo que vale la pena estudiarlas para poder explotar este recurso en el futuro. Sin embargo, aunque actualmente aún no se cuenta con plantas marinas geotérmicas en la actualidad, el siguiente paso es explotar los recursos geotérmicos marinos basándonos en la tecnología y metodología que emplea la industria petrolera.

Las cuencas pull-apart activas son comunes en zonas de rift asociadas a ambientes tectónicos transcurrente, y comúnmente hay la ocurrencia de recursos geotérmicos debido al incremento de la permeabilidad producida por fallas mayores, relleno de material permeable en la cuenca y flujo de calor elevado debido a adelgazamiento de la corteza (Lukman et al., 2019).

Los factores predominantes que determinan la dinámica en prospectos geotermales son la fuente de calor, usualmente intrusiones magmáticas someras (Santilano et al., 2015) y la permeabilidad, relacionada a un sistema natural de fracturas producido por deformación frágil (Faulds et al., 2010), aunque también pueden ser creada por lixiviación en procesos de alteración hidrotermal o diagénesis (Bogie et al., 2015). Por tanto, el entendimiento magmatismo y el sistema de fallas son importantes en la caracterización y evaluación de un sistema geotérmico durante su exploración.

En el rift del Golfo de California la deformación en el límite de placas Pacífico y Norteamérica se acomoda por una serie de fallas transformantes de movimiento lateral derecho ligadas por cuencas pull-apart, que en la mitad sur han evolucionado a centros de dispersión con producción de piso oceánico (Lonsdale, 1989; Lizarralde et al., 2007), mientras que al norte de las islas Tiburón y Ángel de la Guarda, las cuencas pull-apart se encuentran en una etapa más incipiente de formación y la creación de nueva corteza oceánica aún no se comprueba (González-Fernández et al., 2005; Martín Barajas et al., 2013), aunque existen evidencias de magmatismo reciente en las cuencas Delfín y en las cuencas Cerro Prieto y Salton al norte. Se conocen al menos 3 sistemas geotérmicos dentro de este ambiente tectónico: Salton Sea y Cerro Prieto, ubicados al norte del Golfo de California, y Tres Vírgenes, localizado en la parte central

de la península de Baja California. Los dos primeros se ubican en la zona axial de las cuencas pull-apart, mientras que Tres Vírgenes se ubica en la prolongación norte de la zona de fractura Carmen (Figura 1).



**Figura 1.** A) Localización de los campos geotérmicos de Salton Sea, Cerro Prieto y Tres Vírgenes. B) Ambiente tectónico del Norte del Golfo de Baja California y campos geotérmicos (no todos en producción) relacionados a cuencas pull apart. Movimiento relativo de placas de tectónicas en flechas rojas grandes. Modificado de Hulen et al. (2002).

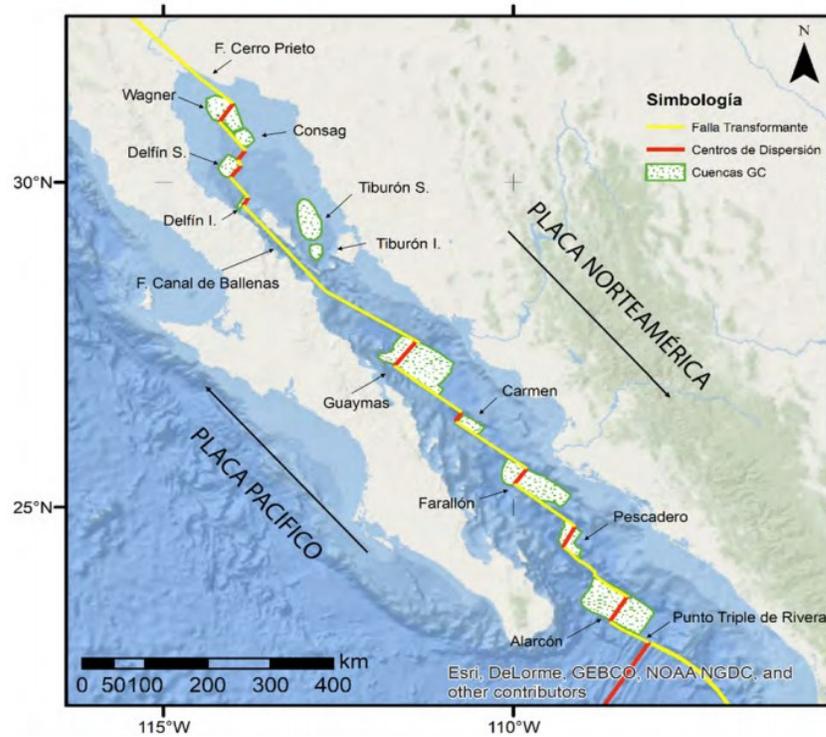
Este proyecto de tesis forma parte del proyecto: “Campaña intensiva de exploración geotérmica de las cuencas Wagner, Consag, Delfín, Guaymas y Alarcón del sistema de rifts del Golfo de California (P03)” liderado por el Dr. Antonio González Fernández en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). En dicho proyecto se realizó la caracterización térmica y estructural de la cuenca Wagner, lo que permite realizar un primer modelo conceptual del sistema hidrotermal en la cuenca. Particularmente para este trabajo de tesis, se realizó la adquisición de perfiles sísmicos de reflexión de alta resolución para realizar una interpretación más detallada de estructuras someras de posible interés geotérmico en la cuenca de Wagner incorporando los perfiles sísmicos del crucero Ulloa99-5 (Persaud et al., 2003) y resultados de otras campañas de estudios geológicos y geofísicos en el norte del Golfo de California.

## 1.1. Marco geológico

El Golfo de California contiene un sistema de rift oceánico extensional oblicuo, que en la región al norte de las islas Tiburón y Ángel de la Guarda transita a un ambiente de ruptura continental en el límite de placas Pacífico y de Norteamérica (González-Fernández et al., 2005). Estructuralmente, el rift del Golfo de California es un sistema de cuencas pull-apart que evolucionaron a centros de dispersión conectados por fallas transformantes con salto derecho. Este sistema de rift se desarrolló dentro de la provincia extensional del Golfo formada durante una etapa previa de extensión continental que afectó el NW de México y el SW de E.U (Herny y Aranda Gomez, 1984). La deformación transtensional se concentró en una franja más estrecha del lado oeste del rift continental a partir de los 6-7 Ma (Seiler et al., 2010; Bennett y Oskin, 2014) (Figura 2) y la ruptura continental ocurrió hace 3 Ma en la cuenca Alarcón en la boca del golfo (Lonsdale, 1989; Fenby y Gastil, 1991).

Se han propuesto dos modelos para explicar la evolución cinemática del rift del Golfo de California; el primer modelo sugiere que de 12.3 a 6 Ma el movimiento lateral derecho entre las placas Pacífico y Norteamérica fue acomodado por fallas transcurrentes al oeste de Baja California (sistema de falla Tosco-Abrejos c.f. Spencer y Normark, 1989), mientras que la extensión ortogonal simultáneamente comenzó en la zona del actual golfo y la planicie costera de Sonora (Stock y Hodges, 1989). La subsidencia asociada a la extensión oblicua propició a primera incursión marina hacia los 7-8 Ma (Oskin y Stock, 2003; ver evidencias paleontológicas en trabajos de síntesis McDougall, 2008). La etapa conocida como proto-golfo (Karig y Jensky, 1972) se definió originalmente para explicar el registro de secuencias marinas del Mioceno Medio. Posteriormente, se comprobó que esos registros son más recientes y el inicio de la sedimentación marina inició entre hacia los 7-8 Ma. A los ~6 Ma las fallas al oeste de Baja California disminuyeron su actividad y la transtensión se concentró en el actual golfo, iniciando así la transferencia de Baja California a la placa del Pacífico (Stock y Hodges, 1989; Oskin y Stock, 2003).

El segundo modelo (c.f. Fletcher et al., 2007) propone que después de la subducción comienza una etapa de transtensión en ambos lados de Baja California y progresivamente la transtensión fue mayor en el golfo de California. Este modelo considera que hubo un cambio en la dirección del movimiento relativo Pacífico-Norteamérica hace 7.8 Ma (Atwater y Stock, 1998).



**Figura 2.** Mapa tectónico del rift del Golfo de California. El movimiento transtensivo entre las placas Pacífico y Norteamérica forma el sistema de fallas transformantes de movimiento lateral derecho ligadas por cuencas pull-apart. Las fallas, cuencas y centros de dispersión son tomados de Lonsdale (1989), Fenby y Gastil (1991) y Aragón-Arreola (2006). Modificado de Peña (2018).

Debido al adelgazamiento y ruptura de la corteza continental y el manto litosférico, se formaron pequeñas cuencas a lo largo del Golfo de California que presentan diferencias morfológicas y estructurales sustantivas. En la parte central y sur las cuencas son más profundas y son consideradas centros dispersión con presencia de corteza oceánica (Lizarralde et al., 2007), mientras que en la parte norte se observa una transición a un sistema de rift con incipiente ruptura continental que define el límite entre placas del Pacífico y de Norteamérica (Stock y Hodges, 1989; González-Fernández et al., 2005; Martín-Barajas et al., 2013).

Las cuencas activas del norte del Golfo de California definen una zona de deformación distribuida que incluye a las cuencas Delfín Inferior (LDB), Delfín Superior Norte (NUDB), Delfín Superior Sur (SUDB), Consag (CB) y Wagner (WB). Esta última es actualmente la cuenca marina más septentrional y es el área de interés de esta tesis.

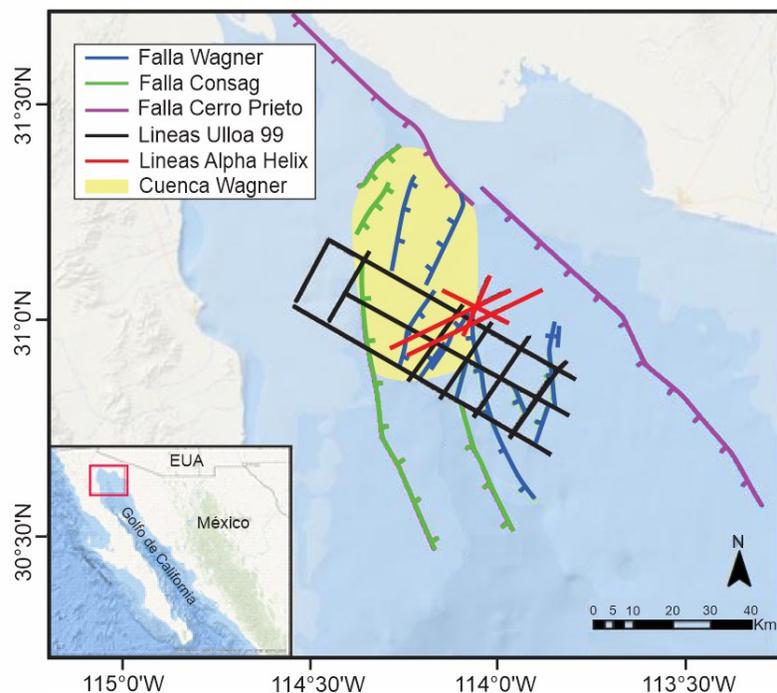
## 1.2. Área de estudio

La cuenca Wagner es la depresión más septentrional del Golfo de California y es considerada como una zona de deformación transtensional difusa (Nagy y Stock, 2000; Persaud et al., 2003; Figura 3). Se considera una cuenca pull-apart limitada al norte por el sistema transcurrente de la falla Cerro Prieto (FCP), mientras que al sur su límite estructural es un alto estructural que separa otra zona de subsidencia activa que se prolonga hacia la cuenca Consag. La falla de Cerro Prieto es la principal estructura que transfiere la deformación entre los sistemas de la parte norte del Golfo de California y las depresiones estructurales de Cerro Prieto e Imperial (Fenby y Gastil, 1991).

La cuenca de Wagner es una depresión elíptica con el eje mayor en dirección NNE de ~40 km de longitud, mientras que su eje menor es de ~20 km en dirección NW alcanzando una profundidad máxima de 230 m bajo el nivel del mar. Se piensa que esta cuenca es relativamente joven (Plioceno Tardío), y se ubica en la parte distal sumergida del delta del Río Colorado (Helenes-Escamilla et al., 2006; Figura 3). Su área se calcula en aproximadamente 2240 km<sup>2</sup> (Persaud, 2003; Persaud et al., 2003; González et al., 2006). En la parte norte de la cuenca Wagner la longitud de la frontera de la cuenca a lo largo de la falla Cerro Prieto es de 18 km, la falla Consag limita esta cuenca a lo largo de 68 km y la falla Wagner es el margen oriental en 42 km, respectivamente (Aguilar, 2007).

Las fallas Consag y Wagner constituyen los límites occidental y oriental de la cuenca Wagner, respectivamente (Figura 3). La falla Wagner es una falla normal-oblicua con caída al oeste y dirección NS, mientras que la falla Consag es una falla normal de orientación NNE con caída al este. Ambas fallas controlan la subsidencia y ubicación del depocentro en la cuenca Wagner, la cual se estima que tiene una tasa de acumulación de 100 cm/mil años en promedio desde el Mioceno tardío (Nix, 2013), y un relleno sedimentario de 6 a 7 km (González-Escobar et al., 2009).

El margen este-sureste de la cuenca Wagner está delimitado por una caída del basamento de ~ 3 km en dirección oeste y probablemente esta estructura absorbe la mayor parte de la deformación por cizalla lateral en el extremo sur de la falla Cerro Prieto; Aragón-Areola (2007) propone que la falla Wagner se intersecta con un ángulo 130° con la falla Cerro Prieto. Hurtado (2003) define un semigraben en flanco pronunciado en el flanco este de la cuenca, donde está ubicado el plano de falla principal y una mayor actividad tectónica.



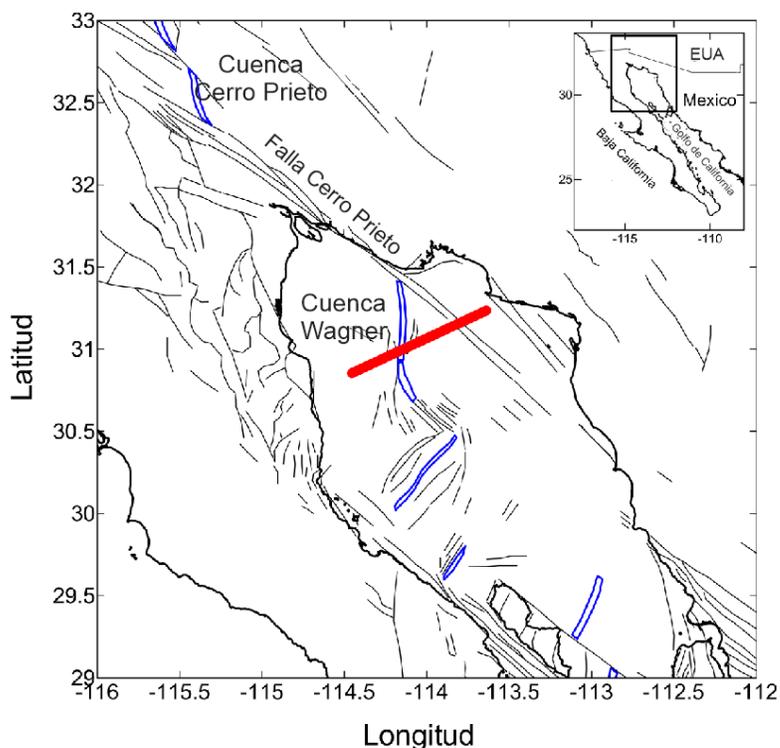
**Figura 3.** Ubicación de la cuenca Wagner y principales elementos tectónicos. Configuración del depocentro de la cuenca Wagner en área amarilla, tomada de González-Escobar et al. (2009). Las fallas moradas, verdes y azul corresponden a Cerro Prieto, Consag y Wagner respectivamente, tomadas de Martín-Barajas et al. (2013). Perfiles sísmicos de Ulloa 99 en color negro; perfiles adquiridos para este trabajo en color rojo.

Las cuencas de Wagner y Consag presentan una alta densidad de fallas, muchas de ellas cortan el fondo marino a pesar de la alta tasa de acumulación de sedimentos deltaicos (Persaud, 2003). En base a la malla de perfiles de reflexión sísmica disponibles en el golfo de California, no se observa el basamento acústico por bajo del depocentro de la cuenca, pero el registro en los perfiles sísmicos de PEMEX indica que este se encontraría a profundidades superiores a 7 km, sin embargo, la pérdida de resolución sísmica no permite definir si este basamento es de tipo continental o es de carácter oceánico (González-Escobar et al., 2009; Martín-Barajas et al., 2013).

La actividad magmática en la cuenca de Wagner esta enmascarada por la sedimentación en la porción distal del delta del rio Colorado. No obstante, en el borde oeste de la cuenca emerge el islote Roca Consag, que consiste en domo dacítico con una edad de erupción de ~40 mil años (Schmitt et al., 2003). Roca Consag tiene una firma isotópica consistente con fundidos originados en el manto, por lo que se infiere actividad magmática a profundidad.

### 1.3. Estudios previos relacionados con el sistema hidrotermal

Estudios previos en la cuenca de Wagner indican valores de alto flujo de calor (Prol-Ledesma et al., 2013; Neumann et al., 2017), situados sobre el margen oriental de la depresión estructural que forma la cuenca (Aragón-Arreola y Martín Barajas, 2007). Los datos de flujo de calor se colectaron sobre un transecto a través de la cuenca Wagner (Figura 4).



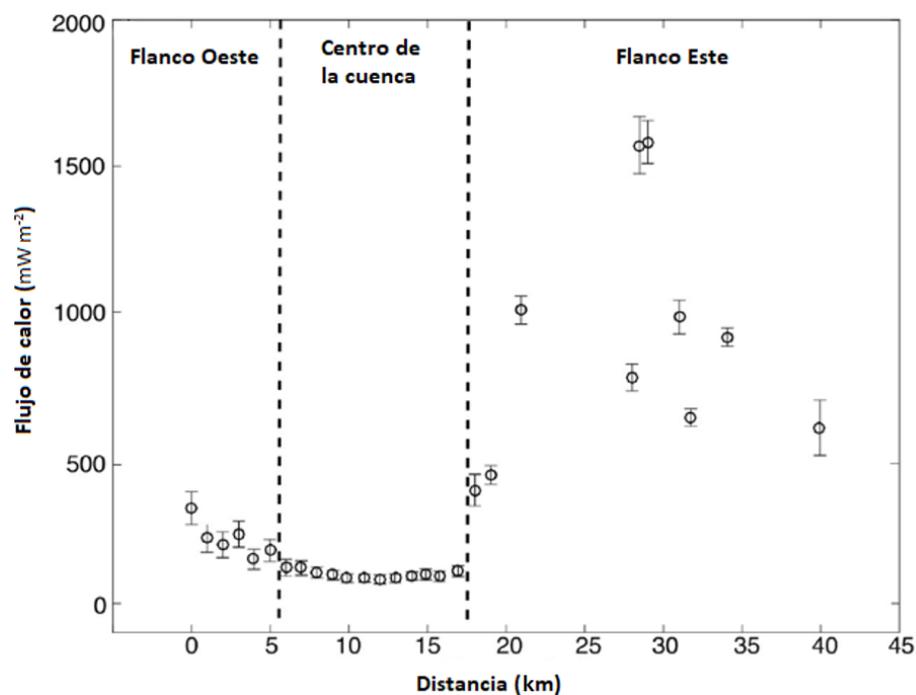
**Figura 4.** Localización del transecto de interés a través de la cuenca Wagner (en rojo). Las fallas y los ejes de las cuencas (en azul) en el norte del Golfo de California son de Fenby y Gastil (1991). Modificado de González-Fernández et al., 2017).

#### 1.3.1. Flujo de calor

A pesar de que inicialmente en estudios de flujo de calor no se reconocieron valores anómalos en la parte norte del Golfo de California (Sánchez-Zamora et al., 1991), recientemente Prol-Ledesma et al. (2013) llevaron a cabo estudios geoquímicos y de flujo de calor nuevamente en el área, proveyendo evidencia de actividad hidrotermal en las cuencas de Wagner y Consag, estos últimos alcanzando un valor promedio de  $1.875 \text{ Wm}^{-2}$  lo cual es 15 veces más que el promedio de flujo de calor para corteza oceánica joven ( $105 \text{ mWm}^{-2}$ ). De igual forma, la relación medida de  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  en temperaturas de equilibrio de  $200^\circ\text{C}$

corresponde con lo observado en otras cuencas con presencia de actividad hidrotermal. Adicionalmente, se encontró bacteria metanogénica que vive en ecosistemas donde los rangos de temperatura son de 75 a 105°C, cuya presencia esta normalmente asociada con sistemas hidrotermales y su ocurrencia se correlaciona a chimeneas hidrotermales localizadas la cuenca noreste de Wagner. Estos altos valores se interpretan como evidencia de ruptura continental y extensión activa del fondo oceánico. El trabajo de Prol-Ledesma et al. (2013) sugiere un sistema hidrotermal sellado bajo una capa de sedimentos de baja permeabilidad.

Nuevas mediciones de flujo de calor (Figura 5) muestran valores consistentes de  $\sim 150$  mW/m<sup>2</sup> en el centro de la cuenca (Neumann et al., 2017) y valores ligeramente más altos en el flanco Oeste, y mucho más altos ( $>800$  mW/m<sup>2</sup>) en el flanco Este, los cuales asocian a flujo advectivo de fluido caliente en fallas que alcanzan el fondo marino.



**Figura 5.** Mediciones de flujo de calor a lo largo de un perfil en el mismo transecto de interés (ver Figura 4). Los altos valores de flujo de calor en el flanco este de la cuenca sugieren transporte advectivo asociado a zonas de fallas (Tomado de Neumann et al., 2017).

La disminución del flujo de calor varía significativamente a lo largo del perfil. En el flanco Oeste se tiene un promedio de 220 mW/m<sup>2</sup> y en el centro disminuye a un valor consistente de 99 mW/m<sup>2</sup> basado

en el análisis de isotermas de Curie (Sánchez-Zamora et al., 1991) y en el flanco Este, al este de la falla Wagner el valor promedio es de  $889 \text{ mW/m}^2$  (Neumann et al., 2017).

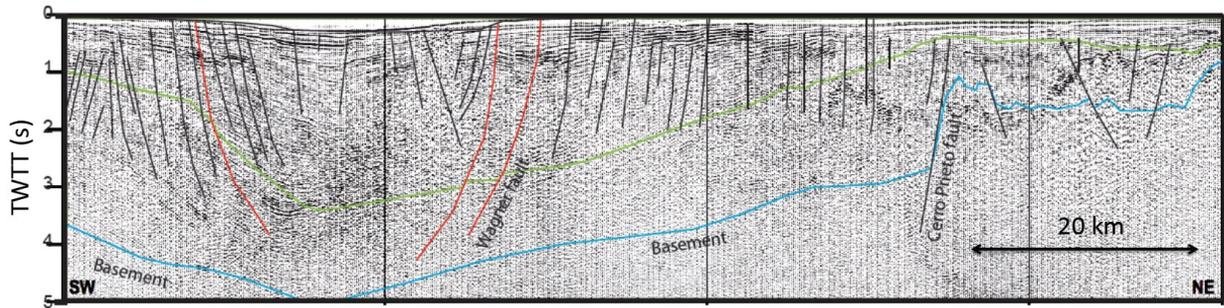
Estos valores de flujo de calor se interpretaron como transferencia de calor conductiva en la zona central de la cuenca y se interpreta como transferencia advectiva de calor a través de la migración de fluidos por vías permeables como fallas y fracturas.

### **1.3.2. Sísmica de reflexión**

Persaud et al. (2003) con datos de Ulloa 99 definieron características estructurales de cuencas en el norte del Golfo de California a partir de la interpretación de datos sísmicos de alta resolución colectados en 1999, con una penetración de hasta 2 km por debajo del fondo marino. Reportan escarpes de fallas en el fondo marino de menor magnitud y menos común, pero una gran densidad de fallas en la cuenca Wagner y Consag en comparación otras cuencas. El patrón estructural es asimétrico, con más fallas activas sobre una región amplia en el flanco SE de la cuenca y una zona menos activa en el flanco NW. Aunque no se identificaron montículos volcánicos, Roca Consag, una pequeña isla al oeste de la cuenca Wagner, puede proveer evidencia de actividad magmática, sin embargo, su identificación se ve reducida debido a la proximidad del delta del Río Colorado y el grosor de la columna sedimentaria.

Persaud et al. (2003) sugiere que la transición de creación de corteza continental a corteza oceánica está siendo retrasada por la falta de deformación particionada como consecuencia del movimiento de cizalla en una zona amplia debajo de una cubierta sedimentaria gruesa

El análisis estructural de González-Escobar et al. (2009) se realizó con datos sísmicos de PEMEX adquiridos entre 1978 y 1980 en el norte del Golfo de California. El estudio indica que las cuencas Wagner y Consag son depocentros independientes y están separado por zona de acomodamiento o alto estructural. Aragón-Arreola (2006) analizó un perfil sísmico que a través de la cuenca Wagner (Figura 6) en donde se observa una estructura de medio graben con engrosamiento del relleno sedimentario al oeste de la falla Wagner, similar estructuralmente al sistema hidrotermal ubicado en Cerro Prieto.



**Figura 6.** Sección sísmica 5037 de PEMEX (Aragón-Arreola y Martín Barajas, 2007), que definió el transecto de interés para detallar la estructura somera de la cuenca de Wagner (Figura 4). Se muestra que la falla Wagner controla el medio gravado con un depocentro al SW. Altos valores de flujo de calor se presentan al NE de la falla Wagner que converge al NW con la falla Cerro Prieto (Tomado de Aragón-Arreola, 2006).

### 1.3.3. Geoquímica

Batista (2019) analizó aguas de poros muestreadas en núcleos de alta y baja temperatura aportando información acerca de la composición y el origen de los fluidos hidrotermales descargados en la cuenca Wagner.

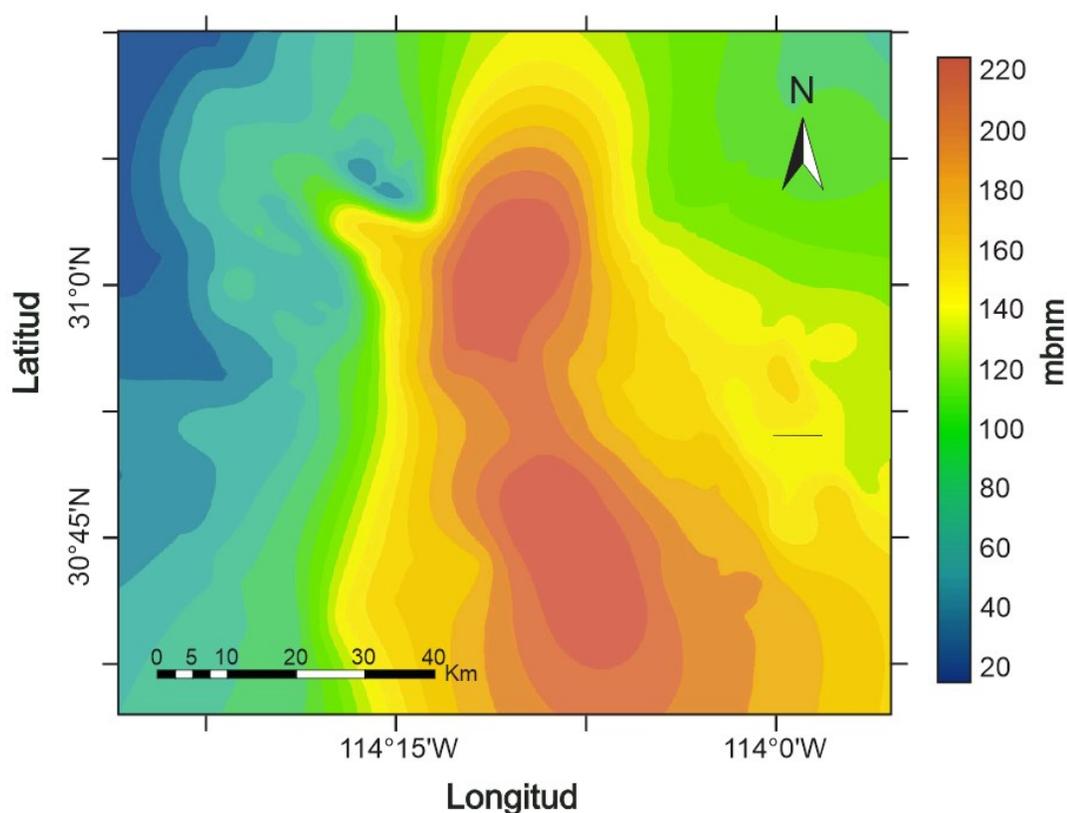
Colectó 11 núcleos de alta temperatura (32.5 - 99.6 °C) y 7 de baja temperatura (16.4 - 25.6 °C) en los cuales la composición del agua intersticial de núcleos someros (< 3 m) varía de acuerdo a la temperatura del núcleo. Las muestras de NTA están enriquecidas en Cl (26,100-37,074 mgL<sup>-1</sup>) en comparación con las muestras de NTB (19,500 a 21,300 mgL<sup>-1</sup>) y el agua de mar (~20,311 mgL<sup>-1</sup>). Elementos como Br, Na, K, Ca, Sr y B también están más concentrados en las muestras de los NTA que en las muestras de los NTB y el agua de mar respectivamente. Además, los núcleos de temperatura alta presentan una baja concentración de SO<sub>4</sub> y MgO, en comparación con núcleos de baja temperatura y agua de mar.

Isotópicamente las muestras de ambos grupos también pueden diferenciarse. Las muestras de los NTB se caracterizan por valores  $\delta^{18}\text{O}$  entre -0.16 a +0.38 ‰ y  $\delta\text{D}$  entre -1.91 a -4.75 ‰, ambos relativos al estándar VSMOW. Sin embargo, valores mucho más negativos para el  $\delta\text{D}$  hasta -30.48 ‰ son observados para los núcleos de temperatura alta, mientras la composición del  $\delta^{18}\text{O}$  es muy similar (+0.14 - +1.39 ‰) a los núcleos de temperatura baja. Existen también variaciones en las firmas isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , siendo valores desde 0.70929 a 0.70996 característicos de núcleos de temperatura alta y valores entre 0.70927 a 0.70945 para núcleos de temperatura baja. Respecto a las firmas isotópicas de carbono para  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  y  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$  los núcleos de temperatura baja muestran un amplio rango de valores para  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ , desde -29.1 ‰

hasta +2.3 ‰. Este carbono positivo también se observa en todos los núcleos de temperatura alta, donde se reportaron valores de hasta +10.5 ‰. Por su parte, el carbono orgánico particulado ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ ) en las muestras indica valores entre -22.0 a -23.9 ‰ para los núcleos de temperatura alta con valores, ligeramente más bajos desde -21.5 a -22.1 ‰ para los núcleos de temperatura baja.

#### 1.3.4. Batimetría

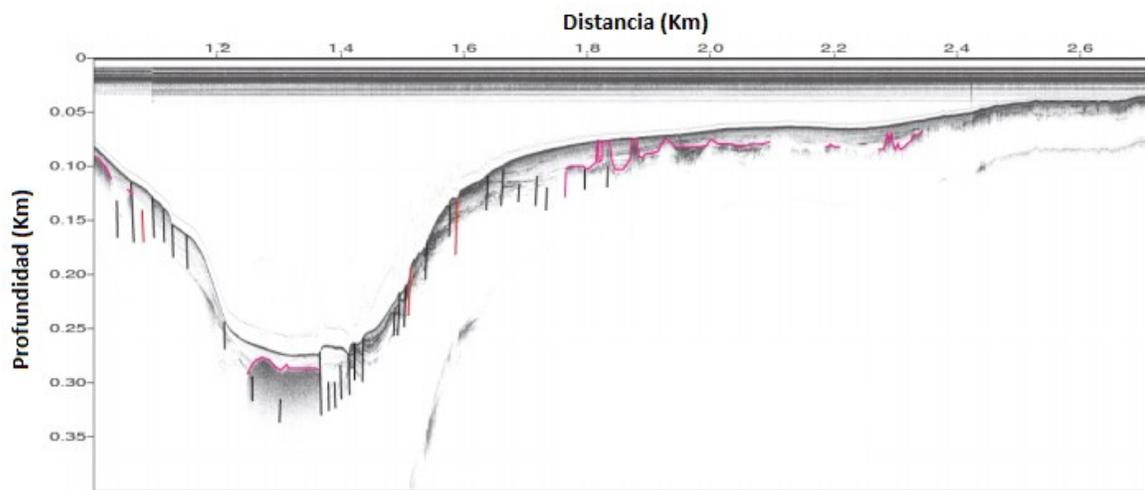
En conjunto con la adquisición de datos de flujo de calor se adquirieron simultáneamente datos de ecosonda con el sistema hidrográfico del buque Alpha Helix durante la campaña de exploración del norte del Golfo de California del 2015. El mapa batimétrico de las cuencas Wagner y Consag se muestra en la Figura 7. En conjunto, estas dos cuencas se disponen en una dirección NNW-SSE y ocupan un área de ~75 km de longitud por 35 km de anchura.



**Figura 7.** Batimetría del área de estudio, resultado de la interpolación realizada a partir de los datos procesados por Díaz Méndez et al. (1999). Cuenca Wagner corresponde a la depresión norte; cuenca Consag corresponde a la depresión sur.

La cuenca Wagner tiene una morfología aproximadamente elíptica, con el eje mayor orientado en dirección NNE. Con 10 km de longitud, el fondo de la cuenca es casi plano alcanzando una profundidad máxima de 216 mbnm. Al sur, separada por un collado submarino, la cuenca Consag es alargada, con una orientación NNW-SSE. El fondo de la cuenca define un valle estrecho de 16 km de largo por 2.5 km de ancho con una profundidad de 204 mbnm (Vázquez-Figueroa et al., 2009).

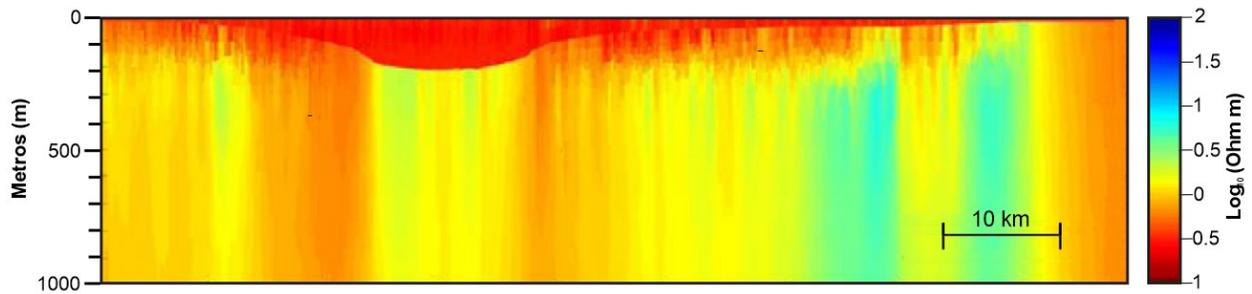
Díaz-Méndez et al. (2015) usaron los perfiles acústicos adquiridos para obtener una batimetría más precisa del área de estudio; adicionalmente estos datos permitieron la localización de pequeñas estructuras subsuperficiales relacionadas a emanaciones hidrotermales (Figura 8).



**Figura 8.** Perfil de ecosonda, con orientación similar al principal transecto de interés en Figura 4. Presencia de fallas activas, acumulación de fluidos y burbujas en la columna de agua (Tomado de González-Fernández et al., 2017).

### 1.3.5. Método Electromagnético de fuente controlada

El modelo de resistividades obtenido por Reyes-Ortega (2016) (Figura 9), muestra zonas de baja resistividad eléctrica en colores cálidos, los cuales se pueden asociar a migración de fluidos a través del subsuelo. Comparó la distribución de resistividades con los resultados de flujo de calor usando contornos de interpolación, mostrando una buena correlación; el conjunto de estas dos variables indica que los métodos electromagnéticos son efectivos para localizar zonas someras de flujo hidrotermal.



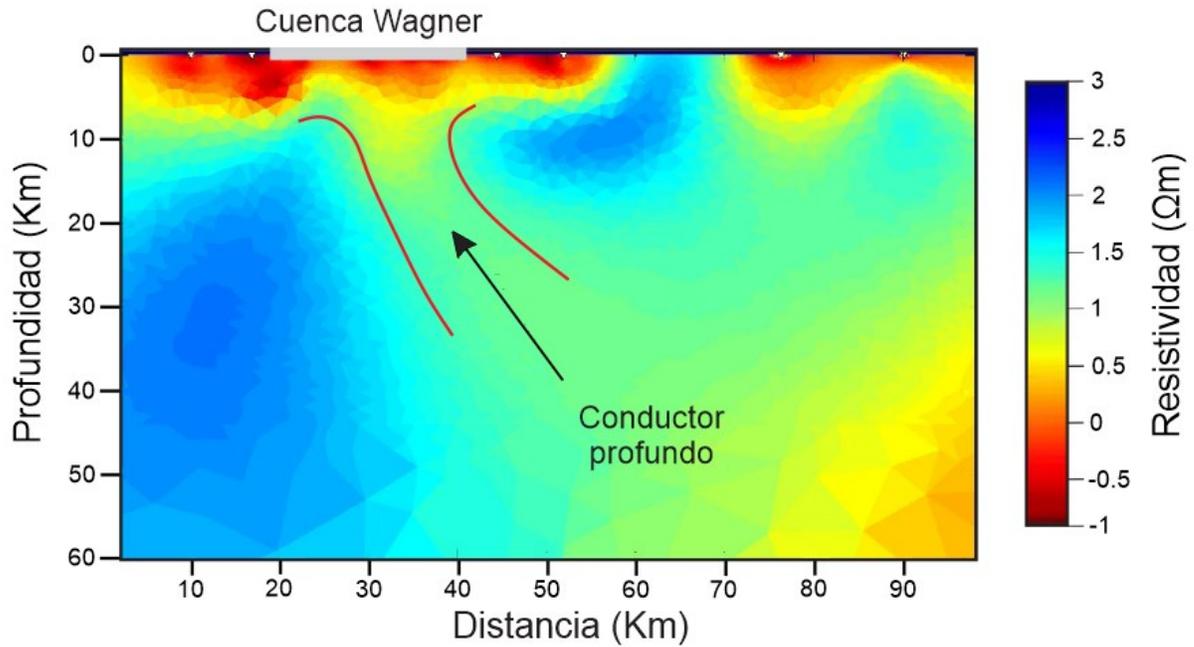
**Figura 9.** Modelo de resistividades resultante del estudio de métodos electromagnéticos de fuente controlada con orientación similar al principal transecto de interés en Figura 4. Se muestra la presencia de conductores someros (colores cálidos), posiblemente relacionados a agua subterránea (Modificado de Reyes-Ortega, 2016).

### 1.3.6. Método Magneto-telúrico

Avilés-Esquível et al. (2020), obtuvieron como resultado de la interpretación de datos magnetotelúricos un modelo de la distribución de resistividad eléctrica estimada con la inversión 2D de resistividad aparente y fases de ambas polarizaciones de campo, del cual establecieron las principales características del modelo (Figura 10).

Determinaron un conductor somero que está asociado a altas conductividades de sedimentos con resistividades entre 0.3 y 3.3  $\Omega\text{m}$  que alcanza profundidades de 5.5 km. Un resistivo profundo es asociado al manto superior que pertenece a la placa del Pacífico contrastando con el flanco opuesto, perteneciendo a la placa de Norteamérica, la cual es más conductiva.

El elemento más importante es el conductor profundo ubicado debajo del depocentro de la cuenca Wagner, el cual se interpreta como una región de fusión parcial alimentando la zona de acreción de su incipiente corteza oceánica.



**Figura 10.** Modelo de resistividad resultado de la inversión 2D de datos MT con orientación similar al principal transecto de interés en Figura 4. Muestra la distribución de resistividad eléctrica con una profundidad de hasta 60 km. Se observa un conductor a profundidad pudiéndose interpretar como una fuente de calor ubicada bajo el depocentro de la cuenca Wagner en línea gris (Tomado y modificado de Avilés-Esquivel, 2016).

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

El objetivo general es elaborar un modelo conceptual del sistema geotérmico de la cuenca Wagner, mediante el procesamiento e interpretación de perfiles sísmicos 2D adquiridos para este trabajo, y de perfiles de la campaña Ulloa99-5 (Persaud et al., 2003), así como la integración de resultados e interpretaciones de los estudios previos en la cuenca de Wagner.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Comprobar la existencia de un sistema hidrotermal en la cuenca Wagner.
- Identificar evidencias que se relacionen con actividad hidrotermal en datos sísmicos adquiridos.
- Delimitar la zona de máximo potencial geotérmico.

## Capítulo 2. Metodología

---

Se utilizó la metodología basada en el procesamiento de datos sísmicos de reflexión multicanal. Consiste en la adquisición, procesamiento de los mismos, para su posterior análisis e interpretación. A continuación, se explica brevemente los conceptos básicos en la exploración sísmica marina.

### 2.1. Sísmica de reflexión

La sísmica de reflexión es una herramienta de exploración ampliamente utilizada cuyo objetivo es obtener información del subsuelo a partir de sus propiedades elásticas mediante la medición de los tiempos de llegada de las ondas (Yilmaz, 2001), las cuales son generadas artificialmente por una fuente de energía en superficie y propagadas en el subsuelo. Dichas ondas son reflejadas en las distintas interfaces del subsuelo para retornar de nuevo a superficie y ser registradas por los sensores. Con el debido tratamiento, se logra obtener información de la estructura interna del subsuelo, para obtener una imagen representativa del mismo.

Se basa en el método de punto de reflejo común (CDP por sus siglas en inglés) o también llamado “registro a desplazamientos sucesivos”, donde cada punto reflectante se muestrea más de una vez. En este tipo de adquisición se obtiene una multiplicidad de la información, que para el caso es importante debido a que, entre mayor muestreo, se tiene mayor calidad en la información del subsuelo al mejorarse la relación señal/ruido (Sheriff y Geldart, 1995).

Consiste de tres etapas principales: adquisición de datos, procesamiento e interpretación. Las tres etapas están íntimamente relacionadas y la correcta ejecución de cada una es la base para lograr buenos resultados en la siguiente etapa (McQuillin et al, 1979; Yilmaz, 1987; Sheriff y Geldart, 1991). Esta metodología es aplicable tanto para estudios terrestres como para estudios marinos con algunas diferencias técnicas para cada uno.

La interpretación sísmica, en general, supone que:

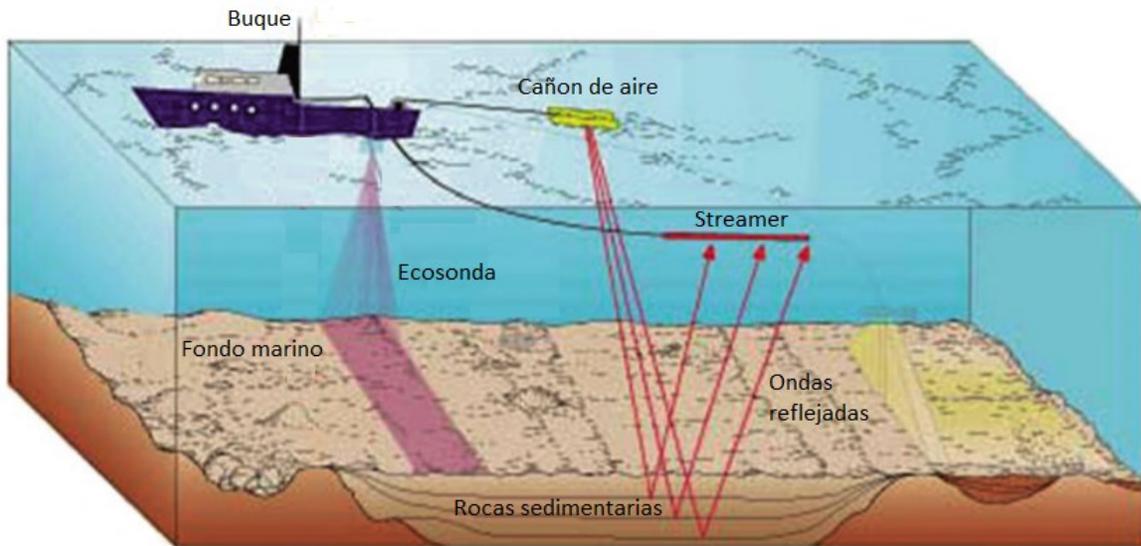
- Los eventos coherentes vistos en los registros sísmicos o en secciones sísmicas son reflexiones provenientes de contrastes de impedancia acústica en la Tierra.

- Estos contrastes están asociados con cambios de la litología y la estratificación de los depósitos sedimentarios y/o intrusiones magmáticas o depósitos volcánicos interestratificados que representan la estructura geológica. Por tanto, el trazo de las curvas de tiempo de llegada de eventos coherentes está muy relacionado con la estructura geológica y, teniendo en cuenta los efectos de velocidad y migración, se obtiene una imagen que muestra la estructura geológica.
- El detalle sísmico (amplitud, forma de onda, etc.) está relacionado con el detalle geológico, es decir, a la estratigrafía y la naturaleza de los fluidos intersticiales (Sheriff y Geldart, 1995).

## 2.2. Adquisición de datos

La adquisición sísmica se basa en la generación de frentes de onda con una fuente controlada artificialmente, registrando digitalmente la señal reflejada por el subsuelo. Para adquisición sísmica marina, la fuente se trata de un cañón o arreglo de cañones de aire para generar un pulso de energía, como se muestra en la Figura 11, los cuales son remolcados por el buque a cierta distancia de la popa con el fin de evitar ruido que este pueda producir.

El *streamer* es el cable receptor que consiste en una serie de grupos de hidrófonos equi-espaciados, los cuales registran la señal acústica procedente de las reflexiones del subsuelo marino. Se acostumbra a posicionarlo a poca profundidad bajo la superficie del mar con el fin de evitar el ruido producido por el oleaje, siendo arrastrado por una embarcación a velocidad constante y a lo largo de rumbos en línea recta previamente establecidos.



**Figura 11.** Diagrama de elementos básicos de reflexión marina: buque de investigación, equipo de navegación GPS, fuente y arreglo de hidrófonos (Modificada de Mondol et al. 2010).

La energía de la fuente artificial (*shotpoint*) genera un frente de ondas P hacia el subsuelo; una parte de esta energía es reflejada en el fondo marino y otra es transmitida y reflejada en diferentes interfaces del subsuelo para posteriormente ser registrada por el arreglo de hidrófonos en el *streamer*. La información registrada consiste en series de tiempo de los frentes de ondas reflejadas, desde la fuente hasta el reflector ( $t_1$ ), y el tiempo de regreso desde el reflector hasta el hidrófono ( $t_2$ ). El viaje realizado por el frente de ondas en dos sentidos comúnmente se le conoce como tiempo doble "TD" ( $TD = t_1 + t_2$ ). Estos tiempos de viaje dependerán de la reología de las rocas y la complejidad estructural del subsuelo. Adicionalmente, este tipo de registros contienen información de la amplitud, frecuencia, fase y forma de la onda, referenciada a una posición geográfica estimada por el sistema de posicionamiento global.

De esta forma, se busca que el frente de ondas penetre en el subsuelo y sea reflejado por los estratos de litologías con diferente densidad, Estos producen contrastes de impedancia acústica debido a cambios litológicos o estructurales en el subsuelo, lo que nos quiere decir que mientras más contraste de impedancia exista, más fuertes serán los reflectores. Entiéndase impedancia como el producto de la densidad y la velocidad del medio por el cual viaja la señal sísmica (Yilmaz, 1987); el conocer dicho parámetro es útil para el procesamiento sísmico, ya que tanto la velocidad como la densidad dependen de las características físicas de las rocas. El coeficiente de reflexión está relacionado con el tipo y tamaño relativo de los cambios de impedancia acústica (Badley, 1985).

Como parte del proyecto “Campaña intensiva de Exploración Geotérmica de las cuencas Wagner, Consag, Delfín, Guaymas y Alarcón del Sistema de Rifts del Golfo de California (CeMIE-GEO P03)” se adquirieron datos sísmicos a bordo del Buque Oceanográfico Alpha Hélix en enero de 2019 en las cuencas Wagner y Consag.

**Tabla 1.** Parámetros de adquisición de los perfiles sísmicos colectados en enero de 2019.

Parámetro	Valor
Fuente	Cañon de aire Sercel GI
Volumen/Presión	0.00245 m /17.3 Mpa
Longitud del tendido	600 m
Distancia entre receptores	12.5 m
Distancia entre fuentes	25 m
Offset inicial	25 m
Número de canales	48
Multiplicidad	1200%
Tiempo de grabación	6000 ms
Intervalo de muestreo	1 ms

Durante esta campaña se adquirieron 180.58 km de datos sísmicos en la cuenca Wagner (Figura 3; Tabla 1). Adicionalmente se integraron los perfiles sísmicos del cruceo Ulloa 99 (Persaud, 2003) y algunos perfiles de PEMEX. Con estas imágenes se realizó una descripción más enfocada en las características y manifestaciones hidrotermales de la zona.

**Tabla 2.** Navegación de las líneas adquiridas en enero de 2019.

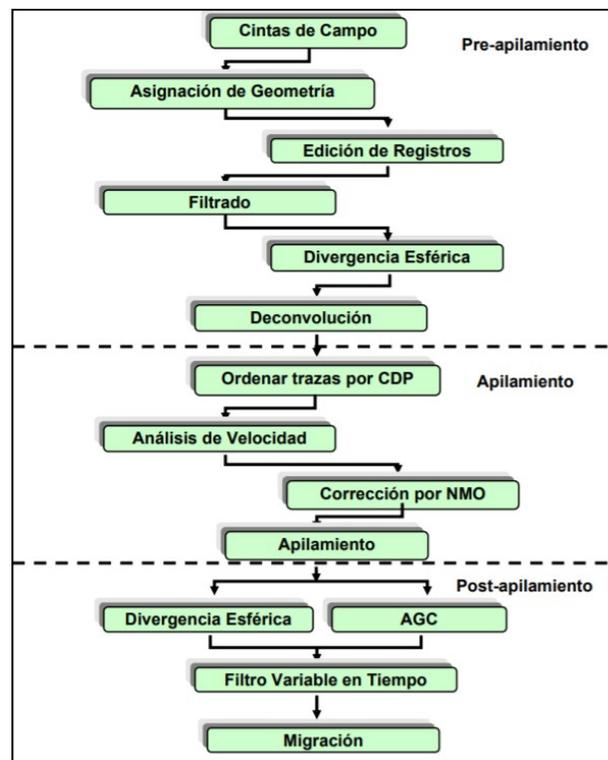
Línea	Número de tiros	Latitud inicial	Longitud inicial	Latitud final	Longitud final
L1	2910	31.09677442	-114.1731140	31.02771338	-114.0004353
L2	2549	30.99908018	-114.1169045	31.13134975	-114.0521199
L3	5422	31.10118530	-113.9972279	30.95989534	-114.3116957
L4	4654	30.94305274	-114.2699894	31.06431042	-114.0001722

**Tabla 3.** Navegación de líneas del crucero Ulloa 99 y la línea 5037 de PEMEX.

Línea	Número de tiros	Latitud inicial	Longitud inicial	Latitud final	Longitud final
2	3450	31.17869	-114.37909	31.17869	-114.37909
6	10530	31.08301	-114.43397	30.81613	-113.83139
8	12160	30.72883	-113.88238	31.05105	-114.57339
9	2800	31.06206	-114.56805	31.20845	-114.48509
10	11470	31.20436	-114.48394	30.90230	-113.82039
17	4510	30.80284	-114.08606	30.99502	-113.93969
18	1530	30.99376	-113.93230	30.95047	-113.84066
19	3650	30.76077	-113.98246	30.93562	-113.84178
23	4050	30.88570	-114.25890	31.06498	-114.11650
5037	4830	30.83570	-114.48630	31.24589	-113.69560

### 2.3. Procesado sísmico

Los datos cuatro perfiles sísmicos obtenidos durante la campaña CeMIE-Geo P03 (Tabla 1) fueron procesados con el software PROMAX desarrollado por la compañía Halliburton. La secuencia de procesamiento de datos de sísmica de reflexión convencional comprende tres fases (Yilmaz, 1987): 1) Pre-apilamiento o *Pre-stack*, 2) Apilamiento o *Stack* y 3) Post-apilamiento o *Post-stack* (Figura 12).



**Figura 12.** Secuencia básica del procesamiento de datos sísmicos de reflexión 2D multicanal (Tomada de Hernández-Pérez, 2008).

## 2.4. Pre apilamiento

Tiene como objetivo principal el reducir lo máximo posible aquellos eventos que no se identifiquen como reflexiones. Esta supresión exige una delicada selección de algoritmos y de elección de parámetros, pues de ello dependerá la correcta obtención de los reflectores.

### 2.4.1. Almacenamiento

Los datos son grabados en formato SEG-Y, un formato establecido por la Sociedad de Geofísicos de Exploración) como formato estándar para datos sísmicos adquiridos, con la finalidad de universalizar la lectura y manipulación de este tipo de datos. Es necesario hacer la conversión de estos archivos a un formato específico para el software empleado en este caso.

### 2.4.2. Asignación de geometrías

La asignación de geometrías establece la distancia entre la fuente (disparos) y el primer receptor, la distancia entre receptores, el número de trazas por registro y las coordenadas X, Y de cada disparo, y los posibles cambios en la dirección de la línea sísmica (azimut). Es necesario introducir el número de canales que grabaron cada disparo perteneciente a cada línea y especificar el primer y último canal que grabó en cada disparo. Es importante asignar correctamente la geometría, ya que influye en el ordenamiento de los puntos de reflejo común.

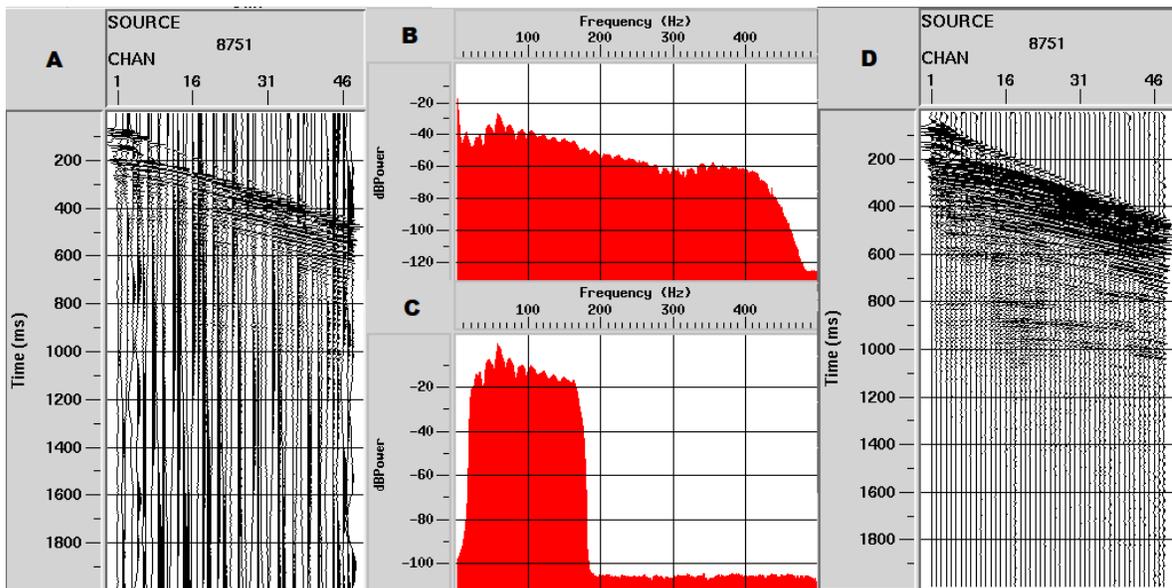
### 2.4.3. Edición de registros

En este punto se realiza una visualización de los *gather* o conjunto de registros de todos los sensores para cada tiro de manera individual. El objetivo es disminuir ruido de trazas anómalas que puedan tener un impacto negativo en el procesado. Para ello se excluyen, total o parcialmente, aquellas trazas que presenten un alto nivel de ruido, usualmente ocasionado por una mala conexión o malfuncionamiento de

los sensores empleados en la etapa de adquisición. Así mismo, en este paso, se eliminan los últimos 4 canales de control (sin información sísmica) para quedarnos con un total de 48 canales.

#### 2.4.4. Filtrado de frecuencias

Se hace uso de un filtro pasabanda, con la finalidad de dejar pasar la señal en una banda limitada de frecuencias, de manera que se aceptan las frecuencias en el rango de las emitidas por la fuente y se rechazan aquellas frecuencias fuera de este rango. Para aplicar dicho filtro, es necesario realizar un análisis espectral en el cual se pueden visualizar las frecuencias que contiene nuestra señal para así poder decidir que frecuencias son las que son útiles para trabajar los datos. En este caso se utilizó un filtro Ormsby, que es un filtro de frecuencias de forma trapezoidal que utiliza cuatro frecuencias de corte de 15 a 20 Hz y de 150 a 180 Hz.

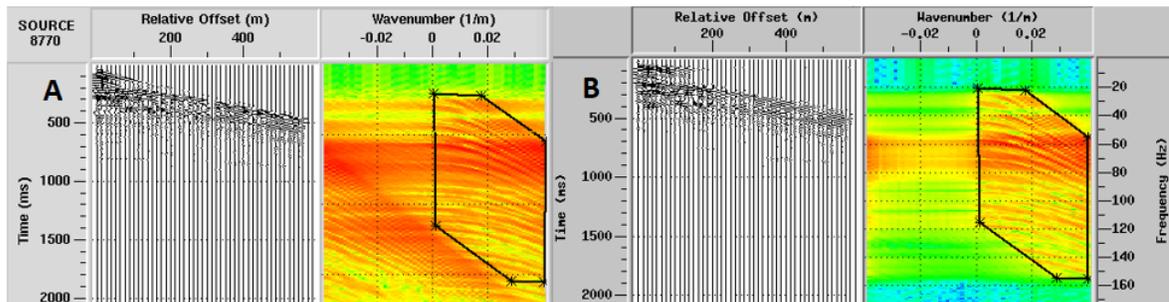


**Figura 13.** Filtrado de frecuencias. (a) Registro sin filtrar. (b) Análisis espectral del registro. (c) Espectro de frecuencias filtrado. (d) Registro sísmico filtrado; visualmente se aprecia la atenuación de ruido ambiental, en especial de baja frecuencia.

### 2.4.5. Filtro FK

Este filtro es útil para eliminar ruido coherente que presenta una tendencia lineal. Se basa en la doble transformada de Fourier de los datos sísmicos, ya que pasan del dominio tiempo-distancia ( $t-x$ ) al dominio de frecuencia-número de onda ( $f-k$ ). El espectro  $f-k$  también permite identificar *aliasing* espacial ocasionado por un muestreo espacial insuficiente durante la etapa de adquisición de datos. Este ruido se evidencia por una repetición de las pendientes en la región opuesta del espectro (Yilmaz, 1987).

Este filtro también es conocido como filtro de velocidad o de pendientes por el espacio en el que opera, ya que discrimina los eventos que están alineados por rectas cuyas pendientes definen las distintas velocidades. Normalmente los eventos lineales en el dominio  $f-k$  son discriminados haciendo uso de polígonos, los cuales determinan los eventos a eliminar como se muestra en la Figura 14.



**Figura 14.** (A) Análisis espectral en el dominio de la frecuencia-número de onda. Se limita un área con un polígono que contenga la energía concentrada de las reflexiones; (B) Respuesta del espectro al aplicarse el filtro.

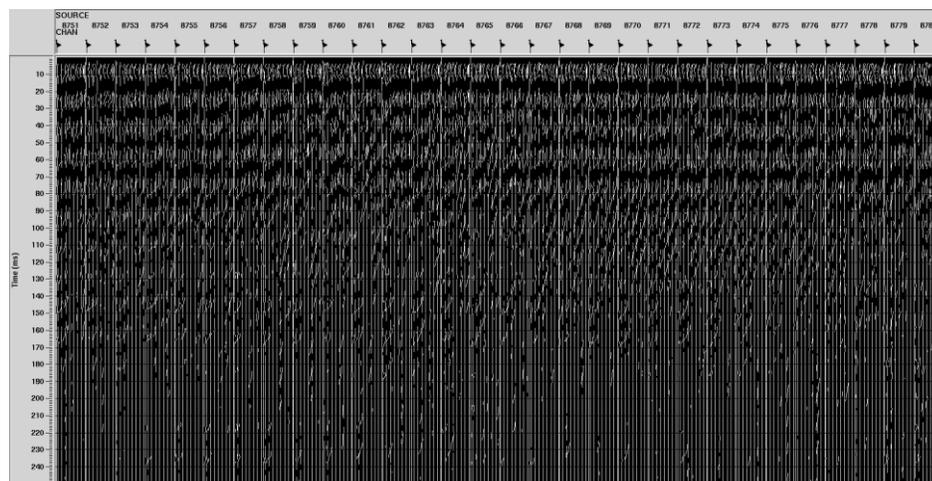
### 2.4.6. Deconvolución

Los registros obtenidos a partir de fuentes de aire comprimido en mar presentan un carácter reverberatorio, que se puede reducir mediante la deconvolución predictiva; como resultado se obtiene una mejora la resolución vertical de los reflectores en los datos sísmicos al comprimir la ondícula de la fuente.

En exploración sísmica, las rocas están definidas por su densidad, y consecuentemente la velocidad con que las ondas se propagan en ellas. Este principio va de la mano con la impedancia acústica, cuyos contrastes nos permite visualizar los diferentes reflectores del subsuelo. La deconvolución nos sirve para

intentar eliminar los efectos que ejerce la fuente en las ondas sísmicas de la señal temporal registrada, quedando así solo las reflexiones en los datos.

Los parámetros elegidos en este proceso se basaron en los resultados de la auto-correlación de los registros (Figura 15). Esta nos permite determinar la periodicidad de una señal a lo largo del tiempo, es decir, indica la correlación que existe entre una señal y ella misma indicando cuan concentrada es la energía en el registro y si existe en el mismo múltiples reverberaciones; mientras mayor sea la similitud entre las señales en periodos cortos, el máximo de la correlación estará más centrado en la fase cero y menor será la reverberación (Sheriff, 1995).



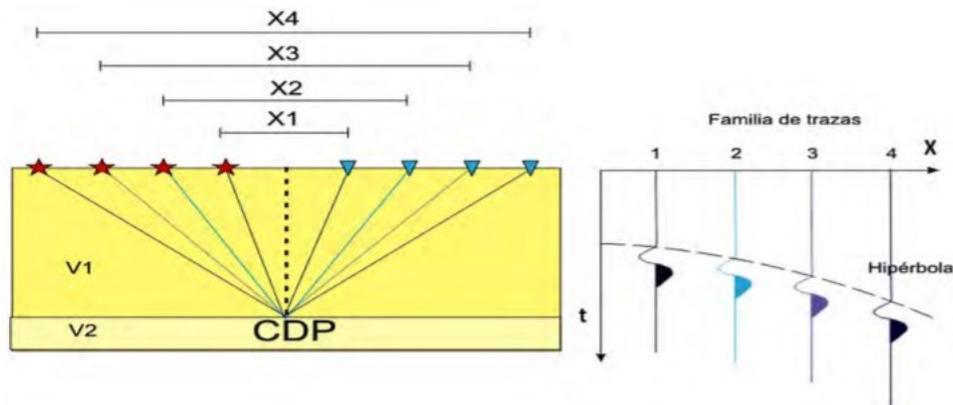
**Figura 15.** Autocorrelograma. Autocorrelaciona cada traza consigo misma. Se puede ver en el tiempo de retardo hasta los 75 ms el efecto reverberante de la fuente sísmica.

## 2.5. Apilamiento

Es el segundo proceso principal, viene en conjunto con el análisis de velocidades y la velocidad de corrección dinámica. En este paso, se usa la redundancia de los datos con igual CDP, para de esta manera atenuar ruido que no tiene relación traza a traza e incrementar la relación señal/ruido (Yilmaz, 2001).

### 2.5.1. Agrupamiento por CDP

La sismica de reflexión multicanal se basa en la obtención de grupos de reflexiones en profundidad con el mismo punto de reflejo común (*Common Depth Point*), aunque pertenezcan a distintos puntos de emisión (fuente) y recepción. Se consigue cobertura múltiple en el área de estudio dependiendo del grado de espaciado entre tiros y receptores. Cada familia de trazas presenta un aspecto hiperbólico, análogo al de los registros de campo, que se origina por el creciente distanciamiento (*offset X*) que se refleja en un mayor tiempo de tránsito (*T*). El motivo de generar el CDP en la sismica multicanal es sumar (apilar o *stack*), convenientemente corregidas, todas las señales que pertenecen a un CDP (o a un punto común del terreno) con la intención de aumentar la relación señal/ruido. Se deduce que el espaciado entre CDP's es la mitad del espaciado entre geófonos.

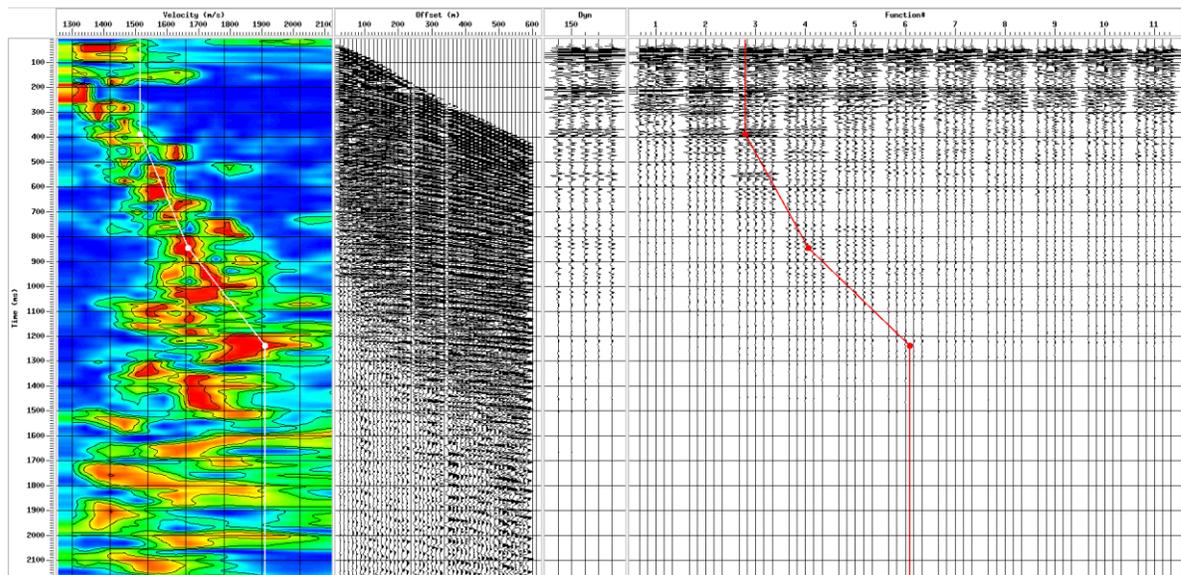


**Figura 16.** Geometrías de puntos de reflejo común (CDP en inglés). Se observa el registro hiperbólico de las trazas por diferencia de tiempo (Tomada de Sanchez-Garcia, 2013).

### 2.5.2. Análisis de velocidades

Es una de las etapas más vitales del procesamiento de datos sísmicos, en la que se relacionan los tiempos registrados de la onda sísmica con el material rocoso de diferentes densidades que atraviesa en el subsuelo. Las velocidades más bajas representan materiales menos consolidados, por lo tanto, menos densos y por lo general más superficiales. En contraste, las velocidades altas representan materiales más compactos y de mayor densidad.

Para proveer una relación señal/ruido mejorada, la sísmica de cobertura multicanal requiere información acertada sobre la velocidad del subsuelo, la cual es obtenida mediante un análisis de velocidades. Para poder estimar el modelo de velocidades se empleó el método de Espectro de Semblanza para obtener un modelo de velocidades detallado. Se basa en la correlación cruzada de las trazas de un CDP aplicando diferentes correcciones por velocidad (Yilmaz, 1987). Los gráficos obtenidos son una serie de máximos y mínimos que se disponen como isolíneas de igual semblanza. El fin de este gráfico (Figura 17) es el de poder ubicar las zonas de mayor semblanza, debiendo tener cuidado de reflexiones múltiples que también pueden tener valores altos.



**Figura 17.** Análisis de velocidad individual de CDPs. El espectro de semblanza muestra las velocidades de apilamiento. Se deben seleccionar los puntos donde se concentra más la energía (en este caso áreas rojas) los cuales nos mostrarán la tendencia del incremento de velocidades.

El resultado del análisis es un campo de velocidades que se usará en el apilamiento para obtener la sección sísmica. Cuando hay poca precisión en el establecimiento de las velocidades de reflexión, la calidad de la sección apilada puede degradarse, ya que las reflexiones no se suman coherentemente.

La elección correcta del campo de velocidades definitivo es un aspecto delicado del procesado, especialmente en sísmica somera, debido a las heterogeneidades de las primeras capas. El aproximar certeramente las velocidades del medio nos puede dar confiabilidad sobre las características estructurales del subsuelo del área que se está estudiando.

### 2.5.3. Corrección NMO (*Normal MoveOut*)

Esta corrección utiliza el modelo de velocidades estimado previamente para normalizar los reflectores que siguen una línea hiperbólica a una horizontal y así poder corregir los retardos de las reflexiones de las trazas de los CDP's que están a mayor *offset*. Si el modelo es correcto, las hipérbolas de reflexión se corrigen a rectas horizontales. Si el reflector calculado mantiene una hipérbola cóncava hacia abajo, indica que la velocidad aplicada fue alta; si se trata de una hipérbola hacia arriba, significa que la velocidad aplicada fue baja. De manera simple, este proceso equivale a lo que resultaría si la distancia entre fuente y receptor fuera nula, es decir, la fuente y el receptor en el mismo punto (Yilmaz, 2001).

### 2.5.4 Apilamiento (*Stack*)

Una vez aplicada la corrección NMO, los reflectores primarios de cada *gather* de CDP's están planos y horizontales, en contraste con las reflexiones que no son primarias. Este proceso mejora la relación señal/ruido de los datos sísmicos al promediar muchas trazas sísmicas. Este proceso consiste en sumar las trazas que por geometría pertenecen a un mismo CDP *gather* entre una fuente y un receptor determinado, obteniendo una traza apilada por cada uno. Ya que las reflexiones primarias están planas, la suma aumenta la amplitud de los eventos que están alineados por la corrección NMO. Ya que el ruido aleatorio no está alineado horizontalmente, su amplitud disminuye. Así, el apilamiento beneficia la eliminación de ruido no coherente y también tiende a eliminar las hipérbolas que representan múltiples. El resultado de este paso es una sección sísmica con una mejor relación señal ruido, pero no es aún la definitiva.

## 2.6. Post apilamiento

El proceso final lleva los eventos sísmicos a su posición original para obtener una imagen final. En una sección migrada, los eventos de reflexión son graficados en sus ubicaciones actuales donde fueron originados y no precisamente verticales como aparecerían en una sección no migrada (Yilmaz, 2001; Updhyay, 2004).

### **2.6.1. Migración**

Es un proceso que se aplica, entre otros fines, para corregir las difracciones que se producen en una sección sísmica debido a relieves bruscos en los reflectores o discontinuidades laterales, al reubicar la energía a su posición verdadera, provocando el colapso de difracciones (Teixido, 2000).

El algoritmo de migración empleado en este trabajo fue el de Kirchhoff, que se basa en la solución integral de la onda. Se realiza partiendo de un emisor y un receptor en la superficie a explorar, se mide el tiempo que se tarda el frente de onda en hacer la trayectoria emisor-reflector-receptor, con este valor se pueden calcular todos los posibles reflectores. Con un modelo de velocidad suavemente variable, el lugar geométrico que ocupan estos posibles reflectores sería la mitad de una elipse (caso 2D); con una sola traza no es suficiente para determinar cuál de todos los puntos es el lugar geométrico verdadero, por ello, se aplica la misma dinámica para las trazas vecinas y finalmente se suman todas las contribuciones de las elipses, formando la imagen en el subsuelo.

La migración también mueve reflectores buzantes y delinea detalladamente características del subsuelo como planos de falla. En este aspecto se puede ver a la migración como una forma de deconvolución espacial que incrementa la resolución espacial. La meta de la migración es hacer que la sección apilada parezca similar a la sección geológica a lo largo de la línea sísmica.

### **2.7. Interpretación**

El propósito de esta etapa es obtener la información geológica e identificar características del subsuelo como: estructura, estratigrafía, presencia de fluidos y propiedades de las rocas (Liner, 2004).

En la interpretación sísmica se asume que los contrastes de la impedancia acústica son los que generan eventos coherentes en las secciones sísmicas que están asociados con la estratificación de los depósitos sedimentarios y las estructuras geológicas que los afectan, por lo que la amplitud y el tiempo de llegada de los eventos coherentes están relacionados a la estructura (Yilmaz, 1987). De acuerdo a esto, para cada sección sísmica se realiza una interpretación trazando fallas y horizontes en cada una para posteriormente correlacionarlas y delinear los principales rasgos estructurales y horizontes sísmicos en toda el área de estudio.

De acuerdo con estas suposiciones, se realiza la interpretación geológica de las secciones sísmicas, identificando eventos o reflectores que poseen o no continuidad lateral, así como rasgos estructurales (fallas o pliegues) y estratigráficos (discordancias).

Debemos asumir una comprensión básica de la deformación, el esfuerzo y la tensión estática, los tipos y ocurrencia de las fallas y la influencia tectónica en elementos estructurales locales. Es la combinación de los datos sísmicos y la especialización en geología estructural que forman una herramienta para el análisis estructural (Liner, 2004).

Cuando se sujetan a un esfuerzo, las rocas pueden fallarse, plegarse o fluir, dependiendo de la magnitud y duración de los esfuerzos, la resistencia de las rocas, la naturaleza de las rocas adyacentes, etc. Las fallas se producen por esfuerzos desbalanceados que exceden la resistencia de las rocas, y el tipo de falla depende en gran medida de la dirección de los esfuerzos verticales u horizontales mayores (Sheriff y Geldart, 1995).

La interpretación sísmica se apoya con los otros métodos geofísicos y estudios geológicos previos para tener mayor certeza en la interpretación de los resultados.

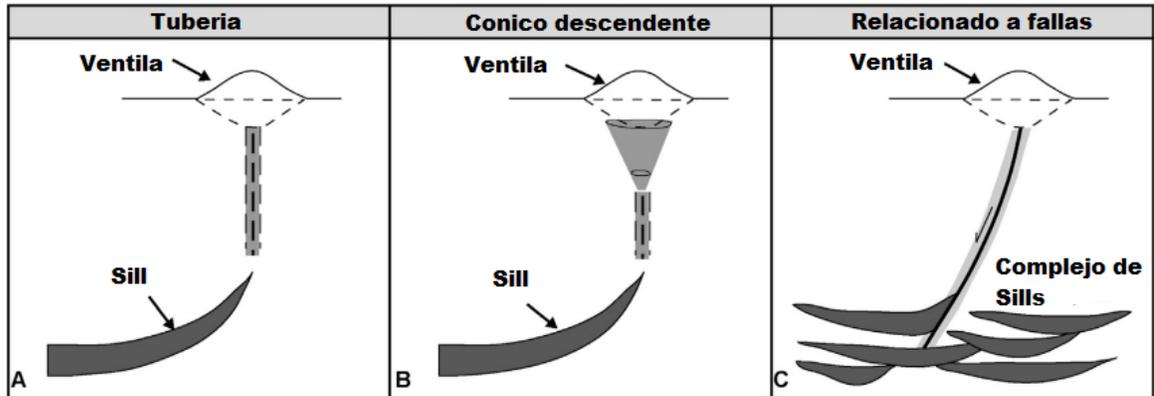
Se debe ser cuidadoso de hacer interpretaciones incorrectas; cuerpos que presentan gran amplitud o difusividad pueden confundirse con supuestos cuerpos ígneos o alteración hidrotermal, lo que puede conducir a resultados erróneos. Lennon (2018) exhorta a analizar de forma exhaustiva los resultados, ya que se pueden hacer malinterpretaciones fácilmente. Se debe ser precavido con cuerpos que puedan imitar la geometría/morfología o reflexiones caóticas con amplitudes moderadas a altas de anomalías hidrotermales.

Se recomienda hacer interpretaciones en contexto donde el intérprete examine no solo el patrón de características de interés si no también los patrones de los elementos adyacentes, no solo identificar las estructuras deseadas si no también los elementos vecinos que aparentemente no son de interés.

## **2.8. Ventilas hidrotermales**

Las ventilas hidrotermales son estructuras complejas subverticales formadas en el fracturamiento de la roca o sedimento donde ocurre el transporte y erupción de fluidos hidrotermales y/o sedimentos

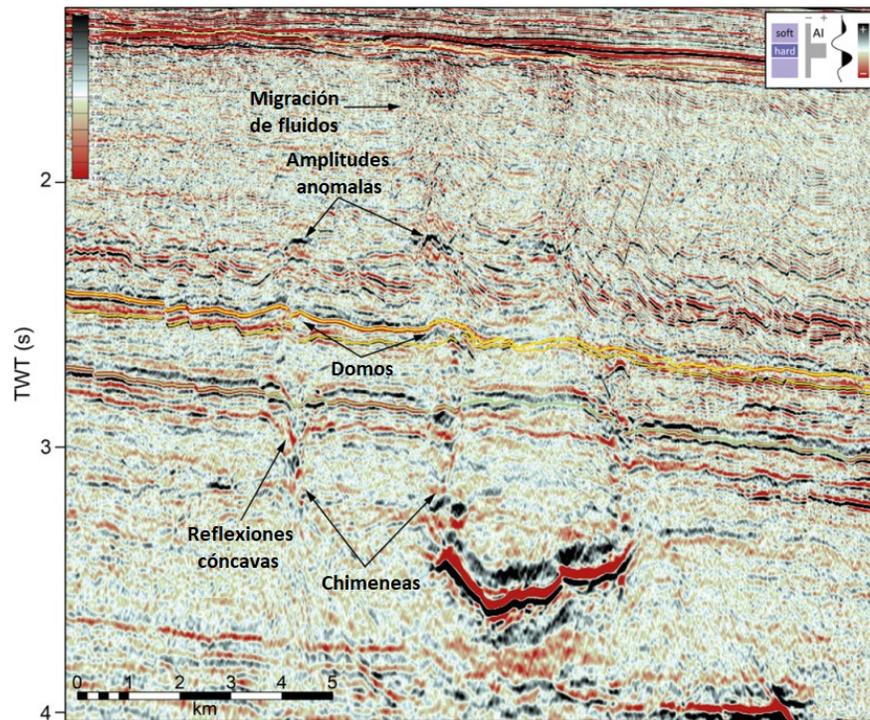
volcanoclásticos (Planke et al., 2005). Se puede reconocer este tipo de estructuras como una fisura en la superficie del fondo de un lago, mar u océano, producida por el paso de agua caliente y gas a través de los estratos (Figura 18). Usualmente están asociadas a complejos de sills y diques (e.g. Planke et al., 2005; Hansen, 2006; Grove, 2013), sin embargo, también se presentan en fondo oceánico rocoso. Las ventilas hidrotermales usualmente se correlacionan con sistemas de falla que canalizan fluidos hidrotermales y, por lo tanto, controlan su posición (Jackson, 2012; Magee et al., 2013)



**Figura 18.** Diagrama esquemático ilustrando los diferentes tipos de ductos que conectan las ventilas con sills. A) Forma de tubería; B) cónico descendente; C) relacionadas a fallas (Tomado y modificado de Hansen, 2006).

Varios estudios de cuencas sedimentarias en el mundo hacen énfasis en la importancia de estas ventilas hidrotermales como un marcador de intrusiones magmáticas (Hansen, 2006; Hansen et al., 2008; Planke et al., 2005; Magee et al., 2013; Alves et al., 2015), las cuales generan calor en las rocas circundantes y modifican la densidad de los fluidos iniciando su circulación ascendente (Figura 19). En trabajos anteriores estas anomalías sísmicas fueron reconocidas durante el mapeo sismo-estratigráfico de sistemas de unidades deposicionales (usando facies sísmicas) en el área a estudiar, metodología que se implementó en este trabajo.

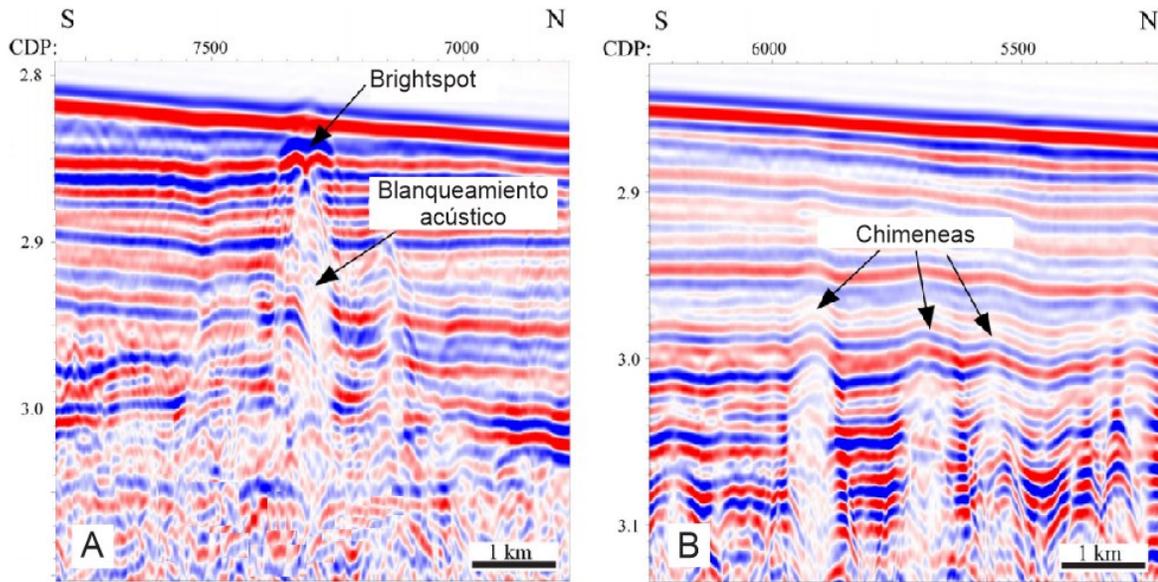
El reconocimiento y mapeo de las ventilas de este estudio se basó en la identificación de facies de reflectores de unidades afectadas por la ventila hidrotermal. Esto se realizó con ayuda de atributos sísmicos que resaltan la morfología particular en cuanto a anomalías de amplitud, coherencia, difusividad y discontinuidad lateral relacionadas con actividad hidrotermal.



**Figura 19.** Ejemplo de chimeneas hidrotermales extendiéndose a través de la columna sedimentaria y los efectos que tiene en su camino, lo cual es característico de migración de fluidos (Hamilton et al., 2018).

La carencia de continuidad lateral de los paquetes sedimentarios y la distorsión difractada, reflexiones caóticas en un área en particular, puede visualizarse haciendo uso de atributos de amplitud y fase instantánea. Purves (2014) demostró que estos atributos parecen ser sensibles a discontinuidades sutiles incluyendo la sustitución de fluidos, que no es fácil de visualizar solo con la amplitud. Lo que realiza al atributo de fase instantánea es destacar pequeños quiebres en los reflectores y eventos de discontinuidad. Características sísmicas que son indicadores de ascenso hidrotermal incluyen *brightspots*, blanqueamiento acústico y *pockmarks*.

Los *brightspots* usualmente aparecen en secciones sísmicas como resultado de una significativa diferencia de impedancia acústica entre zonas de acumulación de fluido y rocas adyacentes. Aparecen como reflexiones de baja frecuencia y alta amplitud siendo reconocibles sísmicamente cuando su contraste es suficientemente grande (Sheriff 1975, 1979). Estos son usualmente indicadores de acumulación de hidrocarburos (Figura 20), sin embargo, estudios han demostrado que áreas con suficiente porosidad y permeabilidad pueden también aparecer como *brightspots* en secciones sísmicas (Yao et al., 2005; Yang et al., 2008; Dong et al., 2010; Zhao et al., 2010).



**Figura 20.** Fragmentos de secciones sísmicas que muestran indicadores como *brightspots*, zonas de blanqueo y chimeneas sísmicas. A) Ejemplo de *brightspot* y zona de blanqueo provocados por ascenso de fluidos. B) Ejemplo de chimeneas sísmicas que muestran reflectores internos deformados por el cambio de velocidad por su contenido de fluido (Tomado y modificado de Yoo et al., 2013).

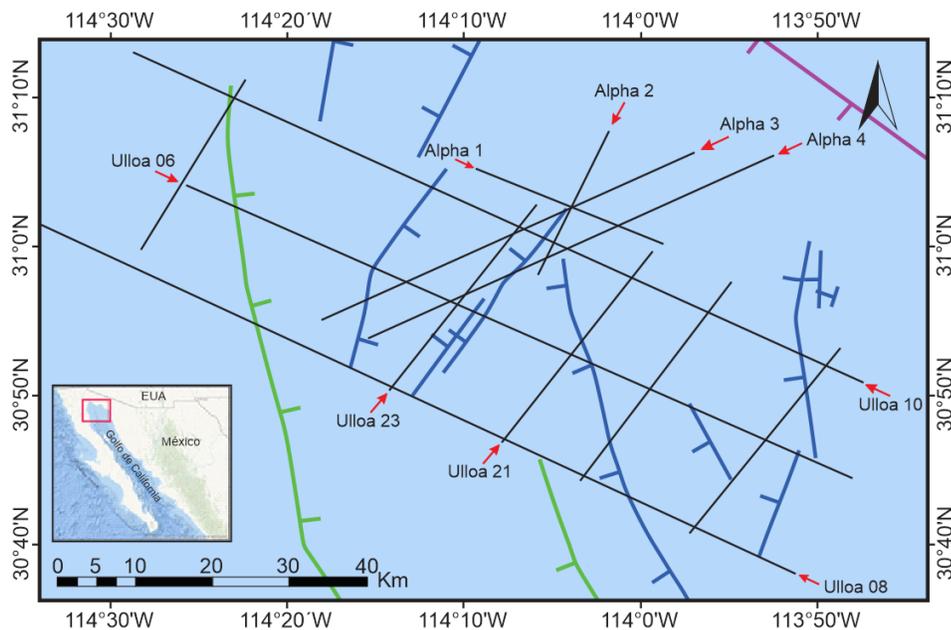
Estas chimeneas sísmicas están asociadas a zonas de blanqueo acústico vertical relativamente estrechas, resultan de la acumulación de fluidos dentro de poros que pueden reducir el contraste de impedancia acústica en capas sedimentarias, provocando un decremento significativo de reflectividad y amplitud sísmica o patrones caóticos de reflexión (Shibley et al., 1979; Hovland et al., 1997; Wood y Ruppel, 2000; Diaconescu et al., 2001).

La expulsión de fluidos en zonas marinas puede ser revelada por perfiles acústicos que muestran plumas hidroacústicas. Dichas anomalías en la columna de agua están asociadas a características batimétricas que incluyen *pockmarks* de diferente diámetro causados por la expulsión de fluidos y/o material rocoso (Milkov, 2000; Dupré et al., 2007; Jerosch et al., 2007), estando asociados a fallas preexistentes en el área. Dichos perfiles acústicos son significativamente afectados por la presencia de fluidos en los sedimentos, ya que dispersa la energía resultando en turbidez acústica (Popescu et al., 2007), la cual puede ser causada por la presencia de un volumen de tan solo 1% de fluidos en los sedimentos (Fannin 1980; Luan y Qin, 2005).

## Capítulo 3. Resultados

### 3.1. Secciones sísmicas

La descripción de las líneas sísmicas sigue el orden en que fueron adquiridas y la orientación que poseen (Figura 21). Las secciones Ulloa 06, Ulloa 08, Ulloa 10 y Alpha 1 tienen una orientación NW-SE y las secciones Ulloa 17, Ulloa 23, Alpha 2, Alpha 3, Alpha 4 y PEMEX 5037 tienen una orientación SW-NE. En las imágenes presentadas se destacan las principales anomalías sísmicas relacionadas a actividad hidrotermal.



**Figura 21.** Mapa de ubicación de líneas sísmicas en la zona de la cuenca Wagner utilizadas en este trabajo. Las fallas en azul son de Martín-Barajas et al. (2013), en verde son de González-Escobar et al., (2009).

#### 3.1.1 Sección Ulloa 10

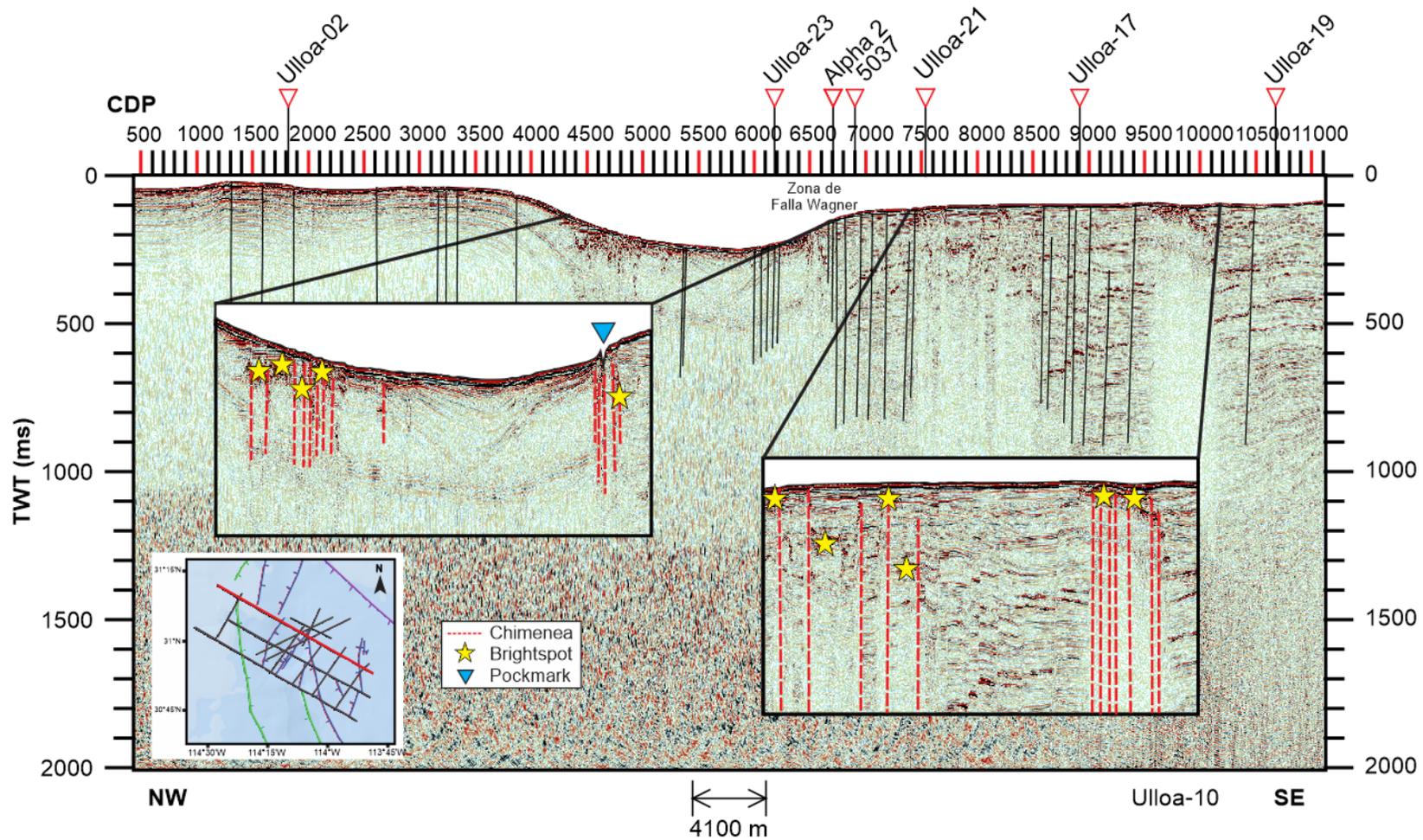
La sección Ulloa 10 tiene una orientación  $S62^{\circ}E$  y una longitud aproximada de 71.1 km (Figura 22).

En la parte NW de la sección, entre los CDPs 500 a 4000, se puede observar una zona de alto contraste de impedancia, que limita la visualización a partir de  $\sim 100$  ms, a partir del fondo marino. En consecuencia,

por debajo se produce una zona de baja amplitud con presencia de múltiples. Este efecto contrasta con el lado SE de la sección, en donde este efecto disminuye gradualmente hacia el flanco oeste de la cuenca.

En la parte central de la cuenca, se observa la presencia de anomalías verticales entre los CDPs 4400 y 5100, con un evidente incremento de amplitud en sus cercanías, algunas como efecto de sombra y otras como aumento de amplitud. La cantidad de estas anomalías también contrasta, ya que en el flanco NW son más numerosas, sin embargo, el flanco SE posee un montículo y valle pequeños en el fondo marino (CDP 6750). A diferencia del área anterior, este comienza a presentar más coherencia en sus reflectores y menos cantidad de múltiples. Se aprecian diferentes reflectores y terminaciones tipo onlap en el flanco SE de la cuenca.

El flanco SE se caracteriza por poseer mayor coherencia en la continuidad de sus reflectores. Sin embargo, esta área se ve afectada por las anomalías verticales que se observan en la cuenca entre los CDPs 7500 a 8700 y entre 9500 y 10250 de la línea Ulloa 10. Estas anomalías son evidentes y consisten en un aumento de la amplitud en su parte superior, y en contraste muestran una disminución de la amplitud a mayor profundidad, interrumpiendo la continuidad lateral de los reflectores en estas áreas



**Figura 22.** Sección Ulloa 10. El flanco SE de la sección (derecha) muestra mejor contraste de amplitud en los reflectores hasta ~1000 ms del lado SE del perfil. Se muestra el patrón de fallas que cortan a los estratos y zonas verticales de bajo contraste que sugieren ascenso de fluidos. El margen NW de la cuenca tiene poco contraste y múltiples del fondo marino. Las emanaciones se ubican en los bordes de un graben con relleno asimétrico del depocentro activo.

### 3.1.2. Sección Ulloa 06

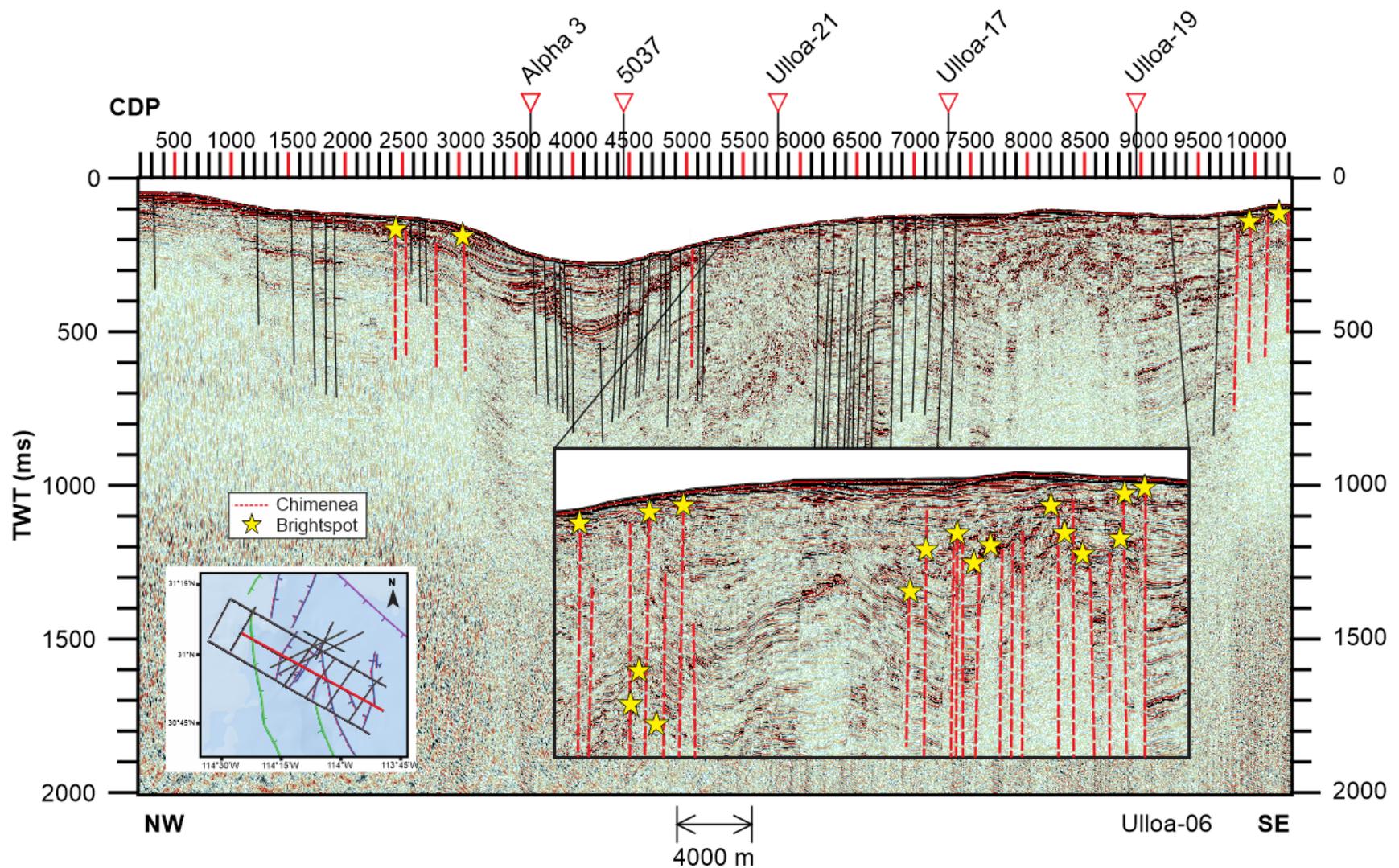
La sección Ulloa 06 tiene una orientación NW-SE y una longitud de ~64.8 km (Figura 23).

El flanco NW de la sección tiene baja penetración de las ondas sísmicas en los primeros 100 ms entre los CDPs 100 y 3000. A partir de este último punto se tiene mayor penetración y señal de la estratigrafía sísmica mejora considerablemente.

Se debe destacar la distribución asimétrica que tiene la cuenca: el flanco NW tiene una configuración escalonada por las fallas en los CDPs 3700 y 3900 produciendo una interrupción de los reflectores de amplitud que contrasta respecto al resto del perfil sísmico. Este escalonamiento se puede observar de igual forma en el flanco SE de la cuenca, con la diferencia que incrementa considerablemente, en comparación con su flanco opuesto, en interrupciones laterales escalonadas.

Podemos observar también varios truncamientos de reflectores someros con el fondo marino entre los CDPs 6200 y 8000. La incidencia de escalonamiento hacia la porción SW, entre los CDPs 5300 y 9000 incrementa notablemente en comparación con su flanco opuesto. Dentro de esta zona se encuentran algunas zonas de amplitud anómala que contrastan con las inmediaciones e interrumpen la visualización de reflectores subyacentes, recuperando amplitud entre los CDPs 9000 y 9800. La amplitud decrece a partir de este último punto donde se puede observar una zona difusa en los últimos CDPs 9900 y 10300 de la sección.

Cabe destacar que la incidencia de eventos de discontinuidad en los reflectores incrementa en comparación la sección Ulloa 10, así como también conserva baja resolución y presencia de múltiples en la porción NW.



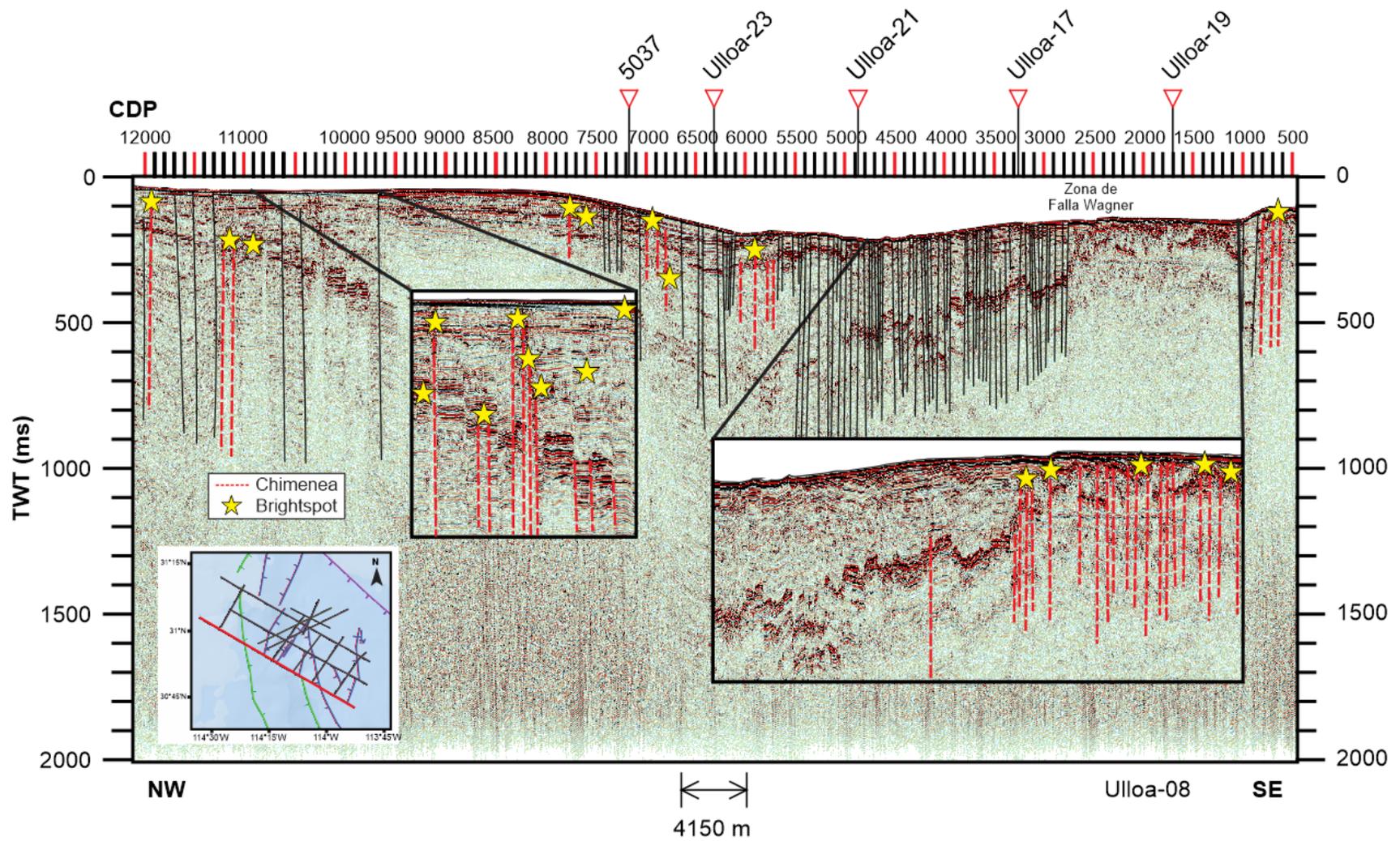
**Figura 23.** Sección Ulloa 06. El flanco NW muestra poco contraste, múltiples del fondo marino y poca actividad. Flanco SE incrementa la densidad de aflamamiento así como la actividad hidrotermal. Esta sección cruza el eje de la cuenca Wagner, se puede observar gran espesor sedimentario depositado en el depocentro debido al alto aporte de material proveniente del Rio Colorado ubicado al Norte.

### 3.1.3. Sección Ulloa 08

La sección Ulloa 08 tiene una orientación S62°E y una longitud aproximada de 74.2 km (Figura 24).

La sección en su flanco NW comienza poseyendo buena resolución entre los CDPs 12000 y 9500 con la presencia de anomalías que se extienden a profundidad, pero con reflectores razonablemente definidos con pérdida de continuidad lateral afectados por escalonamiento severo. Entre los CDPs 9500 y 7000 se observa una disminución abrupta en la coherencia de los reflectores subyacentes pero que se recupera gradualmente a partir del CDP 8000. Entre los CDPs 7300 y 5500 se observa la presencia en menor grado de anomalías de amplitud en comparación con los flancos de la sección. Destaca un reflector que contrasta por su amplitud en relación con sus alrededores entre los CDPs 5000 y 1000, el cual tiene un comportamiento variable siendo severamente afectado por el escalonamiento, acentuándose este efecto a partir del CDP 2700, hasta finalizar la sección; sin embargo, a partir del CDP 2700 dicho reflector es afectado en cierto grado por difusividad y pérdida de resolución a profundidad, con excepción del área comprendida entre los CDPs 1000 y 800 donde brevemente se puede visualizar la continuidad de los reflectores.

Así mismo, se destaca el aumento de los eventos de escalonamiento en la porción SE de la cuenca respecto a las líneas precedentes (Ulloa 06 y Ulloa 10). En estas secciones se resaltan las características y estilos en la configuración entre ambos flancos de la cuenca, de los cuales en general en el flanco NW predomina una baja resolución con presencia de múltiples y un aumento de deformación en el flanco opuesto en cada sección subsecuente.



**Figura 24.** Sección Ulloa 08. El flanco NW muestra buen contraste, evidenciando actividad hidrotermal, sin embargo, el flanco SE es más activo por la gran densidad de afallamiento y evidencia de actividad hidrotermal. Destaca un reflector altamente escalonado, el cual adquiere una morfología diferente a partir de la zona de falla Wagner, indicador de actividad hidrotermal.

### 3.1.4. Sección Ulloa 23

La sección Ulloa 23 tiene una orientación paralela al eje del depocentro moderno y se orienta N35°E. El perfil tiene una longitud de ~23.1 km (Figura 25).

Presenta una buena resolución en los primeros 500 ms, siendo lo más característico de esta sección el no poseer reflectores horizontales. Sus terminaciones laterales son reducidas en espesor gradualmente hasta perderse haciendo contacto con otro reflector inferior formando terminaciones onlap. Se observa momentáneamente el truncamiento de los primeros reflectores en el CDP 3300 y pérdida de continuidad lateral menor en algunos puntos a lo largo del área.

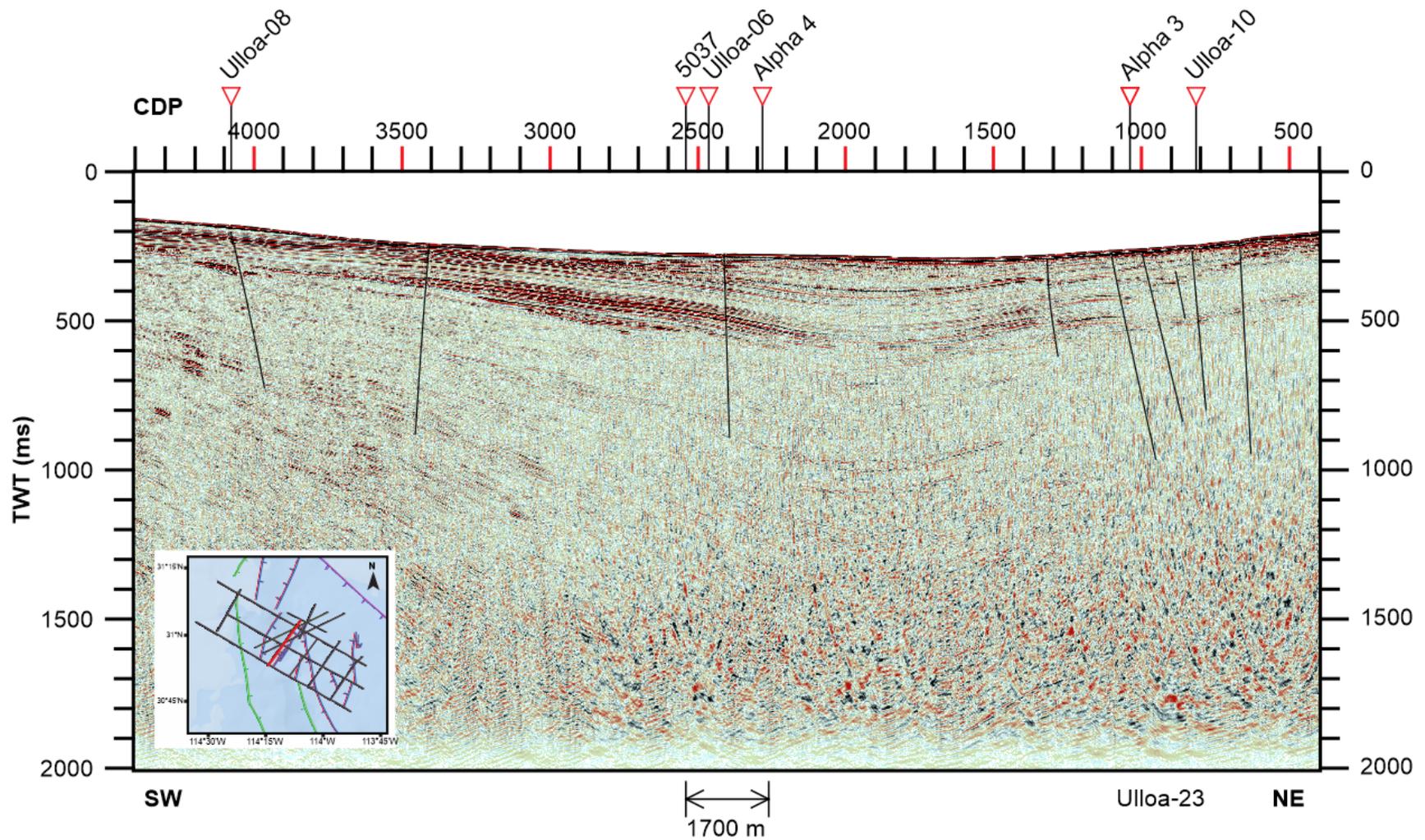
Estas características contrastan con lo visto en otras secciones, ya que el área no presenta cambios abruptos en su configuración. No hay presencia de anomalías importantes de amplitud como pérdida de coherencia, turbidez acústica, presencia de reflexiones caóticas o escalonamiento de reflectores en esta área. Hay presencia de reflectores con amplitudes mayores a los adyacentes a 400 ms entre los CDPs 3500 y 2400.

### 3.1.5. Sección Ulloa 21

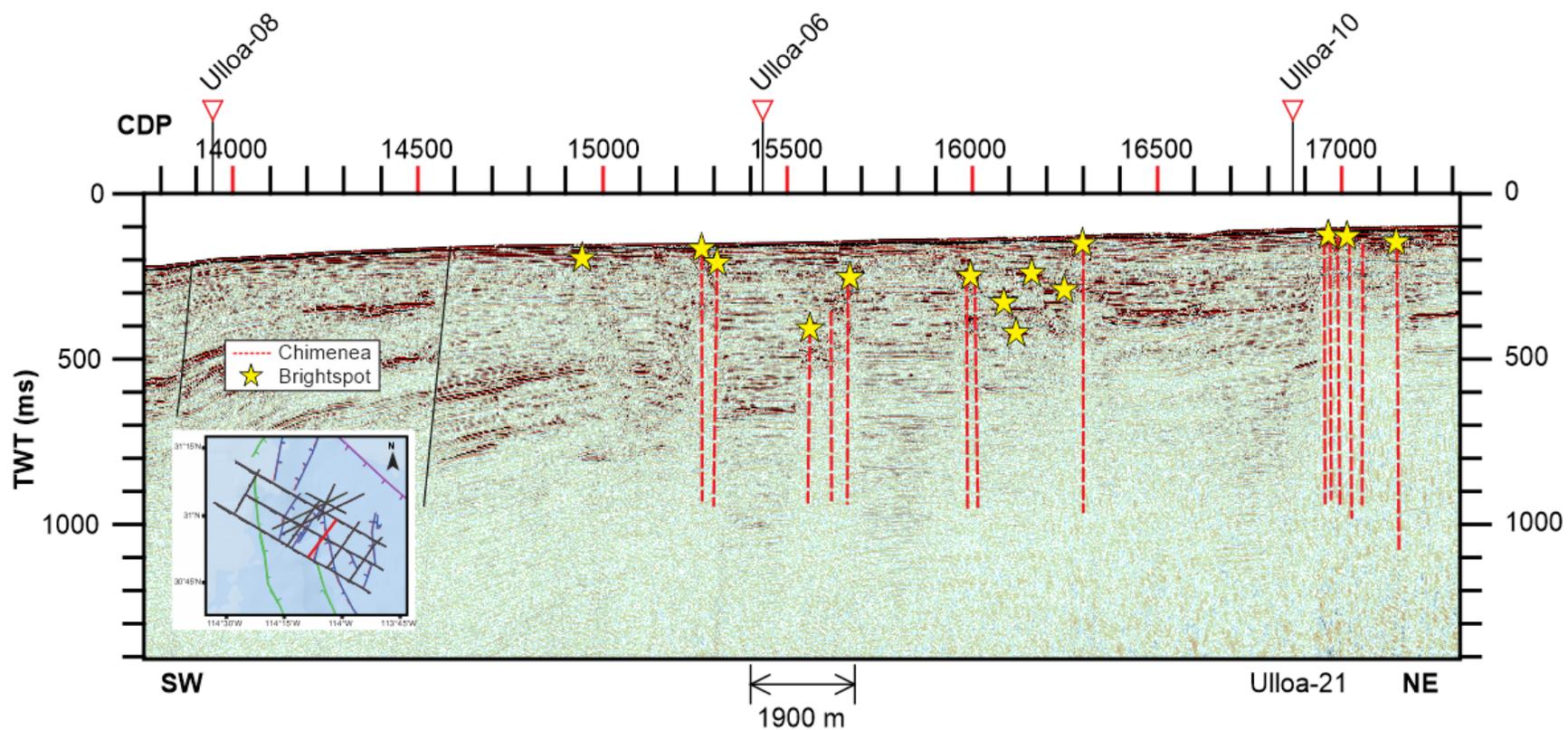
La sección Ulloa 21 tiene una orientación N35°E y una longitud aproximada de 23.9 km (Figura 26).

Esta sección presenta un carácter contrastante a la sección anterior (Ulloa 23, que es paralela), pues cuenta con la presencia de anomalías de interés. Se observan reflectores en los primeros CDPs de la sección que buzan hacia SW, creando una cuenca.

En general la sección goza de un grado razonable de horizontalidad y continuidad lateral, sin embargo, también presenta anomalías de amplitud en los CDPs 14600, 15100, 15500, 16150, 16350 y el área comprendida entre los CDPs 17000 y 17250. Dichas anomalías se conforman de *brightspots* en su parte superior e inmediaciones, acompañadas de difusividad y pérdida de amplitud en profundidad.



**Figura 25.** Sección Ulloa 23. Eje del depocentro de la cuenca Wagner. Muestra el comportamiento deposicional uniforme de una cuenca sedimentaria. Se ilustra el carácter casi simétrico que tiene este perfil, la poca densidad de fallas y carencia de anomalías de alta amplitud o pérdida de continuidad lateral de los reflectores.



**Figura 26.** Sección Ulloa 21. Muestra el flanco NE de la cuenca Consag (flanco SW). En contraste a la sección Ulloa 23 (Figura25) presenta reflectores horizontales con pérdida continuidad lateral afectados por anomalías de amplitud en la señal sísmica, indicadoras de actividad hidrotermal, próximas a la falla Wagner.

### 3.1.6. Sección Pemex 5037

La sección 5037 tiene una orientación NE-SW y una longitud de ~99.4 km (Figura 27).

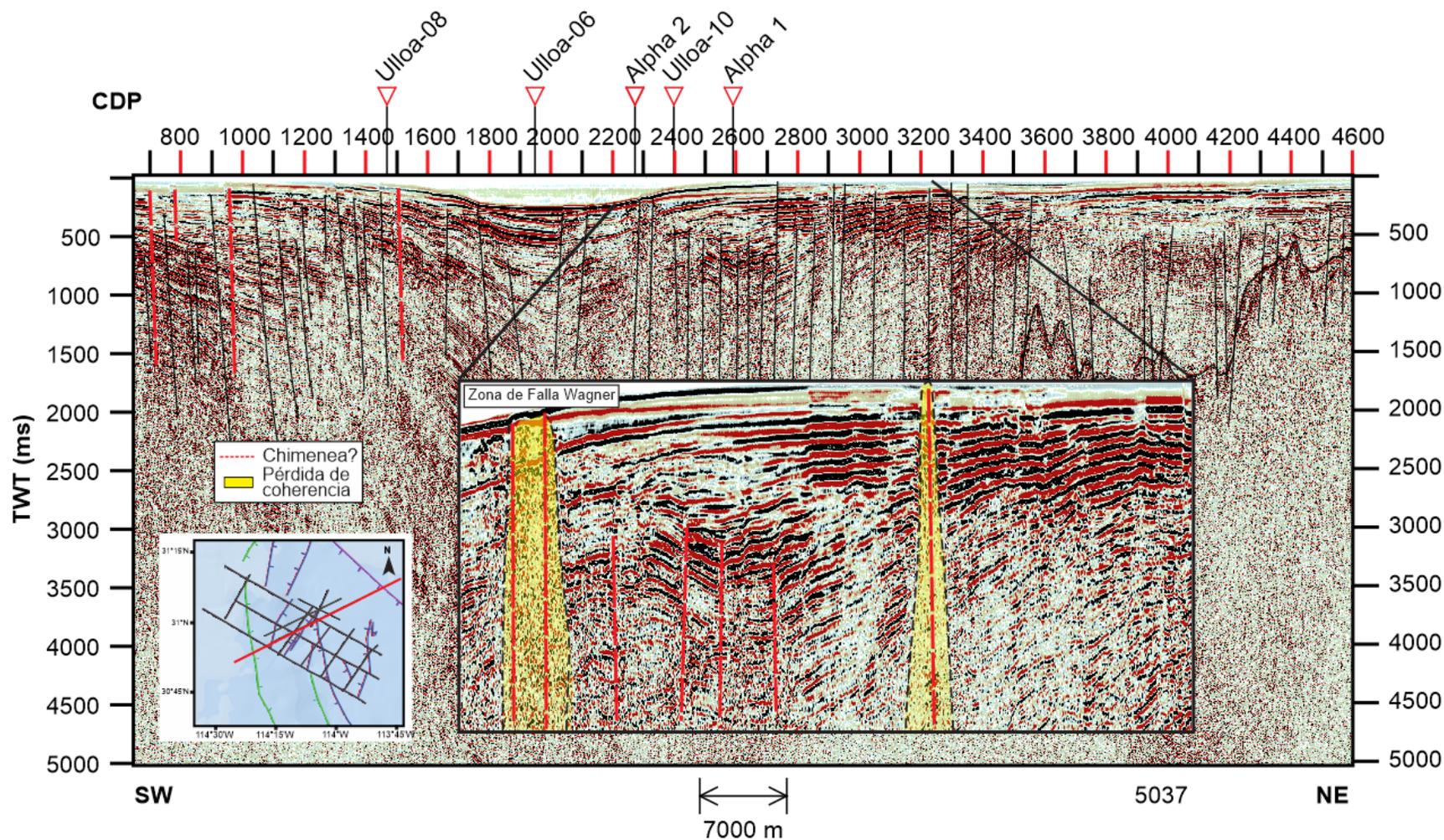
Esta sección tiene 6 segundos de registro, aunque también tiene menor resolución en comparación a las secciones de Ulloa99 y Alpha Helix 2019. Se pueden observar paquetes sismoestratigraficos de gran amplitud que buzcan hacia el NE en el área comprendida por los CDPs 700 a 900, punto a partir del cual comienzan a verse afectados severamente por escalonamiento, provocando discontinuidad lateral.

La zona comprendida entre los CDPs 1700 y 2100 posee un paquete de reflectores de amplitud contrastante con sus inmediaciones, teniendo una subida abrupta al final de este, la cual tiene una terminación onlap con reflectores sobreyacentes.

Entre los CDPs 2250 y 2350 destacada la presencia de una pérdida de amplitud importante, la cual se extiende a profundidad produciendo difusión y pérdida coherencia, no permitiéndonos observar la continuidad del paquete de reflectores a profundidad, siendo coherente con la sección Alpha 4.

El área comprendida entre los CDPs 2500 y 2800 describe una subcuenca por los reflectores de gran amplitud que se encuentran en una posición cóncava. Entre los CDPs 2700 y 3400 podemos ver el carácter de gran amplitud del paquete de reflectores, el cual posee algunos eventos de continuidad lateral. Es importante destacar que en toda esta área se puede observar un carácter escalonado, pero también la existencia de sutiles anomalías verticales que afectan a los reflectores, siendo la más importante la ubicada en el CDP 2900.

Se identificó un reflector en esta sección, puesto que representa un cambio importante en la naturaleza de los reflectores, además de la estructura y configuración del área de estudio. Dicho horizonte posee un comportamiento inconstante a lo largo de su extensión, pues presenta múltiples eventos de discontinuidad lateral.



**Figura 27.** Sección 5037. Muestra zonas con anomalías de amplitud asociadas a la presencia de estructuras y/o actividad hidrotermal que resulta cuestionable debido a la baja resolución del dato. En zoom, zona de mayor interés hidrotermal. Horizonte se interpreta como basamento acústico.

### 3.1.7. Sección Alpha 1

La sección Alpha 1 tiene una orientación S65°E y una longitud aproximada de 17.3 km (Figura 28).

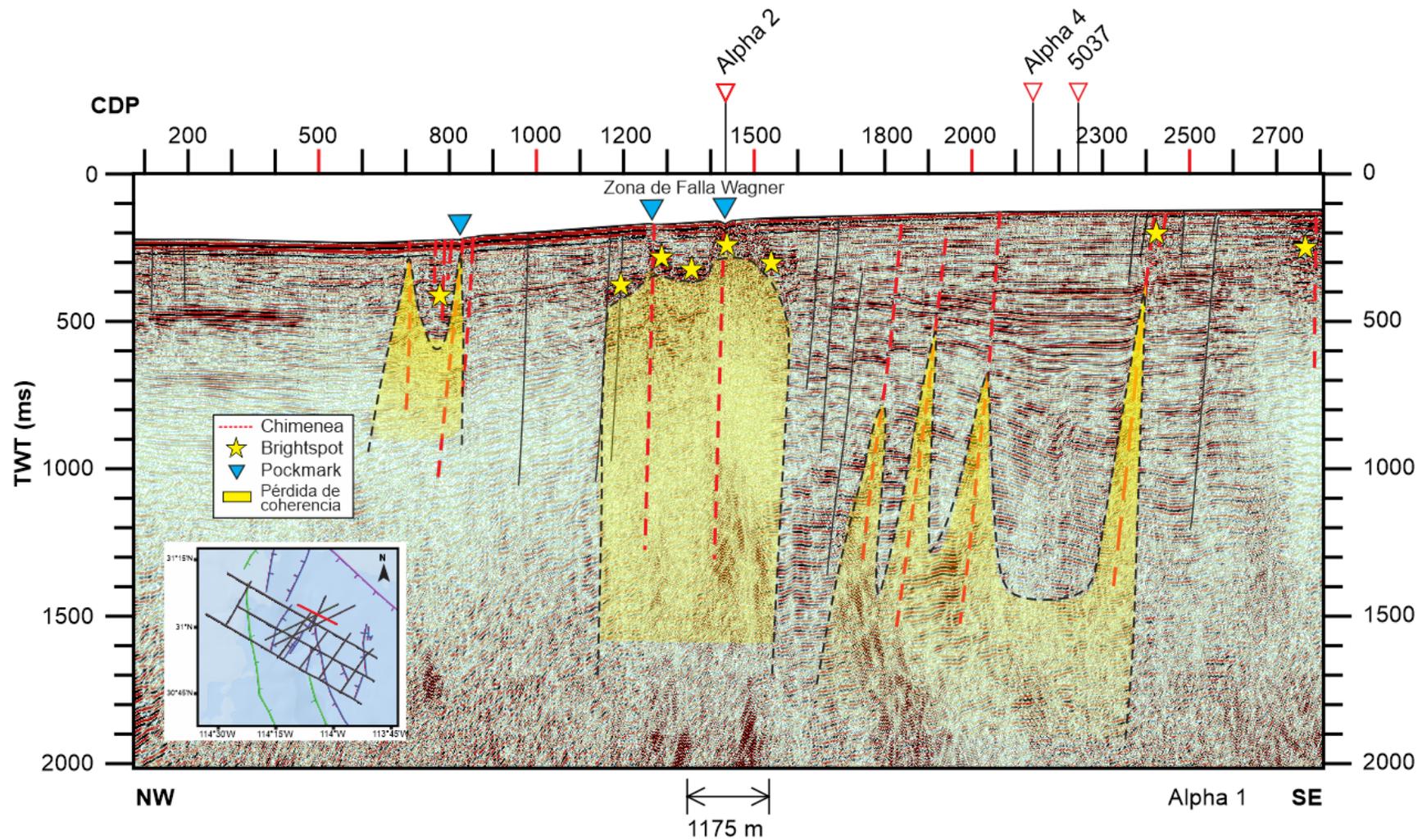
Esta sección sísmica presenta un contraste entre ambos flancos de la misma, sin embargo, presenta uniformidad en cuanto al buzamiento y tipo de fallas presentes a lo largo de este perfil tratándose fallas normales con caída hacia NW. Sin embargo, algunas de estas fallas presentan anomalías de amplitud en su constitución.

El flanco NW presenta un paquete de reflectores comprendidos entre los CDPs 100 y 1100 y hasta los 500 ms, que poseen horizontalidad y continuidad lateral con una zona en el CDP 800 que presenta un aumento de amplitud. Carece de resolución después de los primeros 500 ms donde podemos observar la generación de múltiples provocados por la reverberación del fondo marino y una pérdida importante de amplitud a profundidad.

Destaca la porción central de la sección, el área comprendida entre los CDPs 1150 y 1300, muestra un cambio súbito en el comportamiento de los reflectores, pues hay un aumento importante de amplitud, acompañada de difusividad en sus inmediaciones e incluso afectando la definición del fondo marino. Entre los CDPs 1400 y 1500, se tiene una pérdida completa de la coherencia y resolución de la sección por la presencia de una zona muy difusa que produce una pérdida de coherencia bajo los 600 ms en profundidad, e impide la visualización de reflectores debajo de esta. Sin embargo, hay presencia de *pockmarks* en el fondo marino que sobreyace a una zona relativamente difusa, pero de gran amplitud, en la cual se puede apreciar una serie de *brightspots* relacionados.

El flanco SE de la sección presenta una zona, comprendida entre los CDPs 1600 y 2600 hasta los 1500 ms, de buena amplitud con reflectores horizontales escalonados. Estos son afectados en profundidad por difusividad circúndate a los planos de falla presentes, siendo de mayor área en el fondo y decreciendo hacia la superficie.

Un último *brightspot* puede visualizarse en el CDP 2750 cerca del fondo marino y pérdida de resolución bajo los 500 ms.



**Figura 28.** Sección Alpha 1. El margen NW de la cuenca tiene la presencia de múltiples del fondo marino y carece de buen contraste. Parte central corresponde a la zona de falla Wagner donde hay actividad hidrotermal que incluso afecta el fondo marino. El flanco SE es más activo en comparación con NW, la sombra amarilla se interpreta como fluido que es capturado por fallas y migra a superficie.

### 3.1.8. Sección Alpha 2

La sección Alpha 2 tiene una orientación N22°E y muestra una imagen paralela al flanco oriental de la cuenca con una longitud de ~15.8 km (Figura 29).

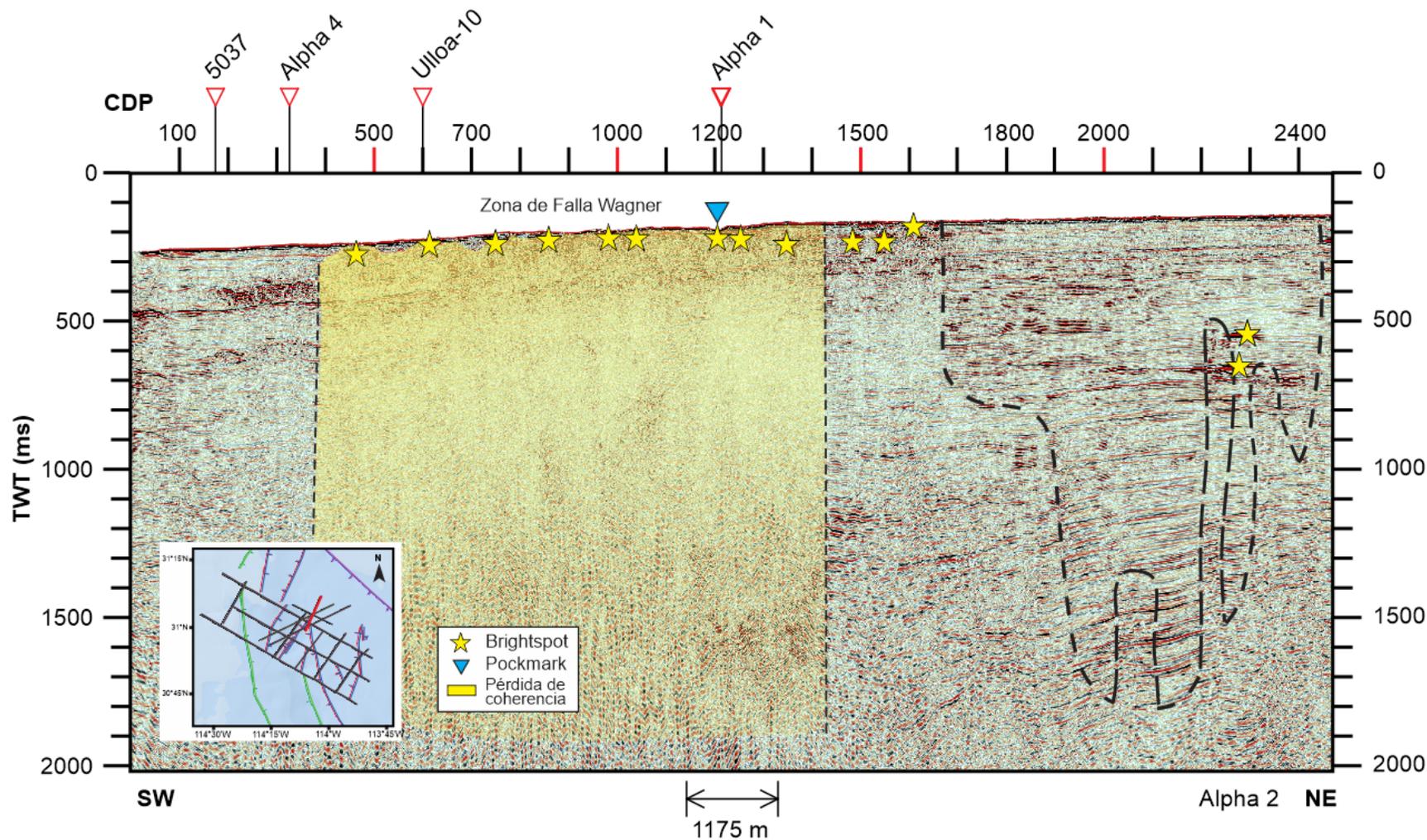
Esta sección en el cruce con L1, presenta un carácter similar en la que podemos observar que ambos flancos de la cuenca presentan características diferentes. En el extremo SW se observa la presencia de un múltiple del fondo marino a los 500 ms y se pierde en la zona difusa comprendida entre los CDPs 400 y 1700.

La zona definida entre los CDPs 400 y 1400 en general presenta pérdida de coherencia y pérdida de amplitud bajo los 500 ms. Sin embargo, aunque no se puedan visualizar reflectores, los primeros 100 ms de esta área bajo el fondo marino poseen un aumento de amplitud en comparación con el resto de la sección y una serie de *brightspots*. A su vez estas características afectan el fondo marino produciendo un escarpe notable en esta área.

A partir del CDP 1400 la coherencia aumenta gradualmente hacia el flanco NE y la presencia de *brightspots* entre los CDPs 1500 y 1600 cerca del fondo marino.

Hacia NE, después del CDP 1700, el comportamiento de los reflectores cambia completamente, pudiendo diferenciarse del resto de la sección como una zona con reflectores más definidos con continuidad lateral. Sin embargo, esta área pierde coherencia a profundidad y donde se aprecian algunas anomalías de amplitud que incluyen difusividad y *flat spots*.

Es importante denotar el comportamiento del múltiple en ambos flancos, puesto que de un lado existe enmascarándonos la señal a profundidad y en caso contrario no, pues si quiera se observa dicho múltiple. Esto sugiere un cambio importante en su configuración y acentúa la importancia del contraste de las características entre ambas zonas.



**Figura 29.** Sección Alpha 2. Sección transversal a Alpha 1 (Figura 28). Zona de falla Wagner contenida en sombra amarilla reflexiones caóticas con amplitudes altas y difusividad circundante, tiene un área mayor debido a que cruza la falla Wagner en un ángulo cerrado, presenta también un escarpe notable. Delimitada en línea negra punteada un área con reflectores con mayor resolución con baja actividad hidrotermal a profundidad.

### 3.1.9. Sección Alpha 3

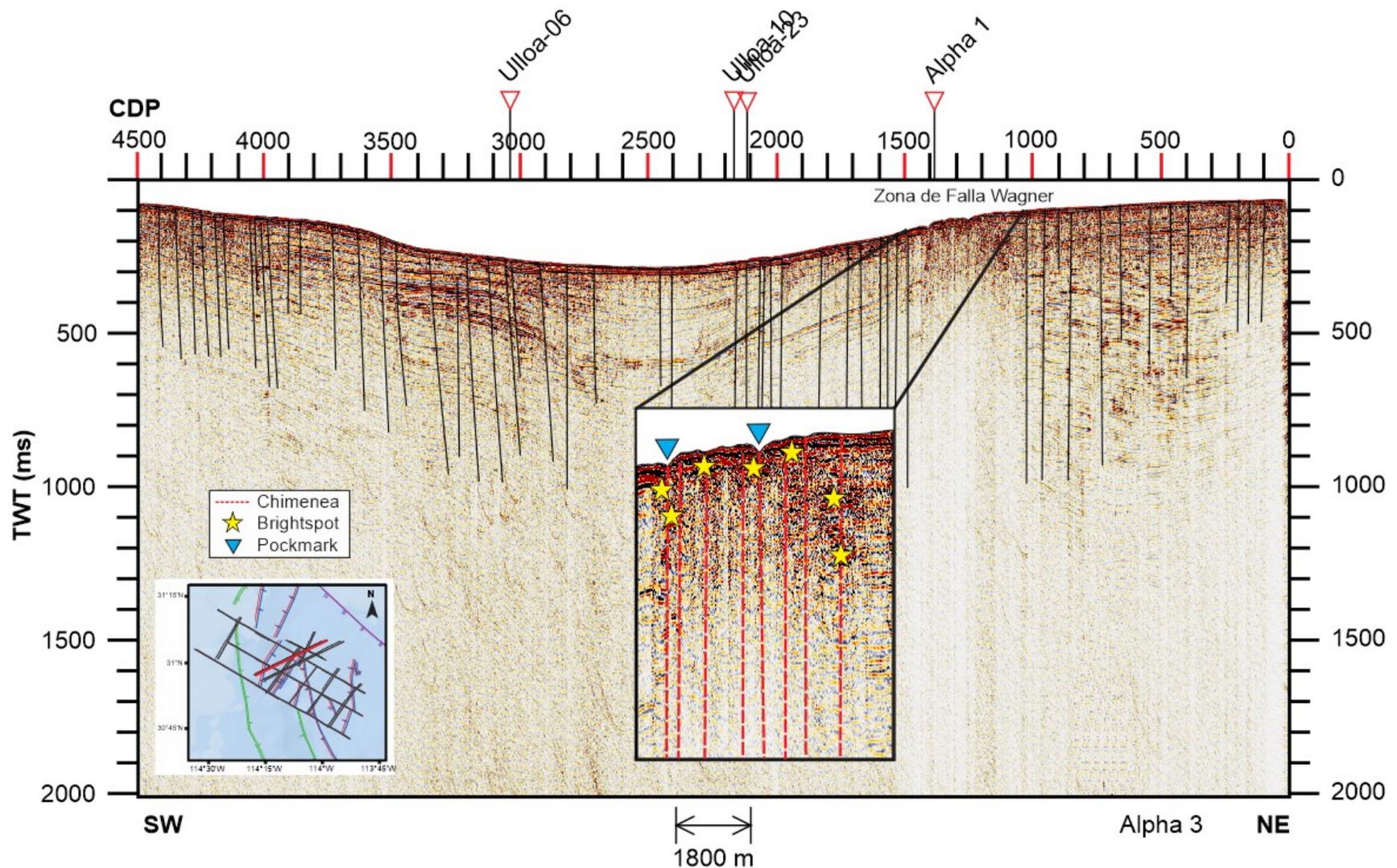
La sección Alpha 3 tiene una orientación N62°E y una longitud aproximada de 33.9 km (Figura 30).

Esta sección resultó ser afectada por ruido posiblemente electrónico, viento u oleaje durante su adquisición, se redujo el ruido al mínimo, pero aún se visualizan algunos restos, especialmente bajo los 1000 ms. Aun así, se tiene una resolución razonablemente buena de los primeros 500 ms donde se puede ver el carácter de la cuenca que posee la zona de estudio.

Se puede observar el paquete de reflectores buzando hacia el NE conservando continuidad lateral y siendo afectados escasamente por escalonamiento. Destacan algunos reflectores por su incremento en amplitud entre los CDPS 2900 y 3500, en los cuales se observan terminaciones onlap y cómo empiezan a verse afectados por escalonamiento. Entre los CDPs 1500 y 2600 se tiene una pérdida sustancial de los reflectores en cuanto a su amplitud, sin embargo, es posible reconocer la estructura de la cuenca y las pérdidas de continuidad lateral existentes en esta zona.

La sección posee una zona que destaca por el cambio que sufre en su resolución entre los CDPS 1100 y 1400. Dicha zona presenta perturbación en el fondo marino en forma de escarpe; presenta reflexiones caóticas en su zona más somera y amplitudes anómalas a sus flancos; a profundidad se genera un efecto de blanqueamiento acústico ocasionado por la pérdida de energía de los eventos en superficie.

La última zona, comprendida entre los CDPS 0 y 1000 posee buena resolución hasta los 1000 ms permitiendo ver un carácter escalonado que afecta a los reflectores; estos mantienen cierta horizontalidad, pero se ven discontinuados repetidamente.



**Figura 30.** Sección Alpha 3. Presenta mayor actividad en el flanco NE, donde se aprecia una zona con pérdida de coherencia y escarpe notable en un área que corresponde a la zona de falla Wagner. La resolución del depocentro se ve afectada probablemente por acumulación de fluidos.

### 3.1.10. Sección Alpha 4

La sección Alpha 4 tiene una orientación NE-SW y una longitud de ~40.1 km (Figura 31).

Esta sección destaca eventos de discontinuidad lateral que poseen alguna anomalía de amplitud o irregularidad en la señal.

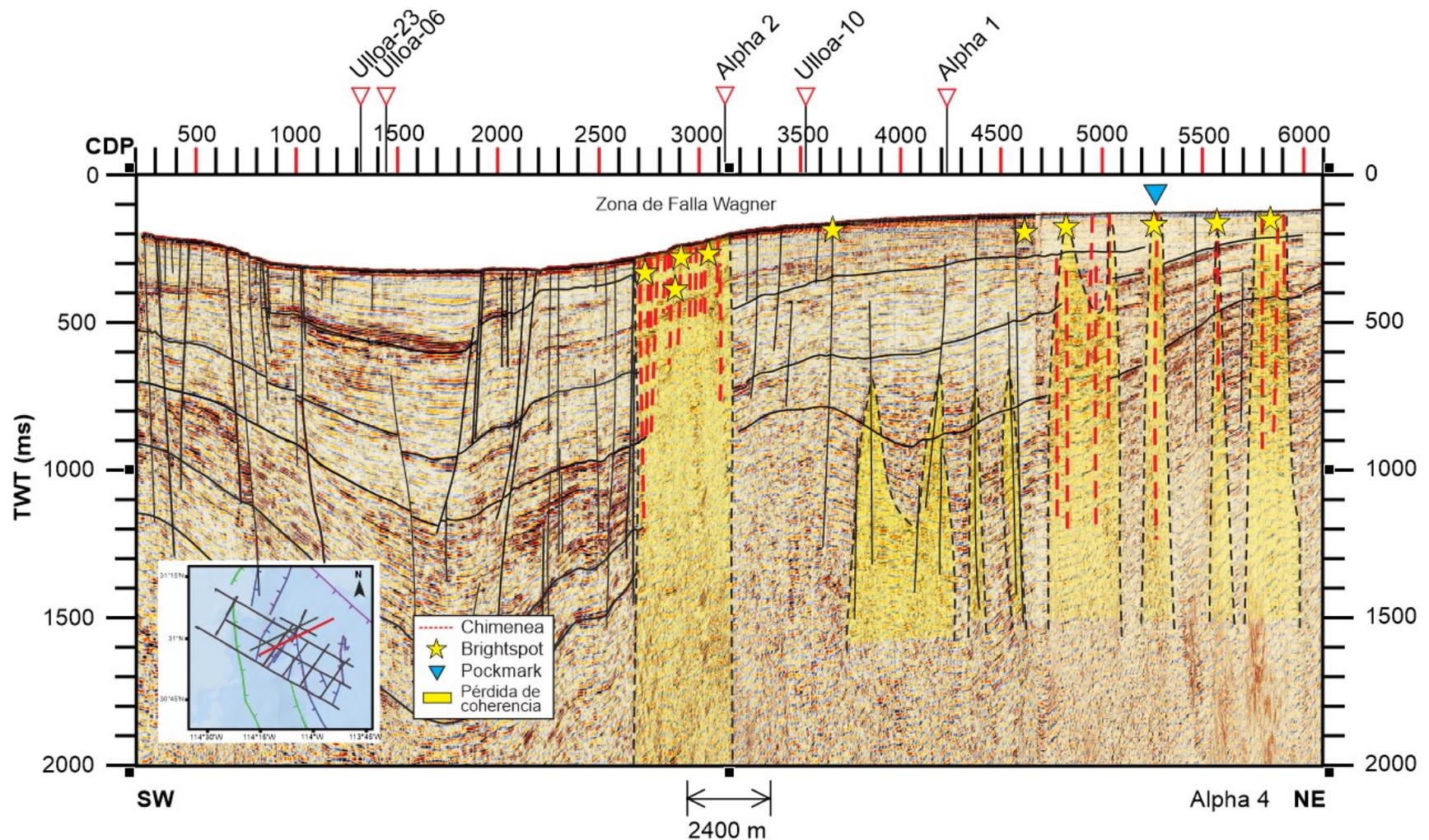
El flanco SW de la cuenca se observa que los reflectores están afectados por fallas que producen escalonamiento en los primeros 900 CDPs. Un paquete de reflectores de amplitud contrastante entre los CDPs 1000 y 1900 marcan el depocentro y los estratos buzcan hacia el NE debido al basculamiento de las fallas que se ubican entre los CDPs 1900 y 2200. Hacia NE los horizontes quedan en una porción más somera en el bloque de piso, y las fallas cortan el fondo marino produciendo escarpes en el fondo. En el margen oriental de la cuenca los reflectores comienzan a buzcan hacia el SW, y se puede observar que los reflectores tienen pérdida de amplitud y continuidad lateral en algunos casos.

Entre los CDPs 2700 y 3000 se puede observar una anomalía importante en la resolución de la zona, con algunas disrupciones alargadas verticalmente de amplitudes contrastantes y produciendo la pérdida completa de coherencia a profundidad, interrumpiendo completamente la visualización de los reflectores.

A partir del CDP 3300 se recupera la resolución del paquete de reflectores; sin embargo, en todo este flanco impera una difusividad constante. En profundidad queda evidenciado por la posición de los reflectores una segunda cuenca entre los CDPs 3600 y 4700 a los 1000 ms. Los reflectores que sobreyacen a esta segunda cuenca mantienen horizontalidad y amplitud baja. Dicha cuenca resalta por una mayor amplitud respecto a sus alrededores; a su vez contiene anomalías verticales de difusividad y pérdida de continuidad lateral que en general se extienden a superficie hasta los 600 ms. Existe una anomalía en el fondo marino manifestada como un cráter, asociado a estas pérdidas de coherencia en el CDP 5250.

Es importante manifestar que el salto en el CDP 4700 fue producido por efectos de procesado del dato y no representa un rasgo importante en las características de la sección.

En la última porción de la sección entre los CDPs 4800 y 5900, similar a la porción anterior, destacan anomalías aún más evidentes de discontinuidad lateral y difusividad en los CDPs 5000, 5300 y 5550. Cabe destacar que estas anomalías verticales alcanzan el fondo marino, a diferencia de la porción anterior que se desvanecían gradualmente.

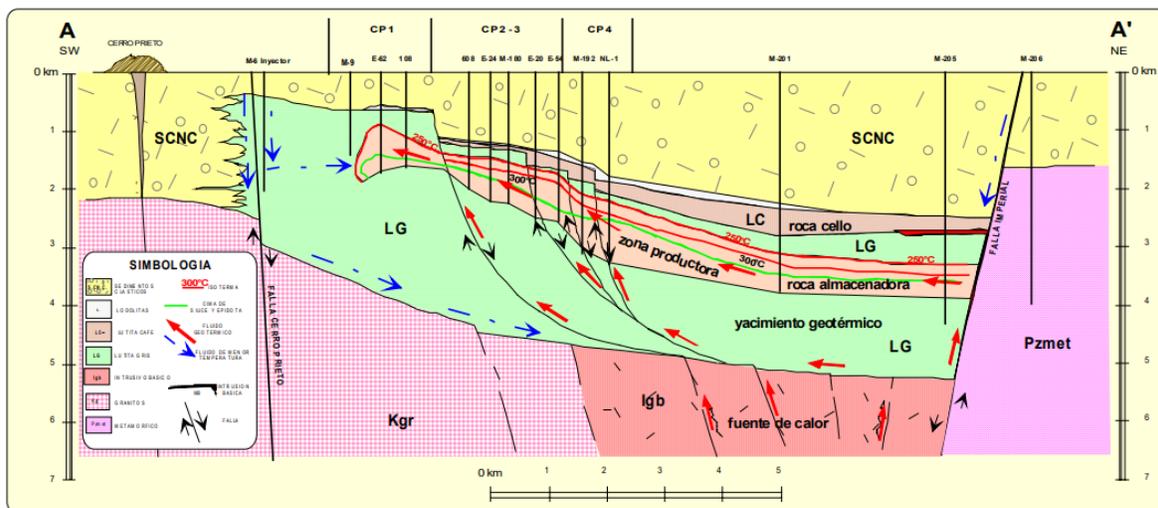


**Figura 31.** Sección Alpha 4. Paralela a la Sección Alpha 3, en general presenta mejor resolución donde destacan las zonas con sombra amarilla. La zona con pérdida de coherencia a profundidad, interpretada como la zona de falla Wagner delimita ambos flancos de la sección, en la cual la presencia de anomalías de amplitud predomina en el flanco NE donde se da principalmente la migración de fluidos a superficie canalizados por fallas y chimeneas hidrotermales asociadas. Horizontes de control ilustran el carácter deposicional de la cuenca Wagner.

## Capítulo 4. Discusión

El área de Cerro Prieto comprende una cuenca de tipo semi graben controlada por las fallas de Cerro Prieto e Imperial, caracterizada por fallas listricas con dirección predominante NW-SE y NE-SW, escalonadas al NE. Al estar situado en una cuenca pull apart, la anomalía termal presente se debe al elevado flujo de calor inducido por el emplazamiento de un intrusivo básico en un ambiente transtensional activo (Prol-Ledesma et al., 2016; Kaspereit et al., 2016).

El resultado de estos eventos geológicos en esta área propicio la formación de un yacimiento geotérmico (Figura 32), el cual permite que los fluidos puedan ser almacenados en estratos permeables, calentados y migrados a través de fallas listricas hasta paquetes superiores donde quedan atrapados por una capa sello donde pueden ser explotados. La zona de recarga se ubica en la porción oeste, a través de pozos de inyección que tienen el objetivo de mantener la presión del yacimiento (Lira-Herrera, 2005).



**Figura 32.** Modelo conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto. Muestra la dinámica que tienen los fluidos en el interior de un semigraben (Modificado de Lira-Herrera, 2005).

Debido a la relación entre la apertura del Golfo de California, las cuencas pull apart desarrolladas en el mismo y la existencia del sistema hidrotermal de Cerro Prieto, puede intuirse un sistema hidrotermal en la cuenca Wagner debido al ambiente tectónico y deposición de sedimentos deltaicos (alternancias de arenisca-limolita-lutita) similares a Cerro Prieto.

La interpretación de las secciones sísmicas pertenecientes al área de la cuenca Wagner permitió la identificación y mapeo de los rasgos hidrotermales en la cuenca Wagner. Se realiza la descripción de estas estructuras y se discuten las características sismoestratigráficas de las zonas en las que se encuentran.

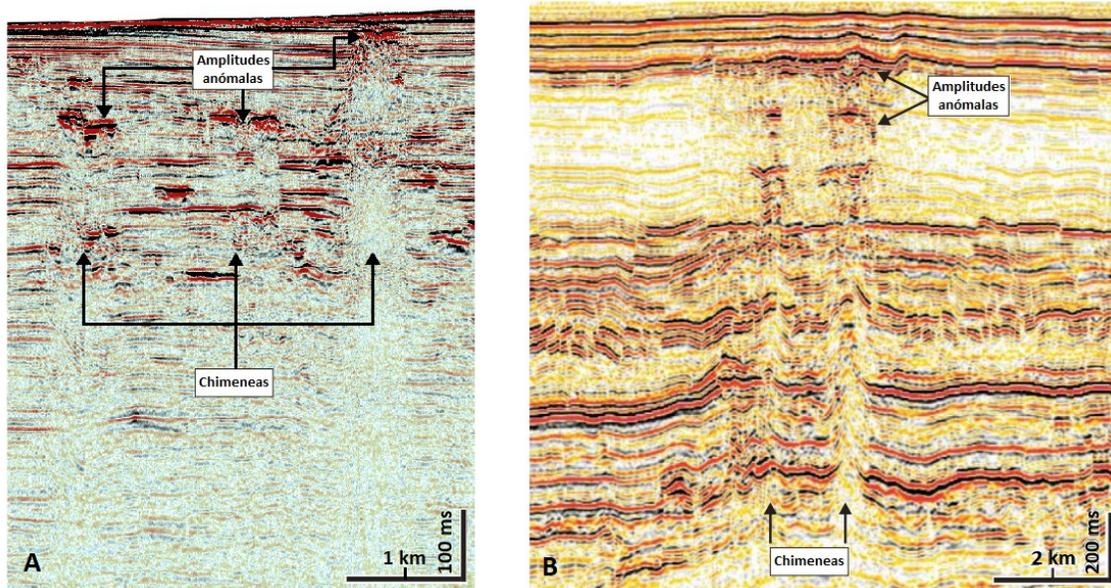
#### **4.1. Interpretación de anomalías**

El mapeo sistemático de las anomalías sísmicas relacionadas a actividad hidrotermal y la relación con su distribución a lo largo de la cuenca Wagner, muestra posibles zonas de acumulación hidrotermal subsuperficiales. La anomalía más comúnmente observada en los perfiles sísmicos es la pérdida de continuidad lateral por pérdida de coherencia o turbidez acústica. Estas anomalías se pueden interpretar como chimeneas hidrotermales que son el conducto alimentador de ventilas hidrotermales a profundidad, formadas por fracturamiento y fallamiento por el cual se favorece el transporte de fluidos hidrotermales y en ocasiones representan diques por donde puede ocurrir la erupción de magma.

Se pueden caracterizar chimeneas hidrotermales en una sección sísmica como estructuras tubulares y verticales que interrumpen a los reflectores (Milas y Cartwright, 2010). En las secciones sísmicas, se identifican por el aumento de amplitud en su tope y la pérdida de amplitud subyacente, enmascarando la continuidad de los reflectores. Estas se pueden interpretar como fallas en la superficie o fondo oceánico afectadas por ascenso de fluidos calientes. De acuerdo a la nomenclatura de Planke et al. (2005), lo más común es que este tipo de estructuras se presenten asociadas al emplazamiento de sills, pues estos cuerpos ígneos aumentan la temperatura y presión, creando nuevos caminos por los cuales seguir ascendiendo. Comúnmente la morfología de estas estructuras incluye zonas verticales de difusividad sísmica y tienen un carácter sísmico de reflectores deformados por el paso de fluidos. Su carácter sísmico depende de la magnitud de transporte de fluido, ya que pueden presentarse en fallas visibles o en zonas en las que la falla queda completamente enmascarada por reflexiones caóticas o pérdida de coherencia (e.g. Figura 33).

La naturaleza de estas ventilas usualmente incluye cráteres en superficie resultantes de la naturaleza explosiva de la ventila (Planke et al., 2005). Sin embargo, las ventilas observadas en este

trabajo no poseen dicha característica (con excepción de las escasas manifestaciones observadas en las secciones Alpha 1, Alpha 3 y Ulloa 06) ya que tienen como génesis afallamiento preexistente que ha sufrido la cuenca por deformación previo al ascenso de fluidos. Cabe destacar que los datos de ecosonda facilitan la visualización de manifestaciones en el fondo marino asociadas a ventilas hidrotermales, gracias a la alta resolución que provee este tipo de herramienta, ayudándonos a identificar pequeñas estructuras como cráteres, fallas, y zonas de acumulación hidrotermal cerca de la superficie.



**Figura 33.** Ejemplos de chimeneas hidrotermales. A) Fragmento de la sección Ulloa 21 con chimeneas que deforman los estratos que atraviesan y con cimas o niveles con amplitud anómala o *brightspots*. B) Expresión sísmica de estructuras tipo chimenea (Tomada de Cartwright, 2007). Los conductos por donde asciende el fluido tienen pérdida de coherencia, mientras que en su tope hacen presencia altas amplitudes, interpretándose como acumulación de fluido.

Estudios recientes revelan que las ventilas hidrotermales usualmente están relacionadas a sistemas de fallas que capturan fluidos hidrotermales y, por lo tanto, influyen su distribución (Jackson, 2012; Magee et al., 2013). Se puede interpretar que las chimeneas hidrotermales coinciden con el afallamiento de la zona, donde varias anomalías de amplitud sobreyacen a las chimeneas. Haciendo uso de atributos sísmicos en Seisworks: coseno de la fase y fase instantánea (figura 34), se puede apreciar una falta de continuidad lateral en los estratos que están siendo afectados por ventilas hidrotermales.

Las fallas tienen una orientación preferencial NE-SW y en las zonas con actividad hidrotermal se presentan como zonas difusas y pérdida de coherencia a profundidad. En la parte somera es común observar *brighspots*, que son amplitudes contrastantes al resto en sus inmediaciones. A su vez, esta anomalía de alta amplitud va acompañada de un efecto de pérdida de iluminación o sombra de la amplitud en profundidad, resultado de la dispersión y atenuación del rayo sísmico y decremento de la velocidad de la onda bajo dichos *brighspots* (Hart, 2011).

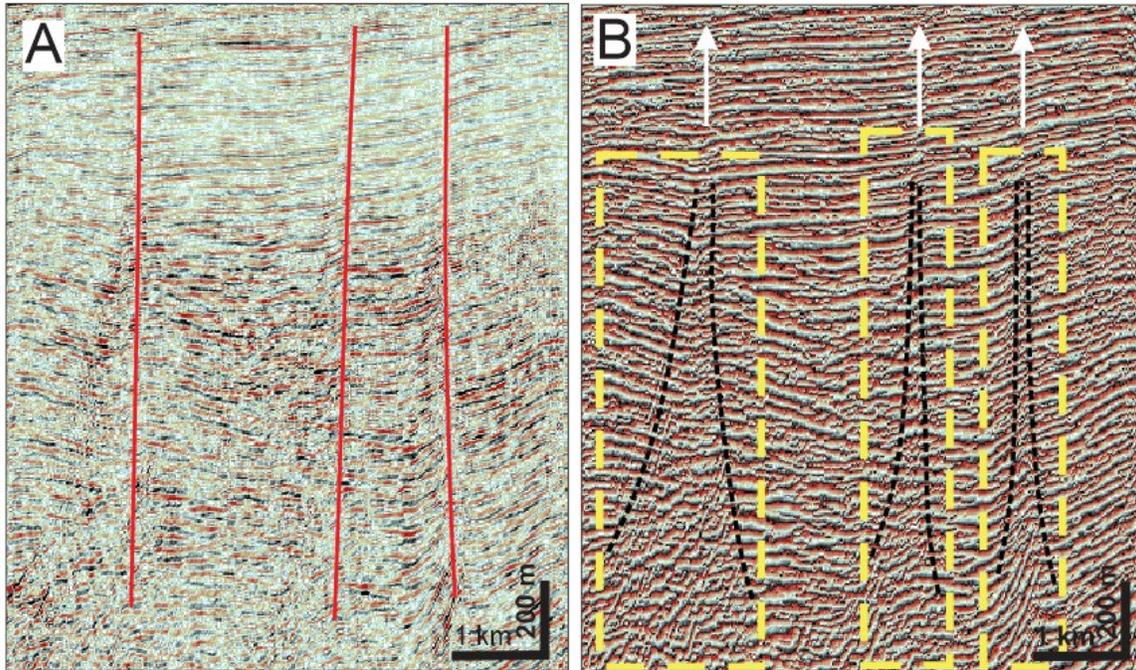
La presencia de estas estructuras se ve favorecida por la configuración tectónica de la zona, donde las fallas activas acomodan la mayor parte del movimiento relativo entre la península de Baja California y el margen de Sonora (Gonzalez-Garcia et al., 2003). Dicho dominio está delimitado entre la falla de Cerro Prieto al norte y la falla del canal de Ballenas al sur, y se caracteriza por tener una densidad de afallamiento mayor en relación con cuencas adyacentes. El patrón estructural de la cuenca Wagner es asimétrico, con más fallas activas en una región amplia en el flanco SE, y una zona menos activa en el flanco NW de la cuenca (Persaud et al., 2003).

Aunado a la estructura de la litosfera, existe evidencia de actividad magmática en el norte del Golfo de California del Plioceno tardío al Holoceno ocurriendo en la intersección de los dominios de falla transtensional y fallas de transformantes de deslizamiento dextral interpuestas (Martín-Barajas et al., 2013; Persaud et al., 2003). Aunque en la cuenca Wagner hay ausencia de basalto superficial emplazado, las intrusiones máficas son abundantes en profundidad, basado en datos de pozos, las cuales son hidratadas por medio de la circulación de agua meteórica en la cuenca (Schmitt et al., 2013). Estos eventos magmáticos en profundidad están relacionados al ascenso hidrotermal presente en la cuenca Wagner, ya que actúan como fuente de calor, haciendo que migre fluido a superficie y sea canalizado por fallas identificadas en las secciones sísmicas de alta resolución.

## **4.2. Mapeo de chimeneas hidrotermales**

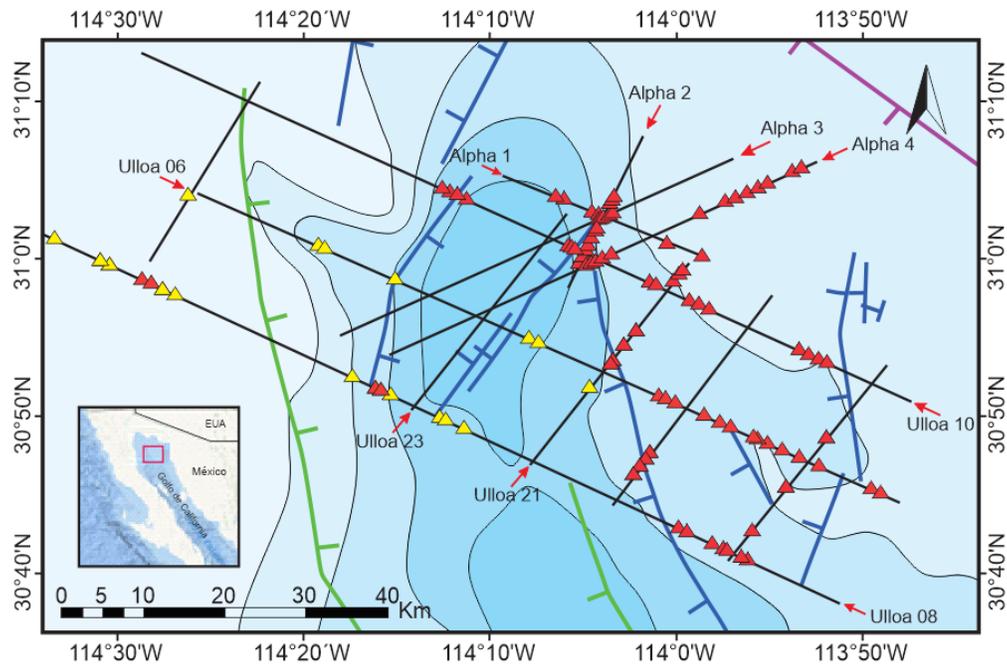
La falta de continuidad lateral en los paquetes sedimentarios puede denotarse mejor haciendo uso de los atributos fase instantánea y amplitud. Purves (2014) demostró que estos atributos son sensibles a discontinuidades sutiles que incluyen sustitución de fluido debido a la precipitación de Barita (Canet et al., 2010) que tiene lugar con la reacción entre los fluidos filtrados y agua de mar, el cual no es fácilmente visto en sísmica convencional (B en Figura 34). En cuencas sedimentarias, el

sílice es considerado como uno de los principales cementantes que pueden ser responsables de la reducción de porosidad y permeabilidad (Ngwenya et al., 2000)



**Figura 34.** Segmento de la sección Alpha 4. A) Sección sísmica en fase normal; eventos de discontinuidad lateral interpretados como fallas en línea roja. B) Sección sísmica con atributo de fase instantánea; muestra 3 de las chimeneas identificadas en recuadro punteado amarillo, área afectada bajo líneas punteadas negras y flecha blanca indicando la dirección de ascenso hidrotermal.

El atributo de fase instantánea por lo general realza quiebres en el reflector y su discontinuidad. El coseno de la fase hace posible resaltar discontinuidades entre estratos, mientras que la fase instantánea permite la observación de fallas asociadas a ventilas y chimeneas hidrotermales (Figura 34). Comúnmente estos métodos se utilizan para resaltar fallas y contactos litológicos en sísmica 2D y 3D (e.g. Chopra y Mrfurt, 2007), pero también ayudaron a identificar las anomalías asociadas a actividad hidrotermal en este trabajo.

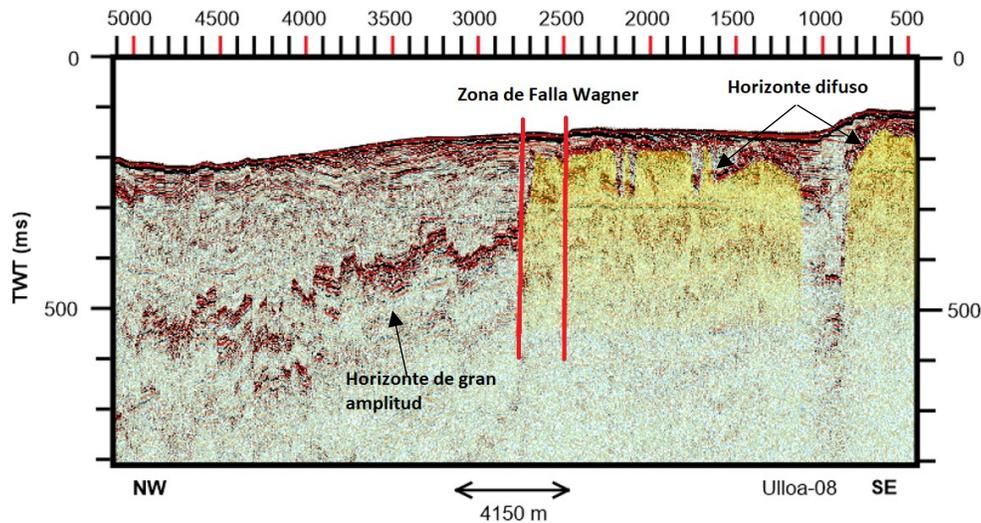


**Figura 35.** Mapeo de chimeneas hidrotermales observadas en la cuenca Wagner; en triángulo rojo se ubica la actividad más evidente y amarillo la actividad con menor expresión en el perfil sísmico. Las fallas principales son de (Martin-Barajas et al., 2013); falla Wagner en línea azul; falla Consag en línea verde; falla de Cerro Prieto en línea morada. Se observa que la actividad más numerosa se ubica al este de la cuenca.

En la cuenca de Wagner la distribución de chimeneas hidrotermales aumenta gradualmente de Oeste a Este aumentando significativamente a partir de la falla Wagner, siendo predominante en el flanco oriental de la cuenca Wagner.

Posibles acumulaciones de fluido hidrotermal subsuperficial se identificaron de acuerdo a la magnitud y proximidad de estas estructuras, lo cual sugiere el potencial rol que pueden tener estos complejos de chimeneas en la migración de fluidos y la exploración geotérmica a lo largo de la cuenca Wagner.

Para este trabajo en particular, se puede hacer una diferenciación entre las zonas difusas provocadas por ascenso hidrotermal y zonas difusas asociadas a fallas. Se pueden usar dos criterios para identificar estas últimas: el escalonamiento de estratos por deformación y el cambio lateral de amplitud en un estrato, como se ve por ejemplo en la sección Ulloa 08 (figura 36), donde se observa un horizonte de alta amplitud que originalmente era continuo y horizontal, pero que fue escalonado por deformación a través de afallamiento.



**Figura 36.** Segmento de la sección Ulloa 08 que muestra un horizonte de alta amplitud escalonado por la deformación. La falla Wagner produce el mayor desnivel de este horizonte. La sombra amarilla es pérdida de coherencia causada por actividad hidrotermal.

La alta amplitud de este horizonte pudiera interpretarse como actividad hidrotermal, sin embargo, no necesariamente, ya que este efecto también puede atribuirse a una diferencia litológica del sedimento depositado, lo que produce un fuerte contraste de impedancia y una reflectividad distintiva. Sin embargo, su flanco SE de la sección (Figura 36) posee un grado de difusividad considerable en su composición y pérdida de coherencia subyacente en comparación con el flanco NW, por lo cual se puede considerar que hay actividad hidrotermal en el flanco SE.

### 4.3. Diferencias en la configuración estructural dentro de la cuenca Wagner

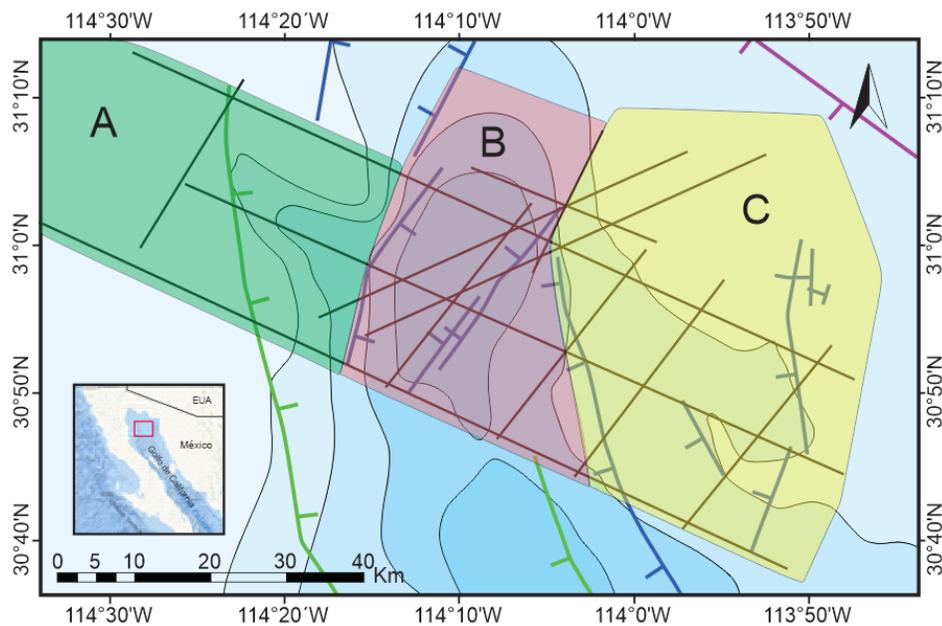
Teniendo en cuenta la distribución de chimeneas hidrotermales y la variabilidad de la densidad de afallamiento presente a lo largo de la cuenca de la cuenca Wagner (Persaud et al., 2003), se puede hacer una diferenciación del carácter estructural que posee la cuenca Wagner.

El flanco W (A en figura 37) tiene como principal característica reflectores de alta impedancia cerca del fondo marino, lo cual propicia la generación de múltiples e impide ver por debajo de 200 ms. El paquete sedimentario en esta área conserva reflectores horizontales y no muestra evidencias claras de afallamiento debido a la mala calidad de la señal sísmica o deformación asociada (Flanco NW de las secciones Ulloa 06 y Ulloa 10, figuras 21 y 22). La gran presencia de múltiples en esta zona

puede ser debido a la fuente sísmica empleada para la adquisición de las líneas de Ulloa, ya que se usó un solo cañón de aire. Esto hace que se genere mayormente frecuencias altas, las cuales pueden quedar atrapadas en regiones someras y en capas delgadas (Hurtado, 2003).

La porción central (B en figura 37) define el depocentro y ambos flancos de la cuenca, y se caracteriza porque cuenta con mejor resolución sísmica. Comprendida en esta área se encuentran las principales fallas que controlan la subsidencia de la cuenca y donde se ubica su depocentro. Las principales manifestaciones hidrotermales se ubican en los flancos de la porción central o zona B.

En el flanco E y hacia la plataforma sin deformación activa (zona C en figura 37), se observa afectado por deformación y fallamiento por debajo de los 400 ms, y localmente se producen algunas zonas difusas. A pesar de la presencia de múltiples, se puede observar claramente los reflectores sismoestratigráficos, a diferencia del flanco oeste en donde la señal es más ruidosa. Es en esta área ubicada al este de la zona de deformación activa se ubicaron la mayoría de las chimeneas hidrotermales identificadas.



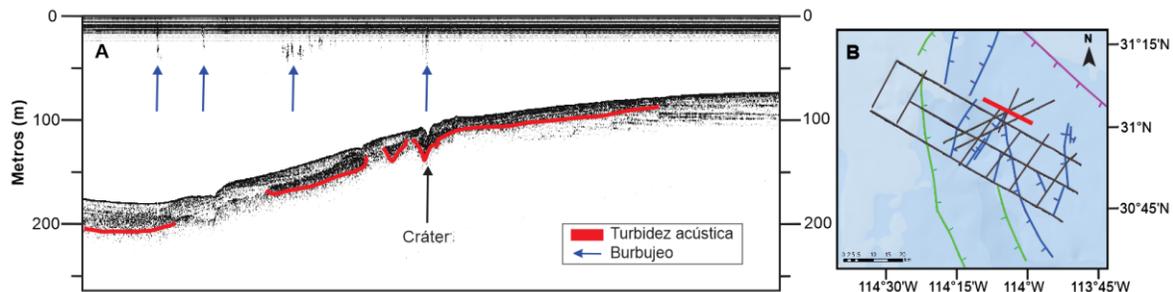
**Figura 37.** Síntesis de la diferencia en la configuración estructural de la cuenca Wagner. A) Flanco NW es caracterizado por gran cantidad de múltiples y baja resolución a profundidad; delimitado por polígono verde; B) Porción central, principal zona de subsidencia; delimitada por polígono rojo y C) Flanco SE caracterizado por alta actividad hidrotermal; delimitado por polígono amarillo. Secciones sísmicas en línea negra; falla Wagner en línea azul; falla Consag en línea verde; falla de Cerro Prieto en línea morada.

#### 4.4. Manifestación hidrotermal en la falla Wagner

El flanco oeste de la cuenca Wagner presenta numerosas manifestaciones de actividad hidrotermal, sin embargo, el flanco E y la zona al oriente de la falla Wagner hay numerosas manifestaciones con mayor expresión y las mayores evidencias de actividad hidrotermal. Los perfiles sísmicos adquiridos cumplen el objetivo de aumentar la malla sísmica en un área en particular previamente estudiada (Canet et al., 2010; Prol-Ledesma et al., 2013) que contiene manifestaciones hidrotermales en el fondo marino. Estos nuevos perfiles ayudan a visualizar con detalle las características y actividad hidrotermal que tiene el subsuelo para esta área en particular.

##### 4.4.1. Modelo Alpha 1

Apoyándonos en datos de ecosonda (figura 38), podemos sintetizar un modelo conceptual basado en las anomalías de amplitud que presenta.



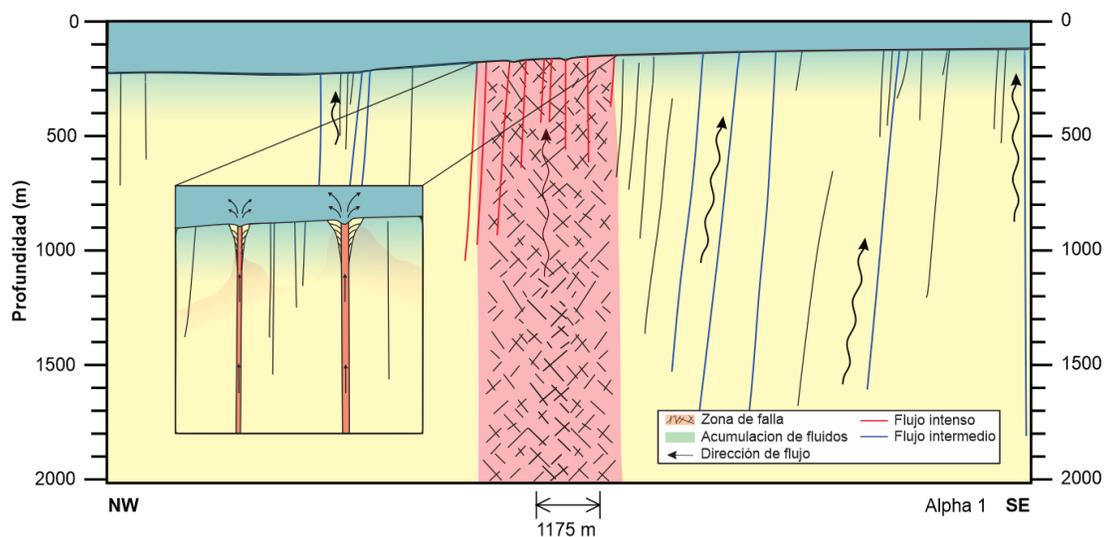
**Figura 38.** A) Perfil de ecosonda correspondiente a sección Alpha 1. Principales rasgos asociados a actividad hidrotermal; zonas de turbidez acústica marcadas con línea roja. B) Mapa de ubicación, en línea roja orientación correspondiente al perfil de ecosonda.

Los datos de ecosonda revelan aumentos en la amplitud, identificadas como zonas de turbidez que se asocian a acumulamiento de fluidos. La magnitud de ascenso hidrotermal es tal, que provoca un cráter en el relieve del fondo marino, indicador del desarrollo de una ventila hidrotermal. Además, hay perturbaciones en la columna de agua, lo que se relaciona con expulsión de fluido sobre este punto y hacia el flanco NW.

El perfil de ecosonda Alpha 1 nos sugiere el ascenso de fluido hidrotermal evidenciado por las anomalías de amplitud de la sección sísmica (Figura 38). La zona de falla Wagner constituye una

discontinuidad tabular compuesta de una red de fallas con saltos pequeños individuales, pero de orientación y geometría similar.

En la zona de falla Wagner la magnitud de migración de fluido puede diferenciarse de acuerdo a las anomalías de amplitud presentes en las fallas; se interpreta un alto flujo en la zona de falla respecto a los flancos de la cuenca que solo presentan anomalías a profundidad, las cuales van disminuyendo gradualmente hacia arriba a lo largo de las fallas presentes hasta no poder ser visualizadas en la parte somera.



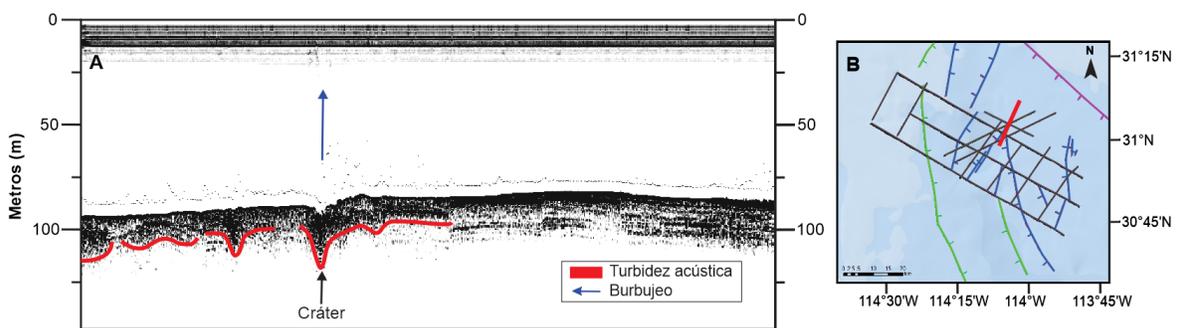
**Figura 39.** Modelo conceptual de la sección Alpha 1 (Figura 28). Zona de falla Wagner en rojo, flechas negras onduladas indican las principales vías de migración de fluidos hidrotermales. Zoom del modelo indica la presencia de un par de ventilas hidrotermales y la dinámica de expulsión de fluido/material hacia superficie. La zona superior en rojo contrasta en amplitud y es debido a la precipitación de minerales en el sedimento a partir de los fluidos hidrotermales.

El flujo hidrotermal en la zona de falla Wagner llega a perturbar el fondo marino y genera un cráter por la expulsión de sedimentos y fluido; esta estructura se puede interpretar como una ventila hidrotermal según la clasificación de Planke (2005). Por debajo de la ventila se presenta una zona que contrasta con sus alrededores que se puede deber a la huella producida por la precipitación de fluidos hidrotermales en el fondo marino y en sedimentos subsuperficiales a través de reacciones entre agua de mar, rica en sulfato y agua filtrada rica en bario (Paytan et al., 2002; Torres et al., 2003). Por otro lado, donde los fluidos filtrados son ricos en metano puede ocurrir la precipitación de carbonatos, usualmente calcita y dolomita (Wallman et al., 1997; Stakes et al., 1999; Canet et al.,

2006). Sin embargo, no significa que necesariamente exista un depósito mineral, sino que es indicador de una intensa migración de fluido hidrotermal.

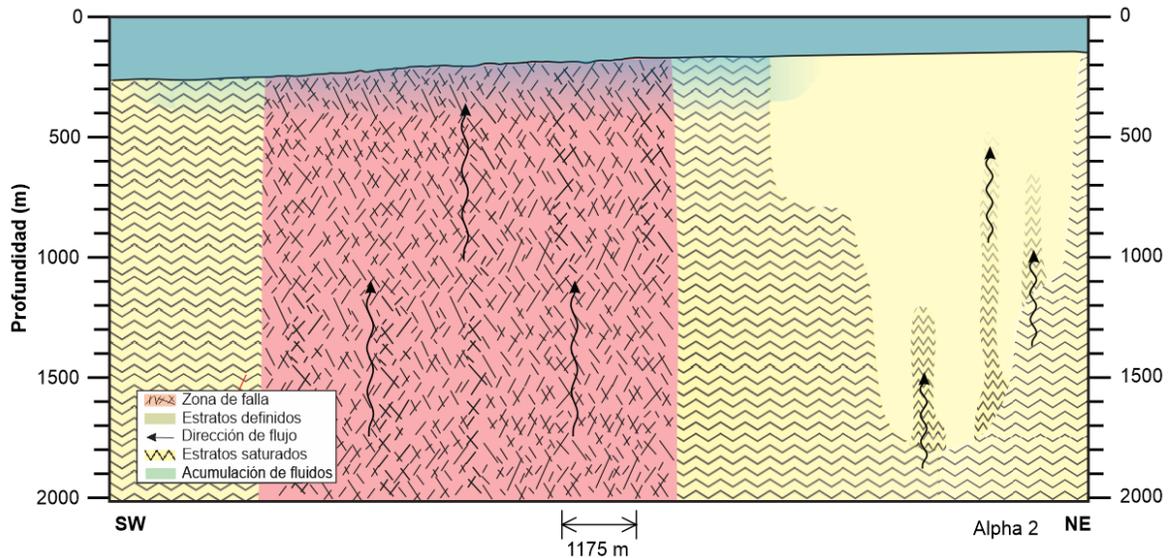
#### 4.4.2. Modelo Alpha 2

El perfil de ecosonda Alpha 2 (Figura 40) revela una diferencia contrastante entre sus flancos, ya que tiene la presencia de zonas de turbidez acústica cargada al flanco oeste; se puede apreciar nuevamente la expulsión de material y fluidos a través de una posible ventila hidrotermal.



**Figura 40.** Perfil de ecosonda Alpha 2. Muestra zonas de turbidez acústica sobre la línea roja y posibles zonas de burbujeo que producen reflejos de la señal acústica viajando en el agua. B) Mapa de ubicación del perfil de ecosonda Alpha 2.

El modelo conceptual de la sección Alpha 2 (Figura 41) es perpendicular al modelo Alpha 1, y muestra una zona de falla mayor de 6 km de ancho, ya que intercepta a la falla Wagner de forma oblicua a sub-paralela. A pesar de que no se ven cráteres definidos, el fondo marino presenta una superficie irregular, similar al modelo Alpha 1 correspondiente a esta zona. Las áreas que se encuentran a los costados de esta zona no se encuentran bien definidas en la sección sísmica por lo que se infiere que están siendo saturadas por el ascenso de fluido caliente por la zona de falla.

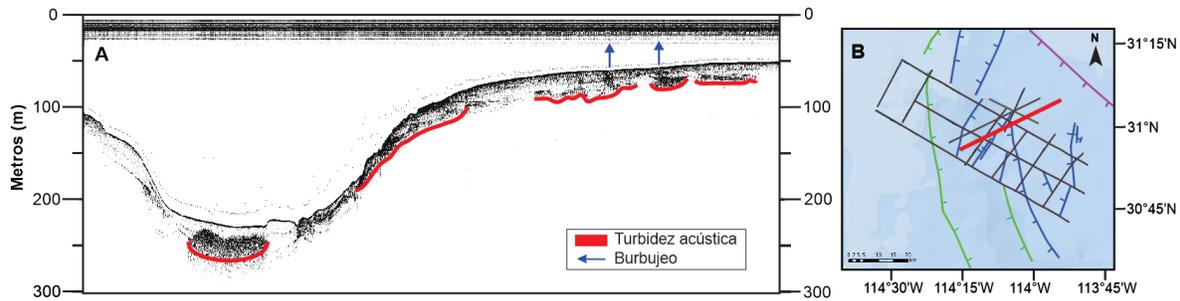


**Figura 41.** Modelo conceptual de la sección Alpha 2 (Figura 29) que atraviesa de forma oblicua a la falla Wagner lo que produce una zona de falla de ~6 km de ancho. Esta zona de falla muestra contraste en ambos lados de la falla. Diferencia entre zonas afectadas por diferente saturación de fluido en líneas quebradas. Flechas negras indican principales vías de flujo hidrotermal a través del área de la falla Wagner.

Hacia el flanco NE de la zona de falla Wagner, el efecto del ascenso hidrotermal disminuye, por lo cual existe una zona menos afectada por actividad hidrotermal en comparación con el flanco opuesto. Sin embargo, presenta interrupciones/perturbaciones en profundidad que afectan la columna litológica, pero que no llegan a superficie por la ausencia de afallamiento activo o reciente.

#### 4.4.3. Modelo Alpha 4

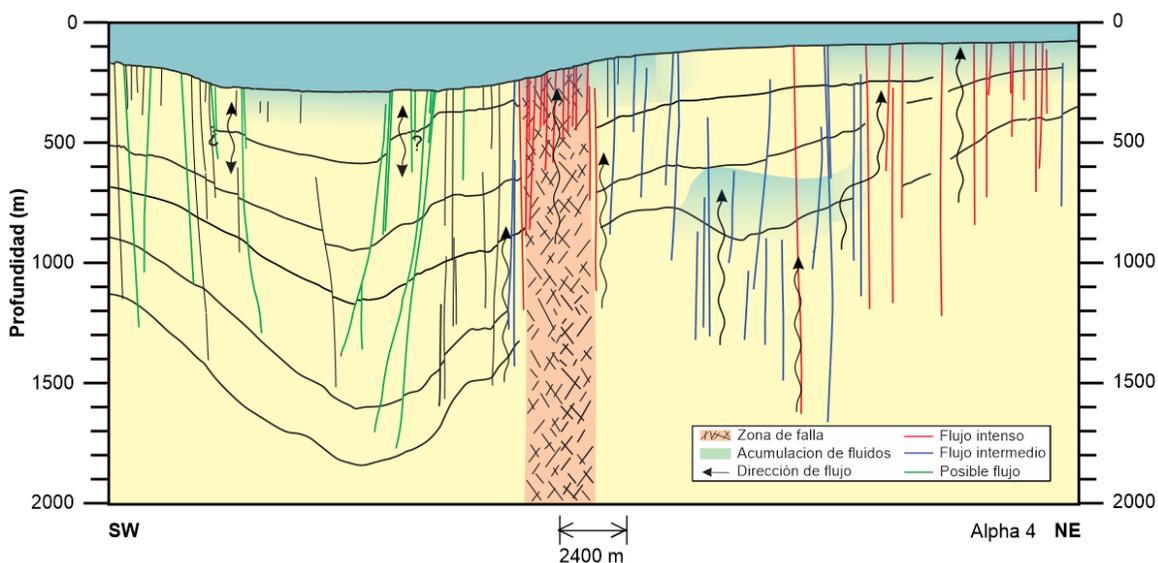
El perfil 4 es el de mayor interés, pues tiene la misma posición que el perfil sísmico de PEMEX 5037 (Figura 27) que sirvió como base para recolectar datos de flujo de calor (Neumann et al., 2017). El perfil de ecosonda Alpha 4 (Figura 42) revela zonas de turbidez sísmica (e.g. acumulación de fluido) principalmente en el depocentro y en el flanco NE, donde a su vez existen manifestaciones en el fondo marino en forma de cráteres posiblemente por expulsión de fluidos, que también se evidencian por minúsculas perturbaciones acústicas en la columna de agua.



**Figura 42.** Perfil de datos de ecosonda correspondiente a Alpha 4. Muestra los principales rasgos de actividad hidrotermal. Zonas de turbidez acústica sobre líneas rojas. B) Mapa de ubicación, en línea roja orientación correspondiente al perfil de ecosonda.

El modelo conceptual de Alpha 4 (figura 43) sintetiza con detalle las variaciones de intensidad que tiene la migración de fluidos a lo largo del perfil apoyándonos con datos de ecosonda para identificar zonas de acumulación de fluidos cercanas a superficie y basándonos en las anomalías de amplitud que presentan en su correspondiente sección sísmica; esta intensidad puede ser desde sutil hasta muy evidente. La clasificación de la intensidad de flujo se hizo en función a la magnitud de anomalías de amplitud (brightspots, difusividad, pérdida de coherencia y/o continuidad lateral) en las secciones sísmicas y perfiles de ecosonda. Dichas magnitudes son mayores en el área que corresponde a la zona de falla y al flanco NE, donde se tiene una total pérdida de coherencia en la señal sísmica.

La incidencia de chimeneas hidrotermales es mayor entre la zona de falla Wagner y hacia el NE del perfil, en contraste con el flanco SW. Se interpreta que hay una zona más extensa de acumulación hidrotermal, como lo revelan los datos de ecosonda. Otra característica que sustenta lo anterior es la mejor definición de los estratos en el lado SW (ver Figura 31), al contrario que en el lado NE, donde prevalece ruido sísmico provocado por la saturación de fluido caliente. Esta falta de definición en el flanco NE se puede deber a la saturación o acumulación de fluido con mayor temperatura o densidad, lo cual podemos observar en los datos de ecosonda (Figura 42). Estas zonas correlacionan con la turbidez acústica vista en el perfil de ecosonda. Aunado a la presencia de chimeneas hidrotermales y las anomalías de amplitud observadas en la sección sísmica (Figura 31) estas vías de ascenso hidrotermal se correlacionan con los resultados de Reyes-Ortega (2016) y los altos valores de flujo de calor de entre 750 a 1500 mW/m<sup>2</sup> (Neumann et al., 2017; Prol-Ledesma et al., 2013).



**Figura 43.** Modelo conceptual de Alpha 4 (Figura 31). Se indica un contraste de vías de migración de fluidos hidrotermales en los flancos de la cuenca. El flujo es predominante a partir de la zona de falla Wagner hacia el flanco NE. La magnitud de estas vías de migración está clasificada por color. En flechas negras onduladas la dirección de migración del fluido. Principales zonas de acumulación de fluido en sombra azul. Zona de falla en rojo. Los horizontes de control ilustran el comportamiento deposicional que tiene la cuenca Wagner.

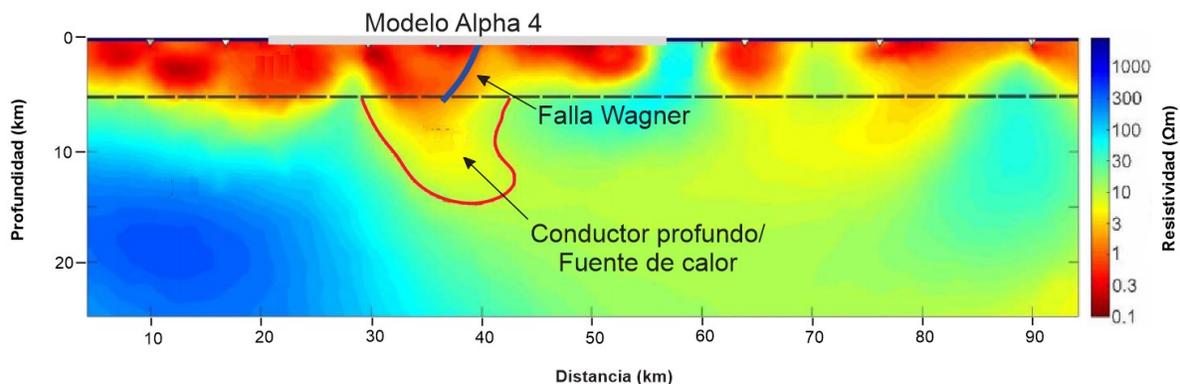
En el caso del flanco SW, aunque hay presencia de fallas con evidencias de contenido de fluido (color verde en la Figura 43), es difícil de asegurar si actualmente funcionan como vías de migración. Adicionalmente, los datos de ecosonda revelan un área con un contraste acústico que se interpreta cerca de la superficie entre estos conjuntos de fallas, lo cual significa que las fallas son conductos que influyen en la dinámica del fluido acumulado cerca de la superficie.

El modelo implica ascenso de fluido caliente con menor densidad que el agua fría intersticial. Sin embargo, el sistema hidrotermal podría tener recarga de agua fluvial fría o alternativamente, el agua podría ser de origen connato se expulsada por la compactación de los sedimentos, o podría ser un modelo convectivo sin recarga meteórica. El mayor volumen de agua expulsada por compactación se produce en los dos primeros kilómetros de enterramiento (Einsele 1991). Sin embargo, en la parte central de la cuenca de Wagner sería difícil determinar si es ascenso o descenso de fluido, tomando en cuenta que esta zona tiene un valor de flujo de calor de  $83 \text{ mW/m}^2$ , que es el valor más bajo registrado en el perfil de Neumann et al., (2017), lo que sugiere que no existe actividad hidrotermal reciente o activa.

#### 4.5. Exploración geotérmica de la cuenca Wagner

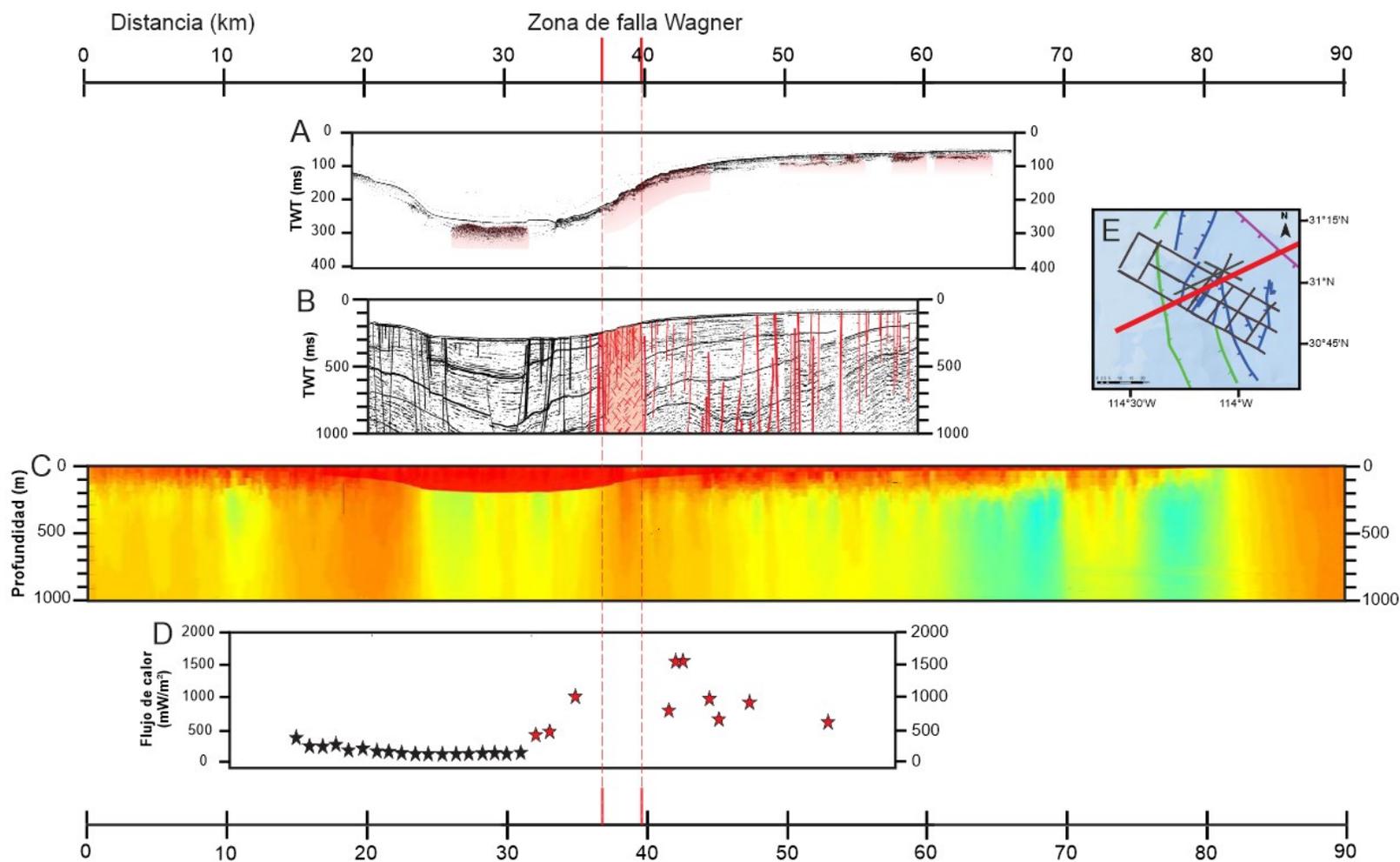
El centro o depocentro de la cuenca muestra valores de flujo de calor consistentemente por debajo del promedio para corteza oceánica en contraste con ambos flancos, que registraron valores destacables, siendo el flanco E donde se registraron valores de hasta 1.5 W/m<sup>2</sup> (Neumann et al., 2017).

El perfil magneto-telúrico obtenido por Avilés-Esquivel et al. (2020), muestra una zona conductora a gran profundidad (Figura 44), la cual se interpreta como una zona de fusión parcial del manto. Dicho conductor muestra un buzamiento aparente hacia el este que coincide con la falla Wagner (González Escobar et al., 2009), que marca el límite oriental del depocentro, que es tectónicamente más activo que el límite oeste de la cuenca (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007). Aunque no se conocen intrusiones magmáticas en el flanco NE de la cuenca de Wagner, si se han reportado intrusivos en el margen oeste (Hurtado-Brito, 2012). Además, Roca Consag es un adorno dacítico cuya erupción se ha fechado en 40 mil años (Schmitt et al., 2013).



**Figura 44.** Modelo 2D estimado de la inversión 2D de datos MT. Posición del modelo Alpha 4 en línea gris; falla Wagner en línea azul; área delimitada por línea roja respectiva a la fuente de calor que alimenta el sistema hidrotermal de la cuenca Wagner atribuida a un conductor profundo en colores cálidos (Tomada y modificada de Avilés-Esquivel et al., 2020).

La Figura 45 ofrece una vista gráfica donde se puede ver la correlación de los resultados de los aproximadamente 2 km más superficiales del área de estudio, donde se muestran las características hidrotermales más distintivas de cada estudio y como correlacionan espacialmente. Se ubica la zona de falla Wagner, la cual está proyectada en los diferentes estudios ajustándose a los demás resultados.



**Figura 45.** Integración de evidencias de actividad hidrotermal en la cuenca de Wagner. A) Datos de ecosonda que muestra zonas de turbidez acústica relacionadas a acumulación de fluidos. B) Datos sísmicos de alta resolución con la zona de falla Wagner y las principales vías de migración a superficie de fluidos hidrotermales. C) Modelo de resistividad (Reyes-Ortega, 2016) con la presencia de conductores someros relacionados a agua subterránea (colores cálidos). D) Valores de flujo de calor de Neumann et al., (2017) con estrellas rojas que muestran valores extraordinarios. E) Mapa de ubicación de los perfiles A, B, C y D.

Los datos de ecosonda tienen una penetración de ~25 metros y muestran evidencias de acumulación de fluidos cercanos al fondo marino, que incluyen irregularidades en el fondo marino asociadas a la expulsión del fluido.

Estas zonas de acumulación son correlacionables con el afallamiento y las anomalías de amplitud que presentan los datos de sísmica de reflexión analizados en este trabajo. Se concluye que los resultados obtenidos describen la localización de complejos de ventilas y chimeneas hidrotermales recientes.

De igual forma, en el estudio electromagnético de fuente controlada (Reyes-Ortega, 2006) se obtuvieron resultados de la ubicación de zonas de baja resistividad que se atribuyen a zonas de flujo hidrotermal en el primer kilómetro por debajo del fondo marino, cuyos resultados se encuentran íntimamente relacionados con resultados de sísmica de reflexión y ecosonda.

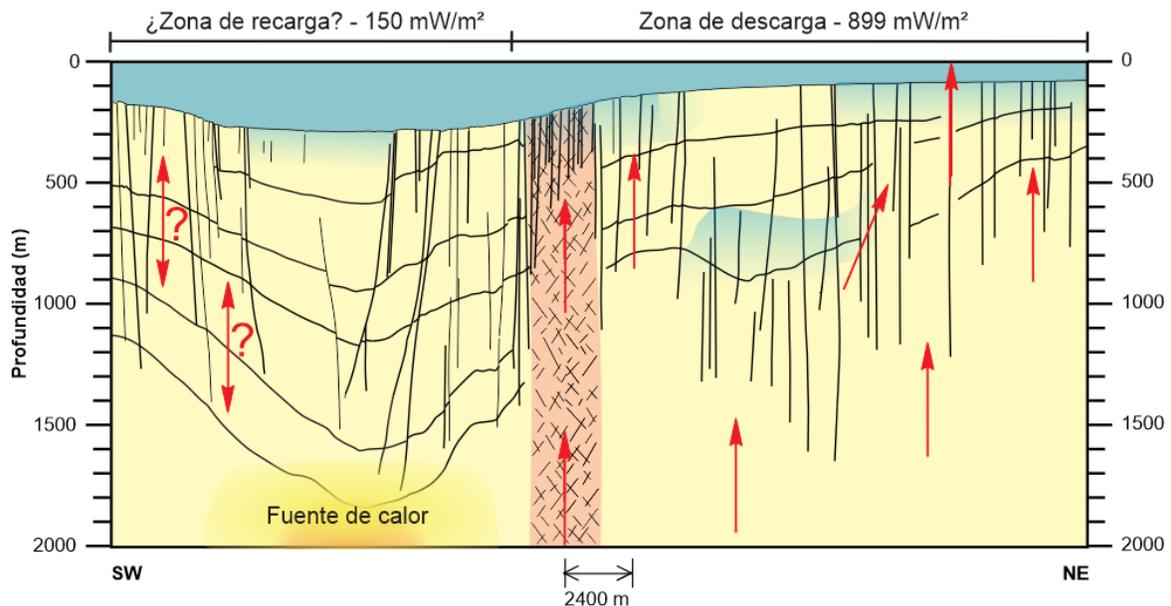
Los resultados de flujo de calor (Neumann et al., 2017) sugieren que el flujo de calor es de forma advectiva en la zona cercana a la falla Wagner y también al este de esta falla mayor (Figura 5). Establecen 3 zonas, de las cuales la porción central tiene valores más consistentes de ~150 mW/m<sup>2</sup>, mientras que en el flanco oeste aumentan un poco por encima de la media y en contraste, el flanco este muestra un incremento extraordinario y donde prevalece afallamiento subsuperficial. Por lo tanto, estos valores altos se explican por la densidad de afallamiento que canaliza fluidos con altas temperaturas a profundidad hacia la superficie.

En cuanto a la geoquímica del agua intersticial, Batista (2019) sugiere un proceso de interacción agua-roca a temperaturas de entre 180° y 220°C. También se ha documentado el escape de gas metano a través de la columna de agua, cuya emisión es provocada por la descomposición térmica de la materia orgánica en zonas con alto flujo de calor. El agua intersticial de los núcleos estudiados por Batista (2019) en la zona central con bajo flujo de calor es de origen puramente marino.

#### **4.6. Sistema hidrotermal en la cuenca Wagner**

De acuerdo a las observaciones presentadas, en conjunto con la información recabada, se infiere que existe un sistema hidrotermal activo en la cuenca Wagner. Su funcionamiento ocurre en un ambiente caracterizado por una alta tasa de sedimentación en la porción submarina del delta del Río Colorado, ubicado en la transición del *rifting* continental en el norte y un *rift* oceánico al sur en

la cuenca de Guaymas. En la cuenca Wagner se ha interpretado que existe una intrusión máfica, evidenciada por el conductor profundo reportado por Avilés-Esquivel et al. (2020) bajo el depocentro de la cuenca Wagner. Esta zona se puede interpretar como una zona de fusión parcial y ascenso de magma, que actúa como la fuente de calor a profundidades de entre 10 y 15 km (Figura 44) y promueve la circulación de agua de origen marino, que posiblemente está siendo expulsada por procesos de compactación o circulación convectiva a través de las fallas y fracturas que facilitan el flujo ascendente (Figura 46).



**Figura 46.** Modelo conceptual del sistema hidrotermal en la cuenca Wagner. Se muestran zonas de acumulación subsuperficial en azul, zona de falla Wagner en rojo, y fuente de calor en profundidad en tonos cálidos. Flechas rojas indican la dirección de flujo de ascenso hidrotermal.

El agua caliente marina interactúa con los sedimentos y esta enriquecida en Br, Na, K, Ca, Sr y B lo que distingue el carácter hidrotermal de la solución. Debido a su menor densidad el agua caliente asciende canalizada principalmente por la zona de falla Wagner, y por otras fallas mayores situadas al este en el margen de Sonora, causando un flujo alto de calor por advección al este de la cuenca como indican los valores altos valores de flujo de calor (Rango promedio de 899 mW/m<sup>2</sup> reportado por Neumann et al., 2018) medidos en este flanco. Dicho flujo también puede llevarse a cabo lateralmente a través de estratos permeables que mueven agua de compactación hacia zonas de falla en donde asciende verticalmente.

La evidencia de la canalización de fluidos a través de la falla Wagner puede observarse en las secciones sísmicas de alta resolución, las cuales presentan anomalías de amplitud en el área que comprende de la zona de falla hacia el este, así como turbidez acústica (o difusividad) y *brightspots*. El modelo de resistividad (Reyes-Ortega, 2016) (Figura 9) y datos de ecosonda son consistentes con esta interpretación sísmica.

No hay evidencia que defina claramente la zona de recarga de fluidos, pero se puede hipotetizar que la recarga del sistema es local, probablemente en el flanco oeste de la cuenca, donde no hay anomalías significativas de actividad hidrotermal y el flujo de calor es bajo. Otra posible fuente del flujo es la expulsión de agua de poro por la compactación del sedimento terrígeno.

Las secciones sísmicas de Ulloa 99 aportan información adicional sobre las anomalías hidrotermales someras y su distribución a lo largo de la cuenca, las cuales tienen mayor incidencia hacia el este de la falla Wagner, posiblemente como consecuencia del incremento en la densidad de fallas y del gradiente de presión litostática que disminuye en esa dirección.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

La distribución de chimeneas hidrotermales está asociada al afallamiento local de la zona oriental de la cuenca de Wagner, que está controlada por la falla Wagner por donde ocurre la principal de migración de fluido ascendente en la cuenca. Esta zona de falla es la estructura más significativa y de mayor interés geotérmico en el área.

Las chimeneas hidrotermales se asocian a un carácter sísmico de difusividad; presentan pérdida de coherencia a lo largo de la falla en que se localizan, y se reconocen por un aumento de amplitud en su tope y pérdida de continuidad lateral de los reflectores del paquete sedimentario.

La cuenca Wagner presenta tres sectores estructurales: El sector NW destaca por la gran cantidad de múltiples (ruido coherente) y la poca resolución a profundidad impide ver la deformación de los estratos y las evidencias de actividad hidrotermal. El sector central ocupa la parte más profunda de la cuenca, donde ocurre la mayor subsidencia. El sector SE se caracteriza por una alta densidad de fallamiento y deformación. La incidencia de actividad hidrotermal aumenta gradualmente de Oeste a Este a lo largo de estos sectores.

El modelo conceptual del presente trabajo plantea la dinámica que tienen las vías migración de fluidos hacia la superficie, el impacto que tienen en la parte somera de la cuenca Wagner y la explicación de cómo es que estos fluidos llegan a ser expulsados ayudado de la integración y correlación de estudios previos. Se determinó que el flujo de agua caliente es expulsado por el flanco Este de la cuenca, debido al ascenso hidrotermal canalizado por la zona de falla Wagner, provocado por una fuente de calor ubicada en el centro de la cuenca a profundidad; no hay evidencias claras que indiquen la ubicación de la zona de recarga, sin embargo, se puede sugerir que ocurre localmente en el flanco oeste y que parte del fluido es agua expulsada durante la compactación de los sedimentos a profundidad <2 km).

Los resultados de la campaña de exploración sísmica de 2019 demuestran el importante rol que juegan los complejos de chimeneas en la migración de fluidos hidrotermales y flujo de calor, ambos factores determinantes en la exploración de sistemas hidrotermales localizados en centros de dispersión.

Se espera que este trabajo sea significativo para la futura exploración de la cuenca de Wagner y otros posibles prospectos geotérmicos similares. El presente trabajo forma una base para futura

investigación que explore la naturaleza de la respuesta sísmica en chimeneas hidrotermales y fallas permeables y saturadas de fluido para consecuentemente ampliar y mejorar el conocimiento de la relación entre las ventilas hidrotermales, migración de fluidos y los centros de dispersión.

## Literatura citada

- Aguilar-Campos, C. 2007. Sismología de reflexión en el norte del Golfo de California, México. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California, México. 82 p.
- Alves, T.M., Omosanya, K., Gowling, P., 2015. Volume rendering of enigmatic high amplitude anomalies in southeast Brazil: a workflow to distinguish lithologic features from fluid accumulations. *Society Exploration. Geophysics Interpret.* 3 (2)
- Aragón-Arreola, M., 2006. Structural evolution of basins in the Northern and Central Gulf of California. Implications for rift kinematics and strain accommodation. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C., 146 pp.
- Armani, F. B., & Paltrinieri, D. (2013). Perspectives of offshore geothermal energy in Italy. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 54, p. 02001). EDP Sciences.
- Atkins, Darren & Audunsson, Haraldur. 2013. Exploration techniques for locating offshore geothermal energy near Iceland. Conference: Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, At Stanford University, California, USA
- Atwater, T. y Stock, J. 1998 Pacific-North America plate tectonics of the Neogene southwestern United States: an update. *International Geology Review*, 40(5): 375-402.
- Badley, M. E., 1985. Practical seismic interpretation, Boston, Massachusetts. Prentice Hall 1107 pp.
- Batista Cruz, R.Y.2019. Interacción fluido-roca, isotopía y modelación geoquímica de zonas geotérmicas del margen este de la Península de Baja California y el norte del Golfo de California. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 173 pp.
- Bennett, Scott & Oskin, Michael. 2014. Oblique rifting ruptures continents: Example from the Gulf of California shear zone. *Geology*. 10.1130/G34904.1.
- Bertani, R. 2011. Geothermal power generation in the World 2010-2014 update report. *Geothermics*. 41. 1-29. 10.1016/j.geothermics.2011.10.001.
- Bogie, I., Ussher, G., Lovelock, B., Mackenzie, K. 2015. Finding the Productive Sweet Spots in Vapour and Transitional Vapour-Liquid Dominated Geothermal Fields of Java, Indonesia, Proceeding of World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., Escobar-Briones, E., Mortera-Gutiérrez, C., Lozano-Santa Cruz, R., Linares, C., Cienfuegos, E., Morales-Puente, P., 2006. Mineralogical and geochemical characterization of hydrocarbon seep sediments from the Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology* 23, 605-619.

- Canet, Carles & Prol Ledesma, R.M. 2007. Mineralizing processes at shallow submarine hydrothermal vents: Examples from Mexico. Special Paper of the Geological Society of America. 422. 359-376. 10.1130/2007.2422(13).
- Cartwright, J 2007. The impact of 3D seismic data on the understanding of compaction, fluid flow and diagenesis in sedimentary basins. Journal of The Geological Society - J GEOL SOC. 164. 881-893. 10.1144/0016-76492006-143.
- Chopra, Satinder & Marfurt, Kurt. 2007. Volumetric curvature attributes add value to 3D seismic data interpretation. *The Leading Edge* 26: 856-867.
- Diaconescu, C.C., Kieckhefer, R.M., Knapp, J.H., 2001. Geophysical evidence for gas hydrates in the deep water of the South Caspian Basin, Azerbaijan. *Mar. Pet. Geol.* 18, 209-221.
- Díaz Méndez, G. M., A. González Fernández, G. Marinone, D. de Dios Sánchez y D. Piñero Lajas, 2015. Batimetría de alta resolución del Golfo de California adquirida durante los cruceros de Geotermia 2015, Resúmenes de la Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, Puerto Vallarta, México.
- Dong, L.G. Haung, C., Liu, Y.Z., y Zhao. Q. 2010. Numerical simulations of seismic wave propagation in cave carbonate reservoir. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2: 121-124.
- Dupré, S., Woodside, J., Foucher, J.P., de Lange, G., Mascle, J., Boetius, A., Mastalerz, V., Stadnitskaia, A., Ondréas, H., Huguen, C., Harmégnies, F., Gontharet, S., Loncke, L., Deville, E., Niemann, H., Omoregie, E., Olu-Le Roy, K., Fiala-Medioni, A., Dählmann, A., Caprais, J.C., Prinzhofer, A., Sibuet, M., Pierre, C., Damsté, J.S., the NAUTINIL Scientific Party, 2007. Seafloor geological studies above active gas chimneys off Egypt (Central Nile Deep Sea Fan). *Deep-Sea Research I* 54, 1146–1172
- Esquivel, T.A., Flores, C., Ortega, V.R., Constable, S., Gómez-Treviño, E., González-Fernández, A., 2020 Magnetotelluric exploration of the Wagner Basin, Gulf of California, Mexico: Evidence for an axial magma chamber and hydrothermal circulation., *Journal of South American Earth Sciences*,
- Faulds, James & Coolbaugh, Mark & Bouchot, Vincent & Moeck, Inga & Oğuz, Kerem. 2010. Characterizing Structural Controls of Geothermal Reservoirs in the Great Basin, USA, and Western Turkey: Developing Successful Exploration Strategies in Extended Terranes. *Proceedings World Geothermal Congress*. 25-29.
- Fannin, N.G.T. 1980, The use of regional geological surveys in the North Sea and adjacent areas in the recognition of offshore hazards. In: D.A. Ards (ed.), *Offshore Site Investigation: Proceedings of a Conference Held in March 1979*, in London, Graham & Trotman, London, 291 pp
- Fenby, S. S. y Gastil, R.G. 1991. Geologic-tectonic map of the Gulf of California and surrounding areas. *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias: American Association of Petroleum Geologists, Memoir*, 47: 79-83.

- Fletcher, J.M., M. Grove, D. Kimbourg, O. Lovera y G.E. Gehrels. 2007. Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: insights from detrital zircon u-pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas. *Geological Society of America Bulletin*, en prensa.
- Flores-Armenta, M., Ramirez-Montes, M., y Morales-Alcala, I., 2014. Geothermal activity and development in Mexico-keeping then production going. Paper presented at "Short course VI on Utilization of Low and Medium Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of utilization", organized by UNU-GPT and LaGeo, in Santa Tecla, El Salvador, March 23-29, 2014.
- González Fernández, A., Dañobeitia, J. J., Delgado Argote, L. A., Michaud, F., Córdoba, D., & Bartolomé, R. 2005. Mode of extension and rifting history of upper Tiburón and upper Delfín basins, northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 110(B01313), 1-17.
- González García, J. J., Prawirodirdjo, L., Bock, Y., & Agnew, D. 2003. Guadalupe Island, Mexico as a new constraint for Pacific plate motion. *Geophysical Research Letters*, 30(16), Doi.10.1029/SDE. (ID: 5728)
- González-Escobar, M., Aguilar-Campos, C., Suárez-Vidal, F., & Martín-Barajas, A. 2009. Geometry of the Wagner basin, upper Gulf of California based on seismic reflections. *International Geology Review*, 51(2): 133-144
- Gonzalez-Fernández, A., Dañobeitia, J., Delgado-Argote, L., Michaud, F., Córdoba, D., y Bartolomé, R. 2005. Mode of extension and rifting history of the upper Tiburón and upper Delfín basins, northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B1).
- Gonzalez Fernandez, A., Neumann, F., Negrete Aranda, R., Contreras Perez, J., Batista Cruz, R.Y. Kretzschmar, T. G., Aviles Esquivel, T. A., Reyes Ortega, V., Flores Luna, C. F., Gomez Treviño, E., Martin Barajas, J. A., & Constable, S. 2017. Conceptual Model for the Geothermal System of the Wagner Basin, Gulf of California. 2017 AGU Fall Meeting. New Orleans, LA
- Grove, C. 2013. Submarine hydrothermal vent complexes in the Paleocene of the Faroe–Shetland Basin: insights from three dimensional seismic and petrographical data. *Geology*, 41, 71–74.
- Hart, B., 2011. *An Introduction to Seismic Interpretation*. American Association of Petroleum Geologists. AAPG
- Hamilton, R. & Minshell, Ben. 2018. Hydrothermal vents and seismic anomalies: Implications for the petroleum system NE of Shetland. *Petroleum Geoscience*. 25. petgeo2017-072. 10.1144/petgeo2017-072.
- Hansen, D.M., 2006. The morphology of intrusion-related vent structures and their implications for constraining the timing of intrusive events along the NE Atlantic margin. *J. Geol. Soc.* 163, 789-800.
- Hansen, D.M., Redfern, J., Federici, F., Di Biase, D., Bertozzi, G., 2008. Miocene igneous activity in the Northern Subbasin, offshore Senegal, NW Africa. *Mar. Pet. Geol.* 25, 1-15.

- Helenes Escamilla, J., Carreño, A. L., & Carrillo Berumen, R. M. 2009. Middle to late Miocene chronostratigraphy and development of the northern Gulf of California. *Marine Micropaleontology*, 72(1-2), 10-25. (ID: 10011)
- Hovland, M., Gallagher, J.W., Cennell, M.B., Lekvam, K., 1997. Gas hydrate and free gas volumes in marine sediments: example from the Niger Delta Front. *Mar. Pet. Geol.* 17, 245-255.
- Hulen, J., Kaspereit, D., Norton, D, Osborn, W., Pulka, F., 2002. Refined Conceptual Modeling and a New Resource Estimate for the Salton Sea Geothermal Field, Imperial Valley, California. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 26, pp.8
- Hurtado-Artunduaga, A. D., 2002. Modelo estructural de la cuenca de Wagner en el Golfo de California basado en sismica de reflexión multicanal. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 109 pp.
- Jackson, C.A.L., 2012. Seismic reflection imaging and controls on the preservation of ancient sill-fed magmatic vents. *J. Geol. Soc.* 169, 503-506.
- Jerosch, K., Schlüter, M., Foucher, J.P., Allais, A.G., Klages, M., Edy, C., 2007. Spatial distribution of mud flows, chemoautotrophic communities, and biogeochemical habitats at Håkon Mosby Mud Volcano. *Marine Geology* 243, 1–17.
- Karig, D. E. y Jensky, W. 1972. The proto-gulf of California. *Earth and Planetary Science Letters*, 17(1): 169-174.
- Kaspereit, D., Mann, M., Sanyal, S., Rickard, B., Osborn, W., Hulen, J. 2016. Updated Conceptual Model and Reserve Estimate for the Salton Sea Geothermal Field, Imperial Valley, California, *GRC Transactions* vol. 40.
- Liner, C.L. 2004. *Elements of 3D seismology*. Penwell Co. (2nd. ed.) Tulsa, Oklahoma. 608 p.
- Lira, H., 2005. Actualización del modelo geológico conceptual del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B.C. *Geotermia*, Vol. 18, No. 1, pp. 37-46.
- Lizarralde, Daniel & Axen, Gary & Brown, Hillary & Fletcher, John & Gonzalez-Fernandez, Antonio & Harding, Alistair & Holbrook, Steve & Kent, Graham & Paramo, Pedro & Sutherland, Fiona & Umhoefer, Paul. 2007. Variation in styles of rifting in the Gulf of California. *Nature*. 448. 466-9. 10.1038/nature06035.
- Lonsdale, P. 1989. *Geology and tectonic history of the Gulf of California. The eastern Pacific Ocean and Hawaii*: Boulder, Colorado, Geological Society of America, *Geology of North America*, v. N: 499-521.
- Luan, X., and Y. Qin 2005, Gas seepage on the sea floor of Okinawa Trough Miyako Section, *Chin. Sci. Bull.* 50, 13, 1358-1365.
- Lund, John & Boyd, Tonya. 2016. Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. *Geothermics*. 60. 66-93.

- Magee, C., Hunt-Stewart, E. & Jackson, C.A.L. 2013. Volcano growth mechanisms and the role of sub-volcanic intrusions: insights from 2D seismic reflection data. *Earth and Planetary Science Letters*, 373, 41–53.
- Martín-Barajas, Arturo. 2000. Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, ISSN 0366-1784, Tomo 53, Nº. 1, 2000, pags. 72-83. 53.
- Martín-Barajas, A., González-Escobar, M., Fletcher, J. M., Pacheco, M., Oskin, M., y Dorsey, R. 2013. Thick deltaic sedimentation and detachment faulting delay the onset of continental rupture in the Northern Gulf of California: Analysis of seismic reflection profiles. *Tectonics*, 32(5): 1294–1311
- McQuillin, R., Bacon, M., y Barclay, W. 1979. An introduction to seismic interpretation. Gulf Publishing Company. Houston. 199 pp.
- Miles, A. y Cartwright, J. 2010. Hybrid flow sills: A new mode of igneous sheet intrusion. *Geology*, 38(4): 343-346.
- Milkov, A.V., 2000. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Marine Geology* 167, 29–42.
- Nagy, E. A. and Stock, J. M., 2000. Structural controls on the continent-ocean transition in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. 105(B7): 16,251-16,269
- Neumann, F., Negrete-Aranda, R., Harris, R.N., Contreras, J., Sclater, J.G. & González-Fernández, A., 2017. Systematic heat flow measurements across the Wagner basin, northern Gulf of California, *Earth Planet. Sci. Lett.* 479: 340-353.
- Nix R. K. 2013. The Gulf of California. A physical, geological and biological study. University of Texas, Dallas, 23 p. Recuperado de: [http://www.utdallas.edu/~rnix/MATSE\\_Units/gulf\\_cal.pdf](http://www.utdallas.edu/~rnix/MATSE_Units/gulf_cal.pdf)
- Oskin, M. y Stock, J. 2003. Pacific-North America plate motion and opening of the Upper Delfin basin, northern Gulf of California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 115(10) 1173-1190.
- Paytan, A., Mearon, S., Cobb, K., Kastner, M., 2002. Origin of marine barite deposits: Sr and S isotope characterization. *Geology* 30, 747-750.
- Peña Domínguez J.G. 2018. Estructura del ridge volcánico Tortuga en el Golfo de California a partir de sísmica de reflexión 2D. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 92pp.
- Persaud, P., Stock, J. M., Steckler, M., Martin-Barajas, A., Diebold, J. B., Gonzalez-Fernandez, A., and Mountain, G., 2003. Active deformation and shallow structure of the Wagner, Consag and Delfin Basins, Northern Gulf of California, Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 108 (7).
- Planke, S., Rasmussen, T., Rey, S.S. & Myklebust, R. 2005. Seismic characteristics and distribution of volcanic intrusions and hydrothermal vent complexes in the Vøring and Møre basins. In:

- Doré, A.G. & Vining, N. (eds) *Petroleum Geology: Northwest Europe and Global Perspectives – Proceedings of the 6th Petroleum Conference*. Geological Society, London, 833–844,
- Planke, S., Rasmussen, T., Rey, S.S., Myklebust, R., 2005. Seismic characteristics and distribution of volcanic intrusions and hydrothermal vent complexes in the Vøring and Møre basins. *Pet. Geol. Conf.* 2005 (6), 833-844.
- Popescu, I., G. Lericolais, N. Panin, M.D. Batist, and H. Gillet 2007, Seismic expression of gas and gas hydrates across the western Black Sea, *Geo-Mar. Lett.* 27, 2-4, 173-183.
- Prol-Ledesma, R. M., Torres-Vera, M. A., Rodolfo-Metalpa, R., Angeles, C., Deveze, C. H. L., Villanueva-Estrada, R. E., ... & Robinson, C. 2013. High heat flow and ocean acidification at a nascent rift in the northern Gulf of California. *Nature communications*, (4), 1388.
- Prol-Ledesma, R. M., Arango-Galvan, C., Torres-Vera, M. A. 2016. Rigorous Analysis of Available Data from Cerro Prieto and Las Tres Virgenes Geothermal Fields with Calculations for Expanded Electricity Generation, *Natural Resources Research* vol. 25, No. 4.
- Purves, S., 2014. Phase and the Hilbert transform. *Lead. Edge* 33, 1164-1166.
- Reyes-Ortega, V., 2016. Interpretation of marine electromagnetic data of the Wagner basin. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California, México. 82 p.
- Sánchez-García, A. C. 2013. Rasgos estructurales en el suroeste del delta del Río Colorado: Interpretación de perfiles de sísmica de reflexión. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California. México. 46-58 p.
- Sánchez-Zamora, O., Doguin, P., Couch, R. W., & Ness, G. E. 1991. Magnetic anomalies of the northern Gulf of California: Structural and thermal interpretations. *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*, 47: 377-401.
- Santilano, A., Manzella, A., Gianelli, G., Donato, A., Gola, G., Nardini, I., Trumpy, E., Botteghi, S.: 2015 Convective, intrusive geothermal plays: what about tectonics?, *Geothermal Energy Science* 3, 51-59.
- Santoyo, E. & Barragán, Rosa. 2010. Energía geotérmica. *Ciencia*. 61. 40-51.
- Seiler, Christian & Fletcher, John & Quigley, Mark & Gleadow, Andrew & Kohn, Barry. 2010. Neogene structural evolution of the Sierra San Felipe, Baja California: Evidence for proto-gulf transtension in the Gulf Extensional Province?. *Tectonophysics*. 488. 87-109. 10.1016/j.tecto.2009.09.026.
- Schmitt, Axel & Martín-Barajas, Arturo & Weber, Bodo & Stockli, Daniel & Zou, Haibo & Shen, Chuan-Chou. 2013. Oceanic magmatism in sedimentary basins of the northern Gulf of California rift. *Geological Society of America Bulletin*. 125.
- Sheriff R.E. y Gerald, L.P. 1995. *Exploration Seismology*. Cambridge University Press. (2nd. ed.) New York. 592 p.

- Sheriff, R. E., and Geldart, L. P. 1995. Exploration seismology. Cambridge university press.
- Sheriff, R.E. 1975. Factors affecting seismic amplitudes. Geophysical prospecting, 23: 125-138.
- Sheriff, R.E. 1976. Inferring stratigraphy from seismic data. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 60(4): 528-542.
- Shipley, T.H., Houston, M.K., Buffler, R.T., Shaub, F.J., McMillen, K.J., Ladd, J.W., Worzel, J.L., 1979. Seismic reflection evidence for the widespread occurrence of possible gas-hydrate horizons on continental slopes and rises. AAPG Bull. 63, 2204-2213.
- Stock, J. M. y Hodges, K. V. 1989. Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific Plate. Tectonics, 8(1): 99-115.
- Sutrisno, Lukman & Bonte, Damien & Daud, Yunus & Smit, Jeroen & Beekman, Fred & Diederik, Jan & Van Wees, J. & Purwanto, Widodo. 2019. Assessing the role of pull-apart basins for high-temperature geothermal resources in transcurrent tectonic setting: Sumatra and California compared. Conference: European Geothermal Conference, At The Hague.
- Taner, M.T., Sheriff, R.E., 1977. Application of amplitude, frequency and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon determination. Am. Assoc. Pet. Geol. Mem. 26, 301.
- Torres, M.E., Bohrmann, G., Dubé, T.E., Poole, F.G., 2003. Formation of modern and Paleozoic stratiform barite at cold methane seeps on continental margins. Geology 31, 897-900.
- Teixidó-iUlldod, Ma. T. 2000. Caracterización del subsuelo mediante sísmica de reflexión de alta resolución (Tesis Doctoral). Departamento de Geodinámica y Geofísica, Universidad de Barcelona, España. 253 p.
- Upadhyay, S.K. 2004. Seismic Reflection Processing. Springer. Berlin.
- Vázquez-Figueroa, Viridiana & Canet, Carles & Prol Ledesma, Rosa Maria & Sanchez, Alberto & Dando, Paul & Camprubí, Antoni & Robinson, Carlos & Hiriart, Gerardo. (2009). Bathymetry and hydrographic characteristics (May 2007) in the Consag and Wagner Basins, Northern Gulf of California, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 61. 119-127.
- Wood, W.T., Ruppel, C., 2000. Seismic and thermal investigations of the Blake Ridge gas hydrate area; a synthesis. In: Paul, C.K., et al, (Eds.), Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 164, pp. 253-264.
- Yang, F.I., Wu J.X., y Dong, I.G. 2008. Seismic forward modeling and its response of dolomite pelecokarst reservoir in Tazhong Area of China. Journal of Tongji University (Natural Science), 12: 1724-1729.
- Yao, Y., Sa, L.M., and Wang, S.X. 2005. Research on the Seismic wave field of karst cavern reservoirs near deep carbonate weathered crusts. Applied Geophysics, 2:94-102.
- Yilmaz, Ö. 2001. Seismic data analysis Tulsa: Society of Exploration Geophysicists. Vol. 1, pp. 74170-2740).

- Yilmaz, O., 1987. Seismic Data Processing. Investigations in Geophysics. Society of Exploration Geophysicists. (2nd. ed.). Tulsa, Oklahoma, 526 pp.
- Yilmaz, Ö., 2001, Seismic Data Analysis. Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data, Tulsa, Oklahoma Society of Exploration Geophysicists. 2027 pp.
- Yoo, Dong-Geun & Kang, Nyeon & Yi, Boyeon & Kim, Gil & Ryu, Byong-Jae & Lee, Keumsuk & Lee, Gwang & Riedel, Mark. 2013. Occurrence and seismic characteristics of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea. *Marine and Petroleum Geology*. 47. 236-247. 10.1016/j.marpetgeo.2013.07.001.
- Wallmann, K., Linke, P., Suess, E., Bohrmann, G., Sahling, H., Schlüter, M., Dählmann, A., Lammers, S., Greinert, J., von Mirbach, N., 1997. Quantifying fluid flow, solute mixing, and biogeochemical turnover at cold vents of the eastern Aleutian subduction zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 5209-5219.
- Zhao, Q., Qu, S.L., Xue, S.G., and Zhang, M. 2010. Study on the seismic response characteristics on the physical model of carbonate cave. *Geophysical Prospecting for Petroleum* 4: 351–358, 400.