



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**“Análisis estructural y sistema petrolero de las cuencas
de Antearco, Trujillo Sur y Salaverry norte, centro de
Perú”**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo

AUTOR

Edward Humberto CUIPA VICENCIO

ASESOR

Javier Pablo JACAY HUARACHE

Lima, Perú

2018

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO**

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, el día lunes 16 de julio del año 2018, siendo las 17:00 horas, en presencia de los señores docentes designados como miembros del Jurado Calificador:

| | |
|------------------------------------|------------------------|
| Ing. ROSA JULIA MEDINA SANDOVAL | (Presidenta de Jurado) |
| Ing. EDWIN MENDIOLAZA BAZALDUA | (Miembro de Jurado) |
| Ing. JUAN MANUEL ELESCANO YUPANQUI | (Miembro de Jurado) |

Reunidos para el acto académico público de colación de la Tesis del Bach. **EDWARD HUMBERTO CUIPA VICENCIO**, quien sustentará la Tesis titulada: «**ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ**», para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Geólogo.

Los miembros del Jurado, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas:

A SATISFACCIÓN DEL JURADO

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

APROBADO POR UNANIMIDAD CON NOTA (16) DIECISEIS

Habiendo sido aprobada la Sustentación de Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO** al Bach. **EDWARD HUMBERTO CUIPA VICENCIO**.

Siendo las 18:00 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose dos (02) Actas Originales de la Sustentación de la Tesis.

Ciudad Universitaria, 16 de julio del 2018

ING. ROSA JULIA MEDINA SANDOVAL
PRESIDENTA DE JURADO

ING. EDWIN MENDIOLAZA BAZALDUA
MIEMBRO DE JURADO

ING. JUAN MANUEL ELESCANO YUPANQUI
MIEMBRO DE JURADO

ING. JAVIER PABLO JACAY HUARACHE
ASESOR

AGRADECIMIENTOS

Primero, me gustaría agradecer sinceramente al Dr. Patrice Baby, investigador encargado de los proyectos de investigación del IRD (Institut de Recherche pour le Développement) dentro del marco convenio IRD-PERUPETRO, por su confianza, amistad y conocimientos para el desarrollo del presente trabajo.

A los del Grupos Funcionales de Banco de Datos y Exploración que pertenecen a la Gerencia de Exploración de PERUPETRO representada por el Ing. Asaid Bandach, por su colaboración en el progreso de esta investigación, así como a la MsC. Ysabel Calderón, próxima a obtener su doctorado, por su invaluable apoyo con sus conocimientos y amistad.

Mis agradecimientos también a mi asesor en la UNMSM el Ing. Javier Jacay por brindarme sus observaciones y apoyo incondicional en este trabajo del mismo modo a los colegas y amigos, Christian Hurtado y Leonardo Ramírez por guiarme con sus ideas y talento a que este proyecto se llegue a concretar.

Finalmente agradezco a mi padre, madre, hermano y hermana por apoyarme siempre en la realización de mis metas.



RESUMEN

El presente es un estudio integrado del análisis estructural y sistema petrolero de las cuencas de antearco, Trujillo sur y Salaverry norte, estas cuencas se encuentran en constante evolución geológica debido a la convergencia que hay entre la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Los datos sísmicos son abundantes en la zona de offshore lo cual da rápidamente una imagen de la complejidad estructural caracterizada por una sucesión de periodos de subsidencias y levantamientos relacionados a la convergencia oblicua que varía su orientación de esfuerzos a lo largo de su historia.

Nuestro trabajo consiste en realizar el análisis estructural a través de un conjunto de secciones sísmicas transversales y longitudinales a la costa, para presentar en un primer lugar las 6 secciones estructurales más representativas que permiten ilustrar la deformación del relleno sedimentario y la evolución tectono-sedimentaria. Se demuestra la existencia de fallas paralelas a subparalelas y perpendiculares a la línea de la costa, inversión tectónica reactivando hemi-grabens, pliegues generados por fallas inversas profundas, discordancias angulares y superficies de erosión en el Cenozoico.

Para el desarrollo de este trabajo, también se recurrió al análisis del sistema petrolero con datos geoquímicos con el objetivo de determinar el potencial hidrocarburífero a través de la modelización geoquímica 1D en pozos hipotéticos localizados en potenciales estructuras que presentan todos los elementos necesarios del sistema petrolero. Finalmente, la información recopilada a través de la interpretación sísmica y la evaluación del sistema petrolero en el área de estudio permitió determinar 5 posibles leads de exploración (2 en el Cuenca Trujillo y 3 en la Cuenca Salaverry).

INDICE

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

| | |
|--|----|
| 1.1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1.1. Ubicación..... | 1 |
| 1.1.2. Accesibilidad..... | 4 |
| 1.2. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA..... | 4 |
| 1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 4 |
| 1.3.1. Problema General..... | 4 |
| 1.3.2. Problema Específico..... | 4 |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA..... | 5 |
| 1.5. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA..... | 5 |
| 1.6. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN..... | 5 |
| 1.6.1. Objetivo General..... | 5 |
| 1.6.2. Objetivos Específicos..... | 5 |
| 1.7. HIPÓTESIS Y VARIABLES..... | 7 |
| 1.7.1. Hipótesis General..... | 7 |
| 1.7.2. Hipótesis Específica..... | 7 |
| 1.7.3. Identificación de Variables..... | 7 |
| 1.7.3.1 Variable Independiente..... | 7 |
| 1.7.3.2 Variable Dependiente..... | 7 |
| 1.7.4. Operacionalización de Variables..... | 7 |
| 1.7.4.1 Variable Independiente..... | 7 |
| 1.7.4.2 Variable Dependiente..... | 8 |
| 1.8. METODOLOGIA..... | 8 |
| 1.8.1. Adquisición de datos de superficie, subsuelo y pozos..... | 8 |
| 1.8.2. Conversión de sísmica de tiempo a profundidad..... | 8 |
| 1.8.3. Construcción e interpretación de secciones sísmicas y datos de pozos..... | 9 |
| 1.8.4. Interpretación de cubos sísmicos..... | 10 |
| 1.8.5. Elaboración del Diagrama Litoestratigráfico..... | 13 |
| 1.8.6. Modelado de Sistema Petrolero..... | 13 |

CAPITULO II: MARCO TEORICO: GENERALIDADES Y CONTEXTO GEODINAMICO

| | |
|--|----|
| 2.1. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN..... | 15 |
| 2.2. GENERALIDADES..... | 16 |
| 2.2.1. Relaciones Tectónica-Sedimentación en Márgenes Continentales..... | 17 |
| 2.3. CUENCAS SEDIMENTARIAS DEL ANTEARCO DEL PERÚ CENTRAL..... | 21 |
| 2.4. UNIDADES MORFOESTRUCTURALES..... | 24 |
| 2.4.1. Zona de Subducción..... | 24 |
| 2.4.2. Talud continental..... | 24 |
| 2.4.3. Plataforma Continental..... | 24 |
| 2.4.4. Cordillera de la Costa..... | 27 |
| 2.4.5. Franja Costera..... | 27 |
| 2.5. CONTEXTO GEODINAMICO DE LAS CUENCAS ANTEARCO..... | 30 |

CAPÍTULO III. MARCO GEOLOGICO DE LAS CUENCAS TRUJILLO Y SALAVERRY

| | |
|---------------------------------------|----|
| 3.1 ESTRATIGRAFIA REGIONAL..... | 34 |
| 3.1.1 Precámbrico – Paleozoico..... | 34 |
| 3.1.2 Mesozoico..... | 35 |
| 3.1.2.1 Jurásico..... | 35 |
| 3.1.2.2 Cretácico..... | 36 |
| 3.1.3 Cenozoico..... | 38 |
| 3.1.3.1 Paleoceno..... | 38 |
| 3.1.3.2 Eoceno..... | 38 |
| 3.1.3.3 Mioceno..... | 39 |
| 3.1.3.4 Plioceno..... | 39 |
| 3.1.3.5 Depósitos Cuaternarios..... | 40 |
| 3.1.4 Rocas Intrusivas..... | 47 |
| 3.2. DIAGRAMA LITOESTRATIGRÁFICO..... | 49 |

CAPÍTULO IV. RELACIONES TECTONO-SEDIMENTARIAS ENTRE LAS CUENCAS TRUJILLO Y SALAVERRY

| | |
|---|----|
| 4.1 GENERALIDADES..... | 50 |
| 4.2 EVOLUCIÓN TECTONO-SEDIMENTARIA..... | 50 |

CAPÍTULO V. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LAS CUENCAS TRUJILLO Y SALAVERRY

| | |
|---|-----|
| 5.1. GENERALIDADES..... | 60 |
| 5.1.1. Sistema de fallas extensionales..... | 60 |
| 5.1.2. Sistemas de fallas compresivas..... | 62 |
| 5.1.3. Sistemas de fallas de rumbo..... | 64 |
| 5.2. CONVERSIÓN DE SÍSMICA DE TIEMPO A PROFUNDIDAD A PARTIR DE LAS VELOCIDADES RMS..... | 69 |
| 5.3. CONSTRUCCIÓN DE LA SECCIÓN ESTRUCTURAL..... | 71 |
| 5.4. INTERPRETACIÓN DE SECCIONES ESTRUCTURALES..... | 73 |
| 5.4.1 Sección estructural 1..... | 73 |
| 5.4.2 Sección estructural 2..... | 76 |
| 5.4.3 Sección estructural 3..... | 78 |
| 5.4.4 Sección estructural 4..... | 81 |
| 5.4.5 Sección estructural 5..... | 83 |
| 5.4.6 Sección estructural 6..... | 85 |
| 5.5. INTERPRETACIÓN DE CUBOS SISMISCOS..... | 89 |
| 5.5.1 Cubo Sísmico Chanchan..... | 91 |
| 5.5.2 Cubo Sísmico Área 1..... | 102 |
| 5.5.3 Cubo Sísmico San Jorge..... | 109 |
| 5.5.4 Cubo Sísmico Moche..... | 114 |
| 5.6 MAPA ESTRUCTURAL..... | 115 |
| 5.7 MODELO ESTRUCTURAL PROPUESTO..... | 118 |

CAPÍTULO VI. SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS TRUJILLO Y SALAVERRY

| | |
|---|-----|
| 6.1. GENERALIDADES..... | 121 |
| 6.1.1. El Sistema Petrolero..... | 121 |
| 6.1.2. Evaluación del potencial Roca Madre..... | 123 |
| 6.2. SISTEMA PETROLERO DE LA CUENCA TRUJILLO..... | 125 |
| 6.2.1 Análisis de secuencias con potencial de roca madre..... | 125 |
| 6.2.1.1 Roca madre del Cretácico..... | 126 |
| 6.2.1.2 Roca madre del Eoceno superior..... | 126 |
| 6.2.1.3 Roca madre del Mioceno inferior..... | 126 |
| 6.2.1.4 Roca madre del Mioceno Medio..... | 126 |
| 6.2.2 Análisis de las secuencias con potencial de roca reservorio..... | 127 |
| 6.2.2.1. Roca reservorio Eoceno inferior..... | 127 |
| 6.2.2.2. Roca reservorio Eoceno medio..... | 127 |
| 6.2.3 Análisis de las secuencias con potencial de roca sello..... | 127 |
| 6.2.4 Análisis de trampas para la acumulación de hidrocarburos..... | 128 |
| 6.2.5 Modelamiento geoquímico 1D de los pozos Delfín 1X y Morsa 1X..... | 130 |
| 6.2.5.1 Pozo Delfín 1X..... | 130 |
| 6.2.5.2 Pozo Morsa 1X..... | 133 |
| 6.3 SISTEMA PETROLERO DE LA CUENCA SALAVERRY..... | 137 |
| 6.3.1 Análisis de secuencias con potencial de roca madre..... | 137 |
| 6.3.1.1 Roca madre del Jurásico Superior..... | 137 |
| 6.3.1.2 Roca madre del Cretácico..... | 137 |
| 6.3.1.3 Roca madre del Mioceno inferior..... | 138 |
| 6.3.1.4 Roca madre del Mioceno medio..... | 138 |
| 6.3.2 Análisis de las secuencias con potencial de roca reservorio..... | 138 |
| 6.3.2.1 Roca reservorio Eoceno superior..... | 138 |
| 6.3.2.2 Roca reservorio Mioceno inferior..... | 139 |
| 6.3.2.3 Roca reservorio del Mioceno superior..... | 141 |
| 6.3.3 Análisis de las secuencias con potencial de roca sello..... | 141 |
| 6.3.4 Análisis de trampas para la acumulación de hidrocarburos..... | 141 |
| 6.3.5 Modelamiento geoquímico 1D del pozo Ballena 1X..... | 142 |
| 6.4. MODELAMIENTO GEOQUIMICO 1D DE LOS POZOS HIPOTETICOS..... | 145 |
| 6.4.1 Modelado 1D del pozo hipotético 1..... | 146 |
| 6.4.2 Modelado 1D del pozo hipotético 2..... | 150 |
| 6.4.3 Modelado 1D del pozo hipotético 3..... | 154 |
| 6.4.4 Modelado 1D del pozo hipotético 4..... | 158 |
| 6.5. PROPUESTA DE NUEVOS LEADS DE EXPLORACION..... | 161 |
| 6.5.1. Lead exploratorio 1..... | 163 |
| 6.5.2. Lead exploratorio 2..... | 164 |
| 6.5.3. Lead exploratorio 3..... | 165 |
| 6.5.4. Lead exploratorio 4..... | 166 |
| 6.5.5. Lead exploratorio 5..... | 167 |

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA

LISTA DE FIGURAS, FOTOS Y TABLAS

CAPÍTULO I.

Figura I-1. Mapa de las cuencas sedimentarias de Perú, y ubicación de la zona de estudio. Fuente: propia.

Figura I-2. Vía de acceso por carretera. Fuente: propia.

Figura I-3. Vía de acceso por vía aérea. Fuente: propia.

Figura I-4. Ubicación de las secciones estructurales. Fuente: propia.

Figura I-5. Ubicación de secciones sísmicas interpretadas de diferentes campañas y pozos presentes utilizados en el área de estudio. Fuente: propia.

Figura I-6. Sección sísmica 2D con el atributo "Instantaneous Phase" en el software Kingdom. Fuente: propia.

Figura I-7. Ubicación de los cubos sísmicos analizados de la zona de estudio. Fuente: propia.

Figura I-8. Atributo sísmico inline dip en el software ASSPI de la Universidad de Oklahoma. Fuente: propia.

Figura I-9. Time slice 0.712 del cubo sísmico Moche con el atributo Inline dip de la Universidad de Oklahoma en el software Kingdom. Fuente: propia.

Figura I-10. Mapa de afloramientos de hidrocarburos. Fuente: propia.

CAPÍTULO II.

Figura II-1. Esquema de la distribución de las placas en la actualidad (Lowman P. et. al, 1999).

Figura II-2. Ciclo de Wilson (modificado de Kearey P. et. al. 2009)

Figura II-3. Características de un Margen Continental Pasivo (modificado de Witt, C., 2011)

Figura II-4. Características de un Margen Continental Activo (modificado de Witt, C., 2011)

Figura II-5. Mapa con las cuencas sedimentarias del Antearco del Perú central. Fuente: propia.

Figura II-6. Mapa de la base del Terciario con los altos OSH y USR en la zona de offshore. Fuente: propia.

Figura II-7. Secciones que muestran la variación de la plataforma continental y el talud a lo largo del margen continental de Perú. Fuente: propia.

Figura II-8. Mapa del fondo marino presentando la plataforma continental y talud de la zona de estudio. Fuente: propia.

Figura II-9. Unidades morfoestructurales de los Andes del Perú. Fuente: propia.

Figura II-10. Block diagrama del margen continental de los Andes del Perú central que muestra los elementos morfoestructurales, que se extiende desde la placa oceánica hasta el subandino. (Modificado de Llerena C.2014).

Figura II-11. Tres diferentes estadios de la subducción durante el Mesozoico - Cenozoico, relacionado a la velocidad de Roll-back y a los procesos generados (modificado de Ramos 2009).

Figura II-12. Dirección de convergencia entre las placas de Farallón (FA) y América del Sur para algunas de las etapas e intervalos del Cenozoico discutidos por Somoza & Ghidella 2005.

CAPÍTULO III.

Figura III-1. a) Vista de la Isla Hormigas de Afuera (Romero D. 2013). b) Foto de muestra del pozo Ballena 1X donde se observa una roca gneis con metamorfismo bandeado con textura ocular (CoreLab 2012)

Figura III-2. Ubicación de la zona de estudio y la Isla las Hormigas de Afuera. Fuente: propia.

Figura III-3. Mapa con la geología de de la costa en la zona de estudio, basado en los trabajos de INGEMMET, cuadrángulos de Puemape (16-d), Chocope (16-e), Otuzco (16-f), Trujillo (17-e),

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Salaverry (17-f), Santiago de Chuco (17-g), Santa (18-f), Santa Rosa (18-g), Chimbote (19-f) y Casma (19-g). Fuente: propia.

Figura III-4. Columna estratigráfica del pozo Ballena con sus registros eléctricos (modificado de SK Energy, 2009) con dataciones de 1) Valdespino (1976), 2) Chanchaya (1992), 3) Okada (1990), 4) Scharader & Cruzado (1990) y 5) LCV (2009). Fuente: propia.

Figura III-5. Columna estratigráfica del pozo Delfín con sus registros eléctricos (modificado de SK Energy, 2009) con dataciones de 1) Scharader & Cruzado (1990), 2) Okada (1990) y 3) Cancha (1992). Fuente: propia.

Figura III-6. Columna estratigráfica del pozo Morsa con sus registros eléctricos (modificado de SK Energy, 2009) con dataciones de 1) Repsol (2000) y 2) LCV (2009). Fuente: propia.

Figura III-7. Columna estratigráfica del pozo Lobos con sus registros eléctricos (modificado de SK Energy, 2009) con dataciones de Repsol (2000). Fuente: propia.

Figura III-8. Correlación estratigráfica entre los pozos Lobos, Morsa, Delfín y Ballena, con referencia del nivel del mar y con evidencias de hidrocarburos. Fuente: propia.

Figura III-9. Columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio, en base de trabajos de Jaimes F. et al. (2011), Jacay et al. (2004), Cobbing (1981), Cossio (1967), Repsol (1999) y Parsep (2001). Fuente: propia.

Figura III-10. Diagrama litoestratigráfico, tasa y dirección de convergencia de las placas en el área de estudio, basado en los trabajos de Soler & Bonhomme (1990), Jaillard & Soler (1996) y Somoza & Ghidella, (2005). Fuente: propia.

Fotos

Foto 1) Afloramiento de las secuencias de la Fm. Chicama en la localidad de Simbal. Fuente: propia.

Foto 2. Afloramiento del Grupo Casma en el puerto Morín. Fuente: propia.

Foto 3. Afloramiento del Grupo Casma en la isla Guañape. Fuente: propia.

Foto 4. Afloramiento del Grupo Calipuy en la localidad de Paranday. Fuente: propia.

CAPÍTULO IV.

Figura IV-1. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Jurásico medio a superior, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). Fuente: propia.

Figura IV-2. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Hauteriviano - Barremiano, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). Fuente: propia.

Figura IV-3. Block diagrama del ángulo de subducción del Albiano al Cretácico superior (113-68 Ma) Somoza et al. (2005), con la partición de esfuerzos. Fuente: propia.

Figura IV-4. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Albiano-Cenomaniano, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). Fuente: propia

Figura IV-5. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Cretácico superior, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). Fuente: propia.

Figura IV-6. Block diagrama del ángulo de subducción del Cretácico superior al Paleoceno (68 - 56 Ma) Somoza et al. (2005) con la partición de esfuerzos. Fuente: propia.

Figura IV-7. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Paleoceno, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Figura IV-8. Block diagrama del ángulo de subducción del Eoceno medio al Oligoceno (47 - 26 Ma) Somoza et. al. (2005), con la partición de esfuerzos. Fuente: propia.

Figura IV-9. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Eoceno, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). Fuente: propia.

Figura IV-10. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Oligoceno, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). Fuente: propia.

Figura IV-11. Block diagrama del ángulo de subducción del Oligoceno al Cuaternario (26 - 0 Ma) Somoza et al. (2005), con la partición de esfuerzos Fuente: propia.

Figura IV-12. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Mioceno inferior-medio, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). Fuente: propia.

Figura IV-13. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Mioceno superior, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). Fuente: propia.

Figura IV-14. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Plioceno - Cuaternario, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). Fuente: propia.

CAPÍTULO V.

Figura V-1 Usando como referencia la superficie de la tierra, las fallas extensionales (b) son un espectro de fallas normales entre vertical (a) y horizontal (c). Las fallas verticales y horizontales no son ni extensiones ni contraccionales (modificado de Fossen H. 2010)

Figura V-2. Falla lítrica con desarrollo de anticlinal de colapso, (1) Espacio geológicamente imposible, (2) Anticlinal de colapso. (L) Longitud de las capas, se conserva constante (Niermeyer H. 1999)

Figura V-3. Falla lítrica con desarrollo de fallas planas antitéticas (1). (2) Espacios que deben rellenarse por ejemplo con brechas de falla. (Niermeyer H. 1999).

Figura V-4. Falla lítrica con desarrollo de fallamiento en dominó sintético en el bloque colgante. (1) estratos con manteo constante. (2) Fallas planas. (3) Espacios que deben rellenarse.

Figura V-5. Modelo de una falla inversa

Figura V-6 Ejemplo de modelo de inversión tectónica en una falla normal.

Figura V-7. Falla de rumbo con cizalla pura (modificado de Fossen H. 2010)

Figura V-8. Estructuras asociadas a transcurrancia. (a) Experimento de Riedel con una capa de arcilla húmeda (1) sobre dos bloques rígidos (2) que se deslizan paralelamente. (b) Pliegues. (c) Fallas R y R'. (d) Fracturas de extensión. (e) Fallas P. Las flechas negras indican la dirección de acortamiento máximo, en tanto que las flechas blancas señalan la dirección de extensión máxima, asociadas al elipsoide de esfuerzo (Niermeyer H. 1999).

Figura V-9. Formación de la estructura tipo flor positiva durante una transpresión dextral.

Figura V-10. Formación de la estructura tipo flor negativa durante una transtensión dextral.

Figura V-11. Ilustración de la falla de Rumbo (cizalla simple), Transpresión y transtensión (modificado de Fossen H. 2010)

Figura V-12. Muestra de la sección sísmica 93-45 en papel con los datos de velocidad RMS en la parte superior. Fuente: propia.

Figura V-13. Valores de la sección sísmica en papel llevados a una tabla excel del cual se genera una gráfica Tiempo - Profundidad. Fuente: propia.

Figura V-14. Conversión a profundidad del software Move. Fuente: propia.

Figura V-15. Calibración de la sección sísmica 93-45 con los pozos Delfín y Ballena en el software Move. Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

- Figura V-16. Ubicación de las secciones estructurales. Fuente: propia.
- Figura V-17. Anticlinal formado por la reactivación de una falla normal. Fuente: propia.
- Figura V-18. Interpretación de la sección Sísmica 93-45 - Trujillo (Hasta la Cordillera Occidental)
- Figura V-19. Grabens y hemigrabens formado por fallas normales. Fuente: propia.
- Figura V-20. Interpretación de la sección Sísmica 93-43 - Trujillo (Hasta la Cordillera Occidental). Fuente: propia.
- Figura V-21. Secuencias del Cenozoico cortado por la falla normal maestra. Fuente: propia.
- Figura V-22. Interpretación de la sección Sísmica 93-40 - Trujillo (Hasta la Cordillera Occidental). Fuente: propia.
- Figura V-23. Falla normal maestra invertida, formando un anticlinal. Fuente: propia.
- Figura V-24. Interpretación de la sección Sísmica 93-38. Fuente: propia.
- Figura V-25. Sistema de fallas normales que forman horsts y grabenes. Fuente: propia.
- Figura V-26. Interpretación de la sección sísmica 96-04. Fuente: propia.
- Figura V-27. Fallas normales que cortan las unidades del Cenozoico. Fuente: propia.
- Figura V-28. Interpretación de la sección sísmica 96-12. Fuente: propia.
- Figura V-29. Vista 3D de las secciones 93-90, 93-44, 96-12 y SD1700 en la cuenca Trujillo. Fuente: propia.
- Figura V-30. Vista 3D de las secciones 93-38, 93-40, 93-45 y SD1700 en la cuenca Trujillo. Fuente: propia.
- Figura V-31. Ubicación de los cubos sísmicos interpretados. Fuente: propia.
- Figura V-32. Inline 405 del cubo sísmico Chanchan mostrando los horizontes interpretados. Fuente: propia.
- Figura V-33. Crossline 791 del cubo sísmico Chanchan mostrando los horizontes interpretados. Fuente: propia.
- Figura V-34. Mapa en amplitud con interpretación del horizonte de la base del Terciario en vista 3D (Cubo Chanchan). Fuente: propia.
- Figura V-35. Diferente presentación para el time slice del flattening del horizonte de la base del Terciario a través del Cubo Sísmico Chanchan. a) Vista en Amplitud b) Vista del atributo inline dip. Fuente: propia.
- Figura V-36. Mapa del time slice con el atributo inline dip del flattening de la base del Terciario sin interpretar e interpretado. Fuente: propia.
- Figura V-37. Mapa en amplitud con interpretación del horizonte Mioceno superior en vista 3D (Cubo Chanchan). Fuente: propia.
- Figura V-38. Diferente presentación para el time slice del flattening del horizonte de la base del Mioceno superior a través del Cubo Sísmico Chanchan. a) Vista en Amplitud b) Vista del atributo inline dip. Fuente: propia.
- Figura V-39. Mapa del time slice con el atributo inline dip del flattening de la base del Mioceno superior sin interpretar e interpretado. Fuente: propia.
- Figura V-40. Mapa en amplitud con interpretación del horizonte Plioceno en 3D (Cubo Chanchan). Fuente: propia.
- Figura V-41. Diferente presentación para el time slice del flattening del horizonte de la base del Plioceno a través del Cubo Sísmico Chanchan a) Vista en Amplitud b) Vista del atributo inline dip. Fuente: propia.
- Figura V-42. Mapa del time slice con el atributo inline dip del flattening de la base del Plioceno sin interpretar e interpretado. Fuente: propia.
- Figura V-43. Inline 288 del cubo sísmico Área1 mostrando los horizontes interpretados. Fuente: propia.
- Figura V-44. Crossline 1270 del cubo sísmico Área1 mostrando los horizontes interpretados. Fuente: propia.
- Figura V-45. Mapa en amplitud con interpretación del horizonte base del-Terciario en vista 3D (Cubo Área 1). Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Figura V-46. Diferente presentación para el time slice del flattening del horizonte de la base del Terciario a través del Cubo Sísmico Área 1 a) Vista en Amplitud b) Vista del atributo inline dip. Fuente: propia.

Figura V-47 Mapa del time slice con el atributo inline dip del flattening de la base del Terciario sin interpretar e interpretado. Fuente: propia.

Figura V-48. Mapa en amplitud con interpretación del horizonte Plioceno en vista 3D (Cubo Área 1). Fuente: propia.

Figura V-49. Diferente presentación para el time slice del flattening del horizonte de la base del Plioceno a través del Cubo Sísmico Área 1 a) Vista en Amplitud b) Vista del atributo inline dip. Fuente: propia.

Figura V-50. Mapa del time slice con el atributo inline dip del flattening de la base del Plioceno sin interpretar e interpretado. Fuente: propia.

Figura V-51. Crossline 507 del cubo sísmico San Jorge mostrando los horizontes interpretados. Fuente: propia.

Figura V-52. Inline 1647 del cubo sísmico San Jorge mostrando los horizontes interpretados. Fuente: propia.

Figura V-53. Mapa en amplitud con interpretación de la base del terciario en vista 3D (Cubo San Jorge). Fuente: propia.

Figura V-54. Diferente presentación para el time slice del flattening del horizonte de la base del Terciario a través del Cubo Sísmico San Jorge a) Vista en Amplitud b) Vista del atributo inline dip. Fuente: propia.

Figura V-55. Mapa del time slice con el atributo inline dip del flattening de la base del Terciario sin interpretar e interpretado. Fuente: propia.

Figura V-56. Inline 2328 del cubo sísmico Moche mostrando los horizontes interpretados. Fuente: propia.

Figura V-57. Inline 4478 del cubo sísmico Moche mostrando la discordancia erosiva de las bases del Eoceno medio y superior. Fuente: propia.

Figura V-58. Líneas sísmicas interpretadas en el software Move. Fuente: propia.

Figura V-59. Mapa estructural de la zona de estudio. Las fallas han sido cartografiadas con la sísmica 2D y 3D interpretadas más arriba. Fuente: propia.

Figura V-60. Modelo de deformación para el vector de convergencia ~W-E. Fuente: propia.

Figura V-61. Imagen esquemática del anticlinal formado por los esfuerzos compresivos del Mioceno-Plioceno para la parte offshore de la zona de estudio. Fuente: propia.

CAPÍTULO VI.

Figura VI-1. Cuadro de los elementos y procesos del sistema petrolero.

Figura VI-2. Grafico del conjunto de elementos y procesos esenciales en generación y acumulación de hidrocarburos.

Figura VI-3. Niveles de Madurez Termal de la materia orgánica para generar hidrocarburos (Peters et al., 1994)

Figura VI-4. Potencial Petrolero de la materia orgánica (Peters et al., 1994)

Figura VI-5. Características de los hidrocarburos Expulsados en función del tipo de kerógeno (Peters et al., 1994)

Figura VI-6: A) trampa estratigráfica asociada a discordancia angular B) trampa estratigráfica asociada a discordancia erosiva C) Trampa estructural, anticlinal formado por la inversión tectónica y D) trampa estructural por bloques fallados. Fuente: propia.

Figura VI-7. Columna estratigráfica mostrando el sistema petrolero de la cuenca Trujillo, basado en los trabajos de, Repsol (1999) y Parsep (2001). Fuente: propia.

Figura VI-8. Características geoquímicas del pozo Delfín con valores de TOC (%wt), T_{máx} (°C) y Vitrinita (modificado de Repsol-YPF 2000).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

- Figura VI-9. Ploteo de valores de temperatura corregida para el pozo Delfín 1X. Fuente: propia.
- Figura VI-10. Calibración de la curva Ro del Pozo Delfín. Fuente: propia.
- Figura VI-11. Modelización de soterramiento en el pozo Delfín 1X se muestra que se encuentra en estado inmaduro. Fuente: propia.
- Figura VI-12. Características geoquímicas del pozo Delfín con valores de TOC (%wt), T_{máx} (°C) y Vitrinita (modificado de Repsol-YPF 2000).
- Figura VI-13. Ploteo de valores de temperatura corregida para el pozo Morsa 1X. Fuente: propia.
- Figura VI-14. Calibración de la curva Ro del Pozo Morsa 1X. Fuente: propia.
- Figura VI-15. Modelización de soterramiento del pozo Morsa 1X se muestra que se encuentra en estado inmaduro. Fuente: propia.
- Figura VI-16. Pozo Ballena, a) Microfotografía de sección delgada (929.85 m, dd/x10) de núcleo que muestra una cuarcita de grano medio, mal ordenada, con un potencial de reservorio moderado. b) Foto de núcleo (930 m) mostrando la transición calcárea de arenisca a limonita, estructura muy apretada, debido a la cementación (Corelab 2012).
- Figura VI-17. Pozo Ballena, a) Microfotografía de sección delgada (912.85 m, dd/x4) mostrando granos de tamaño medio, moderadamente bien clasificado arenisca sublítica con potencial reservorio moderado b) Foto de núcleo (914.05 m) mostrando en la base las areniscas con estratificación cruzada. Se muestra también las láminas delgadas de arcillas, ricas en contenido vegetal (Corelab. 2012).
- Figura VI-18. Pozo Ballena, a) Microfotografía de sección delgada (825.3 m, dd/x10) que muestra una arenita lítica de grano medio, mal ordenado, con potencial de reservorio de moderada a baja, degradada por arcillas y cemento de cuarzo. b) Foto de núcleo (824.90-40 m) que muestra una secuencia de areniscas con estratificación cruzada (conglomerado arenoso/brechas en la base) (Corelab. 2012).
- Figura VI-19. Pozo Ballena, a) Microfotografía de sección delgada (710.9 m, dd/x4) que muestra granos de tamaño medio, pobremente clasificado, con una calidad de reservorio de pobre a localmente moderada, degradada significativamente por arcillas autigénicas y crecimiento de cuarzo. b) Foto de núcleo (709.60-80 m) que muestra arenisca guijarrosa. Obsérvese que hay pocos guijarros en la base (probablemente erosionado) y que los rasgos de guijarros sugieren flujos fuertes (Corelab. 2012).
- Figura VI-20. Pozo Ballena, a) Microfotografía de sección delgada (666.05 m, dd/x4) que muestra una arenisca lítica de grano media, mal clasificada, con una calidad de pobre a localmente moderada como roca reservorio, degradada significativamente por dolomita/calcita, arcillas y crecimiento de cuarzo. b) Foto de núcleo (666.20 m) muestra la transición entre arenisca masiva (base) a estratificación cruzada, arenisca/conglomerado arenoso (parte media de la parte superior probablemente una facie de base de canal (turbidita?)) (Corelab 2012).
- Figura VI-21. a) Trampa estructural, anticlinal formado por la tectónica compresiva b) trampa mixta de truncamiento sobre la estructura volcánica, c) trampa estructural por bloques fallados y d) Trampa estructural, anticlinal formado por fallas inversas. Fuente: propia.
- Figura VI-22. Ploteo de valores de temperatura corregida para el pozo Ballena 1X. Fuente: propia.
- Figura VI-23. Modelización de soterramiento y % Ro del pozo Ballena 1X se muestra que se encuentra en estado inmaduro. Fuente: propia.
- Figura VI-24. Columna estratigráfica mostrando el sistema petrolero de la cuenca Salaverry Tomado de Jaimes F. et. al. (2011). Jacay et. al. (2004), Cobbing (1981), Cossio (1967), y Parsep (2001). Fuente: propia.
- Figura VI-25. Ubicación de los 4 pozos hipotéticos en el área de trabajo. Fuente: propia.
- Figura VI-26. Ubicación del pozo hipotético 1 en la sección estructural 93-40. Fuente: propia.
- Figura VI-27. Modelización de soterramiento del pozo Hipotético 1. Fuente: propia.
- Figura VI-28. Modelización burial del Pozo hipotético 1 mostrando la generación de hidrocarburo de la Fm. Muerto, Fm Redondo y en el Mioceno inferior. Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

- Figura VI-29. Modelización del burial del Pozo hipotético 1 mostrando la expulsión de hidrocarburo de la Fm. Muerto, Fm Redondo y en el Mioceno inferior. Fuente: propia.
- Figura VI-30. Ubicación del pozo hipotético 2 en la sección estructural. Fuente: propia.
- Figura VI-31. Modelización de soterramiento del pozo Hipotético 2. Fuente: propia.
- Figura VI-32. Modelización burial del pozo hipotético 2 mostrando la generación de hidrocarburo de la Fm. Muerto, Fm Redondo, Eoceno superior y Mioceno medio. Fuente: propia.
- Figura VI-33. Modelización burial del pozo hipotético 2 mostrando la expulsión de hidrocarburo de la Fm. Muerto, Fm Redondo, Eoceno superior y Mioceno medio. Fuente: propia.
- Figura VI-34. Ubicación del pozo hipotético 3 en la sección estructural. Fuente: propia.
- Figura VI-35. Modelización de soterramiento del pozo hipotético 3. Fuente: propia.
- Figura VI-36. Modelización burial del pozo hipotético 3 mostrando la generación de hidrocarburo de la Fm. Chicama, Fm La Zorra y Mioceno medio. Fuente: propia.
- Figura VI-37. Modelización burial del pozo hipotético 3 mostrando la expulsión de hidrocarburo de la Fm. Chicama, Fm La Zorra y Mioceno medio. Fuente: propia.
- Figura VI-38. Ubicación del pozo hipotético 3 en la sección estructural. Fuente: propia.
- Figura VI-39. Modelización de soterramiento del pozo Hipotético 3. Fuente: propia.
- Figura VI-40. Modelización burial del Pseudo Pozo3 mostrando la generación de hidrocarburo de la Fm. Chicama, Fm Santa-Carhuaz y Mioceno medio. Fuente: propia.
- Figura VI-41. Mapa con los leads exploratorios. Fuente: propia.
- Figura VI-42. Sección sísmica mostrando la trampa estructural en las rocas reservorio reconocida en el lead exploratorio 1. Fuente: propia.
- Figura VI-43. Sección sísmica mostrando la trampa estructural en las rocas reservorio reconocida en el lead exploratorio 2. Fuente: propia.
- Figura VI-44. Secciones sísmicas mostrando las trampas estructurales en las rocas reservorio reconocida en el lead exploratorio 3. Fuente: propia.
- Figura VI-45. Sección sísmica mostrando la trampa estratigráfica en las rocas reservorio reconocida en el lead exploratorio 4. Fuente: propia.
- Figura VI-46. Sección sísmica mostrando la trampa estratigráfica en las rocas reservorio reconocida en el lead exploratorio 5. Fuente: propia.

Tablas

- Tabla 1. Parámetros estratigráficos para el modelamiento del pozo hipotético 1. Fuente: propia.
- Tabla 2. Parámetros estratigráficos para el modelamiento del pozo hipotético 2. Fuente: propia.
- Tabla 3. Parámetros estratigráficos para el modelamiento del pozo hipotético 3. Fuente: propia.
- Tabla 4. Parámetros estratigráficos para el modelamiento del pozo hipotético 4. Fuente: propia.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Con este trabajo se propone determinar el análisis estructural y sistema petrolero de las cuencas de Antearco, Trujillo sur y Salaverry norte, siendo uno de los principales inconvenientes que enfrenta las empresas petrolíferas para la exploración por hidrocarburos. Esta tesis se organiza en dos partes, en la primera nos enfocamos en el análisis estructural a través de la interpretación de pozos exploratorios, líneas sísmicas e información de campo para luego realizar secciones estructurales. En la segunda, exponemos el sistema petrolero a través de modelamientos geoquímicos en Petromod en pozos hipotéticos en zonas con potencial hidrocarburífero para luego proponer leads exploratorios.

1.1.1. Ubicación

La zona de estudio se encuentra en la costa fuera de Perú, ocupando la parte sur de la Cuenca Trujillo y la parte norte de la cuenca Salaverry, estas cuencas se prolongan con una orientación NW-SE y se extienden entre la plataforma continental y el talud (figura I-1). En costa dentro se extiende desde el litoral costero de los departamentos La Libertad y parte norte de Ancash, hasta el límite oeste de la cordillera Occidental.

El área de estudio posee una extensión aproximada de 36765 km², su longitud es aproximadamente 215 km y un ancho de 171 km.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

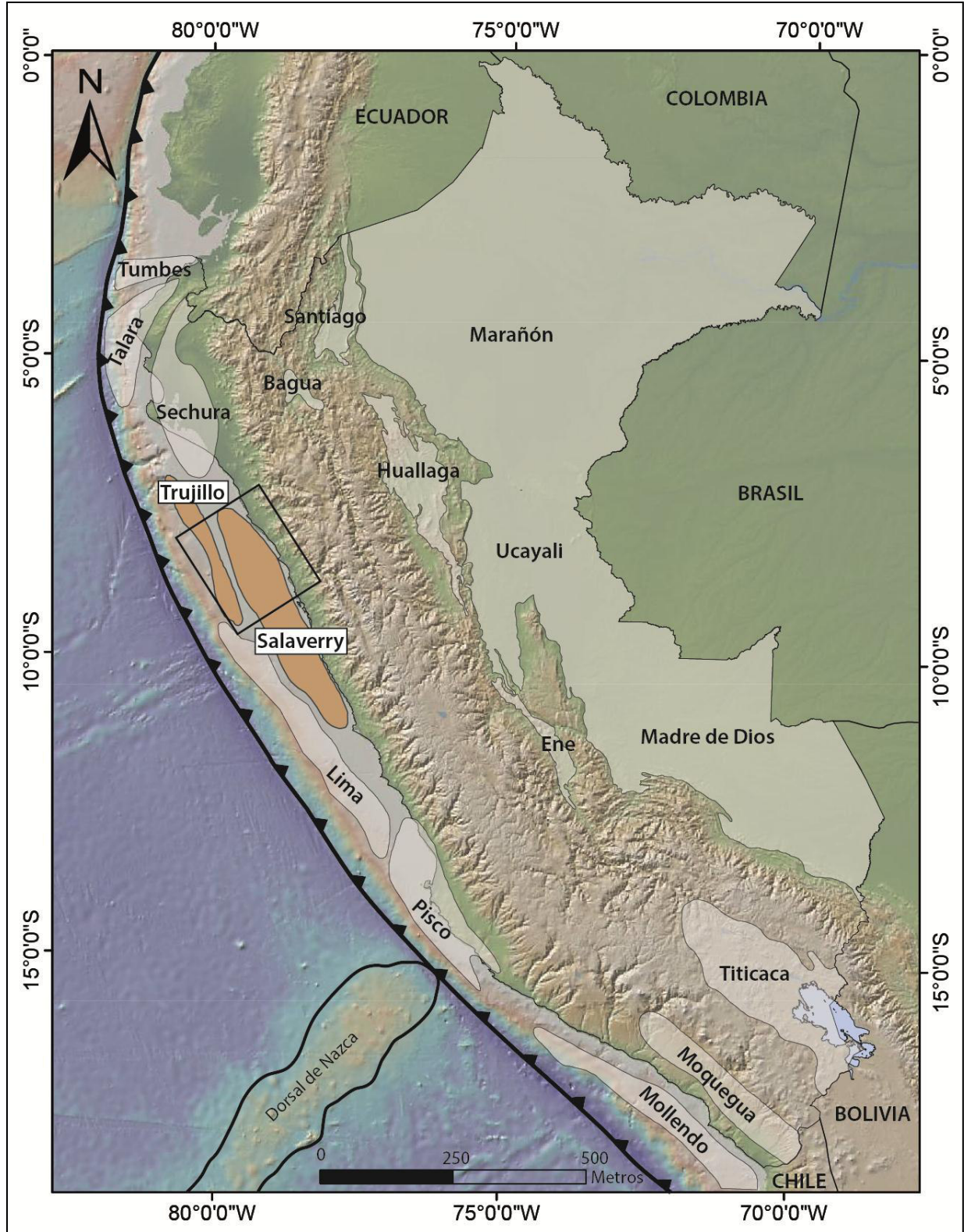


Figura I-1. Mapa de las cuencas sedimentarias de Perú, y ubicación de la zona de estudio. Fuente: propia.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

1.1.2. Accesibilidad

Las principales vías de acceso a la parte costa dentro de la zona de estudio son por medio terrestre o aéreo. Por vía terrestre a través de la carretera "Panamericana Norte" partiendo de Lima toma un tiempo aproximado de 7 horas el cual tiene una distancia aproximada de 550 km (figura I-2).



Figura I-2. Vía de acceso por carretera. Fuente: propia.

Por vía aérea, desde el aeropuerto de Lima "Jorge Chávez", hasta el Aeropuerto de Trujillo "Carlos Martínez", el vuelo dura aproximadamente 40 min. Para los vuelos de Lima a Trujillo, existen salidas regulares todos los días (figura I-3).



Figura I-3. Vía de acceso por vía aérea. Fuente: propia.

1.2 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Las cuencas de Antearco Trujillo y Salaverry se encuentran estrechamente relacionadas y han sido exploradas ya más de 30 años, sin embargo, aún no se tiene un concepto claro de los procesos geológicos. En tal sentido, es importante entender primero los mecanismos de estructuración, deformación y sedimentación de estas cuencas a través del tiempo, para posteriormente integrar parámetros petrolíferos y determinar las futuras tendencias exploratorias para descubrir nuevos yacimientos de hidrocarburos.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1 Problema General

¿Qué determina el sistema estructural y petrolero en las cuencas de Antearco, Trujillo sur y Salaverry norte?

1.3.2 Problema Específico

La escasez de pozos exploratorios en las cuencas y la mala calidad de la información sísmica debajo del horizonte pre-cenozoico no permiten tener una interpretación clara, lo que ha generado incertidumbre estratigráfica para la correcta designación de las unidades geológicas y determinar el potencial hidrocarburífero.

- 1) ¿Cuál es la posible evolución tectono-sedimentaria de la zona de estudio?
- 2) ¿La zona de estudio tiene potencial hidrocarburífero?

1.4 JUSTIFICACIÓN TEORICA

Si bien hubo varios estudios desde hace muchos años, la mayoría de ellos estuvieron enfocados a lotes petroleros, pero en la actualidad no se cuenta con un modelo evolutivo global de la tectónica y la sedimentación, en las cuencas Trujillo y Salaverry, que nos permita entender las relaciones entre el sistema petrolero y estructural en el área de estudio

1.5. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

La exploración petrolera necesita la elaboración de dicho modelo para poder entender como evoluciono a través del tiempo estas cuencas y así poder determinar estructuras favorables para la exploración de hidrocarburos.

1.6. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

1.6.1 Objetivo General

Demostrar el análisis estructural y sistema petrolero de las cuencas de Antearco, Trujillo sur y Salaverry norte, a través de 2 secciones estructurales longitudinales a la línea de costa en la parte offshore, 1 sección estructural transversal solo en la zona offshore y 3 secciones estructurales regionales transversales a la línea de costa que unen las zonas de Offshore y Onshore (figura I-4) y el modelamiento geoquímico de pozos hipotéticos.

1.6.2. Objetivo Especifico

1) Proponer un modelo de la evolución tectono-sedimentaria de la zona de estudio a través de las secciones estructurales, datos de los afloramientos en la zona costera y la correlación de los pozos exploratorios.

2) En base a estudios anteriores, evolución tectono-sedimentario, secciones estructurales y modelización geoquímica en pozos hipotéticos propuesto en esta tesis, es proponer leads para la exploración de hidrocarburos.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

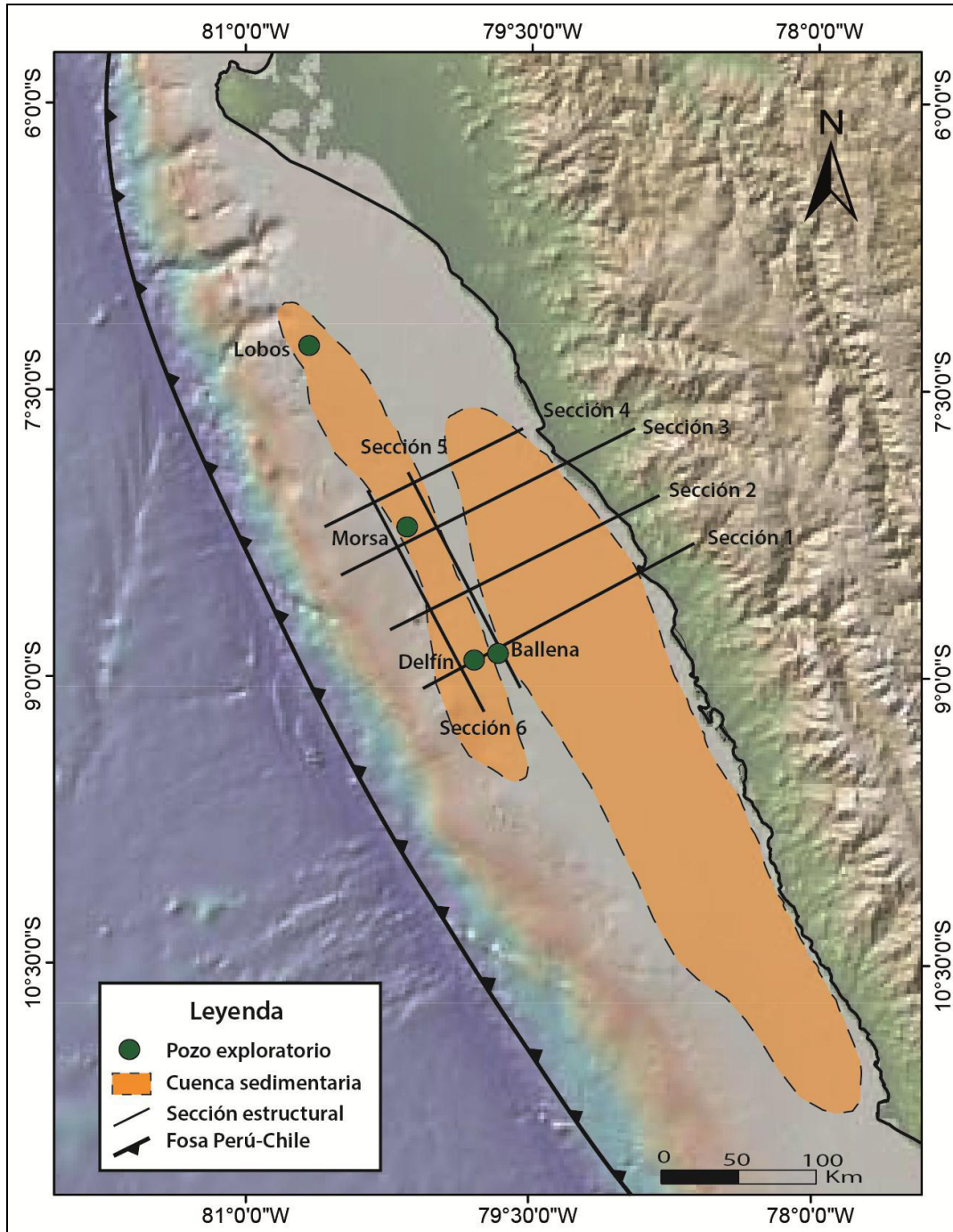


Figura I-4. Ubicación de las secciones estructurales. Fuente: propia.

1.7. HIPOTESIS Y VARIABLES

1.7.1 Hipótesis General

Se espera que la variación de la tectónica regional (velocidad y orientación de subducción) a través del tiempo geológico haya influenciado en el estilo estructural y sistema petrolero en la zona de estudio.

1.7.2 Hipótesis Específica

1) La evolución tectono-sedimentaria se encuentra relacionado a la tectónica regional afectando la distribución espacial y temporal de las secuencias tanto mesozoicas como cenozoicas en la zona de estudio.

2) Las cuencas de Antearco, Trujillo sur y Salaverry norte, tienen por lo menos un sistema petrolero activo debido a la presencia de hidrocarburos en los pozos perforados y los oil seeps por lo que los hace atractivo para la exploración de hidrocarburos.

1.7.3 Identificación de Variables

1.7.3.1 Variable Independiente

Se tiene como variable independiente a la Tectónica regional.

1.7.3.2 Variable dependiente

Se tiene como variable dependiente al sistema petrolero y la evolución tecto-sedimentaria.

1.7.4 Operacionalización de Variables

1.7.4.1 Variable independiente

- La tectónica regional: Identificar las fallas compresivas, extensivas tanto locales como regionales generadas por la variación de la tectónica regional. Identificar la orientación de estas fallas.

1.7.4.2 Variable dependiente

- El sistema petrolero: Identificar las trampas estructurales, roca madre, reservorio y sello.
- La evolución tecto-sedimentaria: identificar los ambientes depositacionales y discordancias como trampas estratigráficas. Identificar los posibles cuerpos ígneos presentes en la zona offshore cerca de la línea de costa.

1.8 METODOLOGIA

Durante la elaboración de esta tesis, se llevaron a cabo diversas etapas, así tenemos:

1.8.1. Adquisición de datos de superficie, subsuelo y pozos

La compilación de información superficial, se dio a través de las distintas campañas realizadas por Petroperu, Savia, Perupetro e INGEMMET, en los cuadrángulos; Puemape (16-d), Chocope (16-e), Otuzco (16-f), Trujillo (17-e), Salaverry (17-f), Santiago de Chuco (17-g), Santa (18-f), Santa Rosa (18-g), Chimbote (19-f) y Casma (19-g). Posterior a esto, IRD-Perupetro realizó una campaña de campo en noviembre del 2015 desde el Puerto Morín hasta Otuzco, donde se tomaron datos estructurales y estratigráficos.

La información de subsuelo con la que se trabajó fue sísmica de resolución media, adquirida en la campaña de Ribiana (RIBDGC93LZ) en 1993 y de Repsol (REPDGC96LZ29) en 1998 (figura I-5). Finalmente se adquirió los datos de registros de 4 pozos exploratorios (Delfín 1X y Ballena 1X de la empresa Occidental y Lobos 1X y Morsa 1X de la empresa Repsol). La información sísmica 2D y 3D, como de pozos fue tomada del banco de datos de PERUPETRO.

1.8.2. Conversión de sísmica de tiempo a profundidad

Los métodos para convertir los datos sísmicos a profundidad son numerosos y dependen de la cantidad de información disponible en el área. Todos ellos necesitan conocer el campo de velocidades promedio hasta el evento de interés. La información obtenida en las diferentes campañas de adquisición sísmica se encuentra en valores de tiempo (milisegundos) por lo que es necesario convertir estos valores a profundidad. Para esto se realizó una tabla de conversión de tiempo a profundidad a partir de datos de velocidades RMS (Root-Mean-Square, raíz cuadrada media) obtenidas de los shot points.

1.8.3. Construcción e interpretación de secciones sísmicas y datos de pozos

Una vez convertida la sísmica a profundidad, se tuvo que calibrar las dos campañas sísmicas para unificar, para esto se utilizó como nivel de referencia, el horizonte de la base del terciario. Posterior a esto, se calibra los reflectores con las bases interpretadas en cada pozo. Finalmente se interpretó sistemáticamente en distintas direcciones, obteniéndose así un mallado. En algunos casos para facilitar la interpretación de los horizontes se utilizó atributos sísmicos como el de "instantaneous phases" (figura I-6). Para el caso de la interpretación de las fallas, se ubicó los planos de falla, en el software Kingdom, observándose la interrupción o cambio de continuidad de los horizontes.

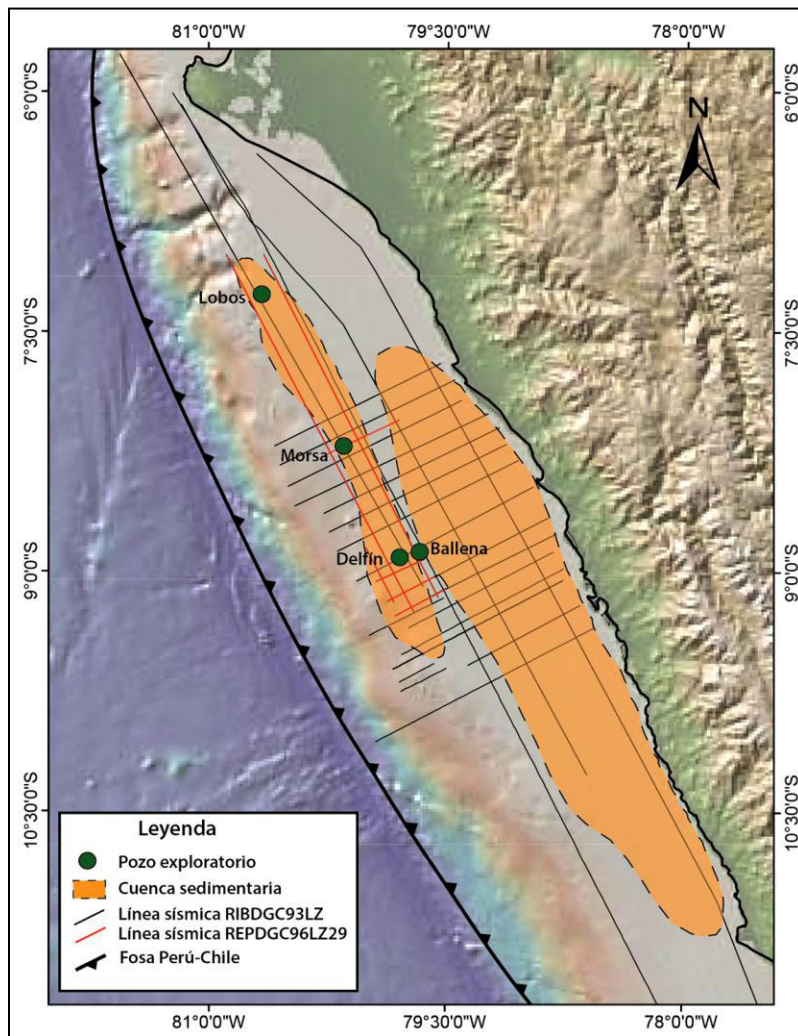


Figura I-5. Ubicación de secciones sísmicas interpretadas de diferentes campañas y pozos presentes utilizados en el área de estudio. **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

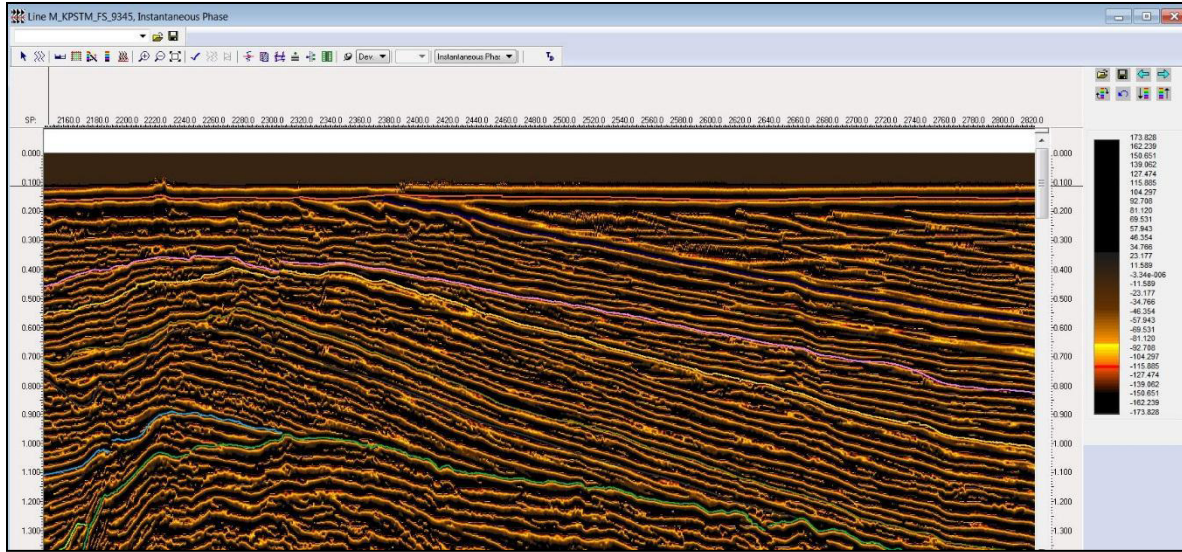


Figura I-6. Sección sísmica 2D con el atributo "Instantaneous Phase" en el software Kingdom. Fuente: propia.

1.8.4. Interpretación de cubos sísmicos

Se realizó la interpretación de cubos sísmicos (figura I-7). Para la cuenca Trujillo se interpretó el cubo Moche de la empresa Moche y para la cuenca Salaverry se interpretó los cubos Chanchan, San Jorge y Área 1 de la empresa Savia. Para esta interpretación, se hizo el recorrido de los inlines y crosslines con un paso largo de cada 5 trazas en el software Kingdom donde se procedió a realizar la interpretación tomando los principales reflectores, discordancias y eventuales anomalías de amplitud. Para la interpretación de estos cubos sísmicos, se aplicó el atributo sísmico inline dip (figura I-8) de la Universidad de Oklahoma (Web. 2016), con el fin de identificar los rasgos estructurales y fallas geológicas en los time slices. Para luego poder visualizar e interpretar las estructuras en el software Kingdom (figura I-9)

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

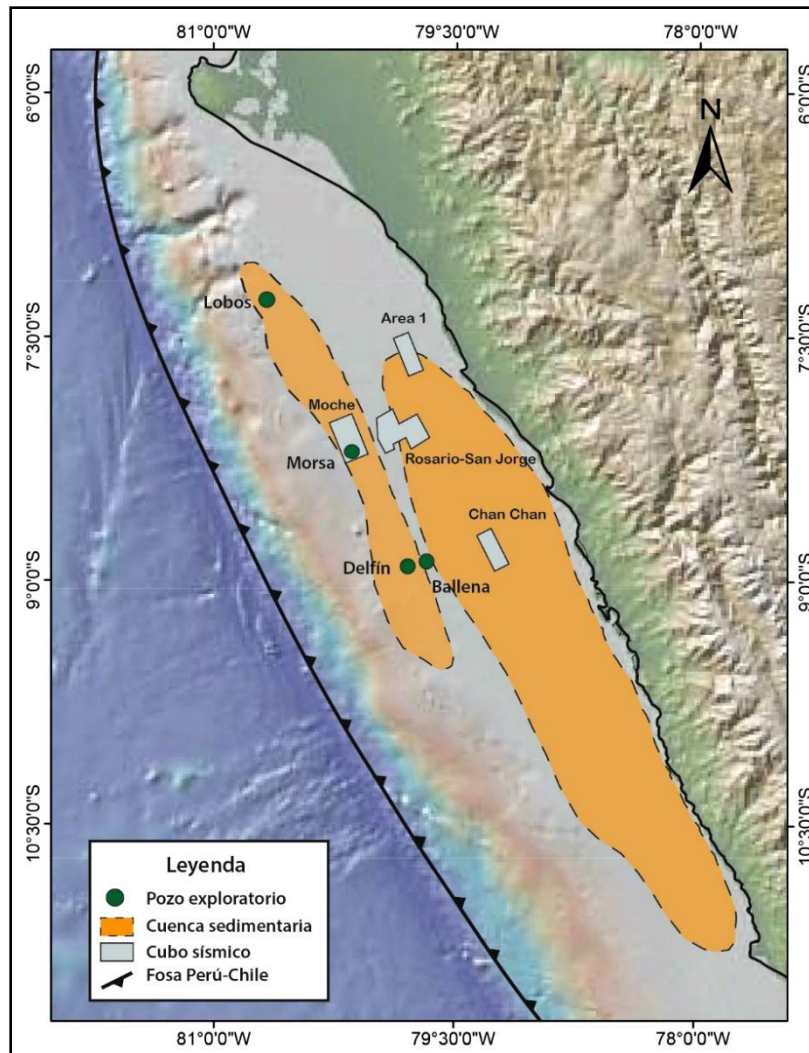


Figura I-7. Ubicación de los cubos sísmicos analizados de la zona de estudio. Fuente: propia.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

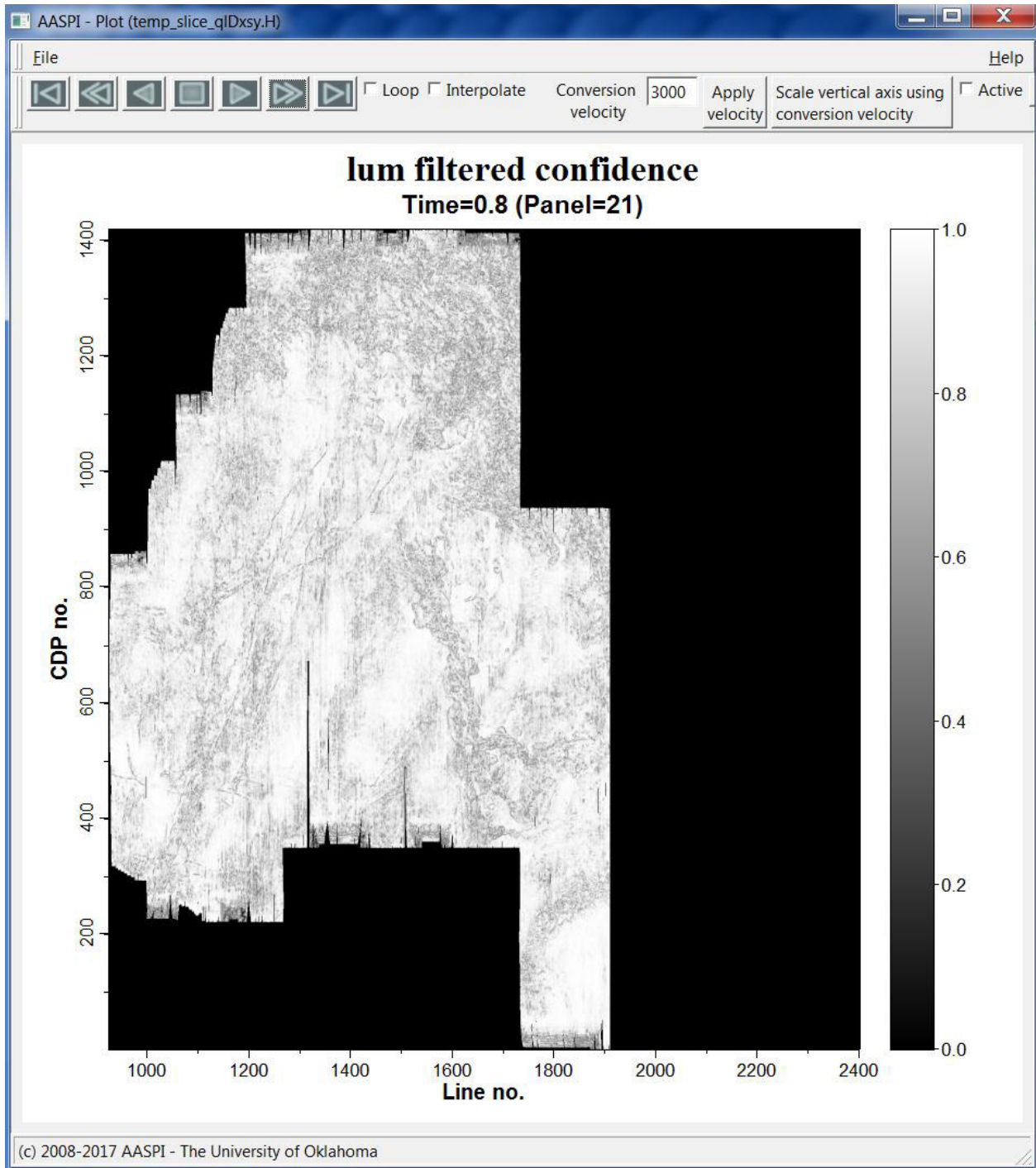


Figura I-8. Atributo sísmico inline dip time 0.8 en el software ASSPI de la Universidad de Oklahoma. Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

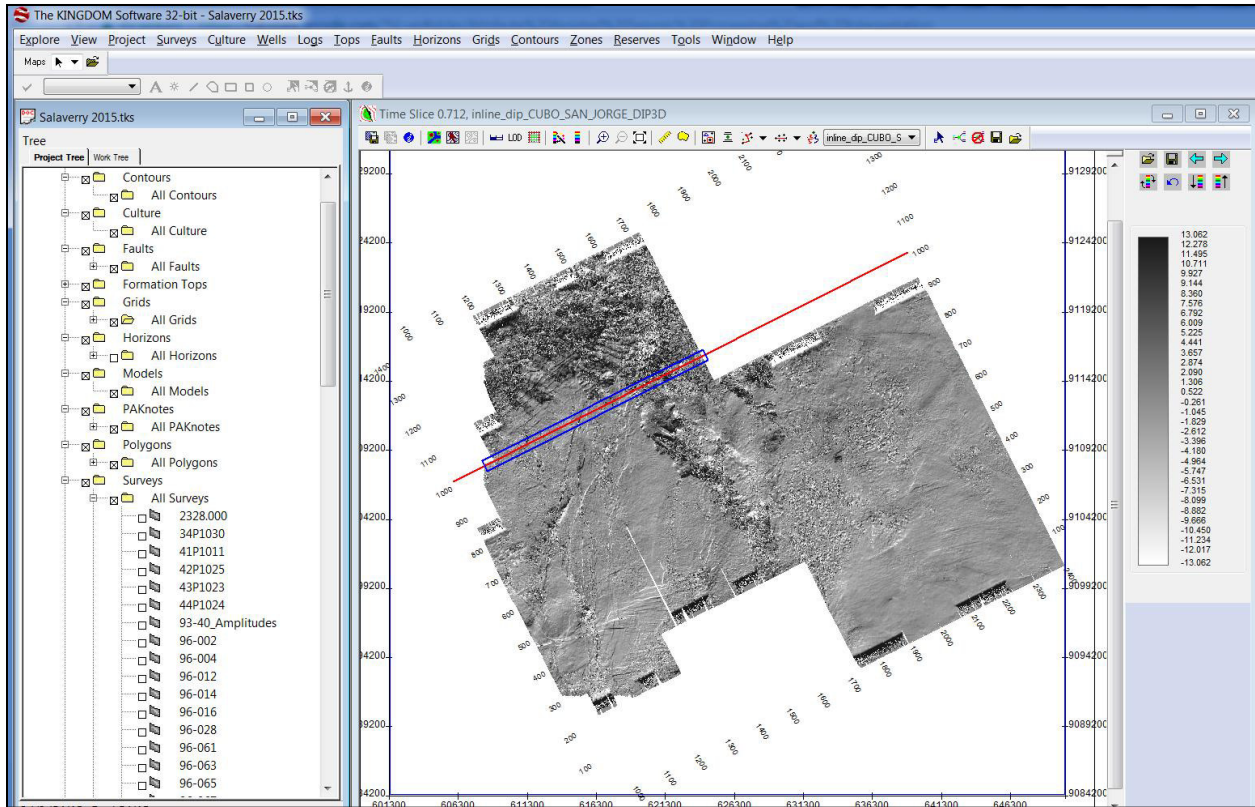


Figura I-9. Time slice 0.8 del cubo sísmico Moche con el atributo Inline dip de la Universidad de Oklahoma en el software Kingdom. Fuente: propia.

1.8.5. Elaboración del Diagrama Litoestratigráfico

A partir de los límites de las grandes secuencias sedimentarias definidas en la interpretación sísmica, junto con la correlación de pozos (figura III-8) y datos de afloramientos, se procedió a realizar un diagrama litoestratigráfico NE-SW que permite ilustrar la repartición de las unidades del Precámbrico-Paleozoico, Mesozoico (Jurásico: Chicama y Cretáceo: Casma/Goyllarisquiza) y Cenozoico (Paleoceno, Eoceno, Mioceno, Plioceno y Cuaternario) figura III-10.

1.8.6. Modelado de Sistema Petrolero

El modelado del sistema petrolero se realizó a través del software Petromod con el fin de determinar el potencial petrolífero de estas cuencas. Para ellos fue necesario contar con información geológica disponible (Carbon Organico Total (TOC), Reflectancia de Vitrinita (Ro%), Temperatura máxima (Tmax), índice de hidrogeno (HI), Heat flow, etc), Las evidencias de hidrocarburos en los pozos exploratorios y los oil seeps (figura I-10) indican por lo menos la presencia de un sistema petrolero activo.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

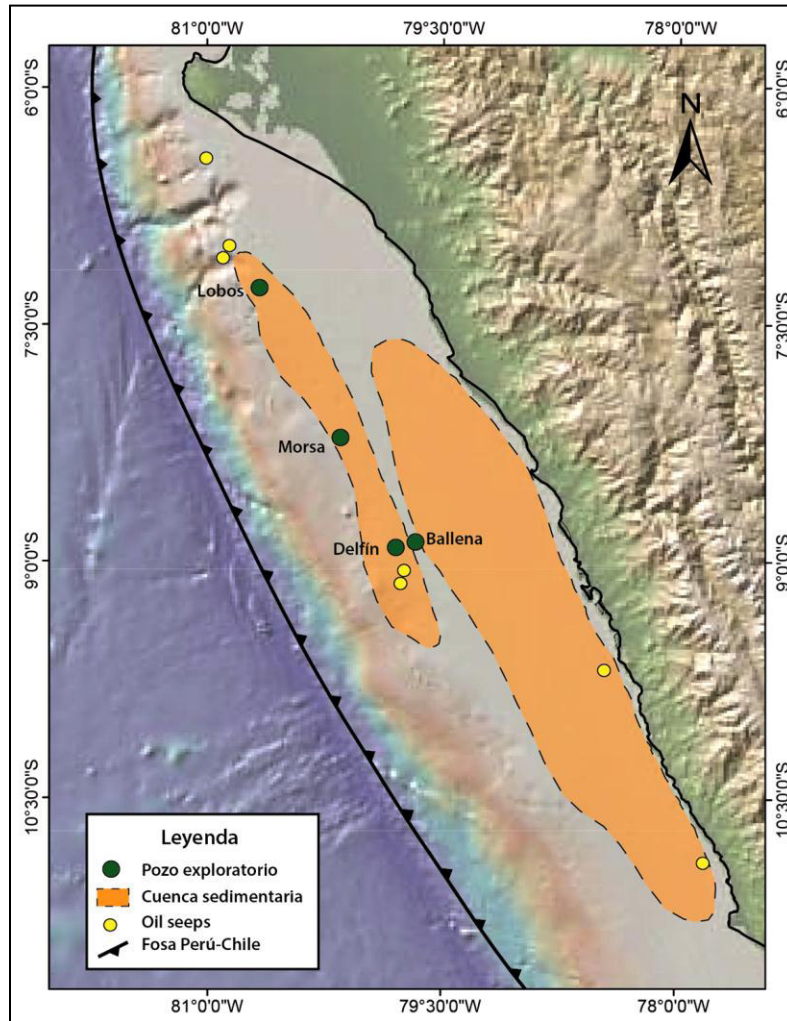


Figura I-10. Mapa de afloramientos de hidrocarburos. Fuente: propia.

CAPITULO II: GENERALIDADES Y CONTEXTO GEODINAMICO

2.1. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

La actividad exploratoria en las cuencas de antearco fue desarrollada por distintas compañías tanto estatales como privadas, instituciones, investigadores y tesis de universidades nacionales y extranjeras, las cuales aportaron con información adquirida, así como con sus respectivas interpretaciones.

El primer trabajo de investigación en la zona de offshore se dio a través de la inversión petrolera por la empresa Cía. Occidental Petroleum en 1971 (PARSEP. 2001). Esta empresa perforo dos pozos exploratorios Ballena 1X con una profundidad de 3198' y Delfín 1X con una profundidad de 8743', ambos pozos llegaron hasta el "basamento".

En el año 1972 se inició el Proyecto Placa de Nazca, donde se realizó el muestreo del fondo marino; así mismo se adquirió datos de gravimetría, magnetometría y data sísmica en la zona offshore. (Parsep. 2001) Posteriormente las compañías Seiscom-Delta (1973) y Companie Générale de Geophysique (CGG) (1982) patrocinados por Petroperu adquirieron datos de gravimetría, magnetometría y sísmica 2D; obteniéndose un total de 9700 km (Seiscom Delta) y 3250 km (CGG) de sísmica 2D.

En el año 1981 Thornburg & Kulm estudian la parte estructural y tectónica del margen continental del Perú a través de datos sísmicos, gravimétricos y magnetométricos (Thornburg T. & Kulm L., 1981).

En el año 1986 se inicia el Programa de perforación Oceánica (Ocean Drilling Program – ODP), donde se reproceso la sísmica adquirida durante el Proyecto Placa de Nazca, también se perforaron 10 pozos y se adquirió nueva sísmica en offshore (ODP. 1986).

En el año 1993 se adquirió gravimetría y sísmica 2D por Digicon Geophysical Corp; patrocinados por Petroperu y Ribiana Inc. de Houston. El área del proyecto comprendió desde el sur de la Cuenca Pisco hasta la frontera con Ecuador en el norte, obteniéndose un total de 10 000 km de sísmica. Es necesario mencionar también el estudio realizado por Carlos Azalgara sobre las cuencas de Antearco del margen continental del Perú (Structural evolution of the offshore forearc basins of Peru, including the Salaverry, Trujillo, Lima, West Pisco and East Pisco basins- Rice University).

En el año 1996 la empresa Repsol exploración Perú, adquiere la licencia del Lote Z-29 en la cuenca Trujillo, y 4020 km de línea sísmica con la empresa contratada Digicon Geophysical Corp. Luego Austin Exploration Inc. fue contratado para recolectar 4017 km de gravimetría y 4001 km de magnetometría. En 1998 Western Geophysical realiza la segunda adquisición sísmica para Repsol, el que consiste de 945 km de sísmica 2D. En 1999, Repsol perforo dos pozos exploratorios Morsa 1X con una profundidad de 1281 m llegando al "basamento" y Lobos 1X con una profundidad de 2469 m llegando a las secuencias del Campaniano. En el 2001 se llevó a cabo el Proyecto de Asistencia para La Reglamentación del Sector

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Energético del Perú (PARSEP), en el cual se desarrollaron estudios G&G en las Cuencas Trujillo y Salaverry.

Para la zona costera, uno de los primeros estudios geológicos fue realizado por Megar F. (1979) donde definió las cuencas del Jurásico-Cretácico de Tras-arco, las cuencas Peruana Occidental y Oriental, separadas por el Alto de Marañón. La actividad exploratoria petrolera para la zona costera fue desarrollada en distintas campañas por parte de la empresa Petroleros del Perú (Petroperu) en los 80's (Bolaños R. 1986, Tarazona A. 1987 & Gaviño C. 1987), efectuando extensivos trabajos de campo donde se realizaron muestreos petrográficos, columnas estratigráficas, análisis palinológicos, secciones estructurales solo con datos de campo y análisis de Carbón Orgánico Total (TOC). Fue seguida por la empresa Savia que también realizó trabajos y análisis de muestras de campo. También aportó información valiosa la Carta geológica Nacional del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), con los cuadrángulos de Puemape (16-d), Chocope (16-e), Otuzco (16-f), Trujillo (17-e), Salaverry (17-f), Santiago de Chuco (17-g), Santa (18-f), Santa Rosa (18-g), Chimbote (19-f) y Casma (19-g).

Se tiene los trabajos de tesis de grado de Carlos Llerena (2014) “Evaluación de los potenciales reservorios naturalmente fracturados en la cuenca Salaverry, a partir del análisis estructural de la costa del Perú central, Universidad Nacional de San Agustín y Diego Timoteo (2013) “Potencial Generador de Hidrocarburos y Distribución de las Secuencias Cretácicas costa afuera (offshore) del Perú centro-norte (Lima – Chiclayo)” Universidad Nacional de Ingeniería. Finalmente, los trabajos de tesis de maestría Anibal Lajo (2014) “Modelamiento de cuencas y Sistema Petrolero 2d del sector Isla Lobos de Afuera – Chiclayo: Cuencas Sechura y Trujillo, Noroeste offshore de Perú” Universidad Federal de Río de Janeiro y Diego Timoteo (2015) “Sismoestratigrafía de los depósitos cenozoicos de la cuenca Salaverry, parte offshore del Perú: Nuevas interpretaciones del sistema petrolero” Universidad de Brasilia.

2.2. GENERALIDADES

Las cuencas de Antearco son el resultado de diferentes eventos tectónicos relacionados entre sí, los cuales han sido estudiados por diferentes investigadores con la finalidad de dar un marco tectónico y estratigráfico referencial, como también los conceptos generales de cuencas de antearco, su segmentación, zonas de aporte que se relacionan con los eventos tectónicos, los cuales permitieron el desarrollo de estos. En los capítulos posteriores se representará nuestra base para dar un panorama general en el entendimiento de las estructuras que tenemos en la actualidad y en especial nuestra zona de estudio.

2.2.1 Relaciones Tectónicas en los Márgenes Continentales

La Tectónica de Placas es una teoría científica con un marcado carácter generalista e integrador que explica la variedad de características y acontecimientos geológicos. Se basa en un sencillo modelo de la Tierra que expone que la rígida litosfera se encuentra fragmentada, la corteza terrestre está compuesta al menos por una docena de placas rígidas (figura II-1) que se mueven cada una con una velocidad y dirección variable, estas encajan entre si y varían en grosor según su composición ya sea corteza oceánica, continental o mixta. A lo largo de la historia geológica han cambiado no sólo la posición de las placas litosféricas, su forma o tamaño, sino también el número de las mismas, como es el caso de la ruptura de la placa Farallón al frente de la costa peruana que se dividió en la placa de Nazca y Cocos.

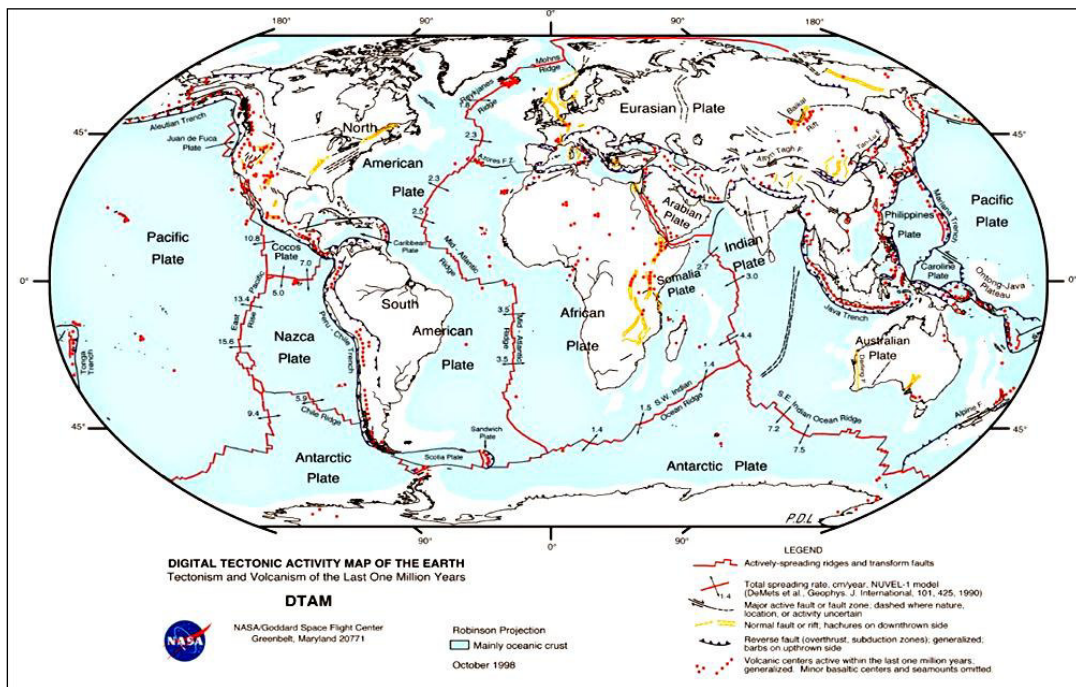


Figura II-1. Esquema de la distribución de las placas en la actualidad (Lowman P. et. al, 1999).

Las cuencas sedimentarias son regiones subsidentes en la superficie de la tierra donde se han acumulado grandes espesores de sedimentos producto de la erosión de la superficie durante un prolongado intervalo de tiempo. Los valores máximos de la tasa de sedimentación se alcanzan en los medios sedimentarios más cercanos a la línea de costa, deduciendo así que más de la mitad de los sedimentos se acumulan en los bordes de los continentes. Se está aludiendo a los márgenes continentales, áreas subsidentes amplias, que constituyen verdaderas trampas de sedimentos donde se depositan importantes volúmenes de los mismos.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

El concepto de margen continental y la reconstrucción de las diferentes fases de su evolución se representan a través del Ciclo de Wilson (Andamayo K. 2008). La figura II-2 muestra una ilustración esquemática de la variación de las etapas en el ciclo de Wilson comenzando con la ruptura de un cratón continental estable (figura II-2a) y el adelgazamiento de la litosfera continental. Rifting (figura II-2b) es seguido por el desarrollo de un adelgazamiento, rift del margen continental y eventualmente da paso a la expansión del fondo marino como los dos continentes se separan a través de un océano en expansión (figura II-2c). La terminación de la abertura de la cuenca puede ocurrir en respuesta a colisiones de placas, que podría desencadenar subducción en uno o más márgenes marginados (figura II-2d). El cierre de la cuenca también puede compensar la litosfera oceánica recién formada en otros lugares. El océano contratante es una consecuencia de la subducción en uno o ambos márgenes del continente (figura II-2e). Esta fase continuará hasta que los dos continentes chocan y la cuenca oceánica cierra completamente (figura II-2f) (Kearey P. et. al. 2009).

Ha sido uno de los avances más notables del conocimiento sobre la génesis de las cuencas sedimentarias a partir de la emisión de la Teoría de la Tectónica de Placas.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

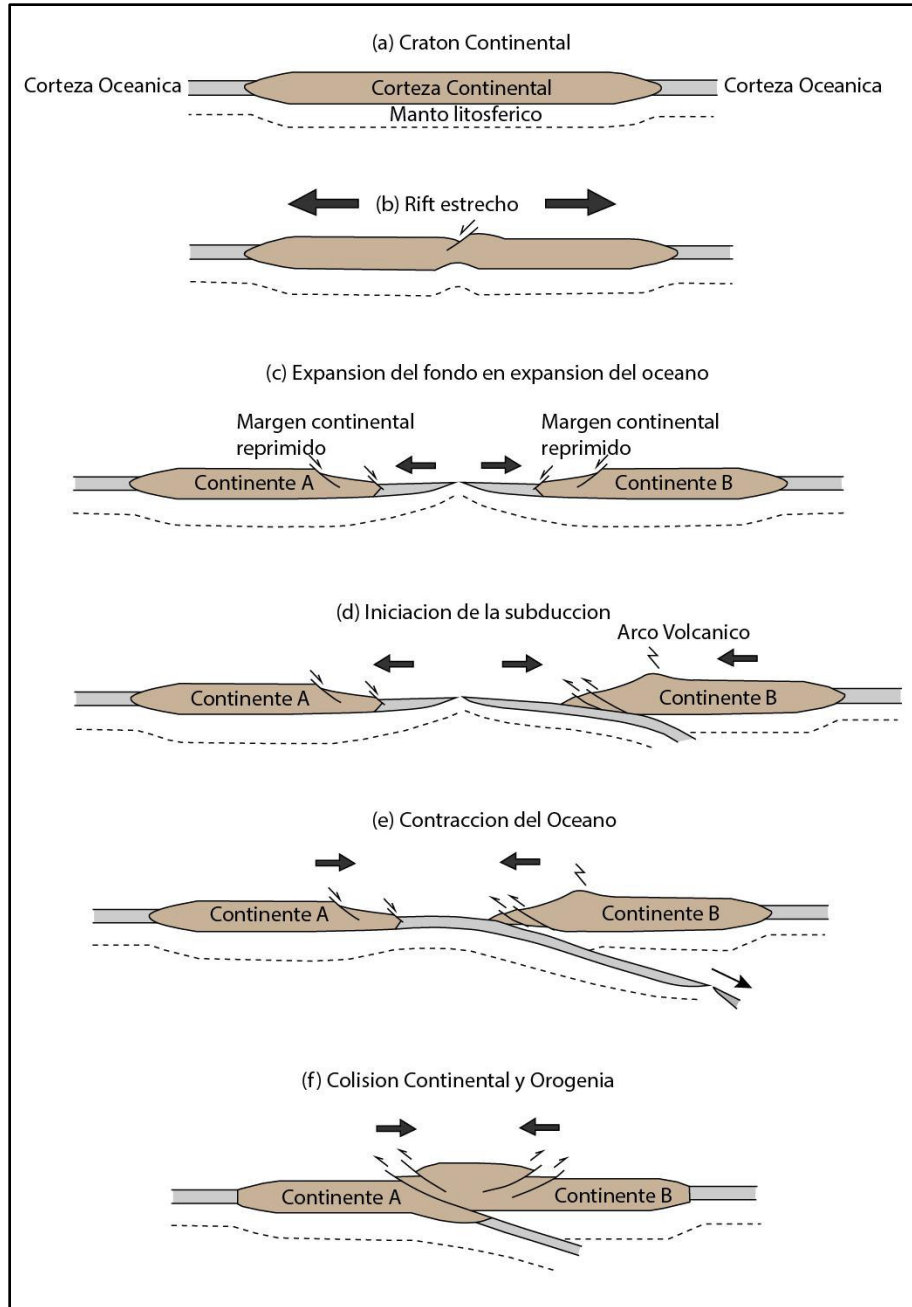


Figura II-2. Ciclo de Wilson (modificado de Kearey P. et. al. 2009).

Se diferencian dos tipos principales de márgenes continentales, de acuerdo con su posición con respecto al borde de las placas, a la morfología del fondo marino, a la estructura interna y al carácter divergente o convergente de los mismos

Margen continental Pasivo: Las placas se están separando una de otra debido a movimientos que las alejan (figura II-3). Cuando dos placas oceánicas se separan, la corteza adelgaza y se fractura a medida que el magma, derivado de la fusión parcial del manto, asciende a la superficie, se cuela en las fracturas verticales y fluye sobre el suelo marino; al llegar a la superficie, sufre cambios formando una nueva corteza oceánica. Los lugares donde se crea nueva corteza oceánica se llaman centros de expansión, así como a las zonas de separación se le conocen como valles Rift. La creación de nueva corteza es un resultado natural de la tectónica de placas. La corteza continental de los márgenes pasivos sufre un progresivo adelgazamiento al estar sometida a una extensión igualmente progresiva. En definitiva estos márgenes presentan una dinámica extensiva por lo que también se les llama márgenes divergentes.

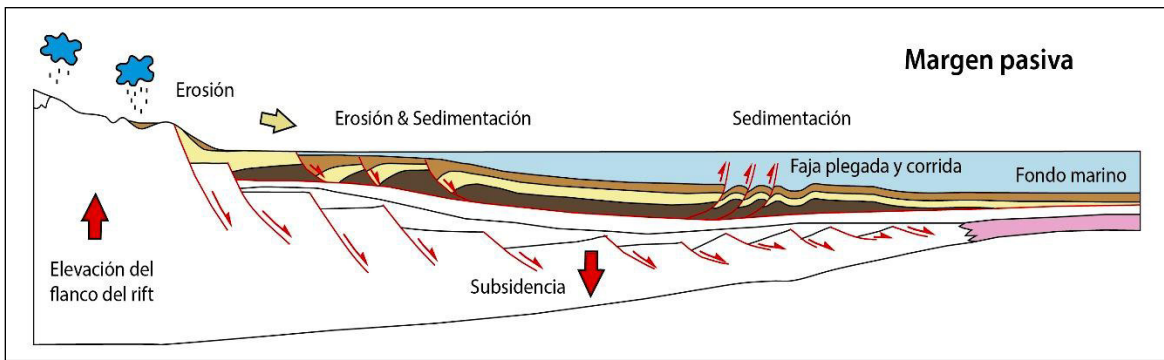


Figura II-3. Características de un Margen Continental Pasivo (modificado de Witt, C., 2011).

Margen continental Activo: En donde dos placas chocan, por tener movimientos con direcciones opuestas, la más densa se hunde debajo de la menos densa a lo largo de lo que se conoce como zona de subducción (figura II-4); la placa que subduce se va hacia el interior del manto, calentándose y fundiéndose parcialmente generando magma que asciende a la superficie. Una zona de subducción se caracteriza por deformación, vulcanismo, formación de montañas, metamorfismo, actividad sísmica y depósitos minerales importantes. Estos márgenes presentan una dinámica compresiva de manera que en ellos hay acortamiento cortical, por lo que también se les llama márgenes convergentes.

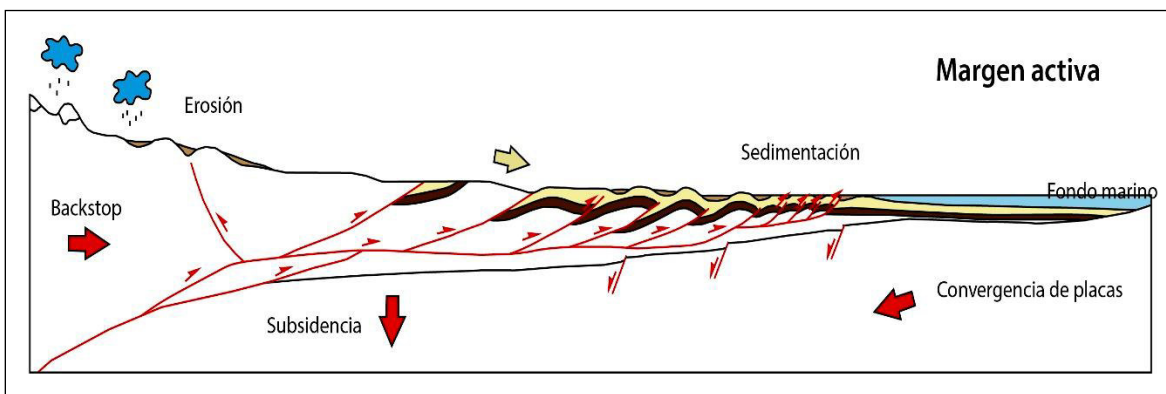


Figura II-4. Características de un Margen Continental Activo (modificado de Witt, C., 2011.)

2.3 CUENCAS SEDIMENTARIAS DEL ANTEARCO DEL PERÚ CENTRAL

Las cuencas sedimentarias del Antearco del Perú central se ubican en la plataforma del margen continental activa de Sudamérica, donde se produce la subducción de la placa de Nazca bajo la placa sudamericana. Estas cuencas presentan una geometría elongada NW-SE (figuras II-5), limitados por dos estructuras paralelas a la línea de costa, una corresponde al Outer Shelf High (OSH) y en el otro alto ubicado en el talud el Upper Slope Ridge (USR) (figura II-6), definidas por Thornburg T. & Kulm L. D. (1981).

Se considera que el Outer Shelf High (OSH) es un alto estructural que corresponde a la prolongación de la Cordillera de la Costa en offshore (figura II-5); las rocas que conforman este alto son esquistos y gneis del Precámbrico-Paleozoico como se pudo evidenciar en los Pozos Ballena 1X, Delfín 1X y Morsa 1X; así como los afloramientos de gneis en la Isla de las Hormigas de Afuera (Romero D. 2013). Las cuencas de antearco muestran un basamento variado compuesto por secuencias del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico (Romero D. 2010; Timoteo D. 2013). Respecto al Upper Slope Ridge, se puede interpretar de manera preliminar, que las rocas que conforman este alto serían similares al Outer Shelf High (Llerena C. 2014) este alto se encuentra en el talud. Las cuencas limitadas entre la Costa (onshore) y el Outer Shelf High (OSH), fueron definidas como cuenca Sechura, Salaverry y Pisco Este. Por lo tanto, las cuencas limitadas entre el Outer Shelf High (OSH) y el Upper Slope Ridge (USR), fueron definidas como cuenca Trujillo, Lima y Pisco Oeste (Valencia K. 2011).

Las cuencas de antearco del Perú contienen un registro casi continuo de sedimentación marginal activa durante la convergencia de placas. La arquitectura estratigráfica en estas cuencas de antearco refleja los cambios en el espacio de acomodación, el cual deriva de la interacción de la tectónica compresiva, también de la carga de sedimentos y actuación del eustatismo en el margen continental.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

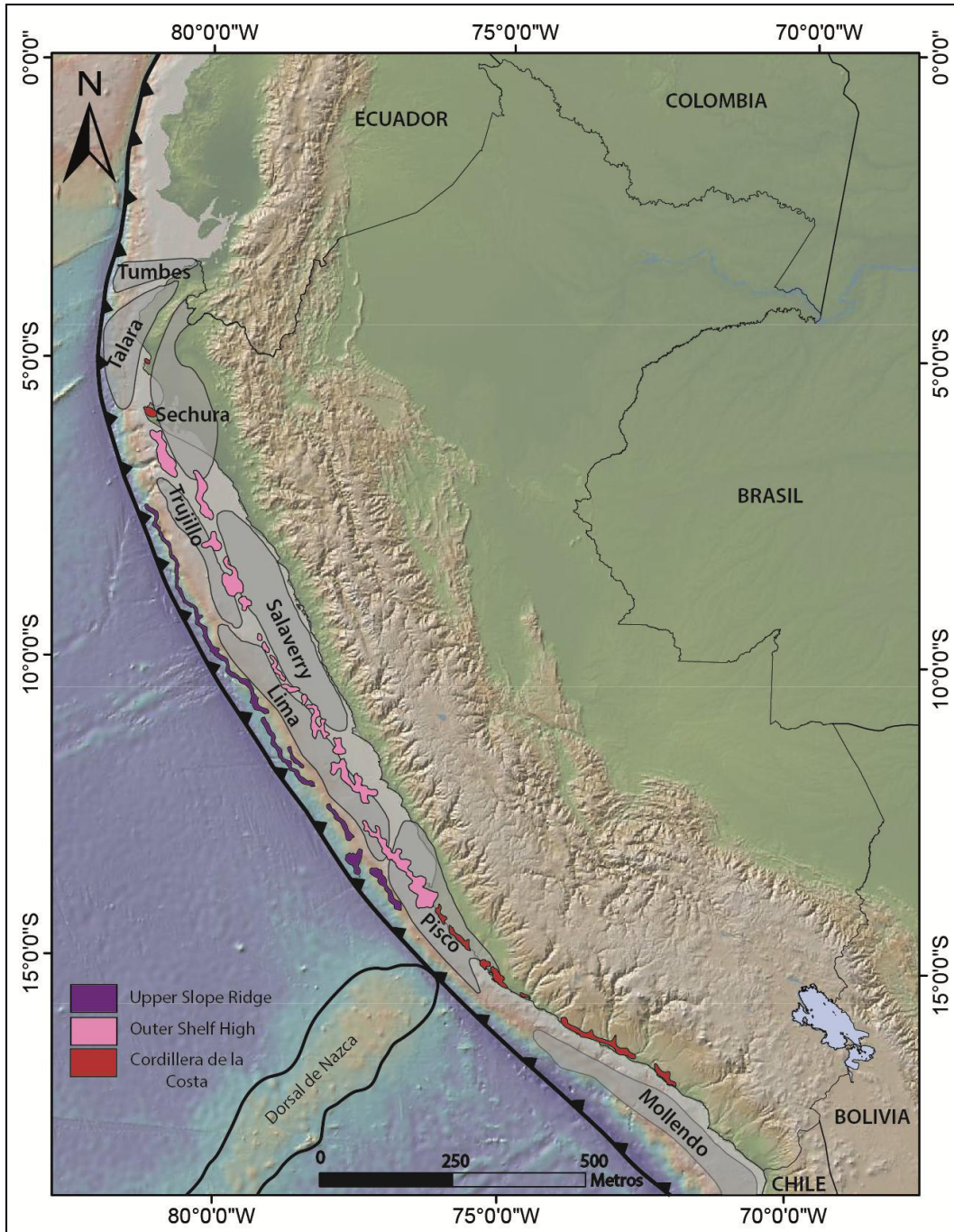


Figura II-5. Mapa con las cuencas sedimentarias del Antearco del Perú central. Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

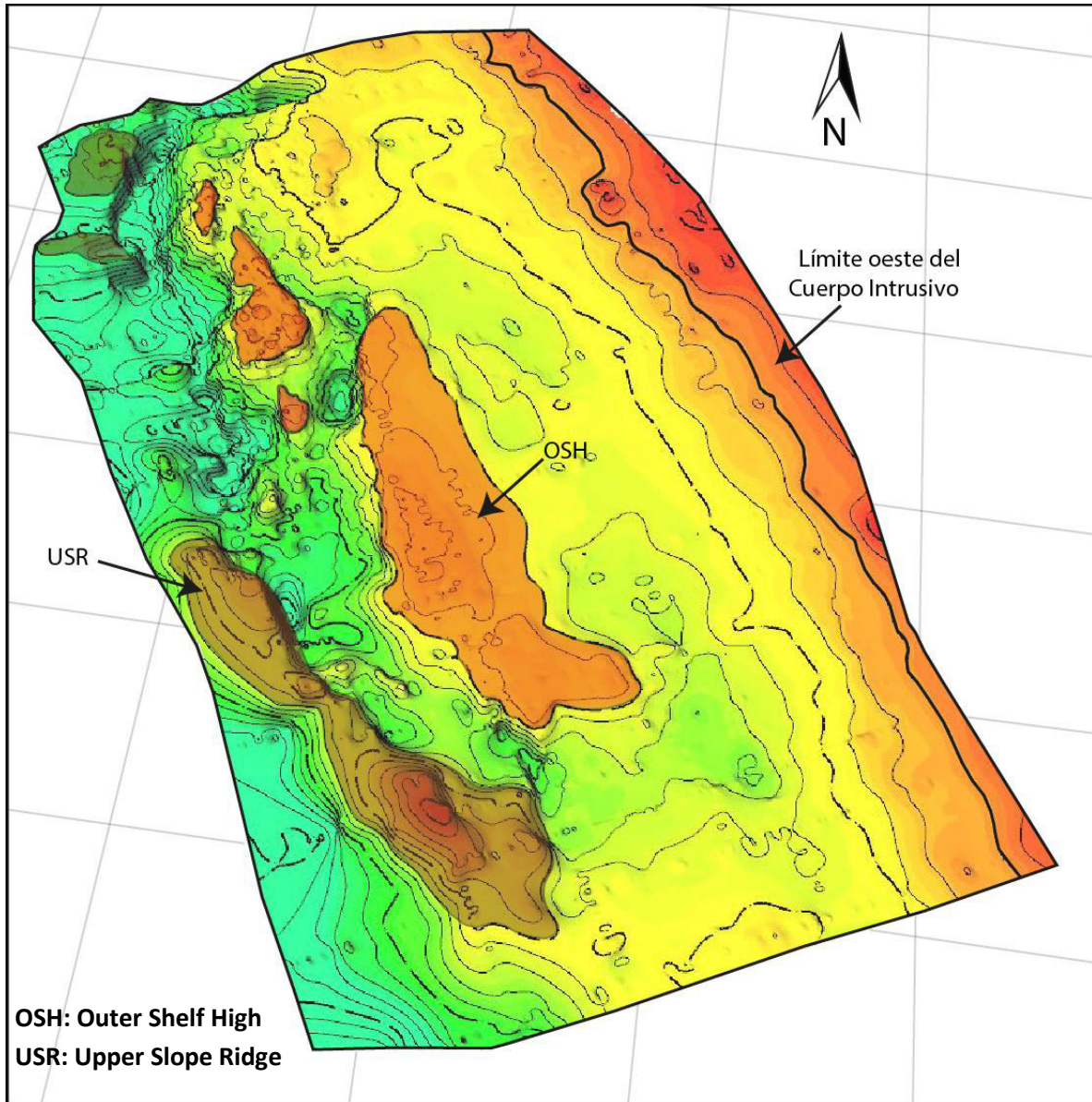


Figura II-6. Mapa de la base del Terciario con los altos OSH y USR en la zona de offshore. Fuente: propia.

2.4 UNIDADES MORFOESTRUCTURALES

La subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana se caracteriza por diversos y grandes unidades morfoestructurales (figura II-9) localizados a ambos extremos del margen continental, los mismos, que deben su origen a los continuos movimientos de compresión y extensión que ambas placas soportan. En general (figura II-10), las unidades morfoestructurales que se encuentran en la zona de estudio son:

2.4.1 Zona de Subducción:

La zona de subducción es una depresión lineal o curvilínea que marca el límite, en la superficie de la tierra, entre el bloque que subduce y el prisma de acreción del bloque subducido (Van Der Pluijm & Marshak, 2002). En el mar peruano se encuentra entre los 80 y 230 km mar adentro. La profundidad de la fosa es constante del orden de los 6000 m bajo el nivel del mar presentando mayor profundidad frente a la costa de Mollendo al sur, Huacho y Bayovar en el norte, observándose menor profundidad frente a las costas de Nazca y Pisco, donde se ubica la Dorsal de Nazca.

2.4.2 Talud continental:

Es la unidad morfológica comprendida entre el borde exterior de la Plataforma Continental y la fosa Peruana-Chilena. El talud continental, en función de su ancho y pendiente (figura II-7), frente a la costa presenta 3 sectores característicos (figura II-7):

- El sector sur comprendido entre Tacna y la Península de Paracas, con un ancho promedio de 100 km y fuerte pendiente, donde se encuentra un cañón submarino de 700 m de profundidad a 50 km, al SO de Punta Pescadores.
- El sector centro coincidente con el centro del País, con pendientes moderadas y donde la mayor extensión lateral es del orden de los 150 km de ancho.
- El sector norte comprendido entre la Península de Illescas y el Golfo de Guayaquil, semejante al sector sur, presenta fuerte pendiente y menor extensión lateral, del orden de los 70 km de ancho, donde se ubica un segundo cañón submarino.

2.4.3 Plataforma Continental:

Esta unidad morfológica comprende la prolongación del continente bajo el mar. Comprende el fondo marino que se extiende desde la línea de costa hasta la profundidad de 200 m o donde ocurra un cambio brusco en su pendiente (figura II-8). El ancho de la Plataforma Continental varía; En el sector norte frente a los departamentos de Piura y Tumbes se caracteriza por ser angosto, con unos 50 km de ancho (Tumbes), 40 km a la altura del desierto de Sechura y extremadamente angosto a la altura de Punta Balcones, Paita y Península de Illescas (figura II-7).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

En el sector centro desde la Península de Illescas de Paracas se caracteriza por ser un zócalo continental amplio, alcanzado unos 140 kilómetros de ancho a la altura de Chimbote, 120 km frente a Trujillo 70 km frente a Lima. En el sector sur desde la península de Paracas hasta la frontera con Chile, se caracteriza por ser un estrecho, con un ancho que varía de 2 a 4 km.

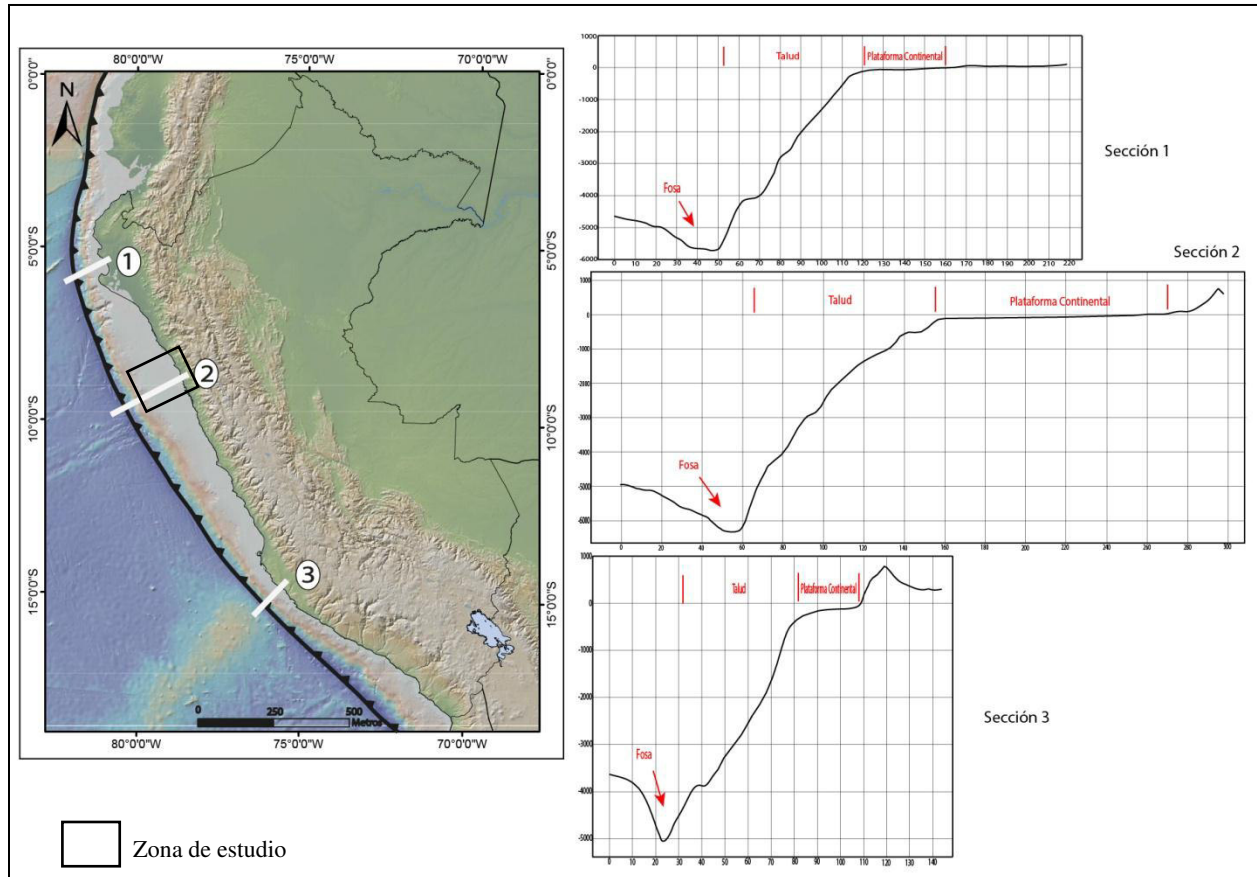


Figura II-7. Secciones que muestran la variación de la plataforma continental y el talud a lo largo del margen continental de Perú. Fuente: propia.

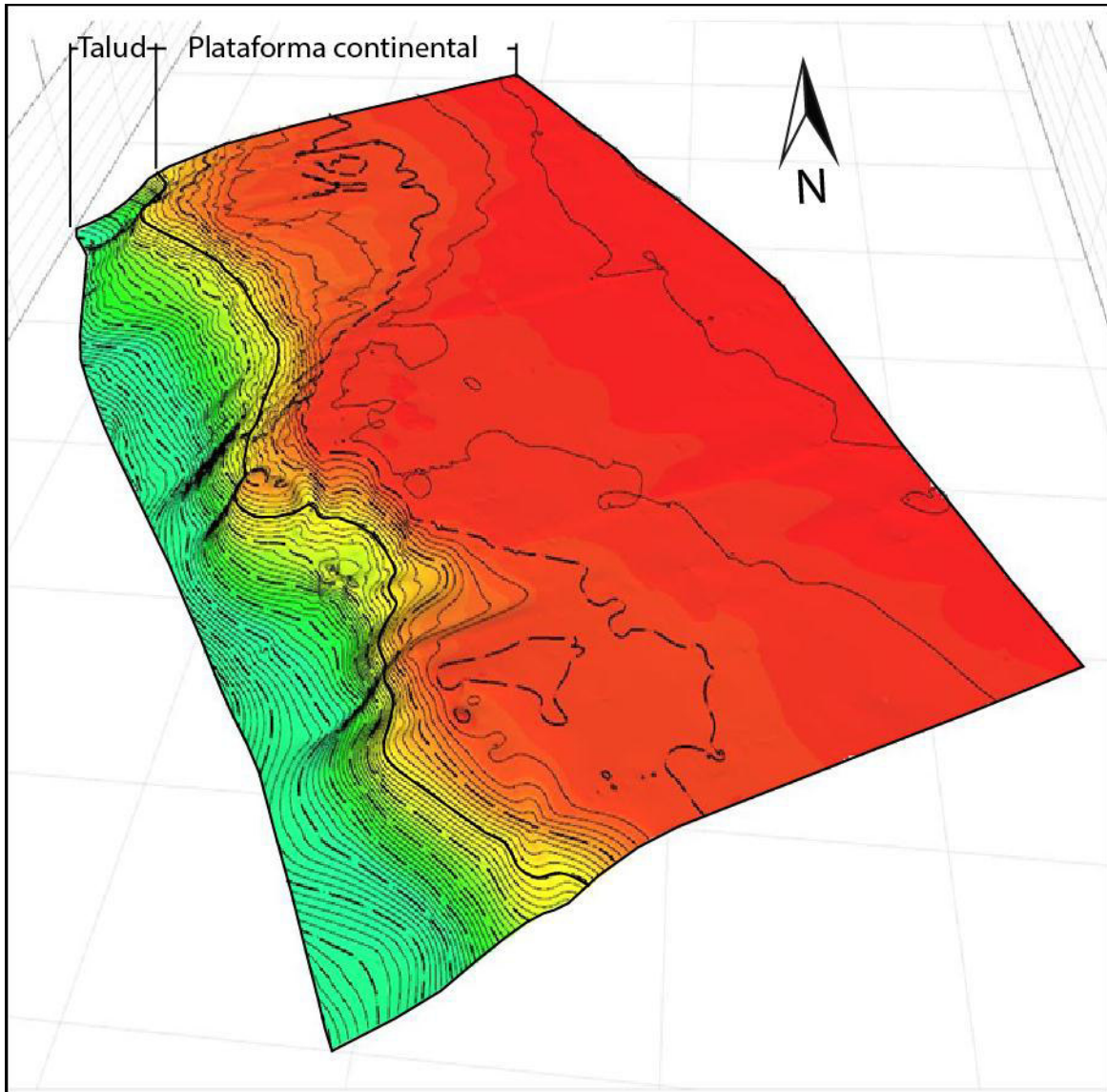


Figura II-8. Mapa del fondo marino presentando la plataforma continental y talud de la zona de estudio. Fuente: propia.

2.4.4 Cordillera de la Costa

Es un elemento estructural compuesto de rocas de edad Precámbrica y Paleozoica, se desplaza de forma paralela a sub paralela a la línea de costa de Perú (figura II-5). Hacia el sur se extiende desde Pisco hasta Tacna asimismo representado por rocas metamórficas de edad Precámbrica y metasedimentos de edad Paleozoica (Timoteo D. 2013). A partir de la península de Paracas, hacía el norte, la Cordillera de la Costa comienza a desarrollarse mar a dentro, identificado por la interpretación sísmica, datos gravimétricos y magnetométricos (Jones 1981; Thornburg & Kulm 1981). A 70 Km. al sur de Lima, aparece como una isla como la "Isla las Hormigas de Afuera", donde aflora rocas metamórficas de edad Precámbrica-Paleozoica (Romero D. 2013). A través de los pozos exploratorios, Ballena 1X, Delfín 1X y Morsa 1X, se tienen evidencias de rocas metamórficas demostrando la continuidad de la Cordillera de la Costa en la zona offshore. Su topografía bajo el agua es variable y ha sido desplazada por movimientos tectónicos dando un aspecto discontinuo. Finalmente aflora en los Cerros Amotape, la Silla de Paita, los cerros Illescas, la isla Lobos de Tierra y Lobos de Afuera, compuesto de rocas metamórficas de edad Paleozoico inferior.

Esta estructura es muy importante en términos de hidrocarburos ya que en algunos casos la Cordillera de la Costa actúa como un límite de las cuencas sedimentarias, tales como en el caso de las cuencas Salaverry y Trujillo.

2.4.5 Franja Costera

Esta unidad geomorfológica se desarrolla a manera de una faja paralela a la costa desde el nivel del mar una altitud aproximada de 200 m y presenta notables ensanchamientos en las proporciones correspondientes a los valles. Por el oeste está limitada por pequeñas escarpas que bordean el litoral y hacia el este por las cadenas de cerros bajos de los primeros contrafuertes andinos. Tiene una superficie más o menos llana, en la que destacan algunos cerros y colinas redondeadas. Esta franja costera está constituida por terrazas aluviales y marinas, abanicos aluviales, dunas y mantos de arena.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

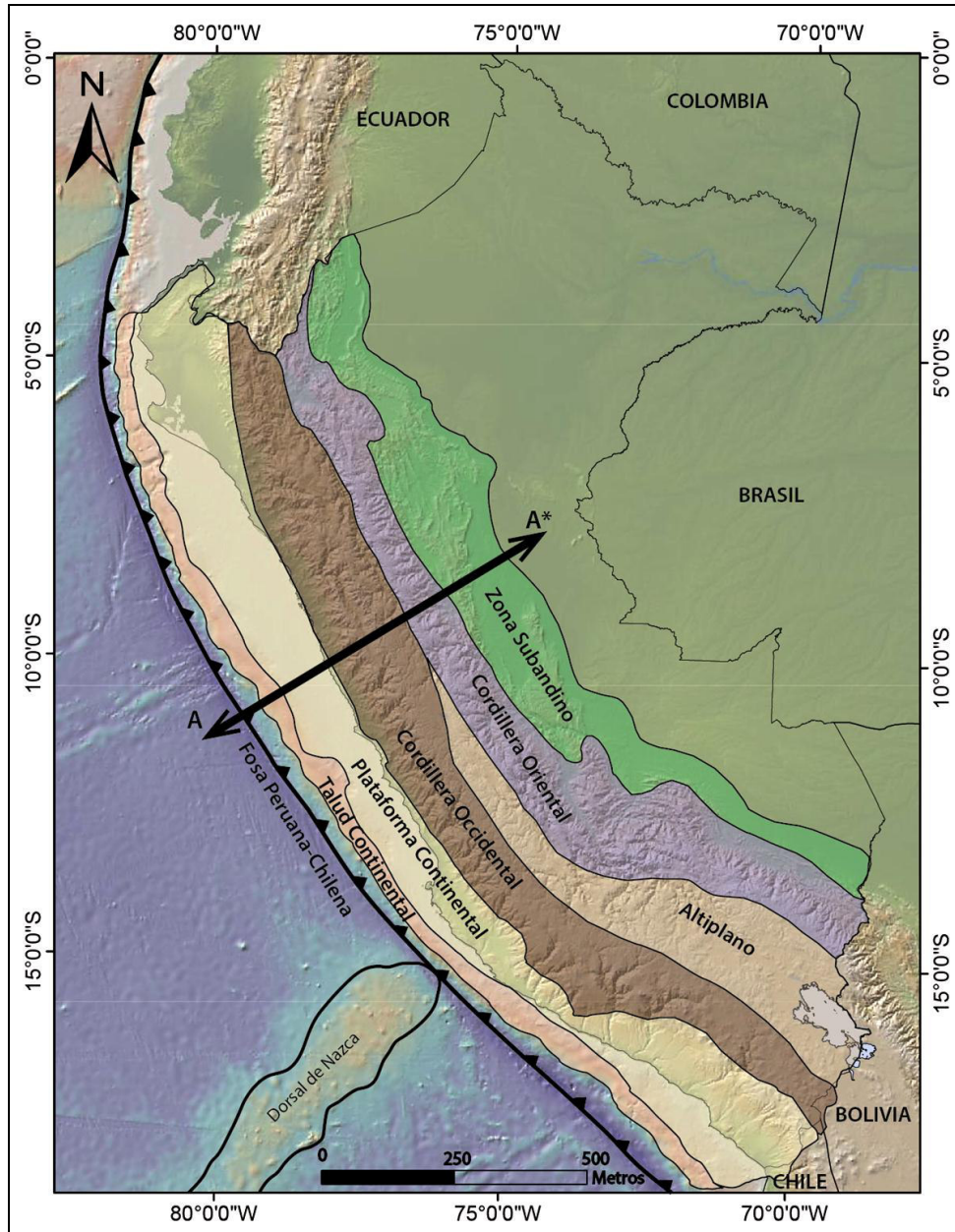


Figura II-9. Unidades morfoestructurales de los Andes del Perú. Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

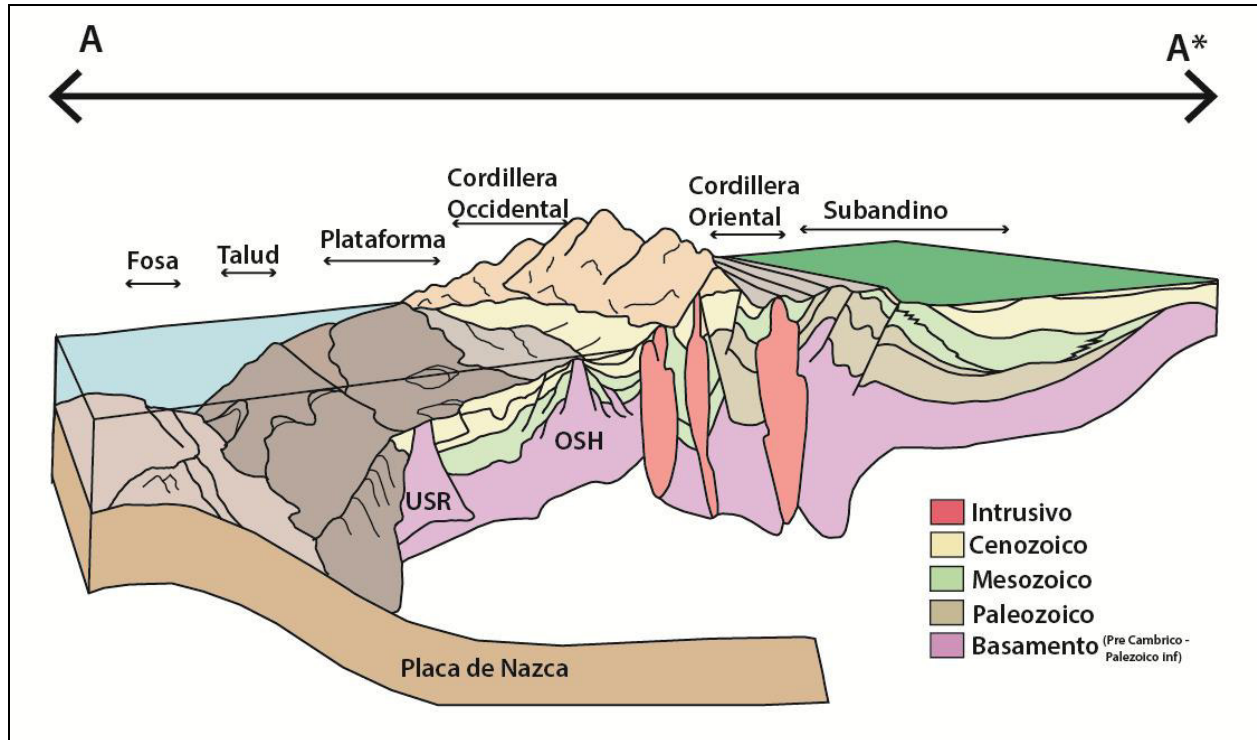


Figura II-10. Block diagrama del margen continental de los Andes del Perú central que muestra los elementos morfoestructurales, que se extiende desde la placa oceánica hasta el Subandino (Modificado de Llerena C.2014).

2.4 CONTEXTO GEODINÁMICO DE LAS CUENCAS ANTEARCO

La evolución geodinámica del margen continental del Perú esta englobada dentro del régimen de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana que se extiende desde la costa norte-centro de Chile y la totalidad del litoral de Perú, Ecuador y Colombia. Este régimen de subducción desarrollo las cuencas de Antearco, las cuales se encuentran limitadas hacia el oeste por la fosa Perú-chile y al este por los arcos volcánicos.

El régimen de convergencia registra actividad desde al menos el Jurásico medio a superior evidenciado por un arco magmático producto de una zona de subducción activa (Jaillard et al, 1994; Ramos 2009) y actualmente presenta una velocidad aproximada de 8 cm/año (Norabuena et al., 1998). Asimismo, la placa de Nazca subduce por debajo del borde Oeste de Sudamérica de dos modos diferentes. En las regiones Norte-Centro, se caracteriza por una subducción horizontal que se inicia con un ángulo del orden de 25°-30° hasta alcanzar una profundidad de 120 km en promedio a partir de la cual, la placa se desplazaría de manera horizontal. Como consecuencia en esta región hay ausencia de actividad volcánica. En la región Sur, la placa de Nazca subduce con un ángulo de 30° de manera continua hasta una profundidad de 250 km como consecuencia en esta región hay presencia de actividad volcánica. Entre ambos modos de subducción, se produciría la contorsión de la placa (Bernal & Tavera 2002).

Hay varios factores que afectan los procesos geológicos a lo largo del margen continental, sin embargo, los principales factores que controlan el desarrollo de la subducción son: la longitud del plano de Benioff, la dirección y velocidad relativa de convergencia, el ángulo de buzamiento de la corteza de subducción, dirección del flujo de manto y variación de la velocidad del roll-back (Pilger, 1983; Pardo-Casas and Molnar, 1987; Somoza, 1998; Ramos 2009), como también el coeficiente de fricción en la fosa de subducción es un primer parámetro para transmitir deformación en la placa superior. La fricción está directamente relacionada con la cantidad de sedimentos en la fosa (Ramos 2010).

Teniendo en cuenta la cinemática que hay entre la corteza inferior y superior en el sistema de Subducción Andina, según Daly (1989) puede ser expresado por la relación entre el roll-back de la línea de fosa de la subducción y el movimiento de la placa superior acercándose o alejándose de la línea de la fosa dentro del sistema de referencia de la astenosfera (Dewey 1986).

El cambio en el régimen tectónico es claramente demostrado por el dominio de las fallas extensionales de la subducción Andina desde el Jurásico medio hasta el Cretácico inferior (Roll-back <0) (figura II-11a), incluyendo períodos de no o despreciable compresión en el Aptiano-Albiano (Rolla-back = 0) (figura II-

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

11b) y subsecuente compresión en el Cretácico superior (Roll-back > 0) (figura II-11c) asociado con los cambios en el movimiento absoluto de Sudamérica (Ramos 1999). Estos cambios en la velocidad del Roll-Back caracterizan las cuencas de antearco de estar sujeto a importantes cambios en el régimen tectónico asociado a magmatismo, deformación, emersión y erosión de la placa superior (Steinmann, 1929; Megard, 1984; Azalgara, 1993; Jaillard y Soler, 1994).

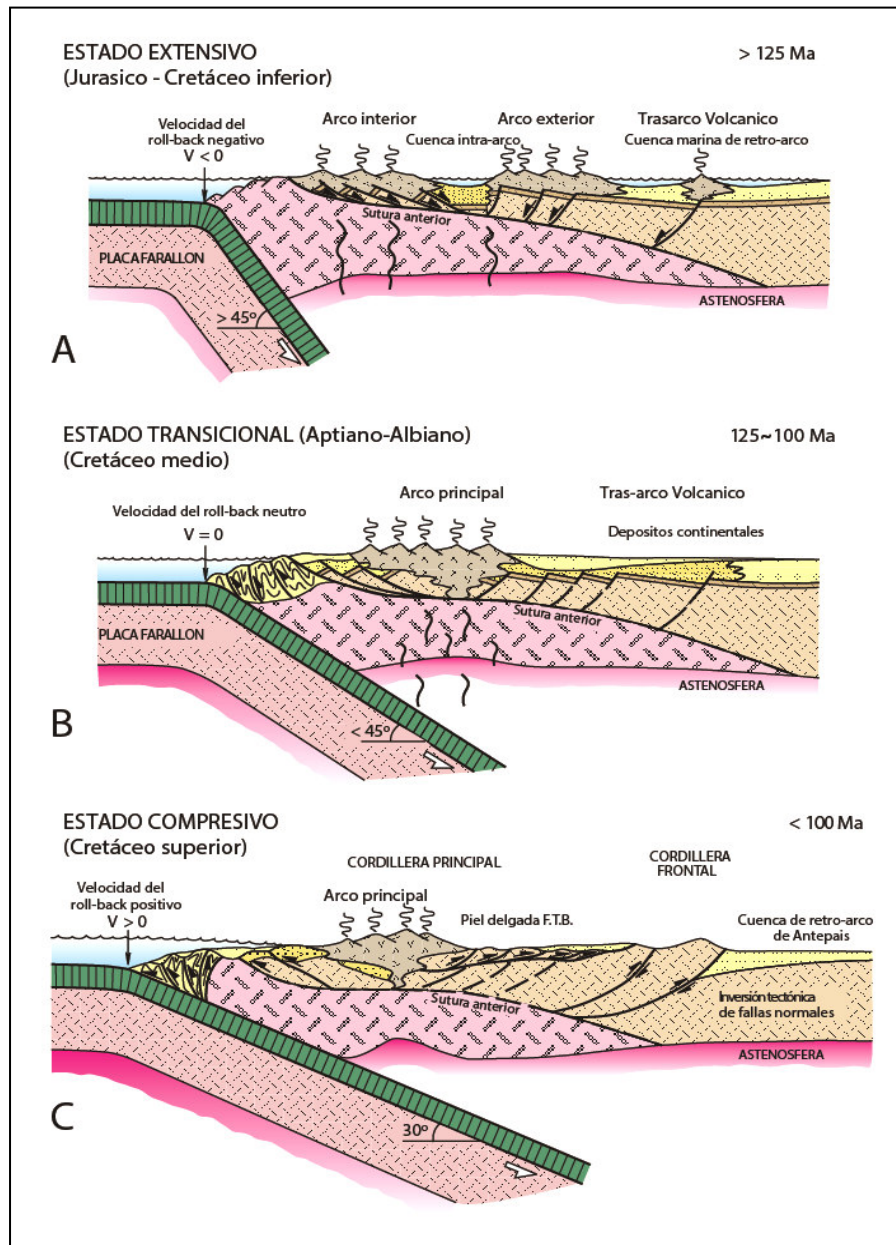


Figura II-11. Tres diferentes etapas de la subducción durante el Mesozoico - Cenozoico, relacionado a la velocidad de Roll-back y a los procesos generados (modificado de Ramos 2009).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Basados en la reconstrucción de anomalías del fondo oceánico Somoza y Ghidella (2005), realizaron una reconstrucción que describe la cinemática de convergencia. La historia de la convergencia en el margen occidental de América del Sur puede dividirse en tres etapas que aproximadamente corresponden al Cenozoico Tardío, Eoceno medio-Oligoceno, y Cretácico Tardío-Paleoceno.

Etapa de 26 - 0 Ma: Describe una convergencia ligeramente oblicua (figura II-12a) en localidades del margen Andino. El inicio de la etapa se caracteriza por un fuerte incremento en la velocidad de convergencia, cuando esta alcanzó los valores más altos conocidos para el Cenozoico, para luego decrecer en los últimos 10 millones de años. Mediciones cinemáticas en base al Sistema de Posicionamiento Global (GPS) indican que la velocidad de convergencia continúa decreciendo en el presente (Norabuena et al. 1998).

Etapa 47 - 28 Ma: Describe una dirección de convergencia más oblicua que la correspondiente a la etapa más joven descrita arriba (figura II-12b); Esta etapa se caracteriza por una velocidad media de convergencia relativamente estable con magnitudes similares a las del último intervalo de la etapa más joven. El final de la etapa coincide con la ruptura de la placa Farallón dando origen a las placas de Nazca y Cocos (Herron y Heitzler 1967).

Etapa 72 - 47 Ma: Las reconstrucciones sugieren que esta etapa estuvo dominada por cambios importantes en la zona de subducción. Las reconstrucciones predicen que durante esta etapa ocurrieron las velocidades de convergencia Farallón- Sudamérica más bajas de la historia presentada en este trabajo. No obstante, aparentemente hubo un incremento gradual de la velocidad durante la etapa, hasta alcanzar el valor relativamente constante que caracteriza a la etapa inmediatamente más joven, tomado de Lajo A. (2014)

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

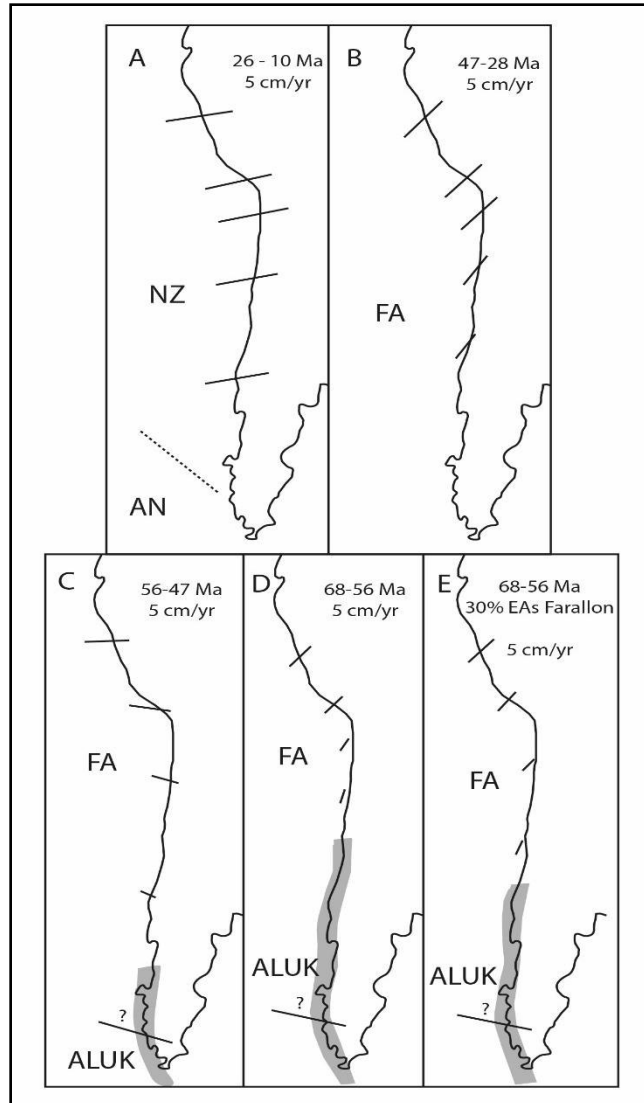


Figura II-12. Dirección de convergencia entre las placas de Farallón (FA) y América del Sur para algunas de las etapas e intervalos del Cenozoico discutidos por Somoza & Ghidella 2005.

CAPÍTULO III. MARCO GEOLOGICO DE LAS CUENCAS TRUJILLO Y SALAVERRY

3.1 ESTRATIGRAFIA REGIONAL

La estratigrafía de la zona de estudio es establecida a partir de la data de los pozos Ballena 1X (figura III-4), Delfín 1X (figura III-5) y Morsa 1X (figura III-6) para la parte de offshore y de la extrapolación de los afloramientos a lo largo de la costa presentándose en las líneas sísmicas como remanentes preservados debajo de la discordancia pre-terciaria. El relleno sedimentario para la zona de estudio es desde el Jurásico hasta el Cuaternario, en las partes más profundas se calcula que esta sección alcanza más de 6000 metros de espesor. Para el resumen estratigráfico se ha tomado como referencia la geología de la costa entre Puémape y Chimbote. A continuación, se describen las principales unidades estratigráficas.

3.1.1. Precámbrico - Paleozoico

En el área de estudio no se conocen afloramientos de rocas Precámbricas o Paleozoicas, pero en un ámbito mayor si se han reportado, en la Isla Hormigas de Afuera (ubicación en figura III-2), corresponden a gneis de hiperstena – biotita de grado metamórfico alto cuya datación por el método U/Pb sobre zircones indica una edad Precámbrica - Paleozoica (figura III-1a) (Romero D. 2013). Por lo que correlacionando con los gneis de cuarzo y biotita cortados por el pozo exploratorio Ballena 1x (figura III-1b) y micaesquistos de los pozos Delfín 1X y Morsa 1X nos permiten interpretar la continuidad de un basamento Precámbrico-Paleozoico inferior.



Figura III-1. a) Vista de la Isla Hormigas de Afuera (Romero D. 2013). b) Foto de muestra del pozo Ballena 1X donde se observa una roca gneis con metamorfismo bandeado con textura ocular (CoreLab 2012)



Figura III-2. Ubicación de la zona de estudio y la Isla las Hormigas de Afuera. Fuente: propia.

3.1.2 Mesozoico

Se encuentran secuencias con más de 2000 metros de espesor, en la franja costera.

3.1.2.1 Jurásico

El Jurásico es reconocido en la franja costera de norte a sur (figura III-2). Está representado por la Fm. Oyotun del Jurásico medio a superior compuesto en la parte inferior por cuarcitas, areniscas carbonatadas con limolitas y en la parte superior lavas de composición andesítica y dacítica con niveles de flujos piroclásticos (Jaimes F. et. al. 2011). También se encuentra la Fm. Chicama cuya secuencia sedimentaria es de lutitas negras (foto 1) marrones con intercalaciones de arenas, limolitas y calizas (Cossio. 1967).

Para el sector offshore la secuencia Jurásica es interpretada con ayuda de interpolación de las unidades que se encuentran en la costa, siendo limitados por el USR, prolongación Cordillera de la Costa en offshore.

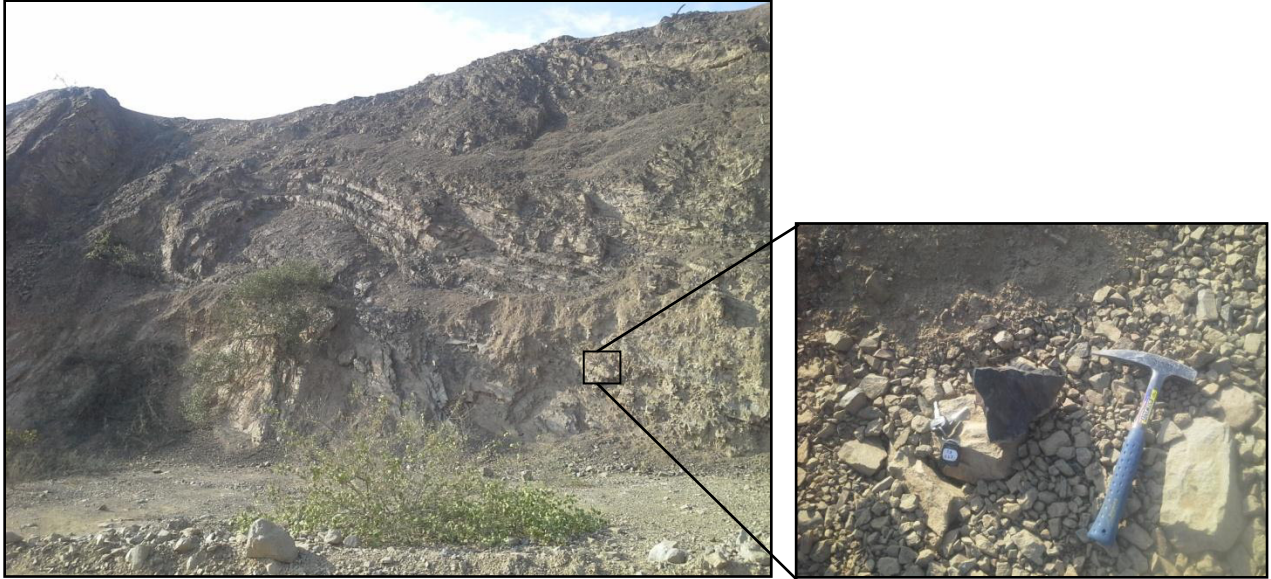


Foto 1) Afloramiento de las secuencias de la Fm. Chicama en la localidad de Simbal. Fuente: propia.

3.1.2.2 Cretácico

Las secuencias cretácicas son reconocidas solo en la zona costera (figura III-3). Durante el Cretácico inferior los sedimentos silicoclásticos del Grupo Goyllarisquizga (Fm. Santa - Carhuaz) han sido reconocidos al norte y sur de la zona de estudio. Posterior a estos se tiene el Gpo. Casma cuya secuencia es una serie marina volcánico-sedimentaria bien estratificada, de amplia distribución en la franja costera. Litológicamente consiste de volcánicos andesíticos y dacíticos de color oscuro (foto 2) que frecuentemente presentan estructuras en almohadillas (Cossio. 1967). Su edad ha sido asignada desde el Albiano hasta el Cenomaniano inferior, en tanto que su espesor máximo se estima en 900 m.

Las secuencias del Campaniano - Maastrichtiano, compuesto por areniscas, conglomerados y arcillas (Repsol. 1999) que son correlacionables con la formación Redondo y Monte Grande, han sido atravesadas por el Pozo Lobos 1X (figura III-7) que se encuentra al norte de la zona de estudio por lo cual se infiere que se encuentra en la parte más profunda de este parte.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

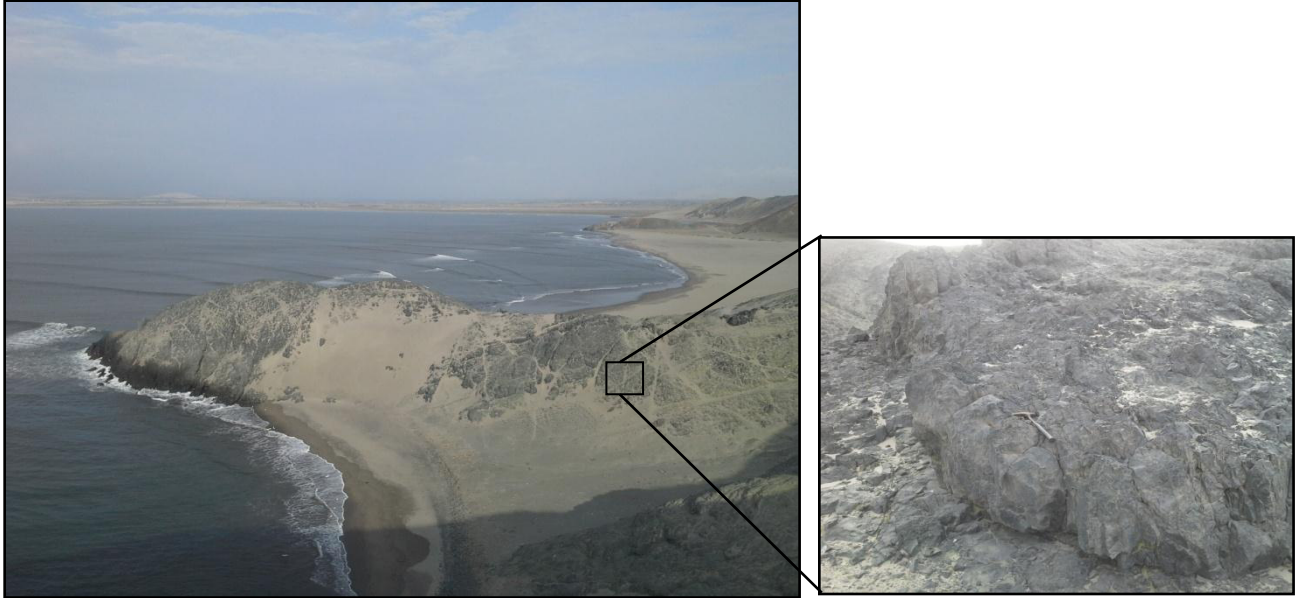


Foto 2. Afloramiento del Grupo Casma en el Puerto Morín. Fuente: propia.



Foto 3. Afloramiento del Grupo Casma en la isla Guañape. Fuente: propia.

3.1.3 Cenozoico

Estas secuencias tienen un espesor mayor a los 6000 m en las zonas más profundas en offshore.

3.1.3.1 Paleoceno

El Paleoceno fue reportado en el pozo Lobos 1X (figura III-7) por lo cual ha sido extrapolado hasta la zona de estudio, esta secuencia consiste de un paquete de conglomerados de diferentes litologías, así como pequeñas intercalaciones de arcillas (Repsol 1999).

3.1.3.2 Eoceno

El Eoceno en el sector de costa afuera ha sido atravesado por los pozos Delfín 1X, Ballena 1X y Morsa 1X. Presenta ciertas variaciones en su composición litológica, con relación a flujos turbidíticos de gran espesor y se encuentra presente casi solo en la parte occidental.

El Eoceno inferior está conformado por areniscas con abundantes fragmentos e intercalaciones de lutitas y limolitas. Posteriormente el Eoceno medio presenta areniscas con metafragmentos y grandes secuencias de caliza intercalado con lutitas y limolitas. Finalmente, las secuencias del Eoceno superior están compuesta de arenisca cuarzosa de grano medio con intercalaciones de conglomerados y se secuencias de lutitas intercaladas con calizas y limolitas (Parsep. 2001).

El Gpo. Calipuy se encuentra presente en el extremo este de la costa, sobreyaciendo en discordancia a las secuencias cretácicas, litológicamente está compuesto por derrames dacíticos alterado de color gris y rojizo (foto 4) estratificados en bancos gruesos y medianos intercalados con lutitas arenosas (Cossio. 1967). Esta secuencia ha sido datada a través de K-Ar por Wilson (1975) obteniendo una edad de 52.5 ± 2.3 Ma en la parte inferior y Farrar & Noble (1976) obteniendo una edad de 18 ± 1.2 Ma en la parte superior (Pajuelo D. 2015).



Foto 4. Afloramiento del Grupo Calipuy en la localidad de Paranday. Fuente: propia.

3.1.3.3 Mioceno

Las secuencias del Mioceno se encuentran en toda la zona de estudio y han sido perforados y reconocidos en los pozos Delfín 1X, Ballena 1X y Morsa 1X.

El Mioceno inferior ha sido reconocido en el pozo Ballena 1X en la parte inferior, está compuesta de arenisca intercalada con calizas finas y lutitas intercaladas con delgadas capas de caliza dolomitizada. En la parte superior, se encuentra presente a través de capas de calizas con intercalación de limolitas, lutitas calcáreas y areniscas (figura III-9). El Mioceno medio, en la parte inferior, consiste de calizas con intercalación de limolitas y en la parte superior lutitas calcáreas con delgadas capas de areniscas. El Mioceno superior corresponde a una secuencia de areniscas de grano fino a grueso con intercalación de calizas y limolitas (Parsep. 2001).

3.1.3.4 Plioceno

Las secuencias del Plioceno no han sido perforadas por los pozos Delfín 1X, Ballena 1X y Morsa 1X, pero sí por el pozo ODP 684 en la parte occidental. En el pozo ODP 684 se ha identificado 50 metros de sedimentos poco consolidados de lutitas y arcillas con algunas intercalaciones de areniscas finas a medias (ODP. 1986). También están identificadas a través de las secciones sísmicas interpretadas, donde presentan una amplia continuidad lateral.

3.1.3.5 Depósitos Cuaternarios

En la franja costera, se encuentran depósitos Cuaternarios como los eólicos constituidos por arenas de grano fino a medio, que ocurren como mantos de arenas de grosor variable. También se encuentran depósitos marinos que son fajas angostas de arenas de playas. Estos son depósitos recientes que cubren grandes sectores de la zona estudiada (Parsep. 2001).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

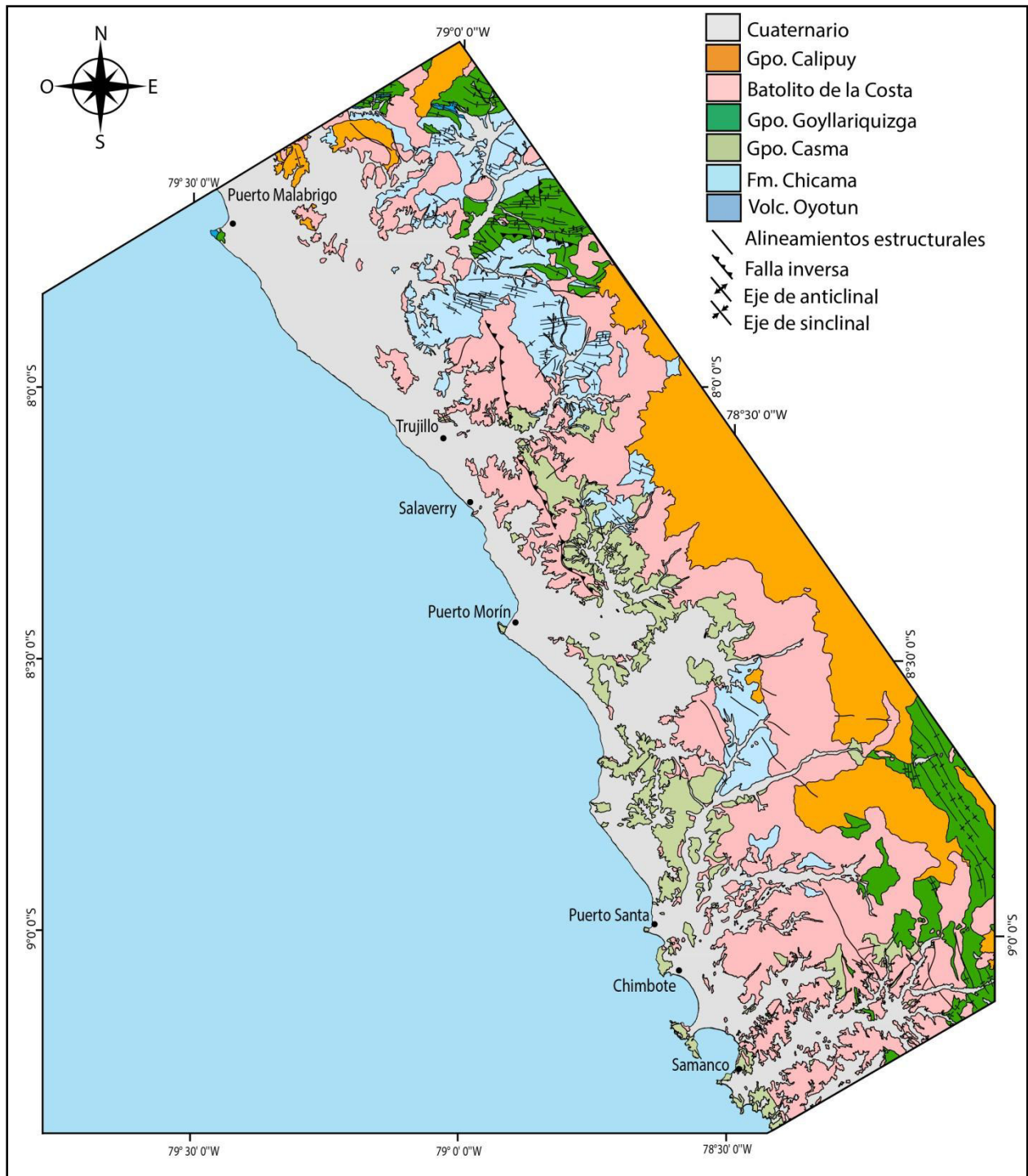


Figura III-3. Mapa con la geología de la costa en la zona de estudio, basado en los trabajos de INGEMMET, cuadrángulos de Puémape (16-d), Chocope (16-e), Otuzco (16-f), Trujillo (17-e), Salaverry (17-f), Santiago de Chuco (17-g), Santa (18-f), Santa Rosa (18-g), Chimbote (19-f) y Casma (19-g). **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

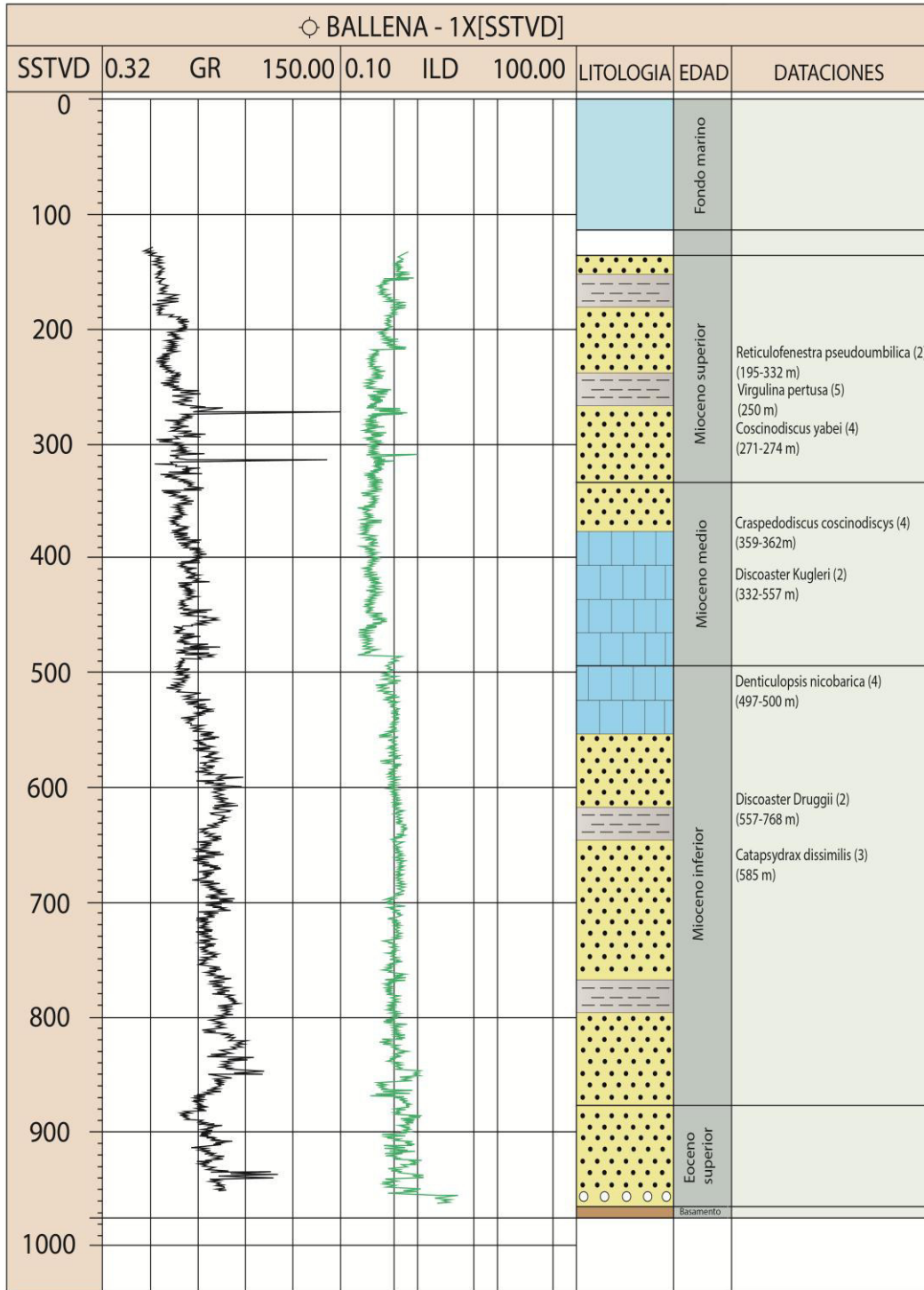


Figura III-4. Columna estratigráfica del pozo Ballena con sus registros eléctricos, modificado de SK Energy (2009) con dataciones de 1) Valdespino (1976), 2) Chanchaya (1992), 3) Okada (1990), 4) Scharader & Cruzado (1990) y 5) LCV (2009).

Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

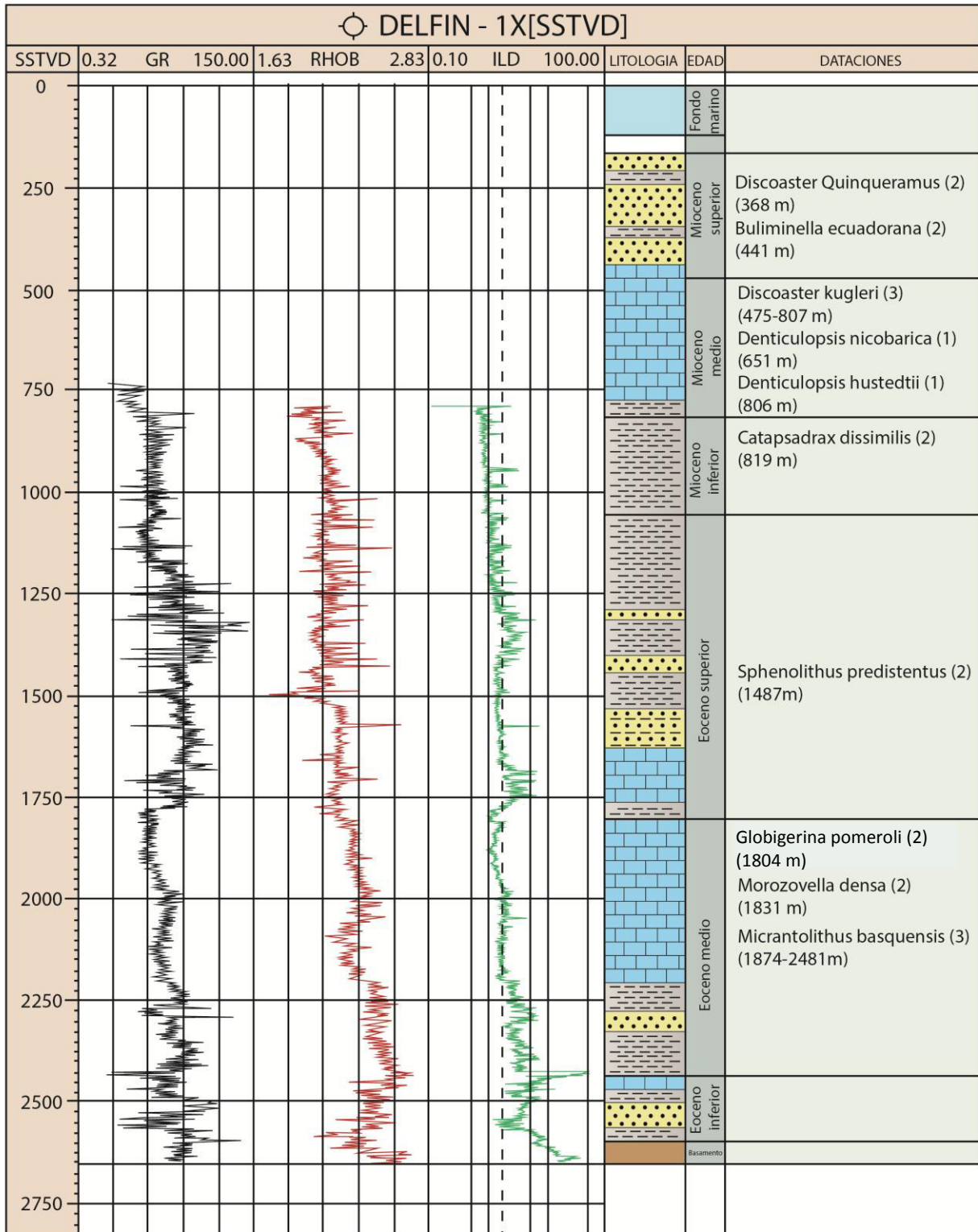


Figura III-5. Columna estratigráfica del pozo Delfín con sus registros eléctricos, modificado de SK Energy (2009) con dataiones de 1) Scharader & Cruzado (1990), 2) Okada (1990) y 3) Canchaya (1992). Fuente: propia.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

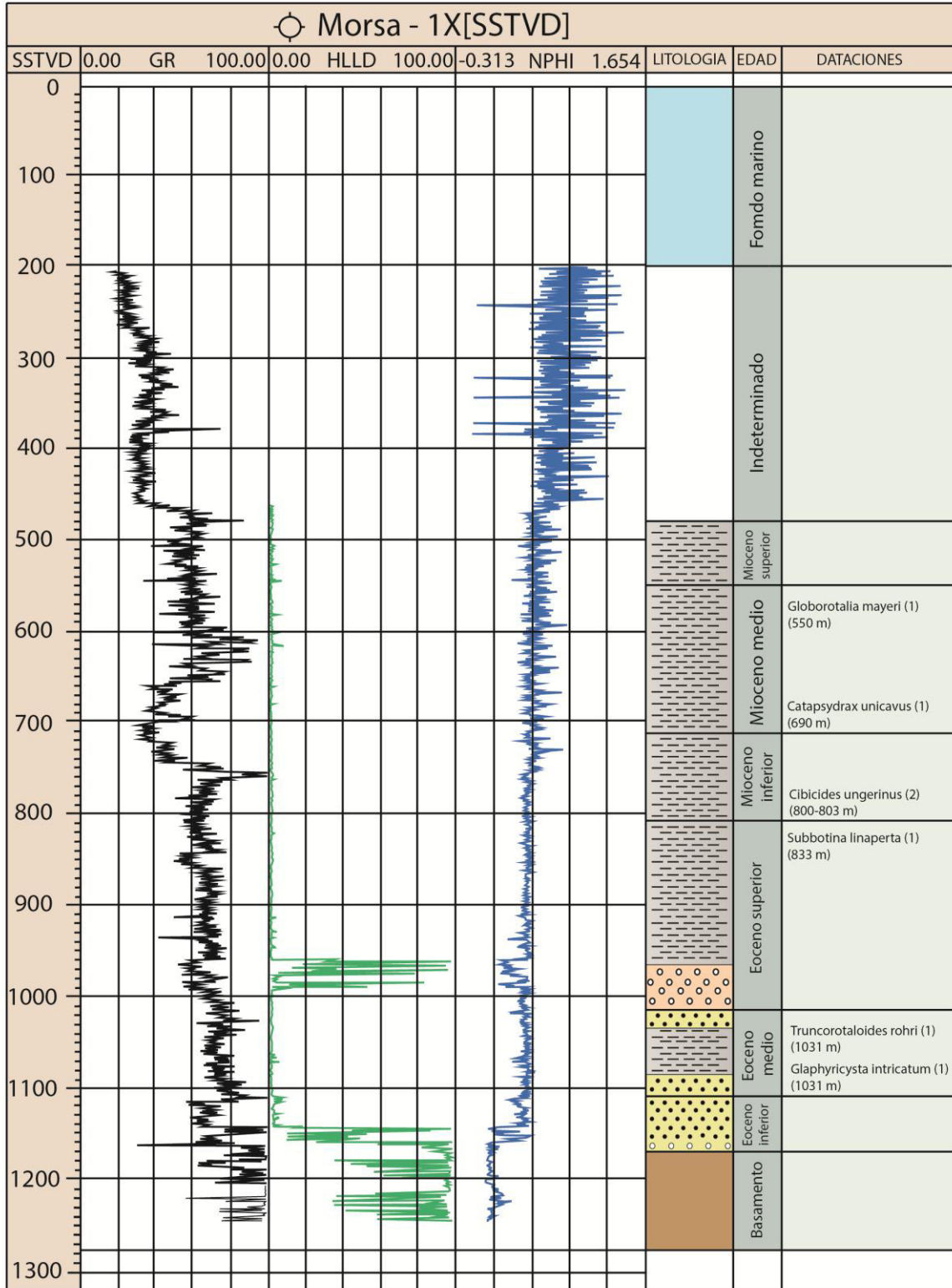


Figura III-6. Columna estratigráfica del pozo Morsa con sus registros eléctricos, modificado de SK Energy (2009) con dataciones de 1) Repsol (2000) y 2) LCV (2009). Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

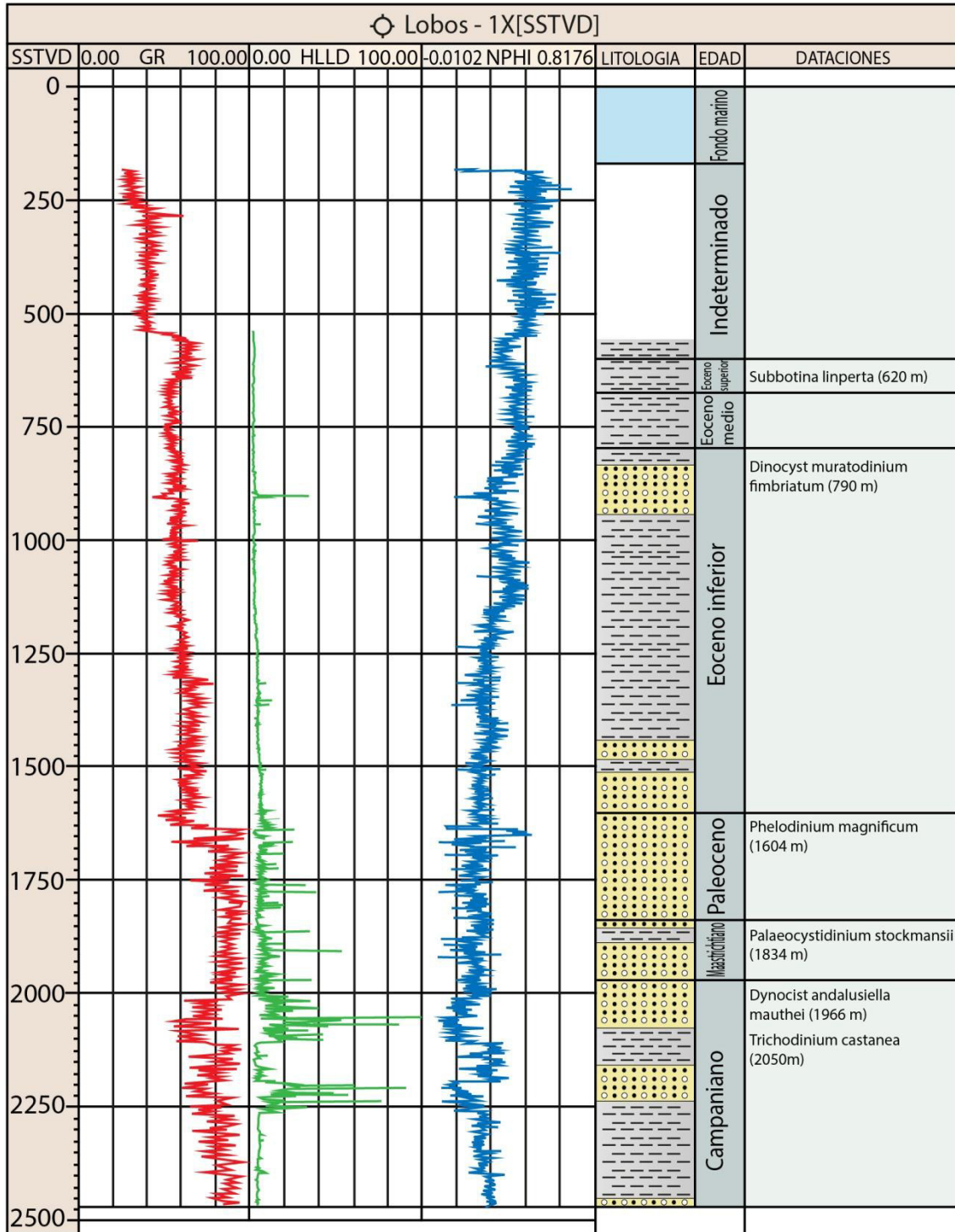


Figura III-7. Columna estratigráfica del pozo Lobos con sus registros eléctricos, modificado de SK Energy (2009) con dataciones de Repsol (2000). Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

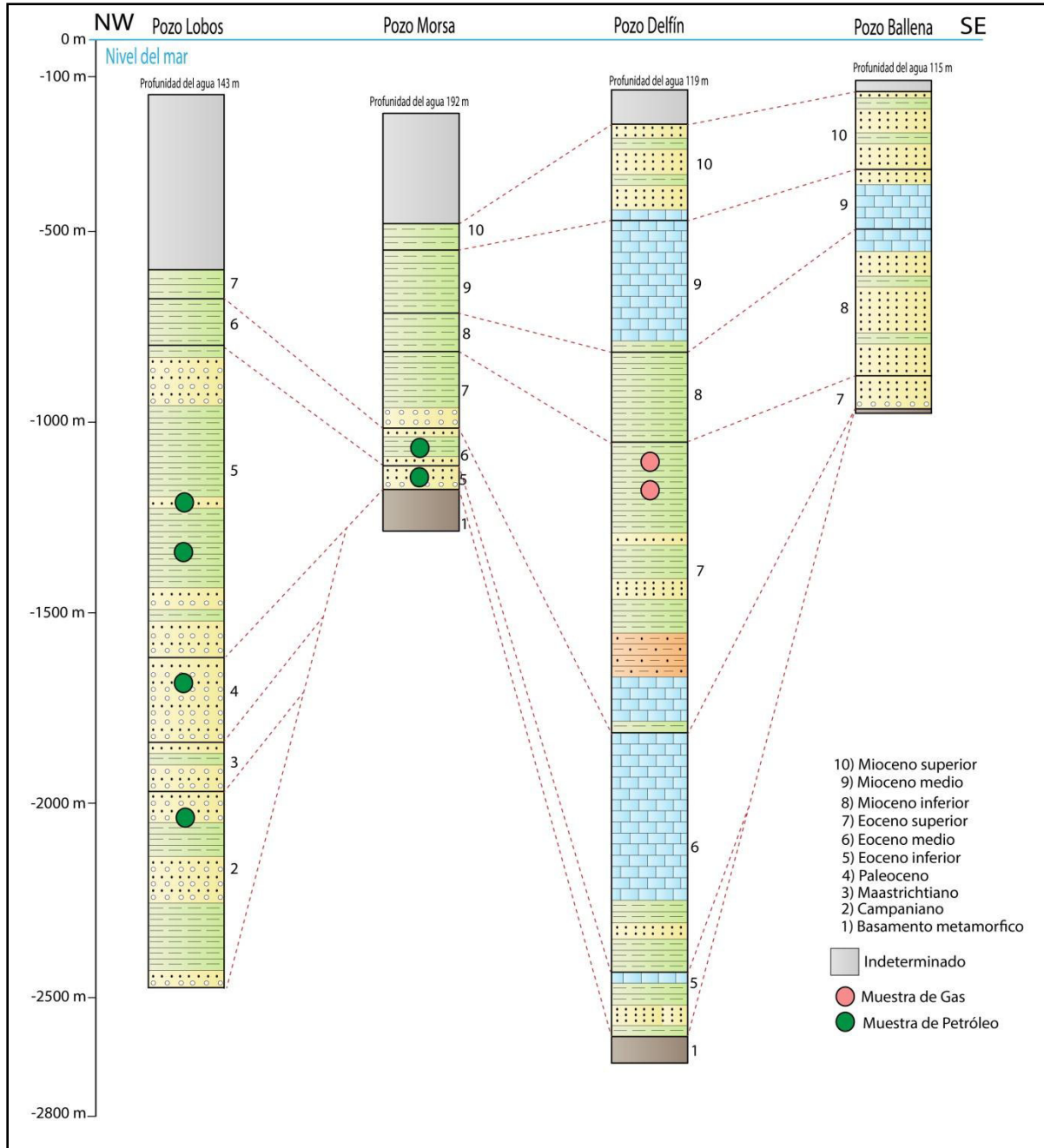


Figura III-8. Correlación estratigráfica entre los pozos Lobos, Morsa, Delfín y Ballena, con referencia del nivel del mar y con evidencias de hidrocarburos. **Fuente:** propia.

3.1.4 ROCAS INTRUSIVAS

Las rocas intrusivas que se encuentran en la franja costera forman el gran “Batolito de la Costa”, que consiste en un gigantesco cuerpo intrusivo de más de 200 km. de longitud y 38 km. de ancho con una orientación de NO-SE (figura III-2), Corresponde a un conjunto de intrusiones cuyas clasificaciones petrológicas varían desde tonalitas, granitos, granodioritas, a dioritas; estos cuerpos intrusivos ocurren en forma de cadenas de cerros prominentes de relieve accidentado (foto 5). La edad de intrusión de este gigantesco cuerpo magmático, ha sido establecido en el intervalo Cretáceo superior – Terciario inferior. Soler (1990) realiza una síntesis de la cronología y distribución espacial de la actividad magmática a lo largo de los Andes centrales y propuso una subdivisión de episodios de emplazamiento en base a las edades radiocronológicas, a través de dataciones realizadas por el método U–Pb, RB-Sr y K-Ar. Soler reconoce 3 períodos importantes de actividad magmática en los Andes Centrales. Los Intrusivos entre 105 y 90 Ma forman parte de los plutones ubicados en el extremo oeste del Batolito de la Costa, estos intrusivos tienen composiciones que van de gabros, tonalitas, granodioritas hasta monzogranitos. Los intrusivos entre 90 y 70 Ma, corresponden a los plutones ubicados en la parte centro–occidental de los afloramientos del Batolito de la Costa. Finalmente, la etapa de las intrusiones entre 70 y 60 Ma, corresponde a los mayores volúmenes del Batolito de la Costa. Estos plutones abarcan toda la parte oriental del Batolito de la Costa.



Foto 5. Afloramiento de los cuerpos intrusivos en la zona de estudio. Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

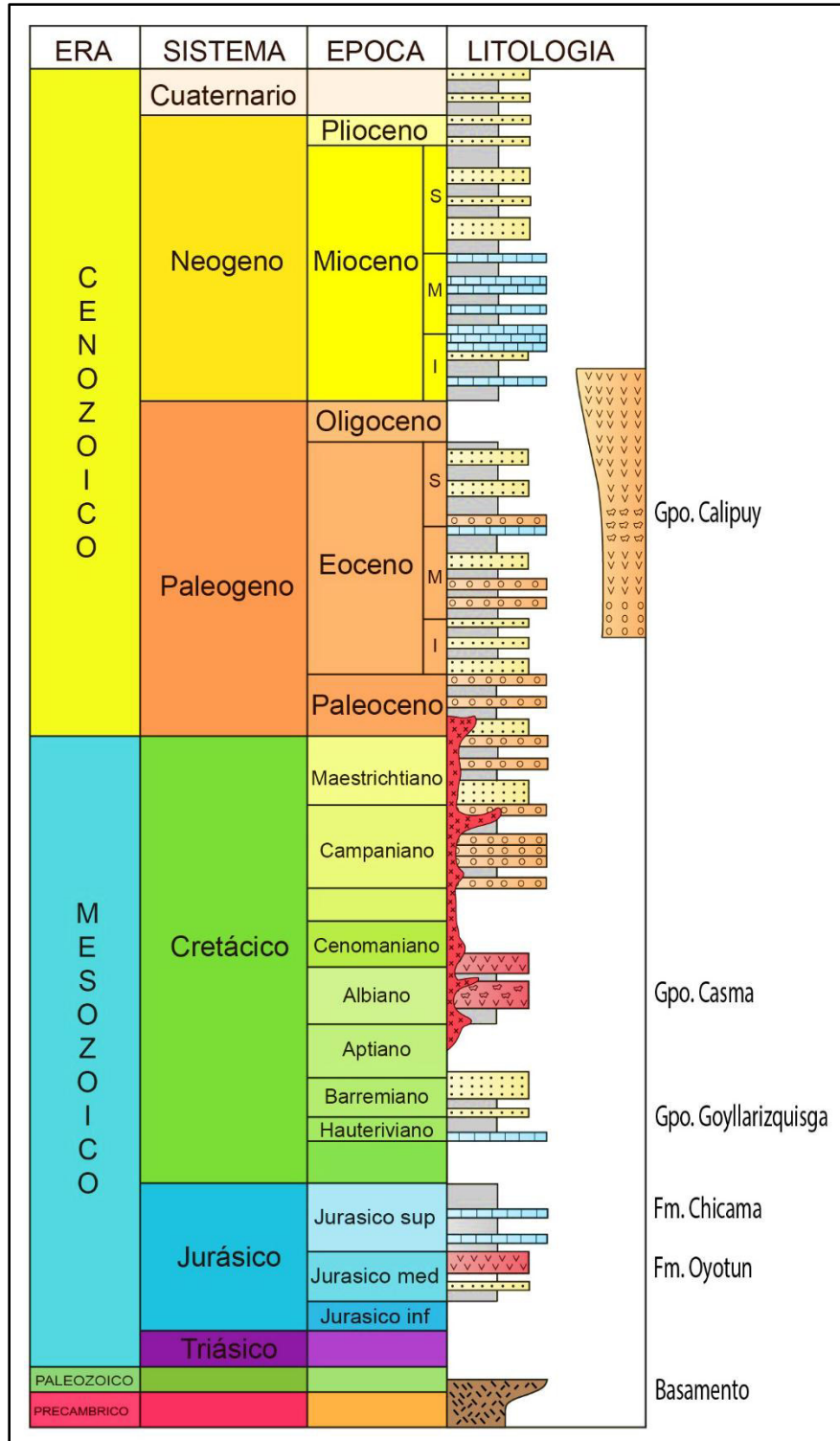


Figura III-9. Columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio, en base de trabajos de Jaimes F. et. al. (2011). Jacay et. al. (2004), Cobbing (1981), Cossio (1967), Repsol (1999) y Parsep (2001). Fuente: propia.

3.2. DIAGRAMA LITOESTRATIGRÁFICO

Con la finalidad de generar un modelo que pueda conllevar a un claro entendimiento de la distribución de las unidades estratigráficas estudiadas mostramos el diagrama litoestratigráfico (figura III-10). Este diagrama se generó a partir de la integración de la información geológica y sísmica (ver más adelante) tanto de offshore, con los pozos perforados (figura III-8), como onshore el cual muestra las principales características de las secuencias sedimentarias del área, así como su respectiva distribución espacial y temporal.

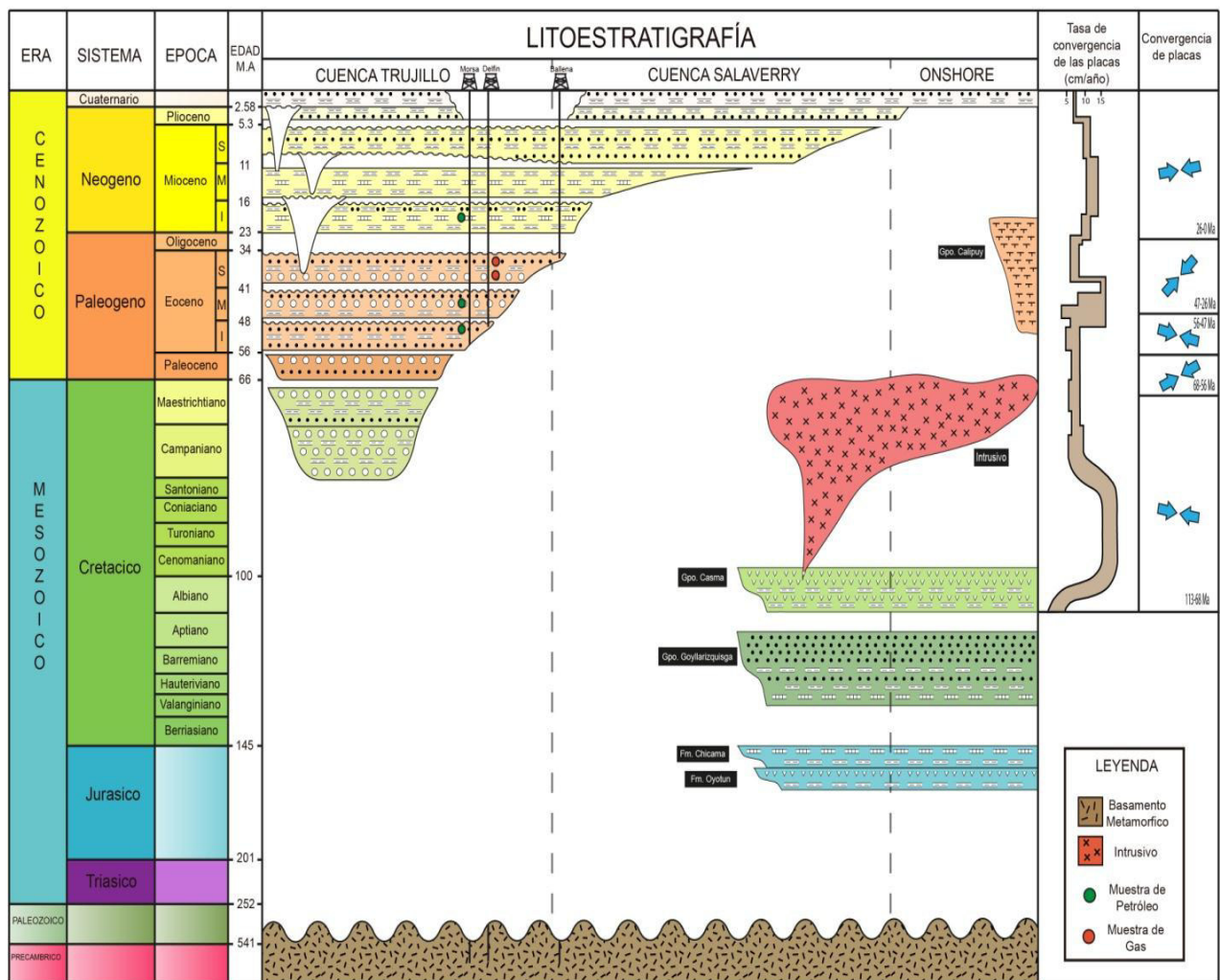


Figura III-10. Diagrama litoestratigráfico, tasa y dirección de convergencia de las placas en el área de estudio, basado en los trabajos de Soler & Bonhomme (1990), Jaillard & Soler (1996), Somoza & Ghidella, (2005) y Lajo A. (2014). **Fuente:** propia

CAPÍTULO IV. RELACIONES TECTONO-SEDIMENTARIAS ENTRE LAS CUENCAS TRUJILLO Y SALAVERRY

4.1 Generalidades

La evolución tectónica de las cuencas de antearco del Perú se encuentra ligado directamente a diferentes procesos geodinámicos que resultan de la convergencia oblicua de la placa oceánica de Nazca y la placa continental Sudamericana que varía su orientación de esfuerzos a lo largo del tiempo. Estas cuencas de antearco están caracterizadas por la interacción de la subducción, el ángulo de subducción, la dirección y velocidad relativa de convergencia, generando discordancias, vulcanismo, fallas, cambios en los períodos de tectonismo, controlando la evolución de las modalidades de sedimentación, así como la morfología y geometría de estas cuencas.

4.2 Evolución Tectono-sedimentaria

Las cuencas de antearco del Perú central a pesar de ser parte de un marco tectónico común, zona de subducción oblicua, presentan notables diferencias a lo largo del margen continental, acompañada de una serie de eventos tectónicos, que dan como resultado estilos estructurales y deformación extensiva como compresiva que es caracterizada en cada evento, para entender estas fases tectónicas se les describe brevemente a continuación:

El basamento sobre el cual se desarrolló la evolución Tectono-sedimentaria corresponde a rocas que se formaron durante el Precámbrico a Paleozoico inferior. De acuerdo a los trabajos de campo e interpretación sísmica, sumados a dataciones de fission track sobre zircones y apatitas (Wipf M. A., 2006 y Llerena C., 2011), se muestra que la Cordillera de la Costa y su prolongación en offshore (Outer Shelf High), estuvo levantado al menos desde el Carbonífero superior-Pérmico, y principalmente desde el Jurásico medio hasta la actualidad, controlando la sedimentación de los depósitos Jurásicos y Cretácicos (Llerena C., 2014). El inicio de la subducción de la Placa Farallón bajo la placa Sudamericana iniciaría aproximadamente en el Jurásico Medio a Superior (Jaillard et. al., 1996) evidenciado por la presencia de arcos magmáticos a lo largo del margen peruano (Atherton et al., 1985). La unidad del Jurásico medio se encuentra descansando probablemente en discordancia sobre el basamento, siendo representado por las secuencias volcano-sedimentarias de la Fm Oyotun, compuesto por andesita basáltica (Reyes L. & Caldas J. 1987), posterior a estas secuencias, se encuentra presente los depósitos de lutitas negras marrones con

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

intercalaciones de arenas limolitas de la Fm. Chicama del Jurásico superior (Cossio A. & Jaen H., 1967) figura IV-1.

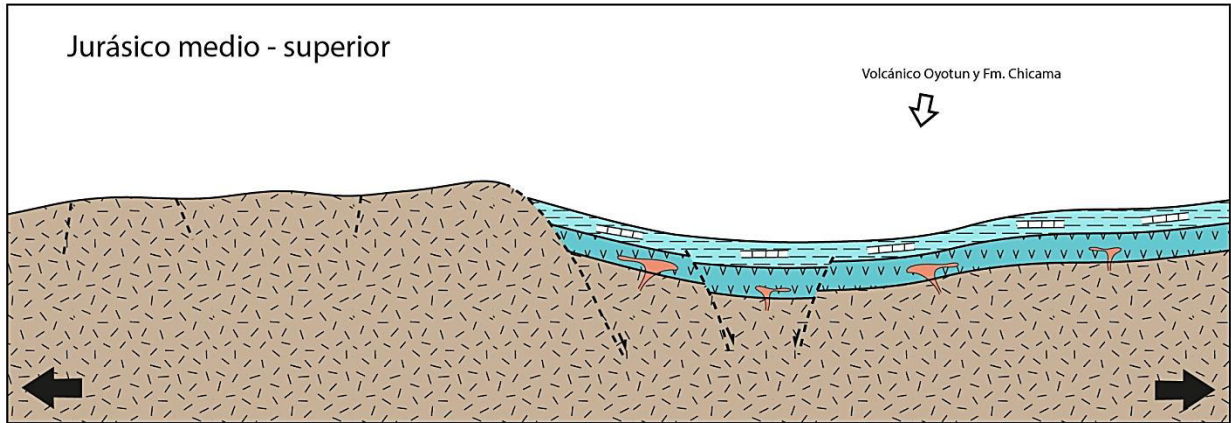


Figura IV-1. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Jurásico medio a superior, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). **Fuente:** propia.

Así mismo en el Hauteriviano se depositaron los sedimentos silicoclásticos principalmente de areniscas cuarzosas intercaladas con lutitas grises y calizas del Grupo Goyllarisquizga (Megar 1978) (figura IV-2). Tanto desde el Jurásico medio hasta el Barremiano estuvieron dominados por un régimen tectónico extensivo (Jaillard et. al., 1994, Ramos. 2009) lo que dio pie, a finales de este período, la formación de la falla normal maestra, con orientación NW-SE subparalelo a la fosa.

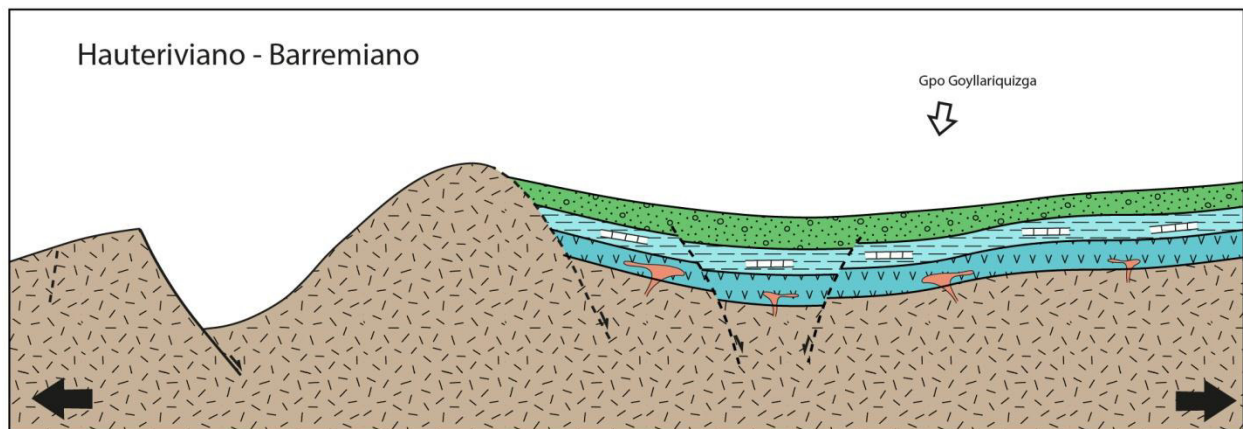


Figura IV-2. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Hauteriviano - Barremiano, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Se interrumpe el régimen tectónico extensivo, la cual deja de ser activa y se manifiesta un régimen tectónico pasivo (Ramos, 2010). A inicios del Albiano se tiene registro del vector de convergencia con componente de esfuerzo ~N110 (Somoza et al. 2005) y la velocidad de subsidencia comenzó a aumentar (Jaillard & Soler, 1996) lo que dio pie la activación de la falla maestra convirtiéndose a una falla de rumbo sinistral producto de la convergencia oblicua de la corteza oceánica bajo la corteza continental (figura IV-3) este hecho controló el desarrollo de significativos depocentros en el lado occidental (Cuenca Trujillo), Estos depocentros fueron rellenados posiblemente por las secuencias provenientes del noroeste, las formaciones Pananga y Muerto (SK, 2012). Simultáneamente existe un intenso vulcanismo en el Perú Central, desarrollándose los primeros desplazamientos del Batolito de la Costa (Soler & Bonhomme, 1990), iniciándose la depositación de secuencias volcanoclásticas, intercalados con lutitas marinas y calizas del Gpo. Casma (Guevara, 1980) en el sector oriental de la zona offshore (figura IV-4).

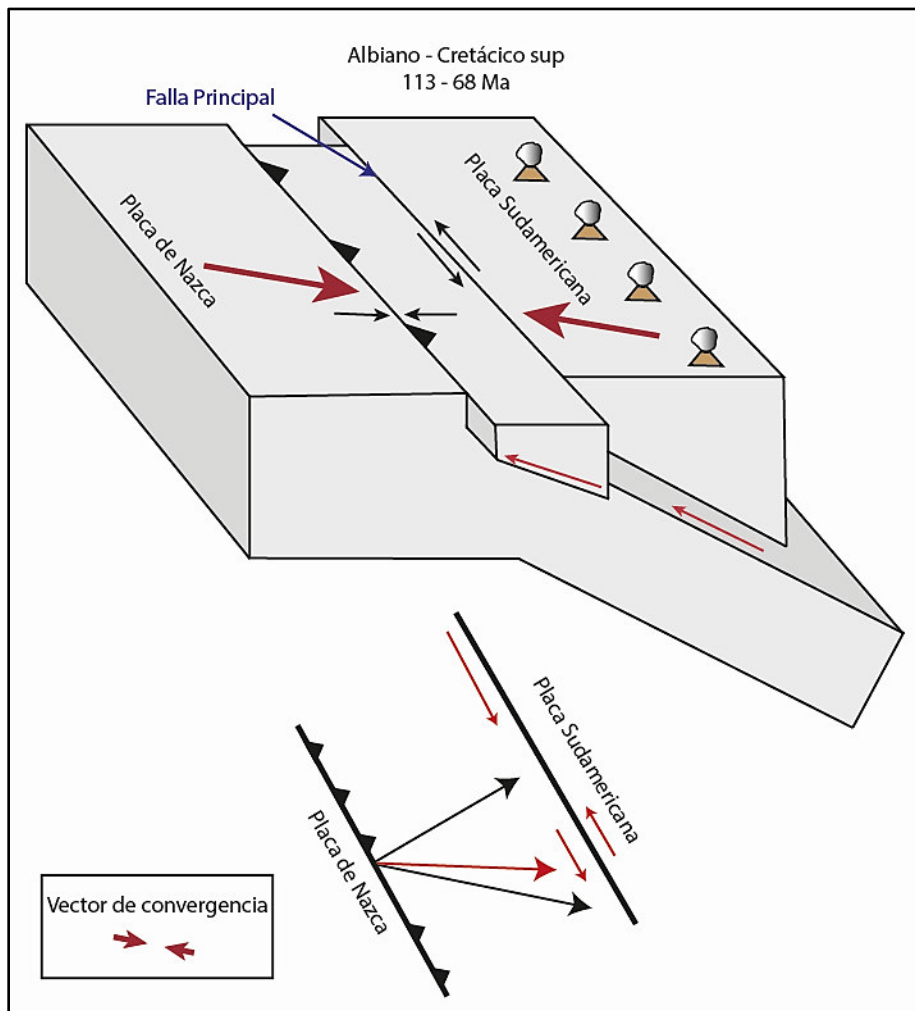


Figura IV-3. Block diagrama del ángulo de subducción del Albiano al Cretácico superior (113-68 Ma) Somoza et al. (2005), con la partición de esfuerzos. **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

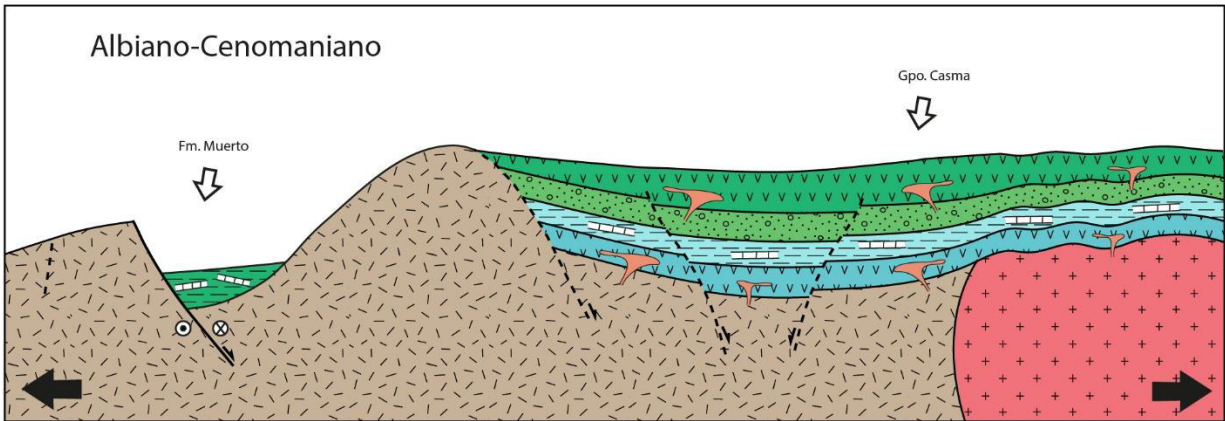


Figura IV-4. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Albiano-Cenomaniano, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). **Fuente:** propia.

La velocidad de subsidencia comenzó a disminuir y ser constante desde el Turoniano hasta el Eoceno medio (Jaillard & Soler, 1996). Las secuencias del Campaniano y Maastrichtiano (figura IV-5) correlacionables con las formaciones Redondo y Monte Grande (informe del pozo Lobos 1X) del noroeste se encuentran acumulados en el sector occidental sobreyaciendo posiblemente a la Fm. Muerto, indicando una erosión o no depositación en la zona de estudio desde Turoniano al Campaniano inferior, al igual que en el noroeste del Perú. En este período se intensificó el emplazamiento de grandes porciones del Batolito de la Costa, en forma de pulsaciones que continúan hasta el Terciario (Soler & Bonhomme, 1990). En el Paleoceno se daría una rotación en el componente de esfuerzo de convergencia ~N50 (Somoza et al. 2005) (figura IV-6) cambiando la cinemática de la falla maestra a dextral reactivando así algunas fallas normales por reacomodo, presentando una tectónica con una deformación insignificante. Esta unidad solo se encuentra depositado en el sector occidental (figura IV-7) ya que probablemente el sector oriental se encontraba levantado.

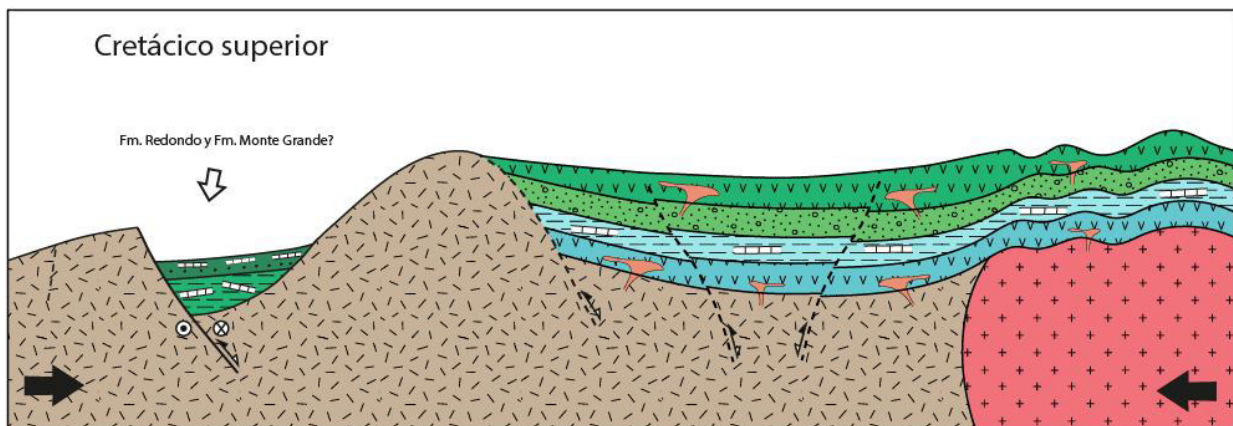


Figura IV-5. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Cretácico superior, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

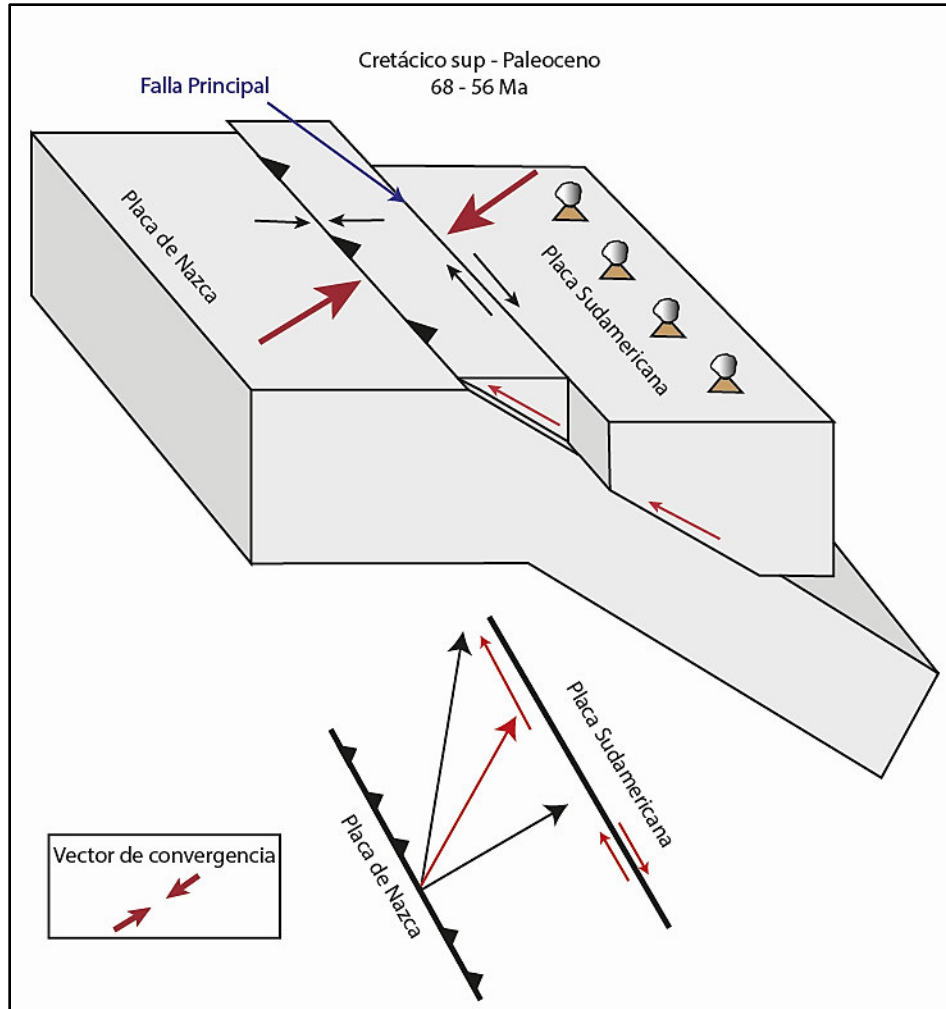


Figura IV-6. Block diagrama del ángulo de subducción del Cretácico superior al Paleoceno (68 - 56 Ma) Somoza et al. (2005) con la partición de esfuerzos. **Fuente:** propia.

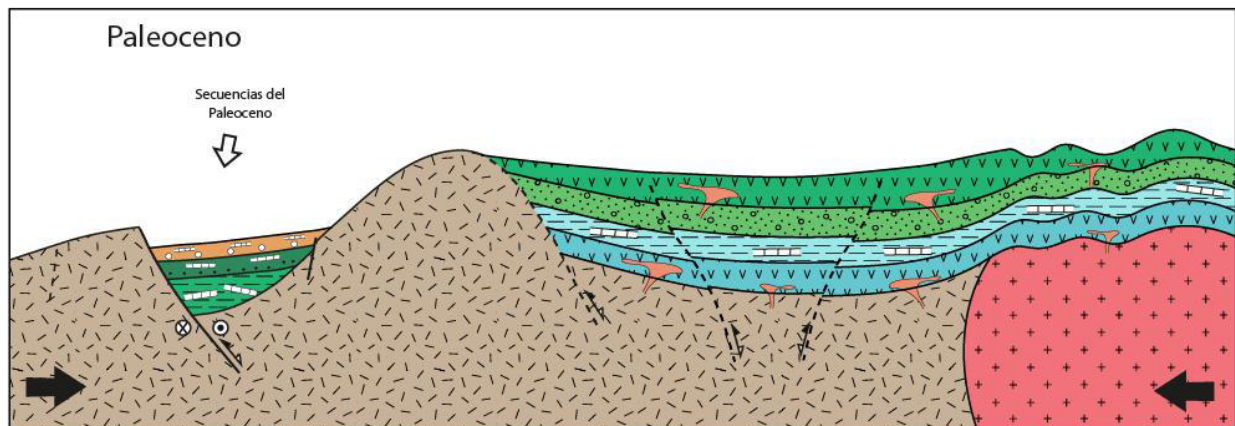


Figura IV-7. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Paleoceno, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

El Eoceno se encuentra limitado para la cuenca Trujillo con poca presencia en la cuenca Salaverry, demostrando una geometría extensiva representada por fallamiento en bloques, generando continuos levantamientos y hundimientos (Grabenes y Horts). Las unidades turbidíticas del Eoceno comienzan a rellenar los bajos formando secuencias bastantes potentes y avanzan hacia el alto (USH) descansando en onlap sobre el basamento. El Eoceno presenta períodos de discordancia siendo interpretado en el Eoceno medio y superior (figura IV-9) probablemente por consecuencia del aumento de la velocidad de subsidencia desde el Eoceno medio hasta el Eoceno superior (Jaillard & Soler, 1996). Desde el Eoceno medio al Oligoceno superior el vector de convergencia tiene una dirección ~N35 (Somoza et al. 2005) (figura IV-8). Como resultado del cambio de la dirección del vector de convergencia y la pendiente del talud se originaron fallas normales gravitacionales y reacomodo en la zona de talud. *Fuente: propia.*

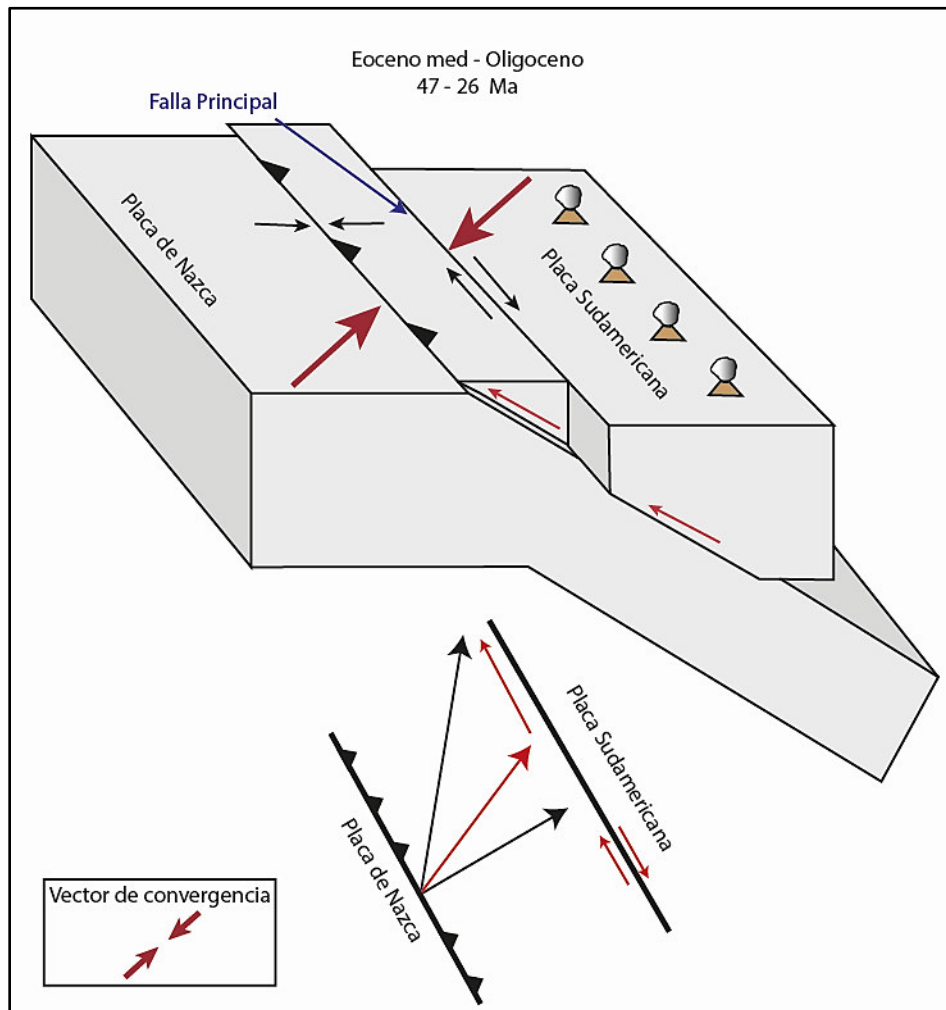


Figura IV-8. Block diagrama del ángulo de subducción del Eoceno medio al Oligoceno (47 - 26 Ma) Somoza et al.(2005), con la partición de esfuerzos. *Fuente: propia.*

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

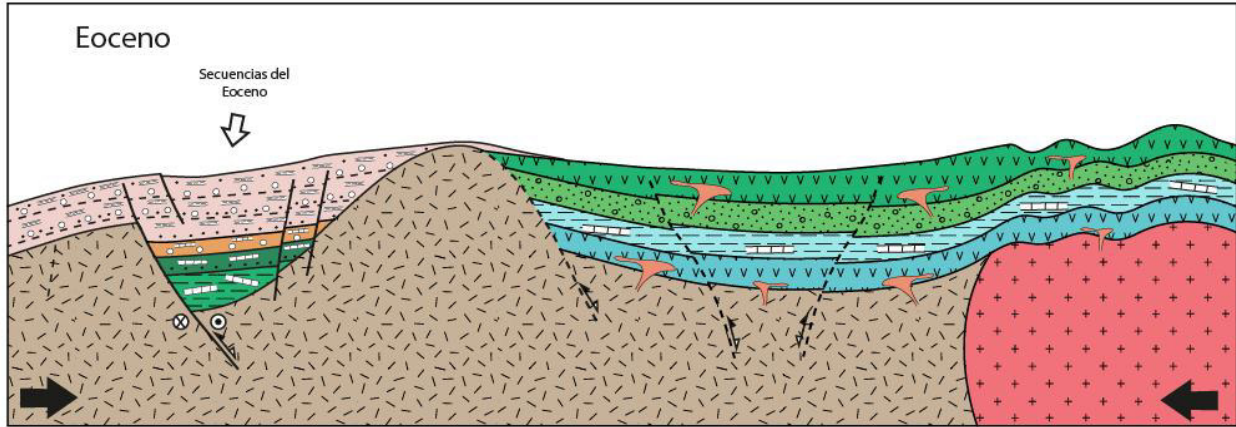


Figura IV-9. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Eoceno, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). **Fuente:** propia.

Los depósitos del Oligoceno en la cuenca Trujillo y Salaverry están ausentes por un proceso de levantamiento (25 Ma) y exposición, determinado por el análisis de termocrología en apatito (Timoteo 2015), desarrollando la erosión de estas unidades en la zona de estudio (figura IV-10) originado probablemente por el aumento de la velocidad de subsidencia que inició desde el Oligoceno hasta el Mioceno inferior (Jaillard & Soler, 1996). En el Oligoceno superior (26 Ma) se da un cambio en el componente de esfuerzo de convergencia ~N80 (Somoza et al. (2005) (figura IV-11) cambiando la cinemática de la falla maestra a sinistral.

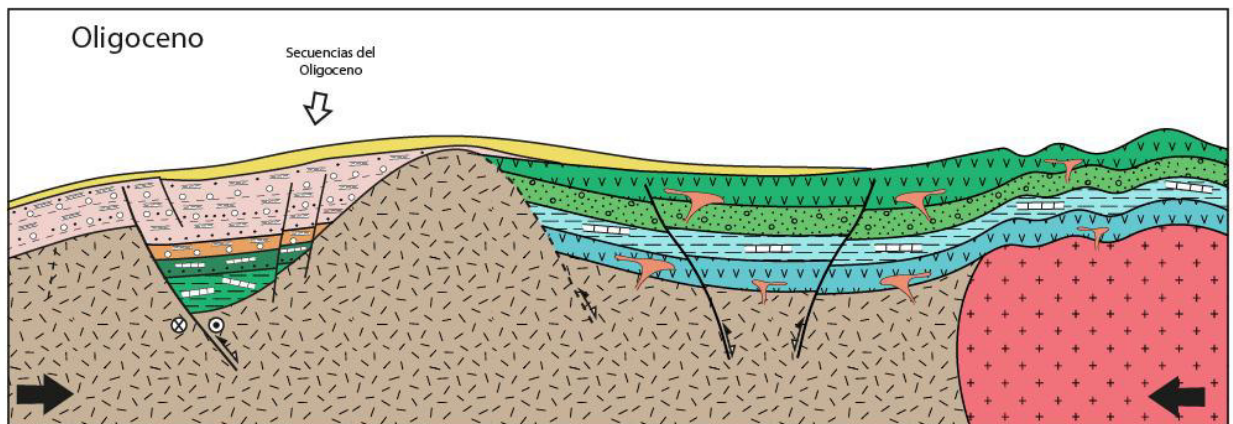


Figura IV-10. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Oligoceno, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

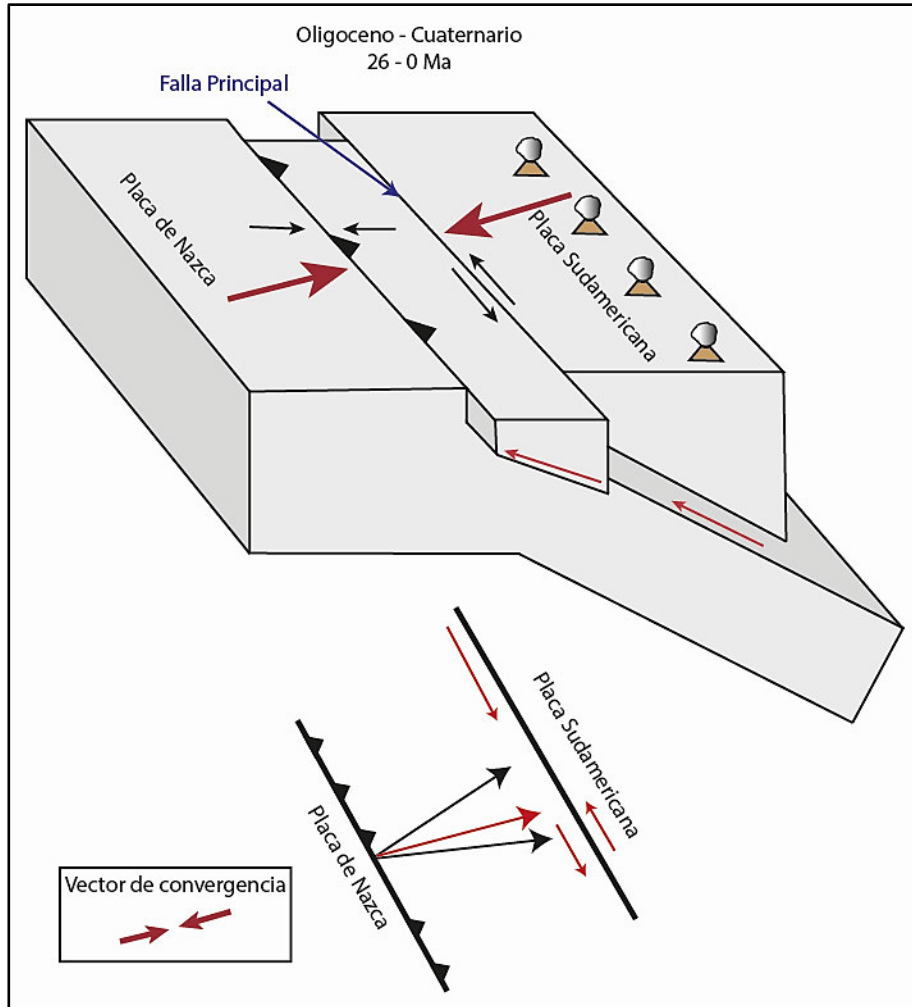


Figura IV-11. Block diagrama del ángulo de subducción del Oligoceno al Cuaternario (26 - 0 Ma) Somoza et al. (2005), con la partición de esfuerzos **Fuente:** propia.

El Mioceno presenta secuencias importantes en offshore, la depositación de estas secuencias se presenta con mayor potencia en la Cuenca Salaverry. Desde el Mioceno inferior hasta el Mioceno medio la velocidad de subsidencia es rápida y constante (Jaillard & Soler, 1996). Las bases del Mioceno inferior, medio y superior están separadas por discordancias donde se puede ver fuertes incisiones y cañones en las unidades subyacentes. En la Cuenca Trujillo la depositación de las secuencias del Mioceno medio generaron cañones que cortan en algunos casos las secuencias del Eoceno superior, estas secuencias presentan una geometría extensiva que quedan evidenciada por las fallas normales que originaron hemigrábenes y horts (figura IV-12)

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

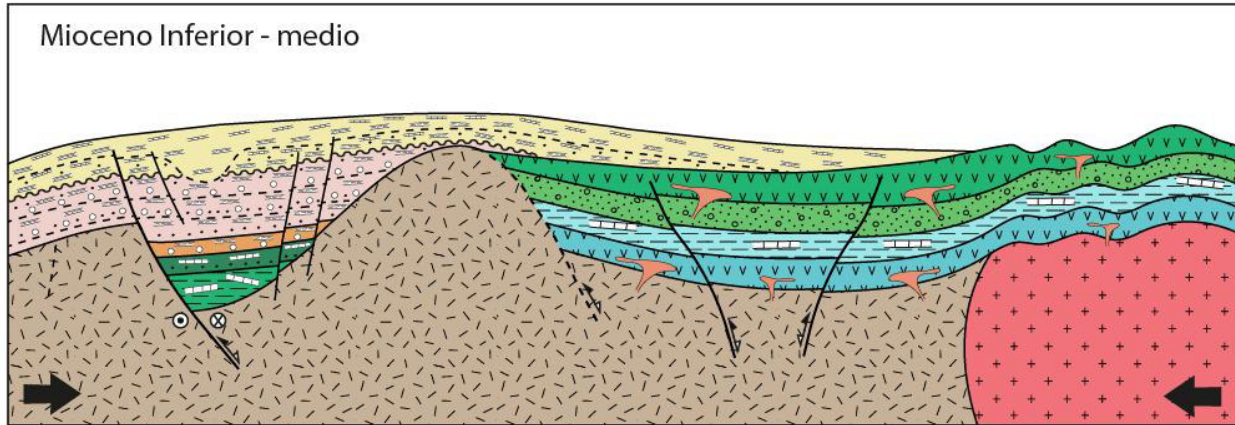


Figura IV-12. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Mioceno inferior-medio, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). **Fuente:** propia.

En el Mioceno superior la velocidad de subsidencia comenzó a disminuir y hacerse constante hasta la actualidad (Jaillard & Soler, 1996). El Mioceno superior se caracteriza por un intenso período tectónico compresivo, se pudo verificar estructuras plegadas asociadas a fallas inversas, como estructuras extensivas en ambas cuencas las cuales se observaron en base a la interpretación sísmica. En este período se dio una emersión entre la zona del talud y la plataforma lo que dio pie al basculamiento de las secuencias Cenozoicas hacia el este (figura IV-13). Este evento tectónico compresivo fue continuo en el Plioceno y Cuaternario el cual induce una moderada inversión tectónica de los hemigrábenes, el plegamiento y fallamiento inverso de los sedimentos de edad Eoceno a Plioceno previamente depositados, también se observa cañones en la zona de talud finalmente en la zona del talud se formaron cañones cortados por fallas normales generados por colapsos gravitacionales simultáneamente a los esfuerzos compresivos (figura IV-14).

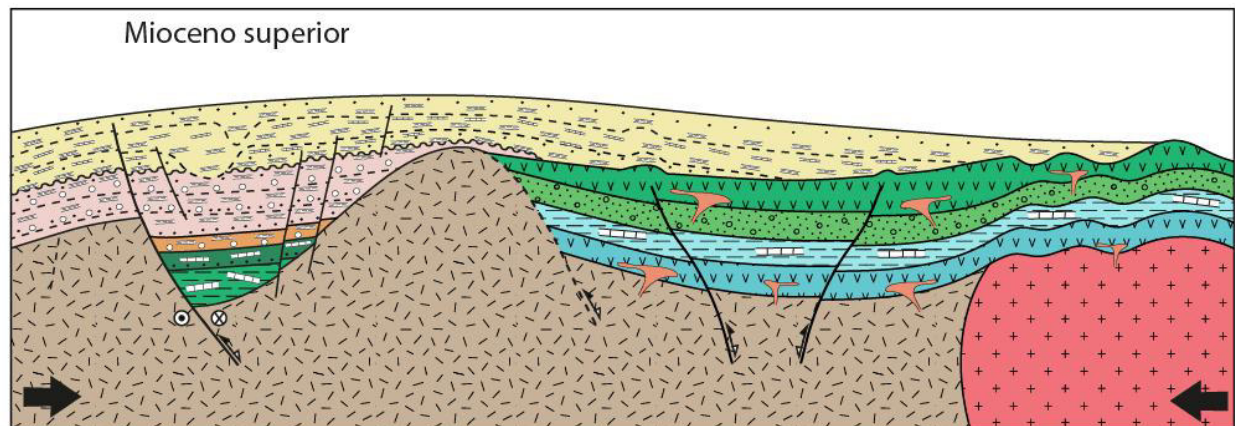


Figura IV-13. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Mioceno superior, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

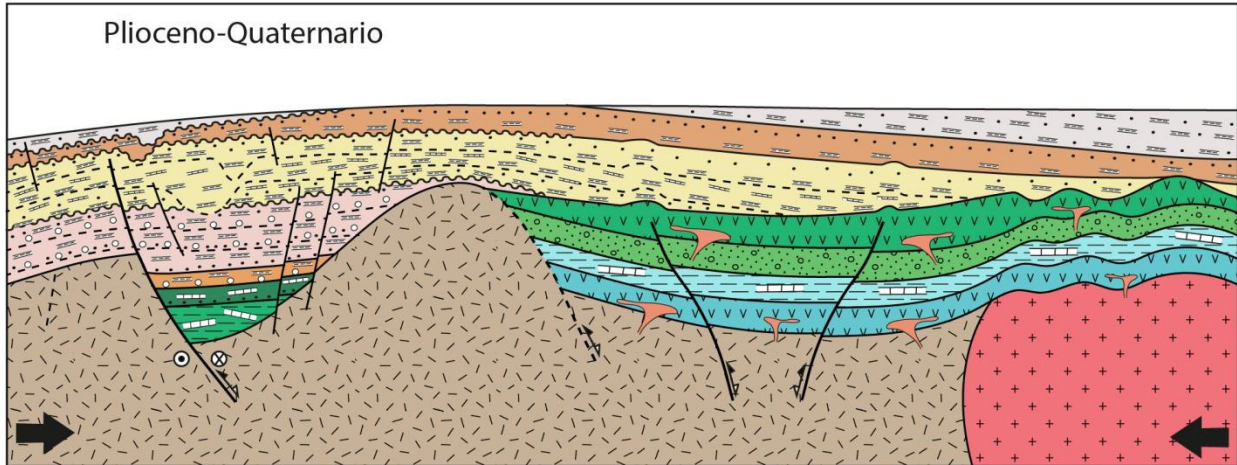


Figura IV-14. Modelo estructural esquemático mostrando la configuración estructural y sedimentaria de la zona de estudio durante el Plioceno - Cuaternario, basado en los trabajos de SK. (2012) y Llerena C. (2014). Fuente: *propia*.

CAPÍTULO V. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LAS CUENCAS TRUJILLO Y SALAVERRY

5.1. GENERALIDADES

Los rasgos estructuras del subsuelo interpretados en base a la información sísmica 2D/3D guardan estrecha relación a los diversos procesos y mecanismos de deformación ocasionados por la colisión oblicua de las placas tectónicas Nazca y Sudamericana. Este evento registrar sucesivas etapas de deformación desarrollando estructuras extensivas como compresivas en toda la zona de estudio.

5.1.1. Sistema de fallas extensionales

Una falla normal es donde el bloque colgante (techo) desciende respecto del bloque yacente (piso). Generalmente, la subsidencia de la cuenca está controlada por una falla principal normal a escala cortical que genera una separación intracortical creando una diferenciación de varios grados de asimetría en la cuenca, descrita como hemigraben. Una falla extensional se ilustra en la figura V-1, afectando a las capas horizontales

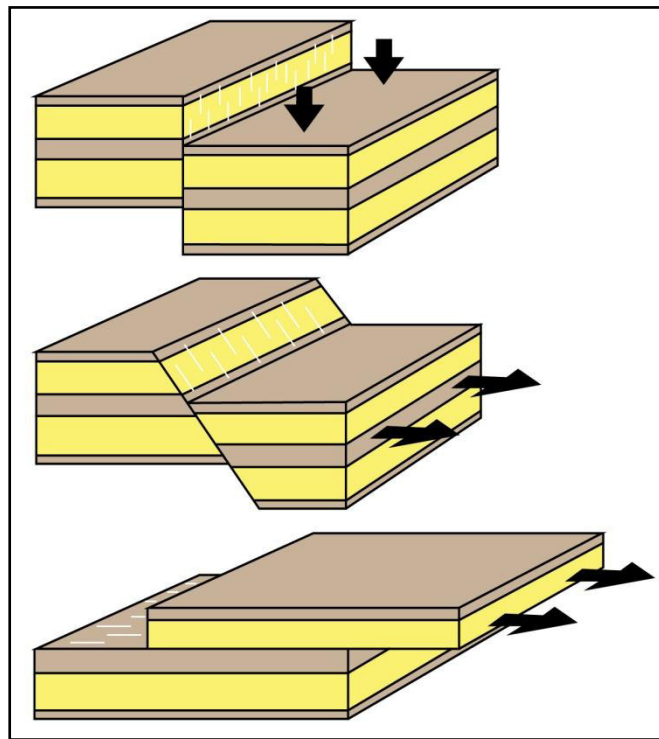


Figura V-1 Usando como referencia la superficie de la tierra, las fallas extensionales (b) son un espectro de fallas normales entre vertical (a) y horizontal (c). Las fallas verticales y horizontales no son ni extensiones ni contraccionales (modificado de Fossen H. 2010)

La falla lítrica es el segundo tipo de falla principal, este tipo de falla se puede definir como una falla que se aplana con la profundidad y que se encuentra comúnmente en zonas sometidas a regímenes extensionales.

En la figura V-2 rotan las capas solamente como consecuencia del desplazamiento a lo largo de la falla lítrica, se genera un espacio geológicamente imposible entre la falla y la base del bloque colgante, permaneciendo la longitud L de los estratos constante. En este caso la deformación se distribuye en el bloque colgante, permitiendo que los bloques permanezcan en contacto. Esto se obtiene por la generación de un anticlinal de colapso o “rollover anticlinal” (figura V-2b). Esta situación impone las siguientes condiciones en el bloque colgante: primero, debe ocurrir un cizalle de toda la secuencia y, segundo, se produce un espacio triangular a la derecha del anticlinal de colapso, que debe ser llenado de algún modo (Niermeyer H. 1999).

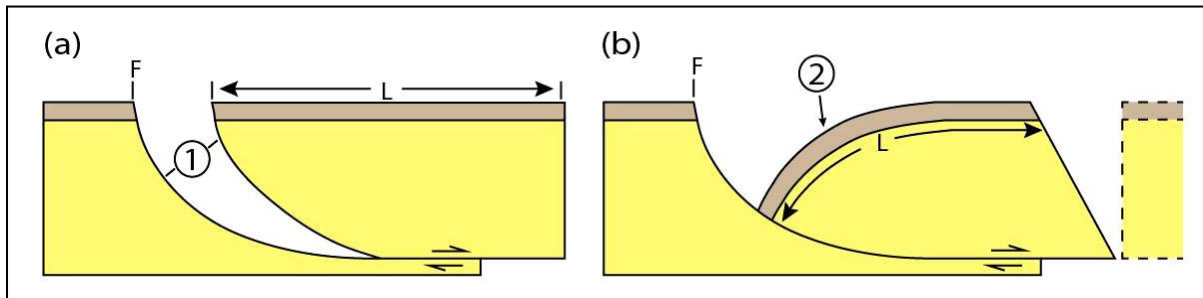


Figura V-2. Falla lítrica con desarrollo de anticlinal de colapso, (1) Espacio geológicamente imposible, (2) Anticlinal de colapso. (L) Longitud de las capas, se conserva constante (Niermeyer H. 1999)

En la figura V-3 se soluciona el problema del espacio mediante la aparición de numerosas fallas antitéticas respecto del movimiento de la falla lítrica. En la base de los bloques el espacio será cada vez menor mientras más seguidas se presenten las fallas. Los espacios pueden acomodarse fácilmente por el fracturamiento local de los bloques, con la consiguiente aparición de brechas de falla (Niermeyer H. 1999).

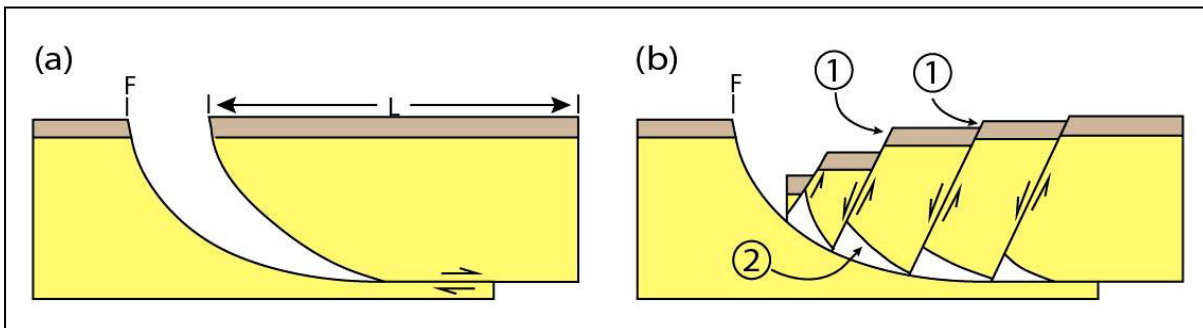


Figura V-3. Falla lítrica con desarrollo de fallas planas antitéticas (1). (2) Espacios que deben rellenarse por ejemplo con brechas de falla. (Niermeyer H. 1999).

La figura V-4 plantea un mecanismo de tipo dominó en el bloque colgante. El mecanismo de dominó se desarrolla según una serie de fallas planas sintéticas con el movimiento de la falla lústrica principal (figura V-4a). Los bloques rotan hasta que la situación se estabiliza, produciéndose deslizamiento paralelo según las fallas planas y conservando el manto de las capas constante (figura V-4b). Los espacios en la base de los bloques pueden acomodarse por fallamiento a pequeña escala, brechización o bien por flujo dúctil de las rocas sobre el nivel de despegue.

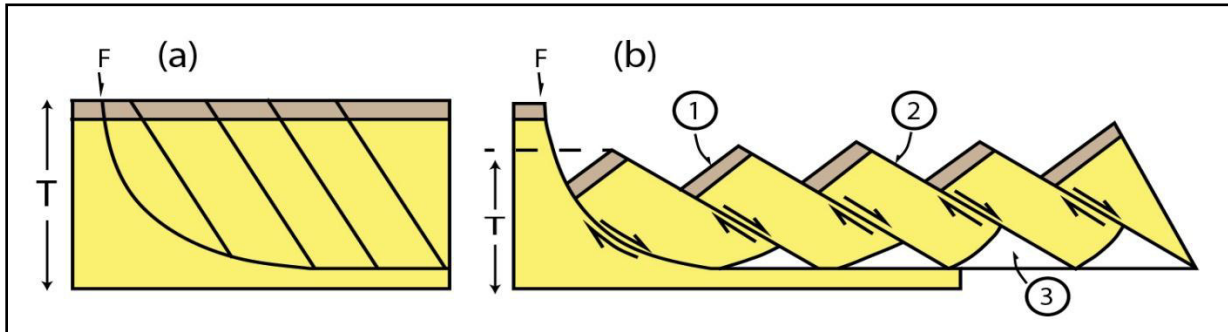


Figura V-4. (a) Bloque sin deformación (b) Falla lústrica con desarrollo de fallamiento en dominó sintético en el bloque colgante. (1) estratos con manto constante. (2) Fallas planas. (3) Espacios que deben rellenarse. (Niermeyer H. 1999).

5.1.2. Sistemas de fallas compresivas

Una falla inversa es un tipo de falla con desplazamiento vertical en las cuales el bloque de techo se mueve hacia arriba con respecto al bloque de muro (figura V-5). Dado que el bloque de techo se mueve hacia arriba y sobre el bloque de muro, las fallas inversas reflejan un acortamiento de la corteza, formado por esfuerzos tectónicos o gravitacionales (Fossen H. 2010). Se encuentran fallas y pliegues de contracción en todas las partes de las zonas de colisión, que afectan a sedimentos no metamorfoseados en prismas de acreción asociados con zonas de subducción,

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

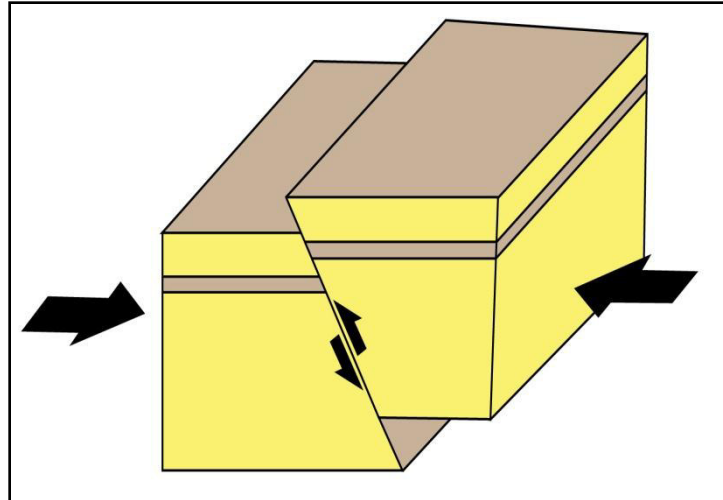


Figura V-5. Modelo de una falla inversa

El término inversión se emplea para describir aquellas áreas en las que se ha producido un cambio en el régimen tectónico pasando de ser áreas con subsidencia o extensión a ser áreas bajo compresión y levantamiento. Está aceptado que la tectónica de inversión involucra la reactivación de fallas extensionales previas que se vuelven inversas (figura V-6) y eventualmente pueden convertirse o nuclear la generación de retrocorrimientos.

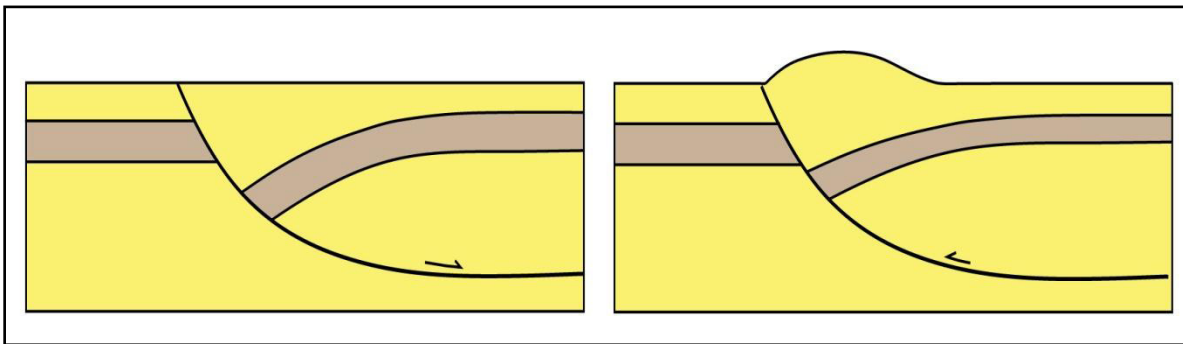


Figura V-6 Ejemplo de modelo de inversión tectónica en una falla normal

5.1.3. Sistemas de fallas de rumbo

Son las fallas de más difícil reconocimiento en terreno ya que, si no se observan marcadores transversales a su desplazamiento, no se puede establecer su rechazo. En particular, no es posible usar la estratificación como marcador del rechazo, ya que estas fallas cortan las capas en forma paralela a su rumbo, no quedando evidencias de su desplazamiento. Las fallas de rumbo son fallas donde el vector de desplazamiento es paralelo al rumbo y así paralelo a la superficie de la tierra (figura V-7)

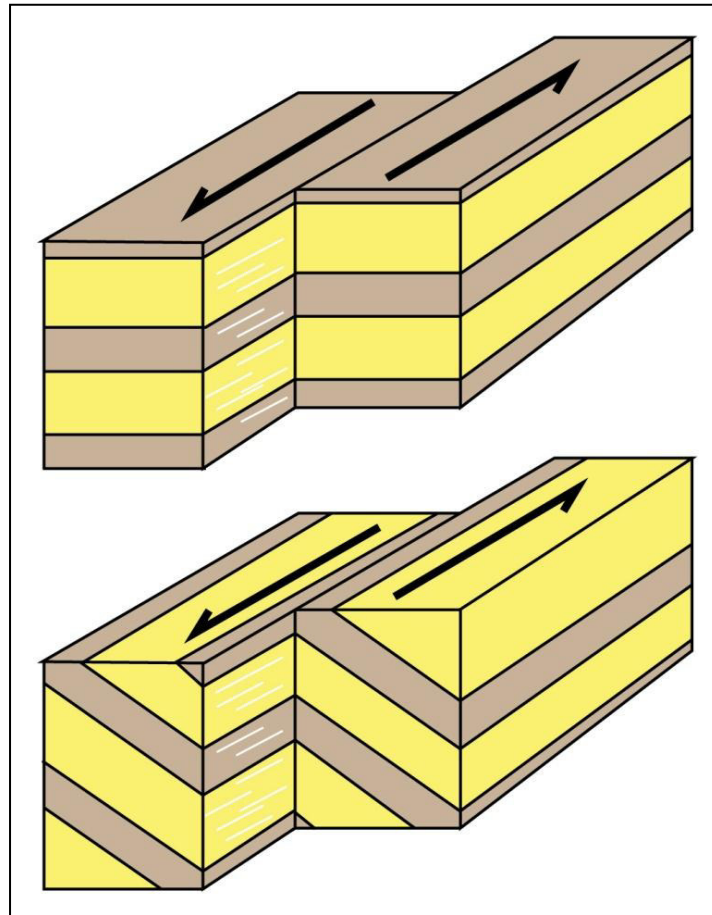


Figura V-7. Falla de rumbo con cizalla pura (modificado de Fossen H. 2010)

La presencia de una falla de rumbo se encuentra frecuentemente indicada por un arreglo de estructuras secundarias escalonadas (“en-echelon”) de pliegues, fallas y fracturas según una zona de cizalla angosta y elongada (Niermeyer H. 1999). En general, existen tres modos en que dos bloques de rocas pueden deslizarse a lo largo de su rumbo:

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

a) En forma paralela: no convergen ni divergen durante el movimiento lateral (figura V-8a) generando estructuras. Entre estas estructuras se cuentan los pliegues escalonados (“en-échelon”), fallas R (Riedel), fracturas T (extensión) y fracturas P. Los pliegues en-échelon se forman inicialmente a 45° de los bordes de la zona de cizalle, pero después rotan para formar un ángulo menor presentando sus ejes curvados.

Los pliegues en-échelon se forman inicialmente a 45° de los bordes de la zona de cizalle, pero después rotan para formar un ángulo menor (figura V-8b), presentando sus ejes curvados.

Las Fallas de tipo Riedel son fracturas con desplazamiento sintético R y antitético R' respecto al sentido de deslizamiento de la zona de falla (figura V-8c). El ángulo inicial según el cual se forman estas fallas respecto de la zona de cizalle principal depende del ángulo de fricción interna ϕ_i del material al cual afectan. Así las fallas R forman un ángulo de $\phi_i/2$ con el borde de la zona de cizalle, en tanto que las fallas R' forman un ángulo de $90^\circ - \phi_i/2$. El ángulo entre fallas R y R' es igual a $90^\circ - \phi_i$, ya que se consideran fallas conjugadas. Estos ángulos y la geometría de las Fallas Riedel significan que las direcciones de máximo acortamiento y de máxima extensión de los ejes de strain infinitesimal, se orientan inicialmente a 45° de la zona de cizalle.

Las fracturas de extensión T no presentan estrías en sus paredes, sino que representan, al menos inicialmente, fracturas abiertas que se forman a 45° del rumbo de la falla principal y según la dirección de acortamiento máximo (figura V-8d). Su terminación es en punta. Estas fracturas pueden posteriormente ser reutilizadas por el movimiento general de la zona de cizalle, para producir rotación de bloques del tipo dominó. Finalmente, se forman las fallas P, al igual que las fallas R, presentan un ángulo agudo de valor $\phi_i/2$ con la zona de cizalle principal, pero en sentido opuesto (figura V-8e). Unen fallas R y sus desplazamientos sintéticos respecto a la zona de cizalle principal se deben a una reorientación local de ϕ_i entre las fracturas R. Estas fallas se forman durante la formación de la zona de cizalle principal, a lo largo de la cual se producen lentes de cizalle (Niermeyer H. 1999).

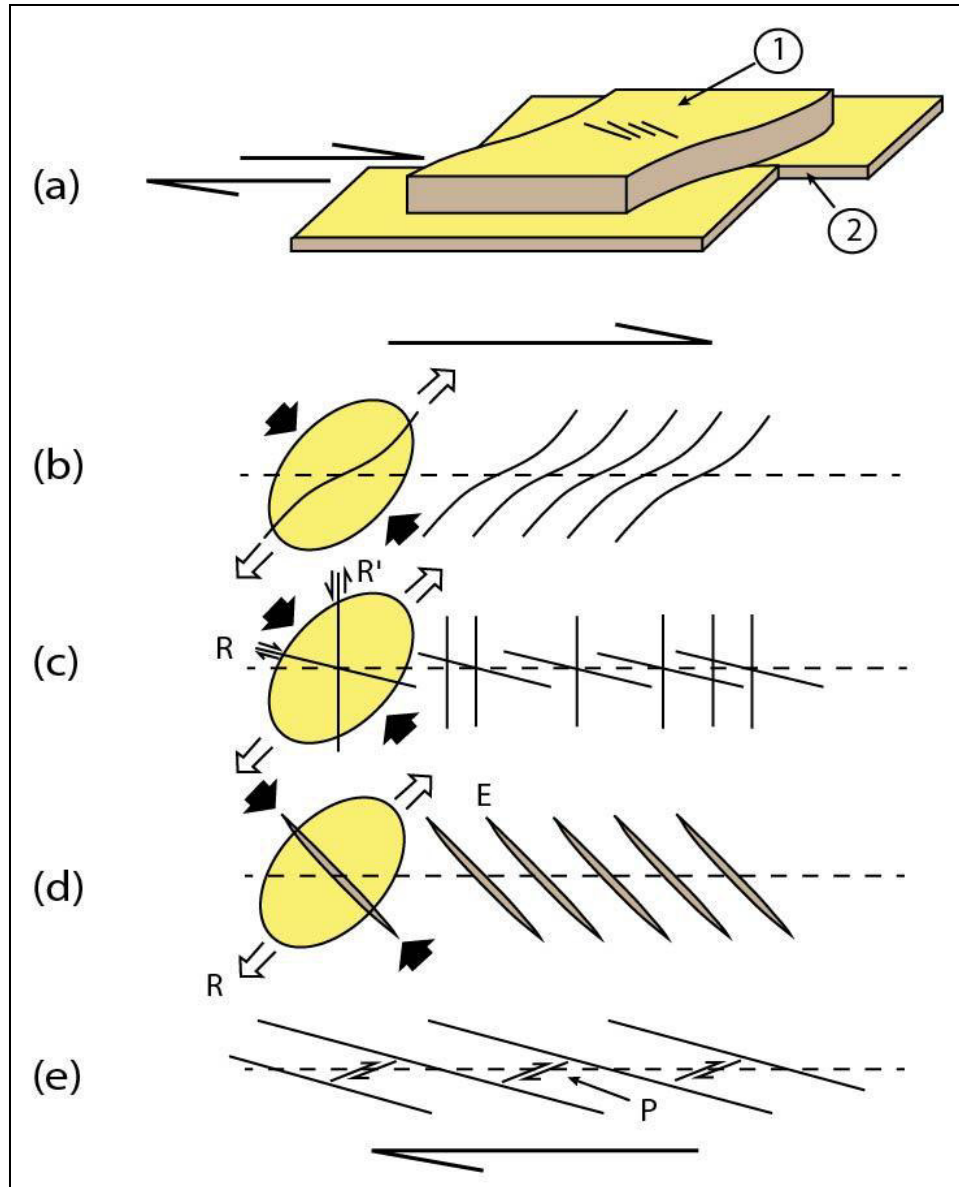


Figura V-8. Estructuras asociadas a transcurrencia. (a) Experimento de Riedel con una capa de arcilla húmeda (1) sobre dos bloques rígidos (2) que se deslizan paralelamente. (b) Pliegues. (c) Fallas R y R'. (d) Fracturas de extensión. (e) Fallas P. Las flechas negras indican la dirección de acortamiento máximo, en tanto que las flechas blancas señalan la dirección de extensión máxima, asociadas al elipsoide de esfuerzo (Niermeyer H. 1999).

b) En forma convergente: Cuando los movimientos transcurrentes se presentan acompañados de convergencia de ambos bloques se dice que ocurre una transpresión. Características: -Pronunciado desarrollo de pliegues “en-échelon”, presencia de fallas inversas subparalelas a los ejes de los pliegues y formación de fallas inversas en “hoja de palma” (figura V-9).

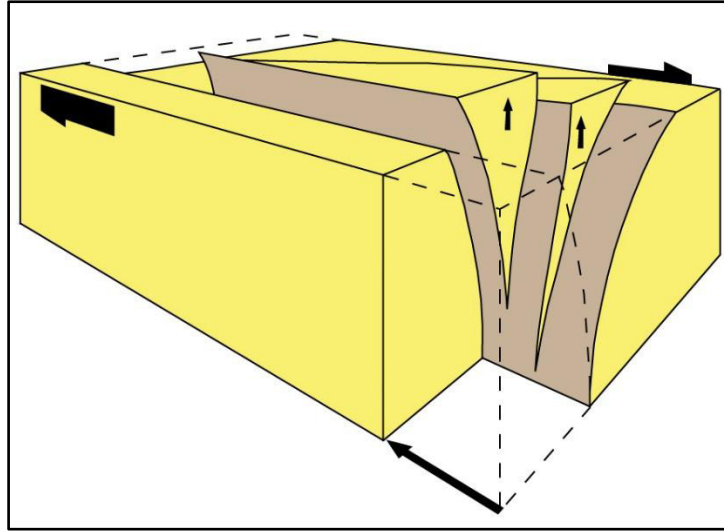


Figura V-9. Formación de la estructura tipo flor positiva durante una transpresión dextral.

c) En forma divergente: En el movimiento divergente las estructuras extensionales dominan sobre las compresionales y en este caso se habla de transtensión. Presentan las siguientes características: Los pliegues están ausentes, desarrollo de fallas normales, formación de fallas normales con forma de “tulipán” en sección transversal (figura V-10) y se forman cuencas extensionales denominadas cuencas “pull-apart”.

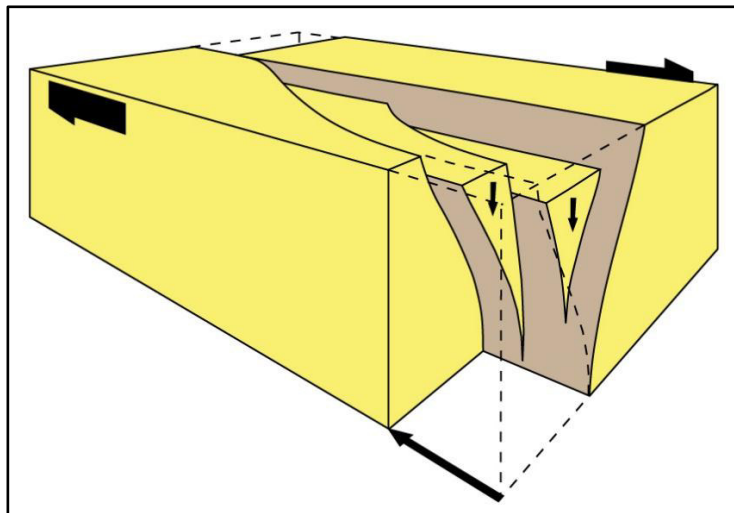


Figura V-10. Formación de la estructura tipo flor negativa durante una transtensión dextral.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Se ha visto que las capas en una falla de rumbo pueden producir componentes locales de contracción y extensión (figura V-11). El tipo de deformación que se produce en tales curvas se denomina transpresión y transtensión. En general transpresión es una combinación de una falla de rumbo con una deformación compresional y la transtensión es una combinación de una falla de rumbo y tensión, en ambos casos la falla no es paralela a la proyección del mapa de los vectores de desplazamiento regional.

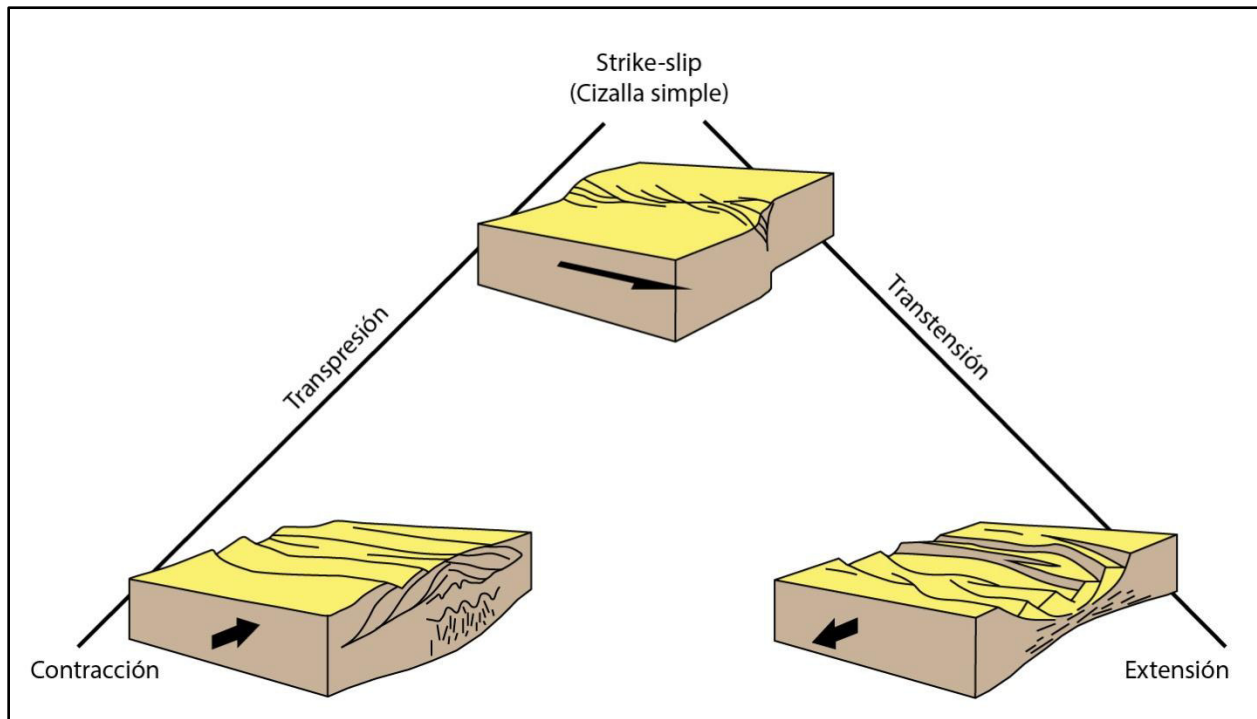


Figura V-11. Ilustración de la falla de Rumbo (cizalla simple), Transpresión y transtensión (modificado de Fossen H. 2010)

5.2. CONVERSIÓN DE SÍSMICA DE TIEMPO A PROFUNDIDAD A PARTIR DE LAS VELOCIDADES RMS

Para el proceso de conversión de los datos sísmicos de una escala de tiempo (milisegundos) a una escala de profundidad (metros) para proporcionar una imagen de las estructuras del subsuelo es necesario poder recolectar las velocidades de procesamiento sísmico de la misma y realizar distintos trabajos con ellas. Se colectaron en la parte superior de la sección sísmica en papel (figura V-12) las tablas con los valores de las velocidades de Root Mean Square (RMS) y de tiempo, llevados a una tabla excel para el proceso de conversión.

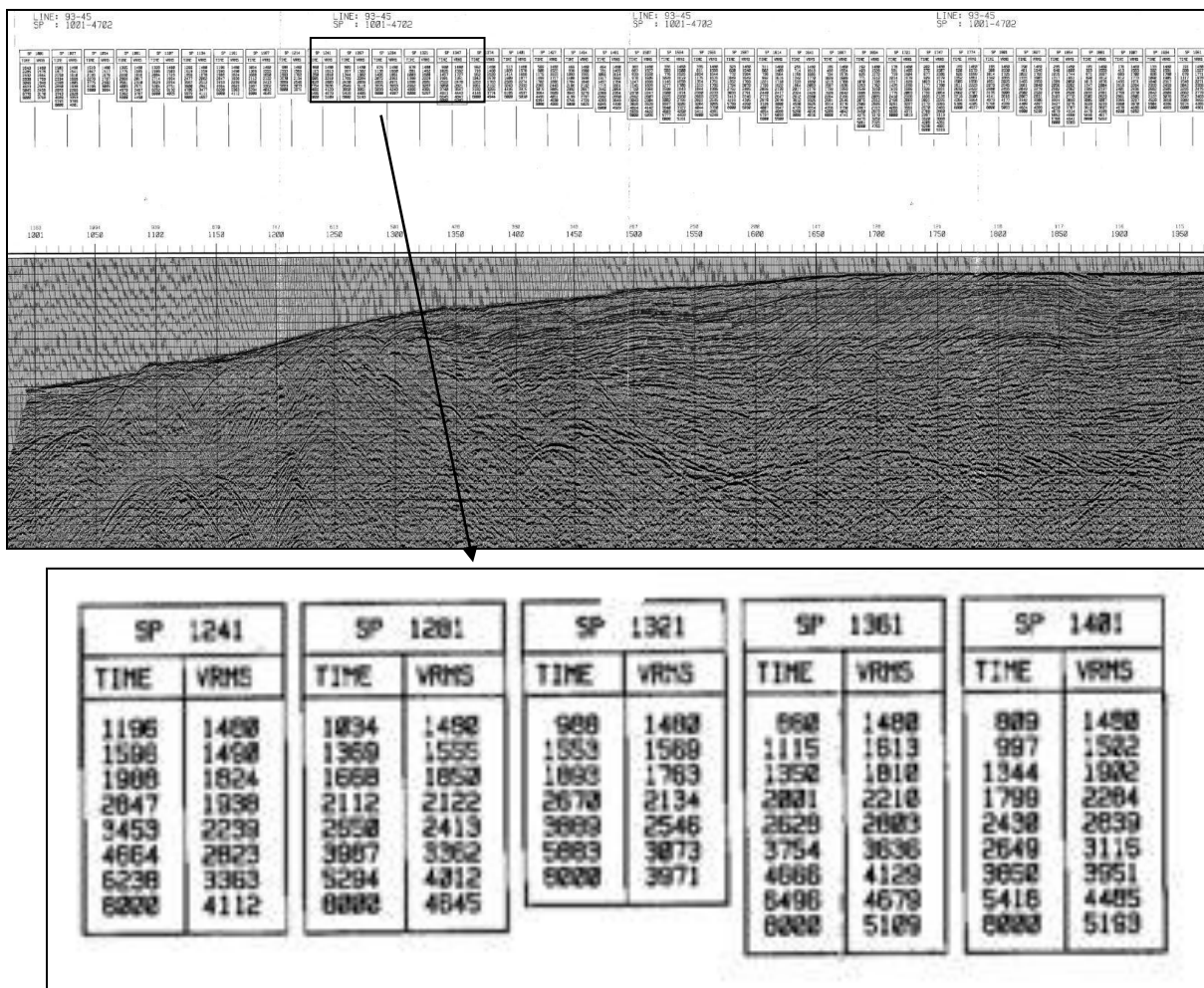


Figura V-12. Muestra de la sección sísmica 93-45 en papel con los datos de velocidad RMS en la parte superior. Fuente: propia.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Los valores obtenidos permitieron generar un gráfico de tiempo - profundidad que indica una ecuación lineal (figura V-13). Posteriormente se obtuvo los valores de V_0 (velocidad inicial) y V_f (velocidad final o de fondo) para el cálculo de la constante "k". Estos valores fueron promediados e ingresados a la opción de conversión de tiempo-profundidad del software MOVE, donde se ingresa el promedio de V_0 junto con el promedio de "k" por muestra y el datum de la sección sísmica (Figura V-14).

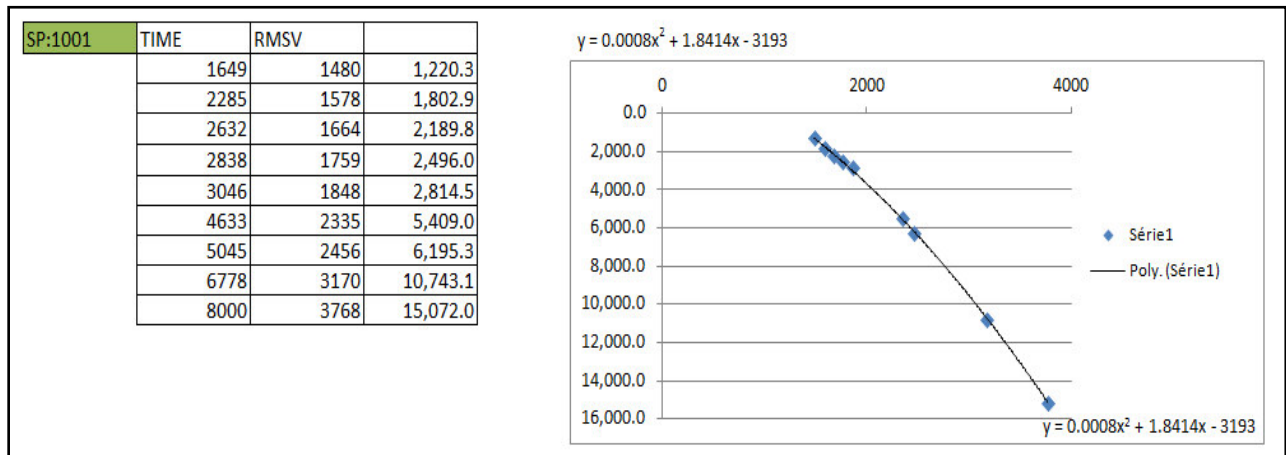


Figura V-13. Valores de la sección sísmica en papel llevados a una tabla excel del cual se genera una gráfica Tiempo - Profundidad. **Fuente:** propia.

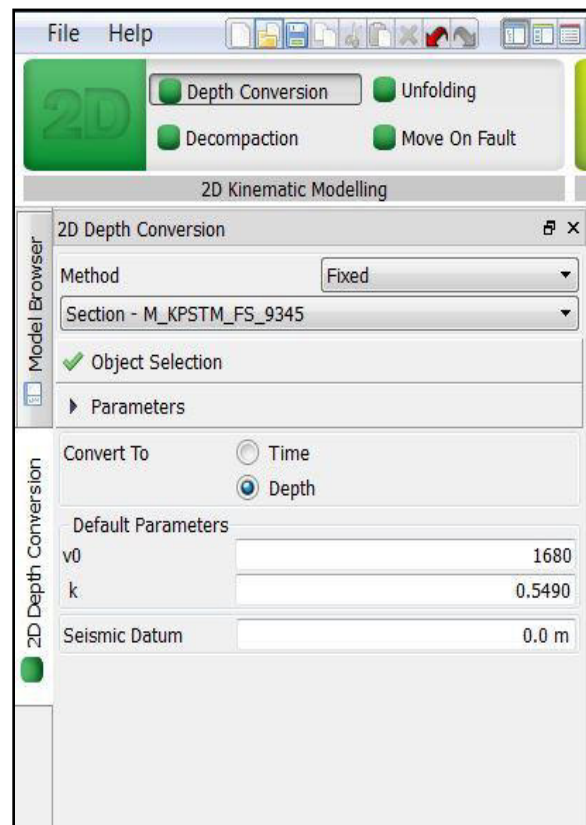


Figura V-14. Conversión a profundidad del software Move. **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Finalmente, las profundidades obtenidas en metros pueden ser controladas a partir de la calibración con los horizontes interpretados en los pozos exploratorios en profundidad (figura V-15).

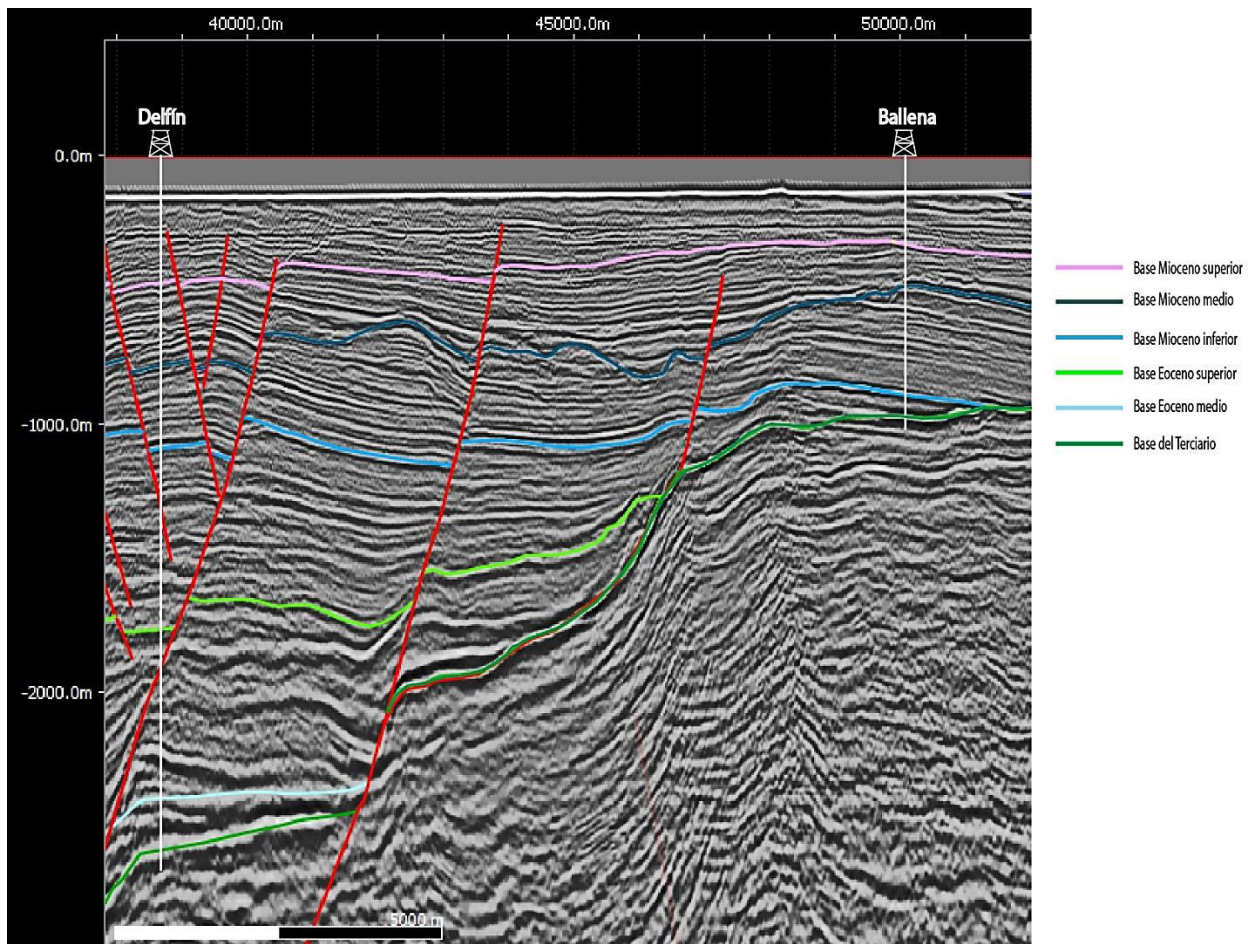


Figura V-15. Calibración de la sección sísmica 93-45 con los pozos Delfín y Ballena en el software Move. Fuente: propia.

5.3. CONSTRUCCIÓN DE LA SECCIÓN ESTRUCTURAL

Se escogió 6 secciones sísmicas representativas tanto transversales como longitudinales para construir secciones estructurales con el software Move de la compañía Midland Valley, en el cual se integró la información de superficie como del subsuelo. Las secciones realizadas se encuentran entre el talud superior y el borde oeste de la cordillera Occidental. Para la realización de estas secciones estructurales se tomó información de los cuadrángulos de INGEMMET (16-e, 16-f, 17-e, 17-f y 17-g), datos sísmicos de Perupetro y la proyección de los pozos Ballena, Delfín y Morsa (figura V-16).

Para mayor entendimiento se describirá cada sección estructural.

Sección 1

Tiene una longitud de 208 kilómetros aproximadamente, con orientación NE-SW. Abarca desde el límite occidental de la Cordillera Occidental hasta el extremo occidental de la cuenca Trujillo, cubriendo la superficie del Grupo Casma, Grupo Calipuy, los intrusivos del batolito de la costa y también la cuenca Salaverry. Esta sección estructural se construyó sobre la sección sísmica 93-45 de la campaña de Ribiana que tiene 140 kilómetros de largo y es atravesado por 2 pozos exploratorios (Ballena y Delfín)

Sección 2

Tiene una longitud de 192 kilómetros aproximadamente, con orientación NE-SW. Abarca desde el límite occidental de la Cordillera Occidental hasta el extremo occidental de la cuenca Trujillo, cubriendo la superficie de la Formación Chicama, Grupo Casma, Grupo Calipuy, los intrusivos del Batolito de la Costa y también la cuenca Salaverry. Esta sección estructural se construyó sobre la sección sísmica 93-43 de la campaña de Ribiana que tiene 136 kilómetros de largo.

Sección 3

Tiene una longitud de 207 kilómetros aproximadamente, con orientación NE-SW. Abarca desde el límite occidental de la Cordillera Occidental hasta el extremo occidental de la cuenca Trujillo, cubriendo la superficie de la Formación Chicama, Grupo Goyllarisquizga, los intrusivos del Batolito de la Costa y también la Cuenca Salaverry. Esta sección estructural se construyó sobre la sección sísmica 93-40 de la campaña de Ribiana que tiene 135 kilómetros de largo.

Sección 4

Tiene una longitud de 107 kilómetros aproximadamente, con orientación NE-SW. Abarca desde el límite occidental de la línea de la costa hasta el extremo occidental de la Cuenca Trujillo, cubriendo también la Cuenca Salaverry. Esta sección estructural se construyó sobre la sección sísmica 93-38 de la campaña de Ribiana que tiene 130 kilómetros de largo.

Sección 5

Tiene una longitud de 155 kilómetros aproximadamente, con orientación NNW-SSE. Se encuentra dentro de la Cuenca Trujillo. Esta sección estructural se construyó sobre la sección sísmica 96-04 de la campaña de Repsol que tiene 276 kilómetros de largo.

Sección 6

Tiene una longitud de 150 kilómetros aproximadamente con orientación NNW-SSE. Se encuentra dentro de la cuenca Trujillo. Esta sección estructural se construyó sobre la sección sísmica 96-12 de la campaña de Repsol que tiene 280 kilómetros de largo.

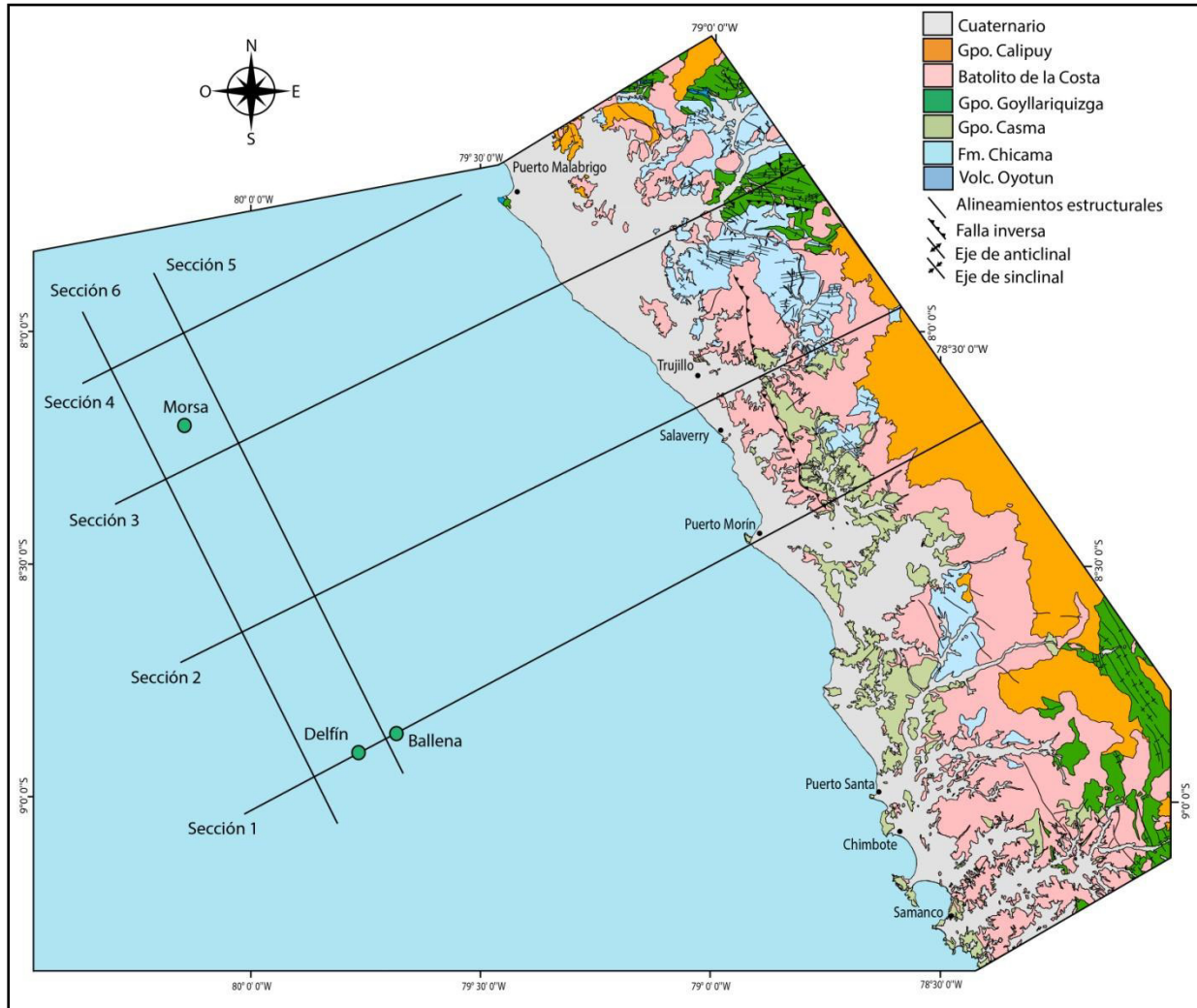


Figura V-16. Ubicación de las secciones estructurales. Fuente: propia.

5.4. INTERPRETACIÓN DE SECCIONES ESTRUCTURALES

5.4.1 Sección estructural 1

La Cuenca Trujillo se encuentra limitada por dos altos estructurales, el Upper Slope Ridge (USR) y la prolongación de la Cordillera de la costa, el Outer Shelf High (OSH), generando un depocentro importante para las secuencias Terciarias. Esta cuenca presenta básicamente estructuras de carácter extensivo controladas por una falla maestra normal con buzamiento al noreste, presentando un sistema de

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

fallas sintéticas y en menor proporción fallas antitéticas desarrollándose hemigrábenes. Esta falla maestra sufre una inversión tectónica, mostrando en la sísmica algunas antiformas asociadas a la reactivación de algunas fallas normales (figura V-17) en las secuencias del Cenozoico.

En la Cuenca Salaverry, al oeste se muestra un levantamiento basculante de las secuencias terciarias hacia el continente debido al levantamiento en el Mioceno superior-Plioceno. Al este, cerca al litoral costero, se encuentran altos estructurales formados por cuerpos intrusivos, probablemente del batolito de la costa, este relieve controla principalmente la depositación de sedimentos del Mioceno, los cuales van reduciéndose rápidamente por acuñaamiento, finalmente se observa fallas inversas que cortan el basamento con vergencia hacia el este y oeste que generan anticlinales deformando las unidades del Jurásico, Cretácico y Mioceno. Estas secuencias del Jurásico (Fm. Chicama) y Cretácico (Gpo. Casma) son extrapoladas hacia la zona offshore desde los afloramientos de la costa, estas secuencias se encuentran limitadas al oeste por la prolongación de la Cordillera de la Costa.

En la zona onshore, se observa la deformación causada por el intrusivo, cortando las secuencias Mesozoicas, al extremo este se observa las secuencias volcano-sedimentarias del Gpo. Calipuy que descansan en discordancia sobre las unidades Cretácicas (figura V-18).

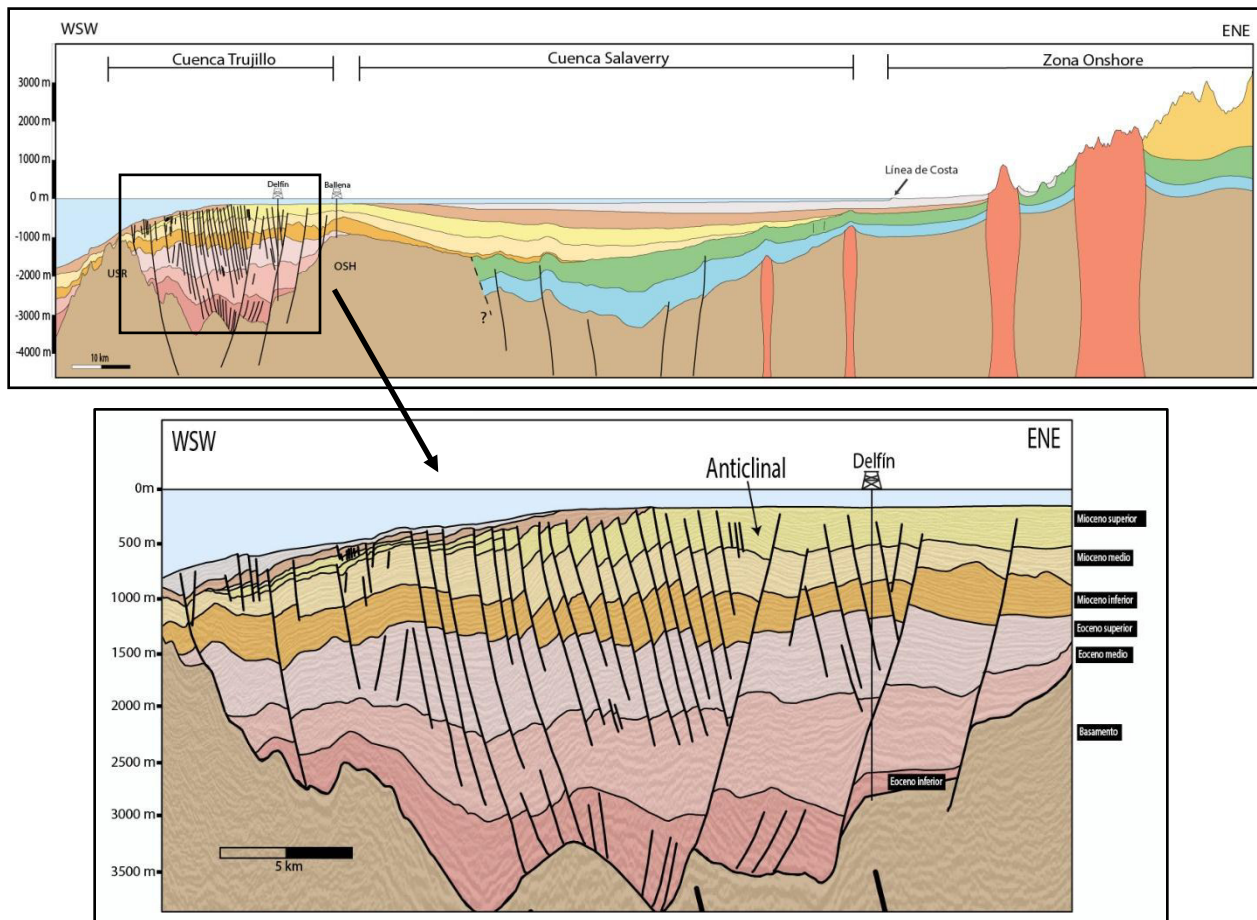


Figura V-17. Anticlinal formado por la reactivación de una falla normal. **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

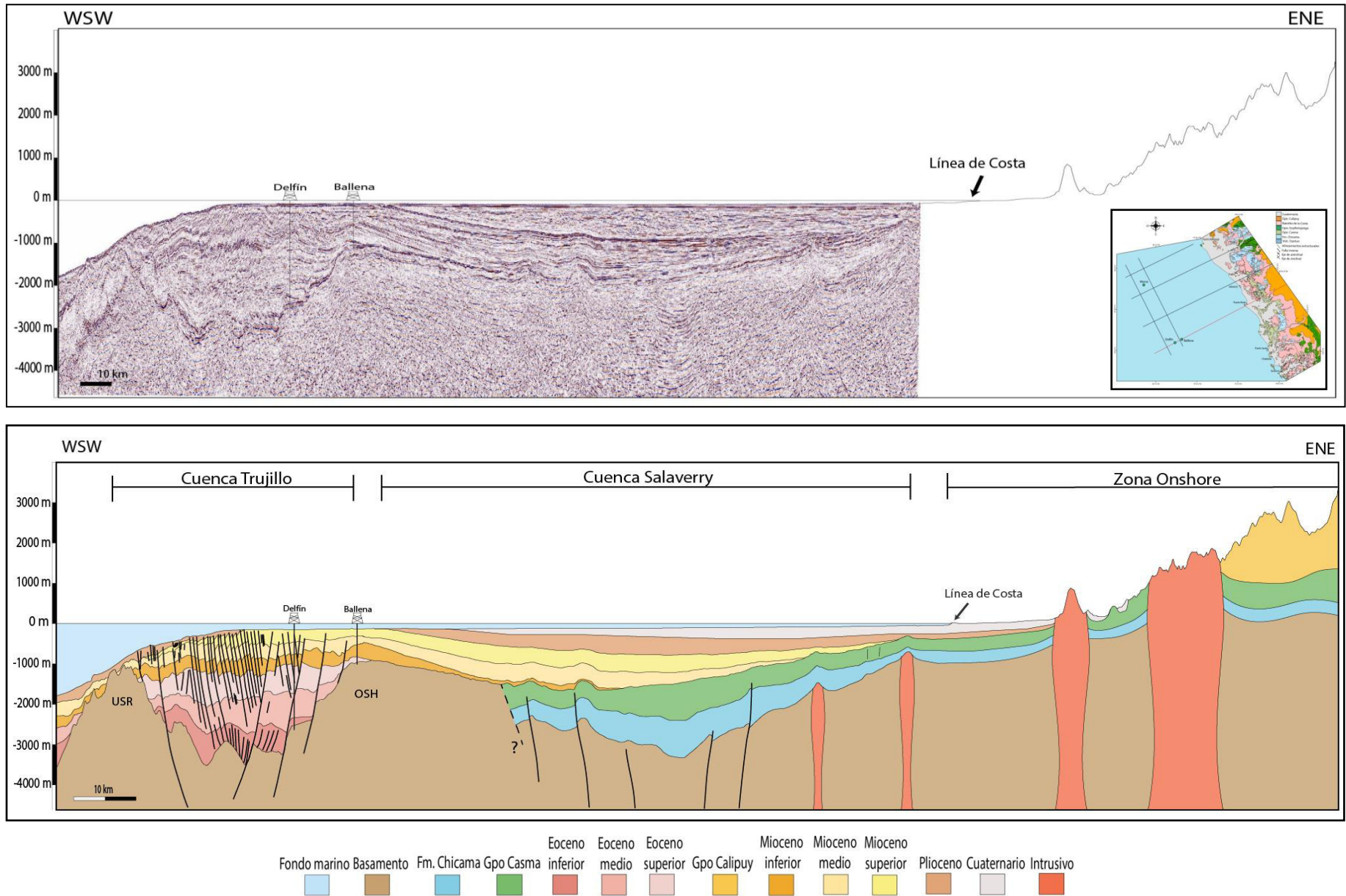


Figura V-18. Interpretación de la sección Sísmica 93-45 - Trujillo (Hasta la Cordillera Occidental. Fuente: propia.)

5.4.2 Sección estructural 2

La Cuenca Trujillo se encuentra limitado al este por una falla normal que buza hacia el oeste, donde limita las secuencias del Eoceno medio y superior. Se caracteriza por presentar un estilo extensional formando hemigrábens y grabens (figura V-19) en las secuencias terciarias. Estas fallas limitan un alto estructural, limitando las secuencias del Eoceno inferior y las posibles unidades de Cretácico y Paleoceno. En la cuenca Salaverry al este las secuencias del Mioceno y Plioceno descansan en onlap sobre las estructuras formadas por cuerpos intrusivos, probablemente del Batolito de la Costa. Estas secuencias están basculando hacia el continente y muestran que hubo un levantamiento tectónico, en la cuenca Trujillo, resultando aparentemente de un proceso de inversión. En la parte interna de la cuenca Salaverry, fallas inversas deforman y cortan las secuencias del Jurásico y Cretácico, estas unidades Mesozoicas son extrapoladas de los afloramientos de la zona costera y se encuentran limitadas al oeste por la prolongación de la Cordillera de la Costa.

La zona onshore ha sido levantada por el intrusivo, erosionando las secuencias del Cretácico. Más al oeste, en la Cordillera Occidental, el Gpo. Calipuy descansa en discordancia sobre las unidades Jurásicas (figura V-20).

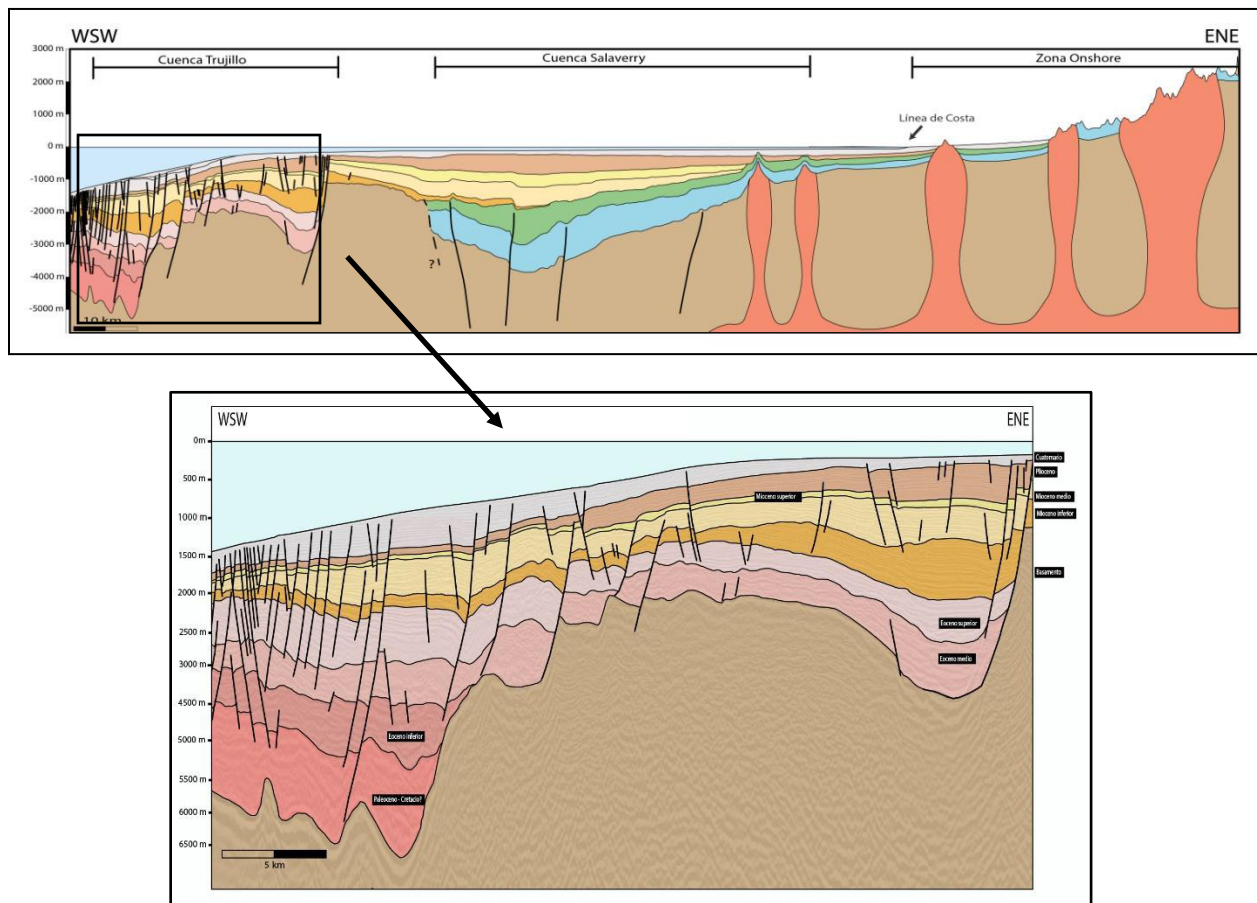


Figura V-19. Grabens y hemigrabens formado por fallas normales. Fuente: propia..

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

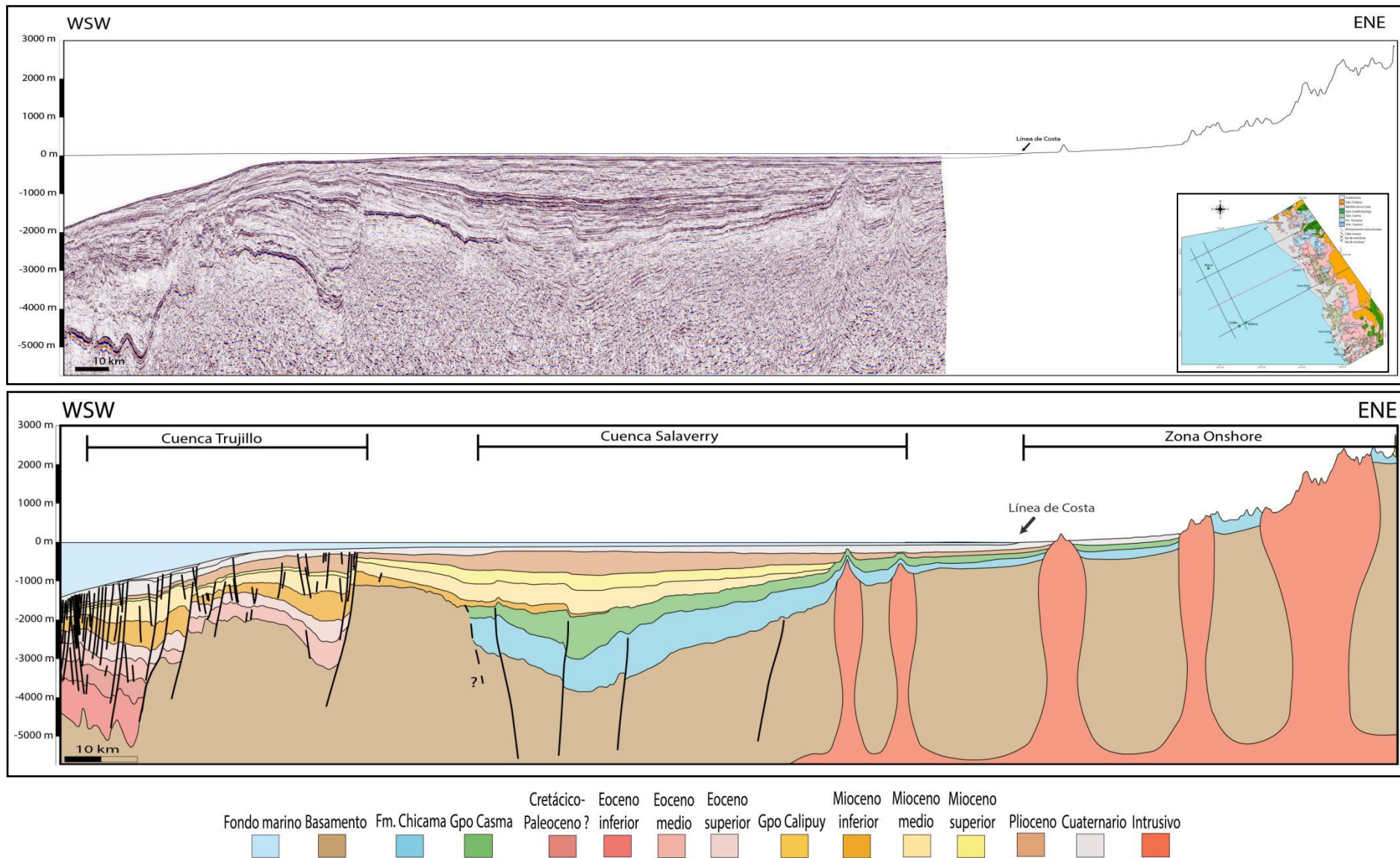


Figura V-20. Interpretación de la sección Sísmica 93-43 - Trujillo (Hasta la Cordillera Occidental). Fuente: propia.

5.4.3. Sección estructural 3

La Cuenca Trujillo se encuentra limitada por el mismo alto estructural (OSH) y cortado por una falla normal maestra que corta el basamento presentando un sistema de fallas antitéticas y en menor proporción fallas sintéticas desarrollando hemigrabenés (figura V-21), los cuales generan un depocentro donde se depositaron posiblemente las secuencias del Cretácico y Paleoceno, que están depositados en un área confinada controlada por dichas estructuras. Posteriormente se muestran que hubo un levantamiento tectónico, lo que originó la erosión las secuencias del Mioceno superior y Plioceno,

En la cuenca Salaverry, las unidades del Eoceno se encuentran limitadas hacia el oeste de esta cuenca descansando en onlap sobre el basamento. Las secuencias del Mioceno y Plioceno se acuñan progresivamente hacia el continente y son afectadas por fallas normales, finalmente se observa fallas inversas con buzamiento hacia el este y oeste que deforman las secuencias del mioceno y que cortan las unidades del Cretácico y Jurásico, estas unidades Mesozoicas son extrapoladas de los afloramientos de la zona costera y se encuentran limitadas al oeste por la prolongación de la Cordillera de la Costa.

Las secuencias del Mioceno se encuentran en toda la sección afectadas por fallas normales.

La zona onshore ha sido levantada por cuerpos intrusivos y fallas inversas lo que dio pie el afloramiento y plegamiento de las secuencias Jurásicas y Cretácicas (figura V-22).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

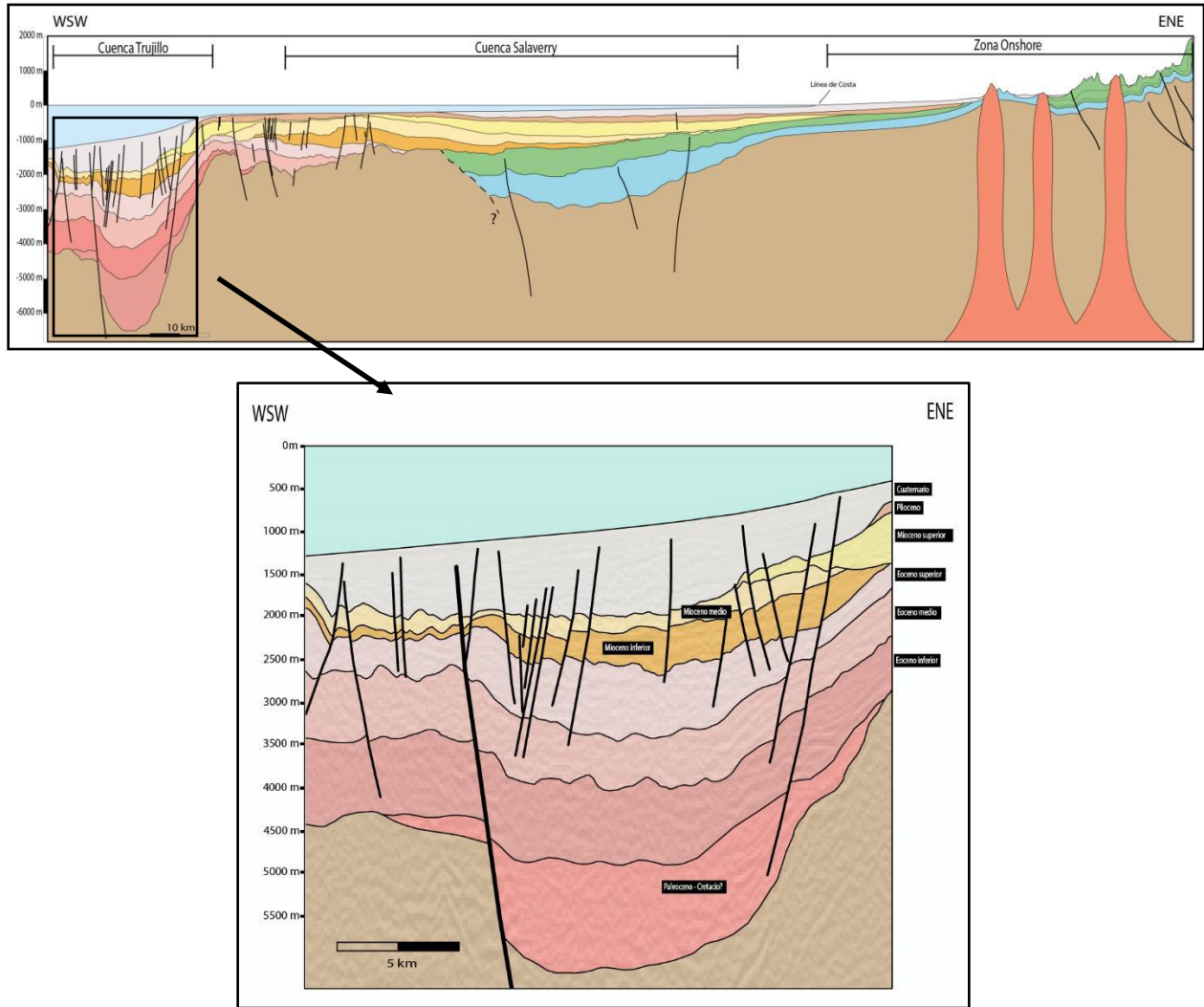


Figura V-21. Secuencias del Cenozoico cortado por la falla normal maestra. **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

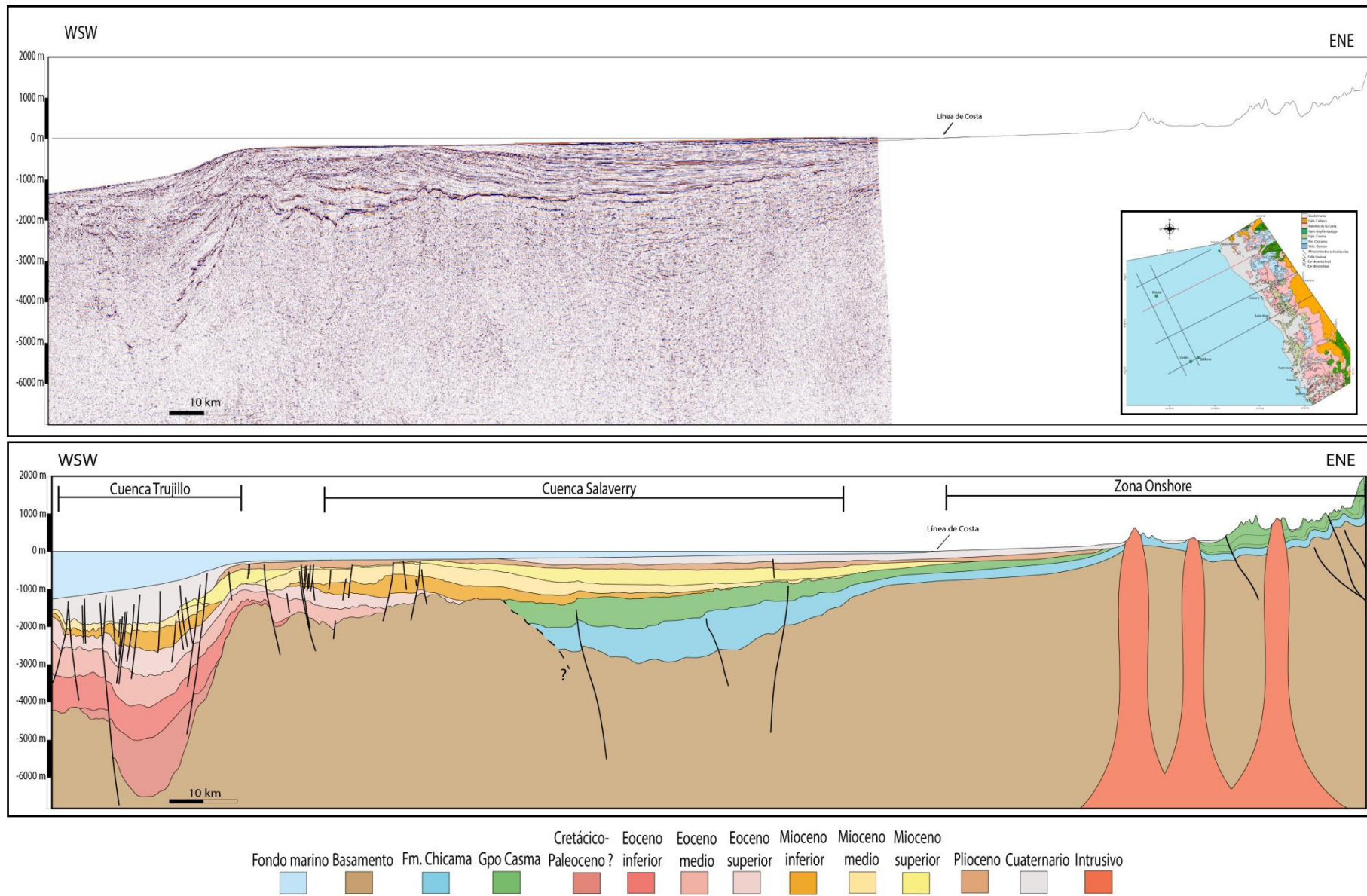


Figura V-22. Interpretación de la sección Sísmica 93-40 - Trujillo (Hasta la Cordillera Occidental). Fuente: propia.

5.4.4. Sección estructural 4

La cuenca Trujillo se caracteriza por presentar un estilo extensional, se encuentra limitado por una falla normal maestra, que corta el basamento, presentando un sistema de fallas antitéticas y en menor proporción fallas sintéticas desarrollando hemigrabens. Esta falla maestra generó un depocentro donde se depositaron las posibles secuencias del Paleoceno y Cretácico siendo confinados para esta cuenca. El Eoceno se encuentra depositado en onlap sobre el basamento. La falla maestra sufre un proceso de inversión (figura V-23), siendo evidenciado por el ligero levantamiento de la parte oeste de esta cuenca, desarrollando ligera deformación sobre las secuencias cortadas.

En la cuenca Salaverry el Mioceno y Plioceno se acuan progresivamente hacia el continente sobre las estructuras formadas por cuerpos intrusivos, también estas secuencias son afectadas por fallas normales. Se observa deformación de las secuencias del Mioceno que son asociadas a las fallas inversas, que buzan hacia el este y oeste, que cortan las secuencias Jurásicas y Cretácicas. Las unidades Mesozoicas son extrapoladas de los afloramientos de la zona costera y se encuentran limitadas al oeste por la prolongación de la Cordillera de la Costa (figura V-24).

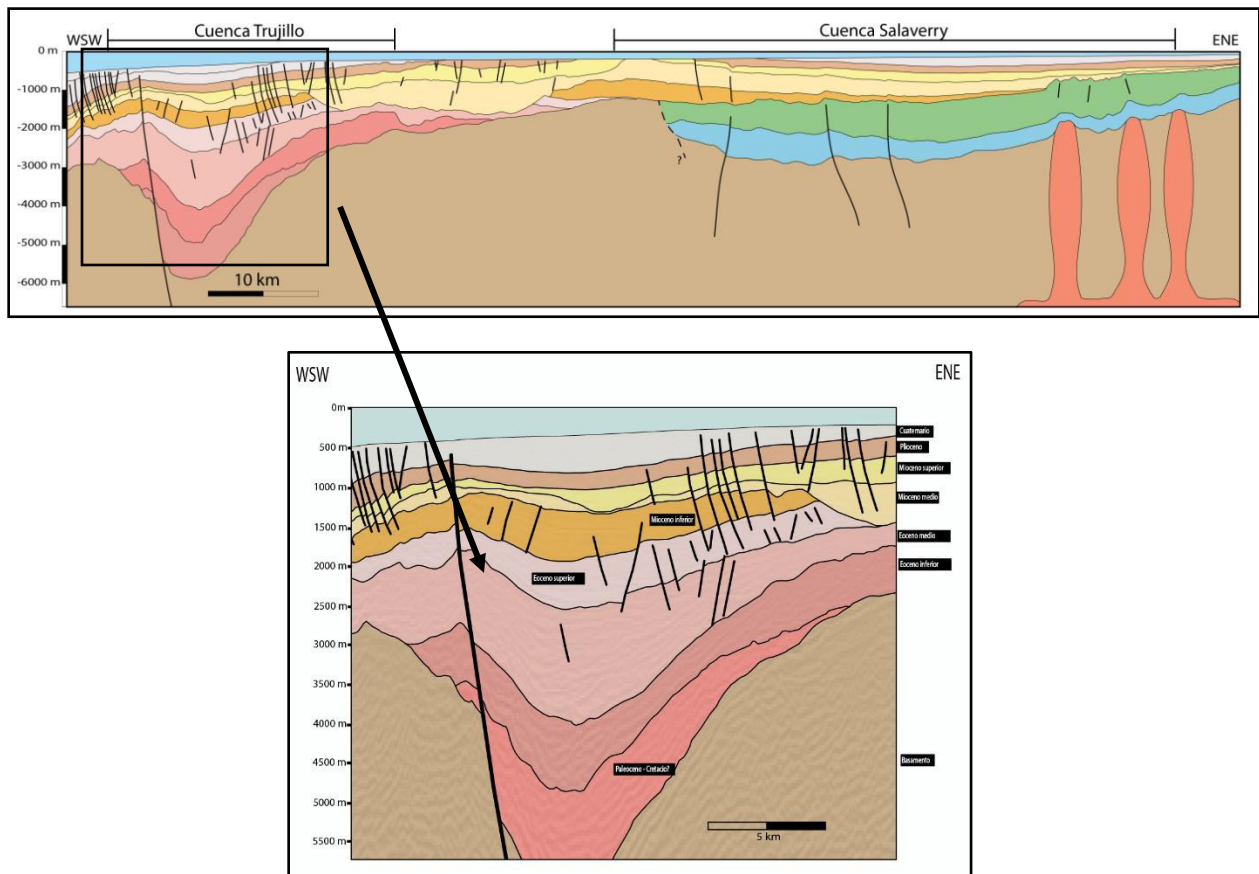


Figura V-23: Falla normal maestra invertida, formando un anticlinal. **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

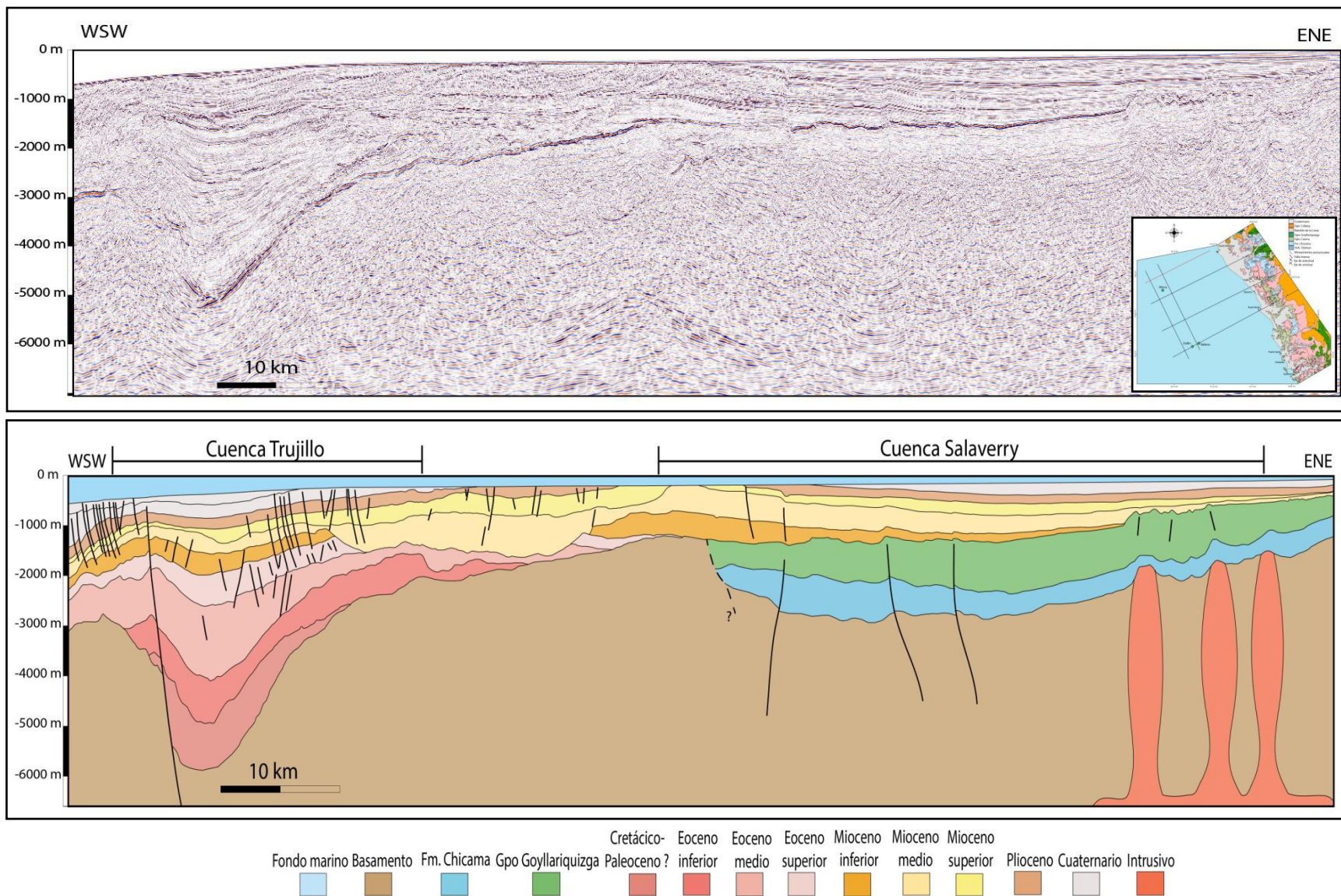


Figura V-24. Interpretación de la sección Sísmica 93-38. Fuente: propia.

5.4.5. Sección estructural 5

Esta sección está ubicada en la plataforma continental, y esta paralela a la costa. El sustrato presenta un relieve con altos y bajos los cuales controlan la depositación de las secuencias interpretadas.

Al norte de la sección, se observa que el estilo estructural se encuentra controlada por la falla normal maestra que corta el basamento, desarrollando un depocentro para las posibles secuencias Cretácicas y del Paleoceno que solo se encuentran en esta parte. En esta zona, se observa que las secuencias del Eoceno inferior descansan en onlap sobre el basamento siendo así limitado solo para esta área. Este sector ha sufrido un levantamiento tectónico lo que originó un mayor proceso de erosión siendo evidenciado por los cañones de gran tamaño generados durante el Mioceno medio y superior. La falla maestra sufre un proceso de inversión lo que dio pie a la formación de un anticlinal de gran longitud (figura V-26).

Al sur de la sección, se observa un depocentro importante (aproximadamente 1500 m de profundidad) que es rellenado por secuencias del Eoceno medio y superior. El Mioceno medio tiene una superficie erosiva determinado por los cañones interpretados a lo largo de la sección. La geometría extensional se encuentra evidenciado por la presencia de horst y grabenes (figura V-25)

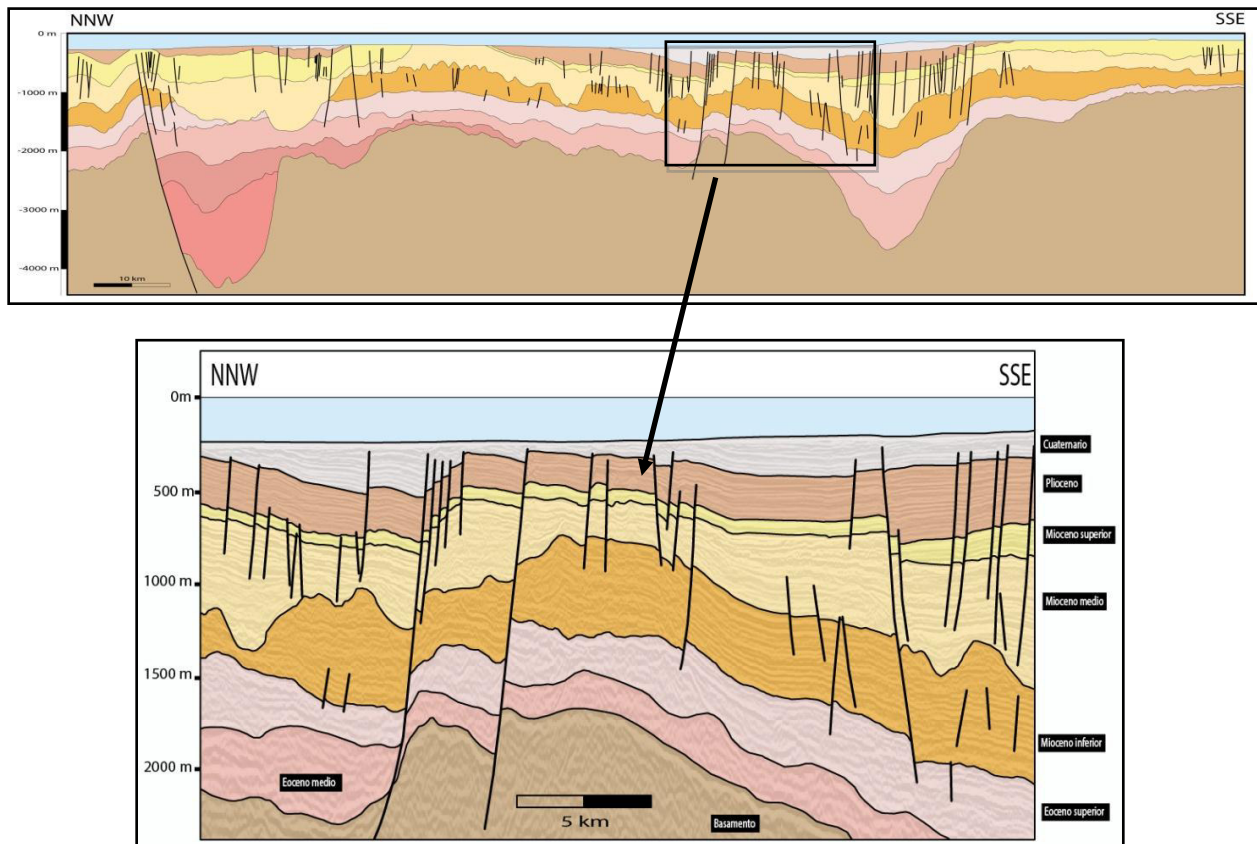


Figura V-25. 1. Sistema de fallas normales que forman horsts y grabenes. Fuente: propia..

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

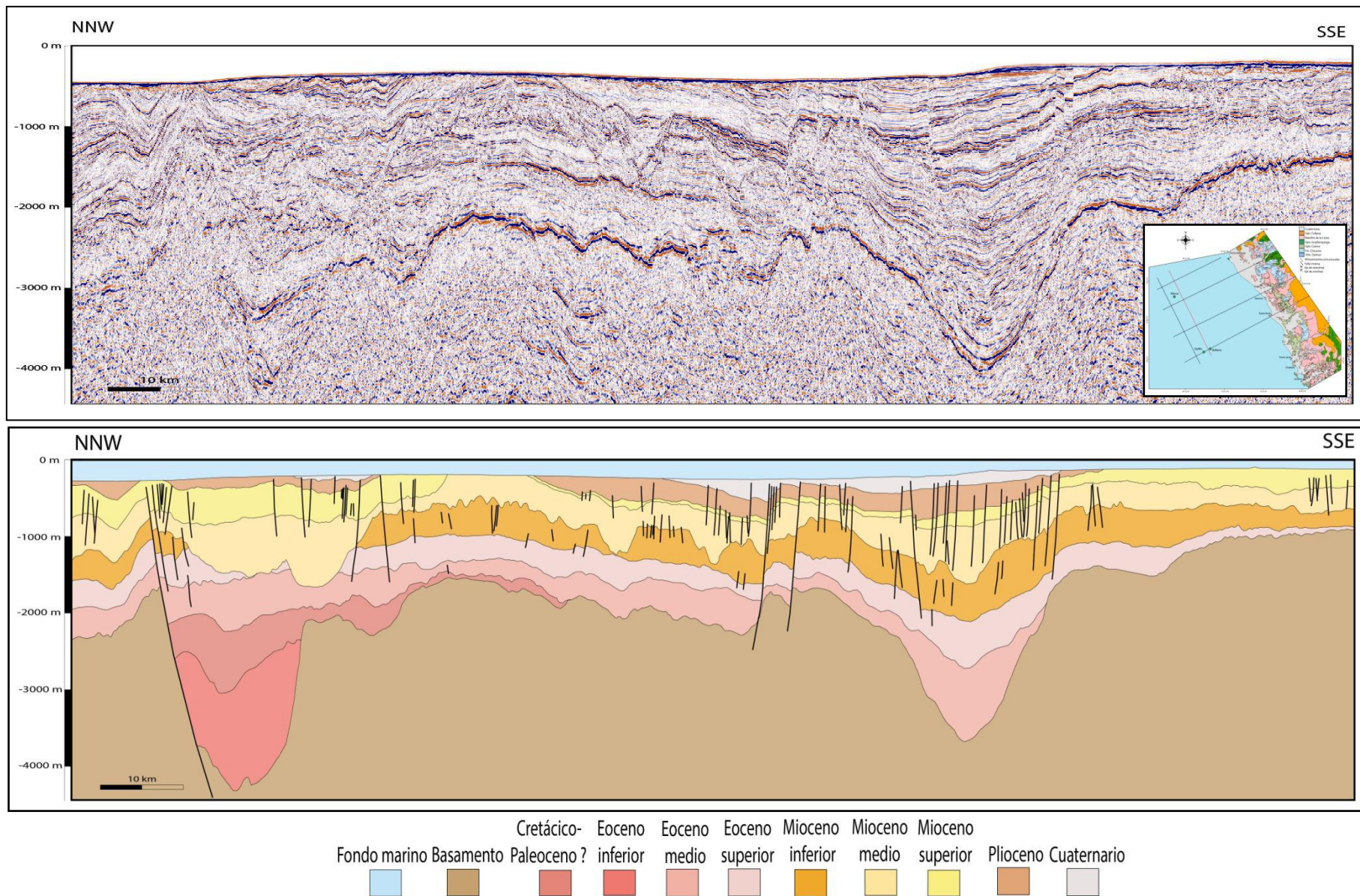


Figura V-26. Interpretación de la sección sísmica 96-04. Fuente: propia.

5.4.6 Sección estructural 6

Esta sección está ubicada en el talud superior, y paralela a la costa (ver figura IV-16). Se encuentra controlado por un estilo extensional y eventos compresivos. El sustrato presenta un relieve con altos y bajos (Graben y Horst) los cuales controlan la deposición de las secuencias interpretadas.

El norte de la sección, los rasgos estructurales se encuentran controlados por la falla normal maestra que corta el basamento, presentando un sistema de fallas sintéticas y en menor proporción fallas antitéticas. Posibles secuencias Cretácicas y del Paleoceno descansan en onlap sobre el basamento. El Mioceno se encuentra en toda la sección siendo afectada por fallas normales (figura V-27). Se observa en la sísmica que hay un mayor proceso de erosión formado hacia el lado norte de la sección, evidenciado por los cañones.

En el centro de la sección, aparece un alto (Horst) generando un basculamiento de las secuencias cortadas. Finalmente, el sur de la sección sufrió un proceso de levantamiento desarrollando un alto estructural que dio pie a la erosión del Plioceno (figura V-28).

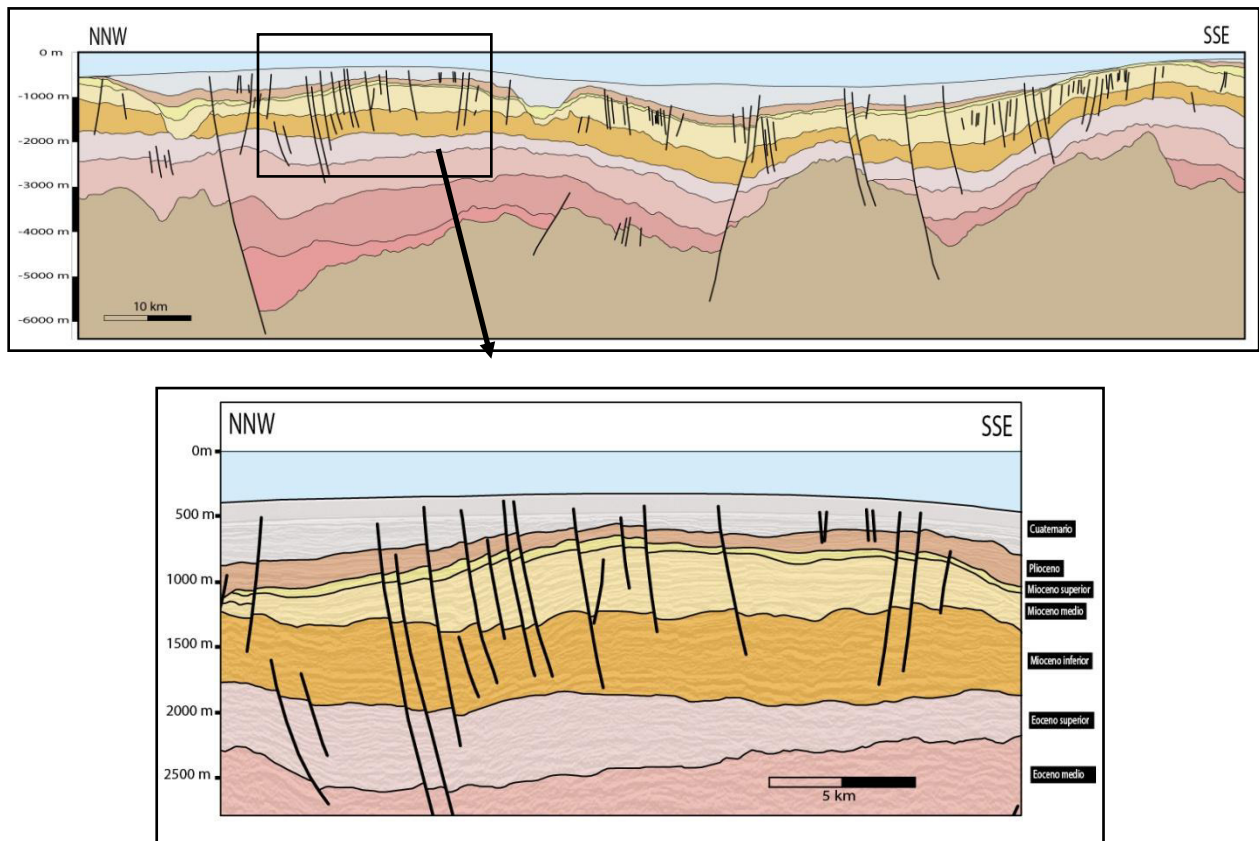


Figura V-27. Fallas normales que cortan las unidades del Cenozoico. Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

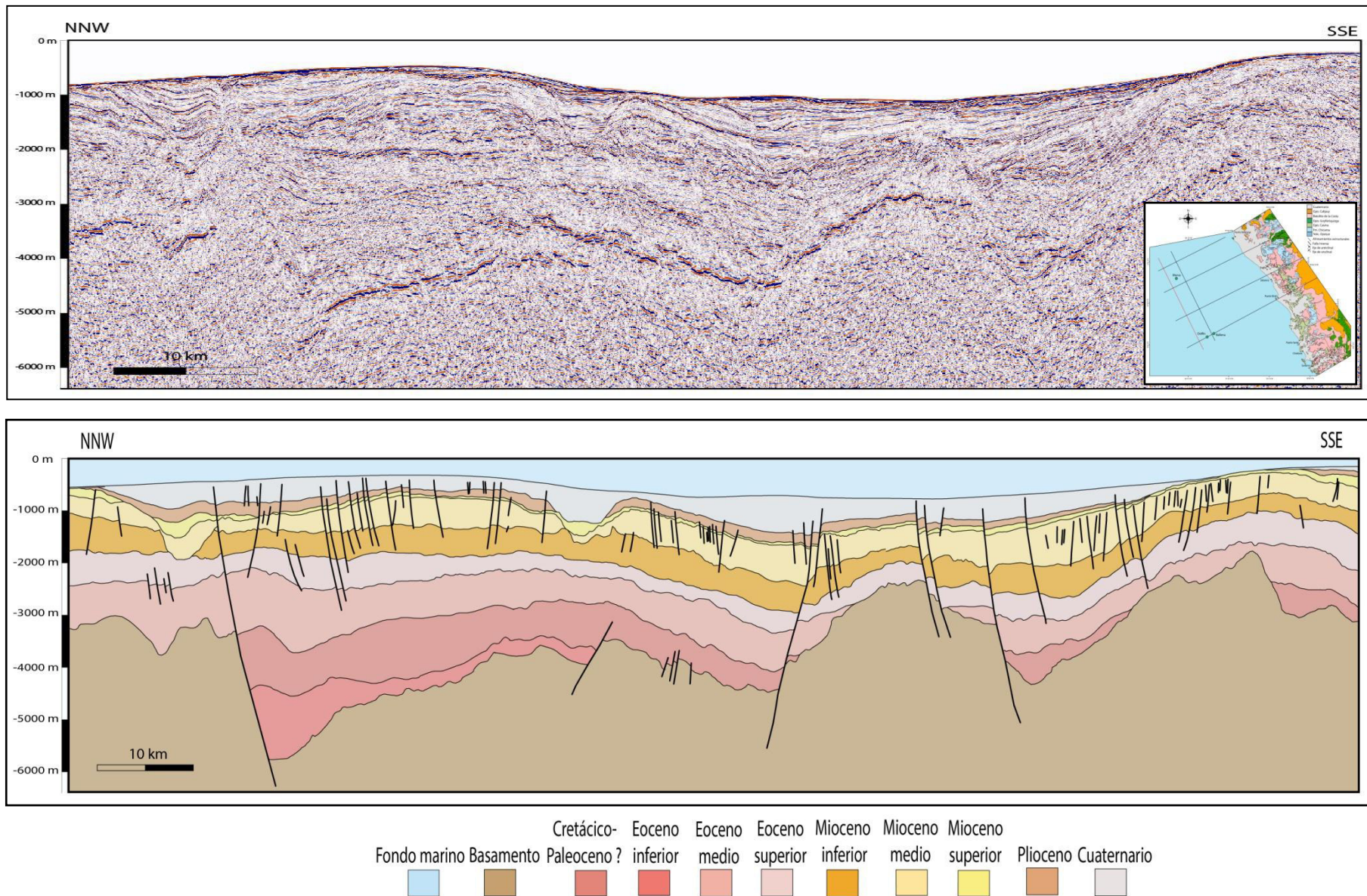


Figura V-28. Interpretación de la sección sísmica 96-12. Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

En la vista 3D de la Cuenca Trujillo (figura V-29), en el sector oeste, se observa como varía a lo largo de norte a sur el estilo de deformación controlado por la falla normal maestra. Las secuencias Cretácicas como Cenozoicas son cortadas por esta falla, y fallas antitéticas y sintéticas. En la sección norte (93-40) se observa que la erosión cuaternaria es más intensa que en la sección inferior (93-44), erosionando las unidades del Mioceno medio-superior y Plioceno.

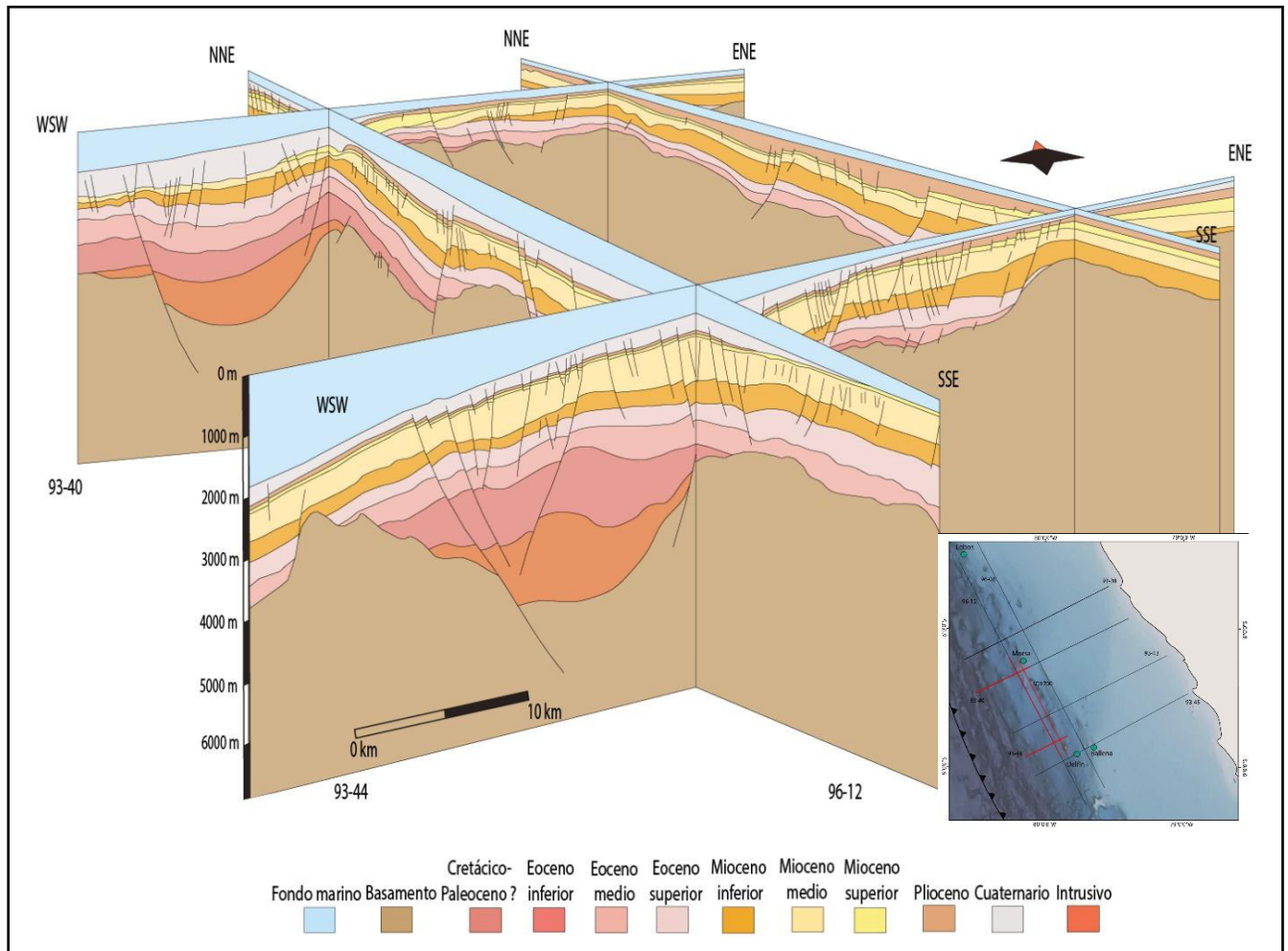


Figura V-29. Vista 3D de las secciones 93-40, 93-44, 96-12 y SD1700 en la Cuenca Trujillo. Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

En la vista 3D de la figura V-30 se observa que la erosión del Mioceno medio es más intensa hacia el norte de la zona de estudio. La evolución estructural y depositacional varía de sur a norte. Las secuencias del Paleoceno y Cretácico solo se encuentran presentes en el norte, esto nos indicaría que la falla maestra desarrolló un mayor hundimiento hacia el norte.

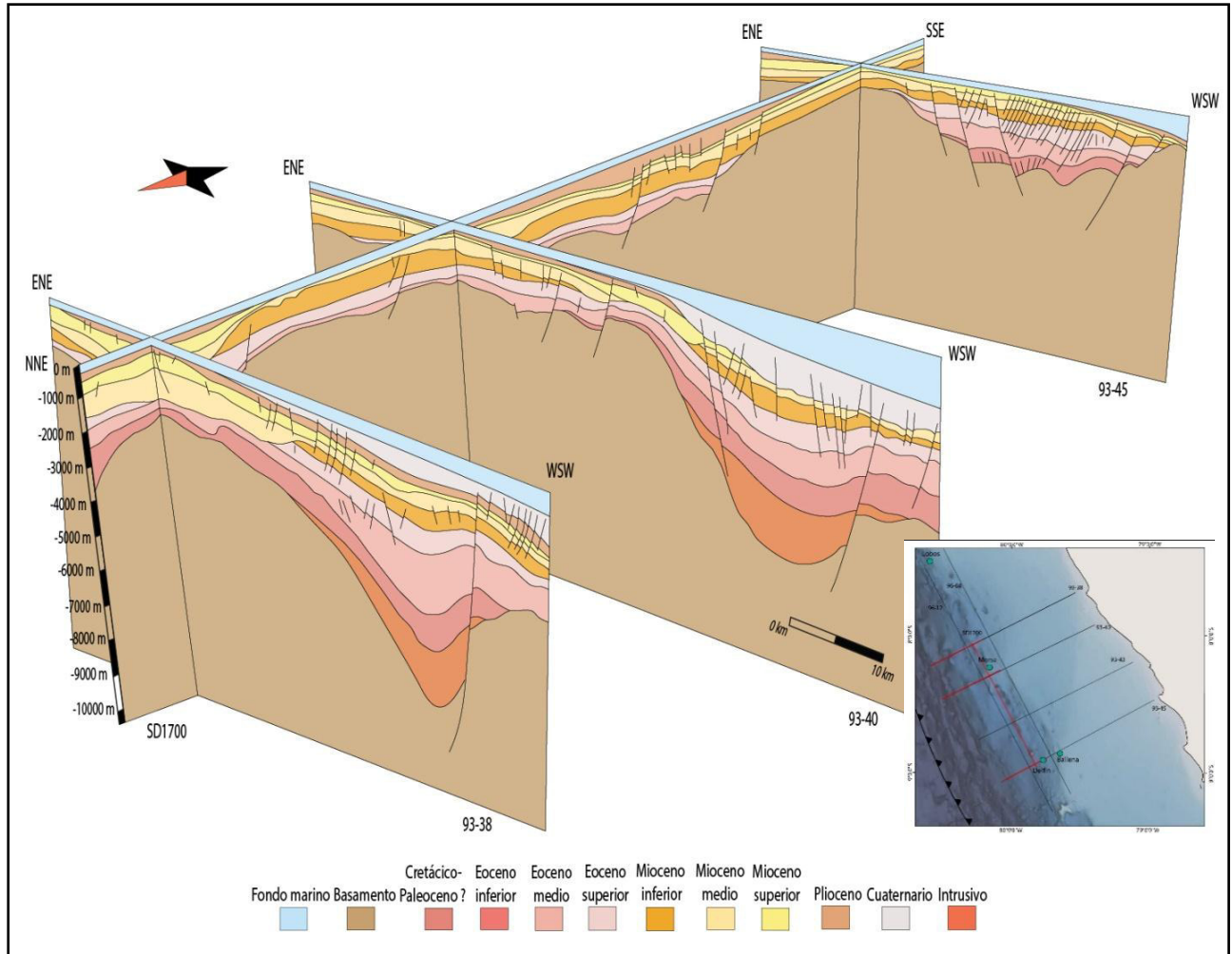


Figura V-30. Vista 3D de las secciones 93-38, 93-40, 93-45 y SD1700 en la Cuenca Trujillo. Fuente: propia.

5.5. INTERPRETACIÓN DE CUBOS SISMICOS

La interpretación consiste en darle un significado geológico a toda la información, ubicando la profundidad de los horizontes de interés, a partir de las secciones sísmicas.

En este trabajo se realizó la interpretación de 4 cubos sísmicos (ver ubicación en la figura V-31) 1 en la Cuenca Trujillo y 3 en la Cuenca Salaverry. El primer paso que se realizó fue analizar los reflectores fuertes a lo largo del cubo sísmico, a partir de la primera correlación de los horizontes obtenidos por los pozos exploratorios se comienza a interpretar sistemáticamente en distintas direcciones, obteniéndose así un mallado. Para la interpretación de fallas se observó la interrupción o cambio de continuidad de los horizontes, ya interpretados en cada línea a partir de la sísmica 2D. Para disminuir el grado de incertidumbre de la localización exacta de las fallas, se utilizó el atributo sísmico "inline dip" en el software ASSPI de la universidad de Oklahoma (web 1, 2016), ya que solo utilizando la sísmica, las fallas de poco desplazamiento no son evidentes. Para la interpretación se hizo el recorrido de todas las líneas inlines, crosslines y time slide.

Una vez que los horizontes y las fallas han sido identificados e interpretados, se elaboran los mapas en tiempo para cada nivel geológico interpretado. La obtención de estos mapas se basa en la generación de una malla a partir de los valores de tiempo obtenidos al nivel de los reflectores de interés, y su posterior interpolación para la generación de contornos.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

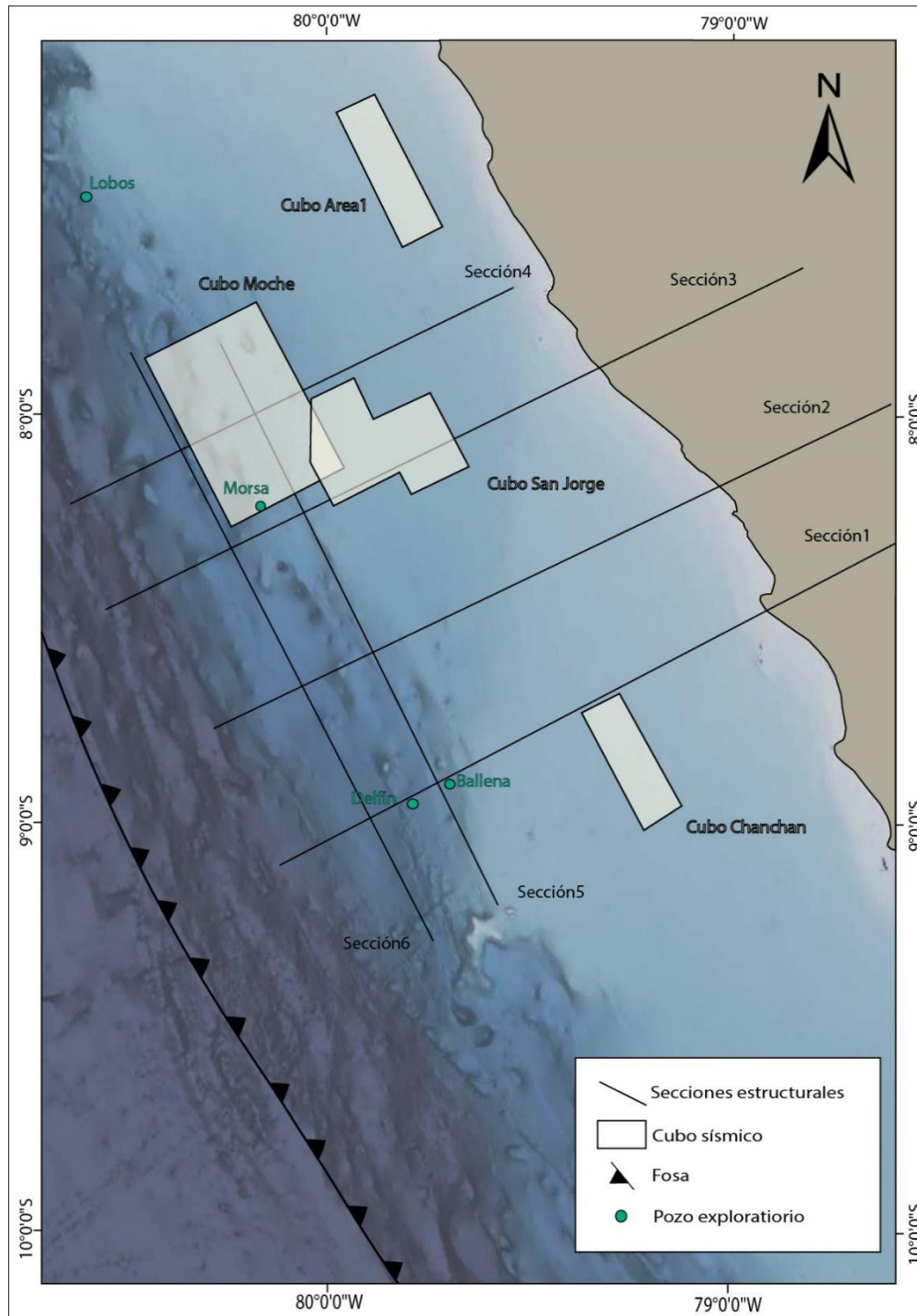


Figura V-31. Ubicación de los cubos sísmicos interpretados. Fuente: propia.

5.5.1 Cubo Sísmico Chanchan

En este cubo sísmico ubicado al sur de la zona de estudio, en la plataforma continental (figura V-31), se procedió a la identificación de los horizontes sísmicos y el marcador geológico al cual corresponde, teniendo como garantía la continuidad del horizonte a lo largo de la sección sísmica. Fueron interpretados 5 horizontes (figura V-32 y V-33) los cuales son la base del Terciario, Mioceno medio, Mioceno superior, Plioceno y Cuaternario. También se interpretó un conjunto de fallas las cuales desarrollaron estructuras compresivas como distensivas. Esas fallas fueron mapeadas en los mapas generados con la interpretación de cada horizonte. Las fallas inversas solo cortan secuencias que se encuentran debajo de la base del terciario, así como las fallas normales solo cortan las secuencias superiores a la base del Terciario. Se reconocieron estructuras favorables, pliegues como trampas estructurales y discordancias como posible sello dentro del sistema petrolero para esta cuenca.

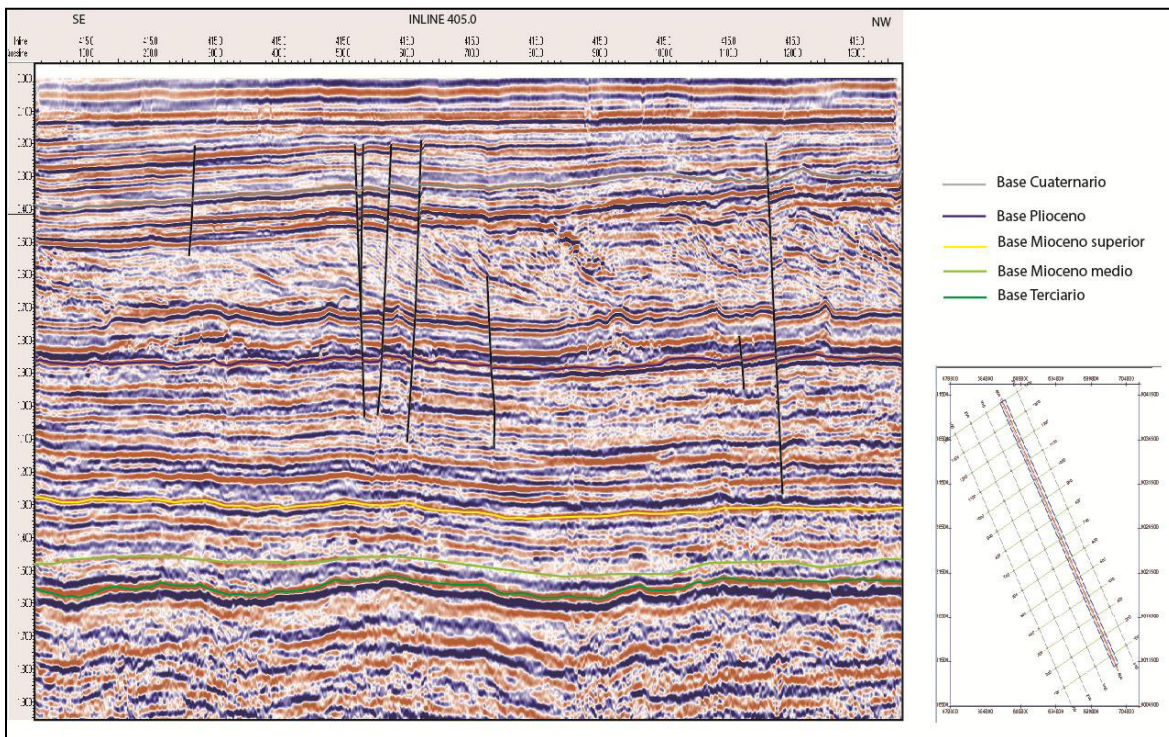


Figura V-32. Inline 405 del cubo sísmico Chanchan mostrando los horizontes interpretados. Fuente: propia.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

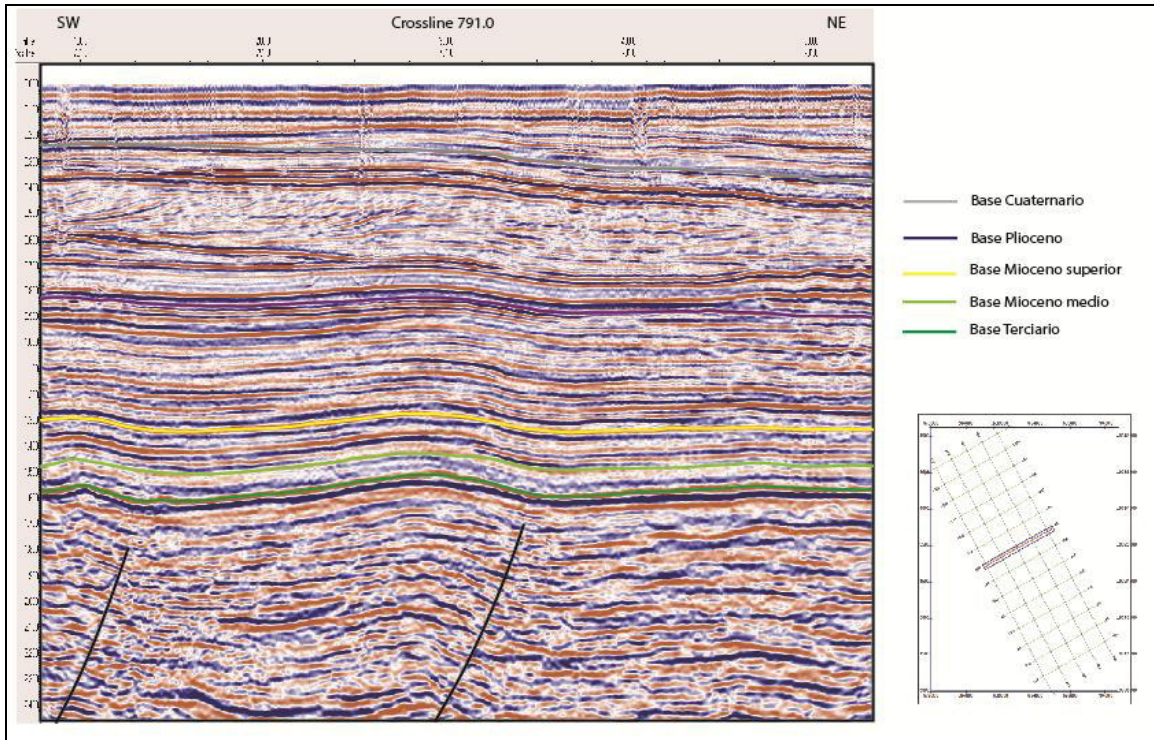


Figura V-33. Crossline 791 del cubo sísmico Chanchan mostrando los horizontes interpretados. **Fuente:** propia.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Para el horizonte denominado base del Terciario, no fue difícil identificarlo por presentar buena continuidad y alta amplitud de reflexión, característica que pudo ser reconocida en varias de las secciones sísmicas interpretadas. Se realizó el mapa en tiempo correspondiente de la base del Terciario. En la figura V-34 se muestra la interpretación del horizonte interpretado en una vista 3D y dos secciones sísmicas 2D (Inline y Crossline).

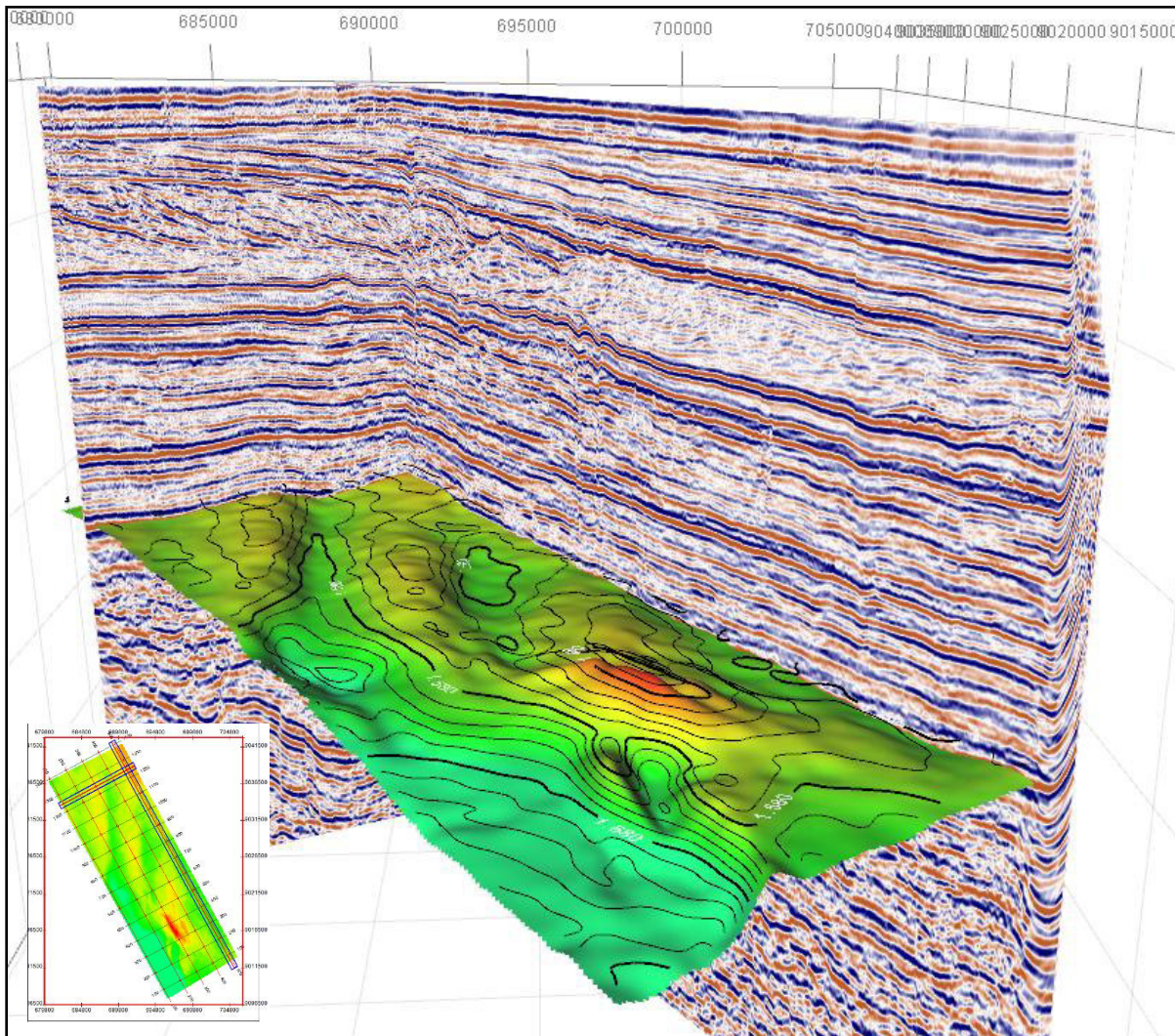


Figura V-34. Mapa en amplitud con interpretación del horizonte de la base del Terciario en vista 3D (Cubo Chanchan). **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Para realizar un estudio de los sistemas de fallas menores es necesario hacer un análisis con un tipo de atributo sísmico que ayuda a reconocer esas discontinuidades que algunas veces resultan un poco difíciles de interpretar. Estos atributos ayudan a revelar tendencias de fallas, alineaciones y de anomalías estructurales que no son fáciles de observar o no están bien definidas por los mapas estructurales en tiempo. En la figura V-35 se observa un time slice del flattening de la base del Terciario en amplitud y con el atributo de inline dip, este atributo permite resaltar y visualizar rasgos estructurales, tendencias de fallas y alineaciones.

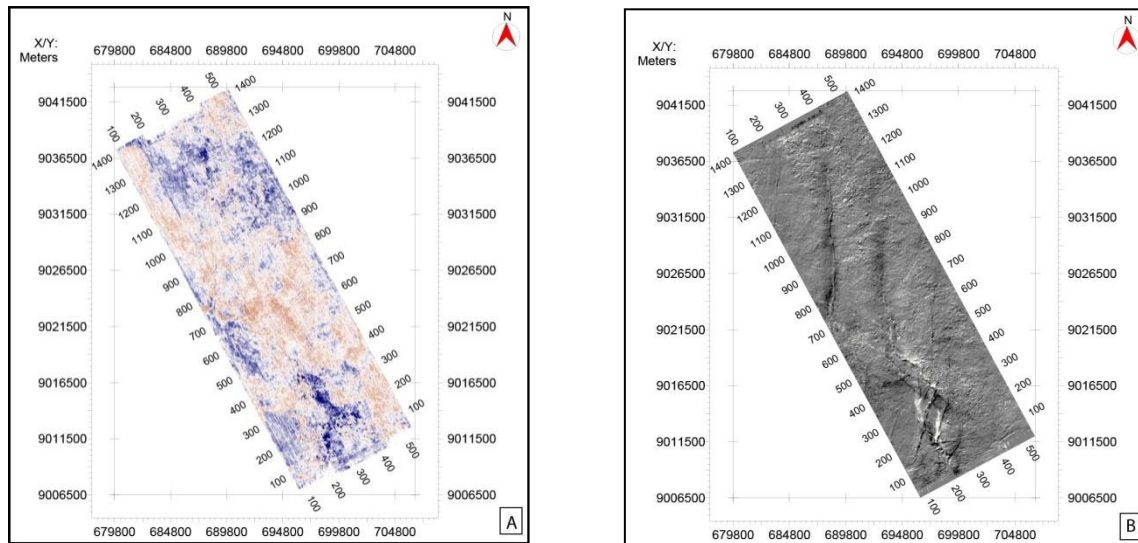


Figura V-35. Diferente presentación para el time slice del flattening del horizonte de la base del Terciario a través del Cubo Sísmico Chanchan. a) Vista en Amplitud b) Vista del atributo inline dip. **Fuente:** propia.

El mapa de time slice con el atributo inline dip del flattening de la base del Terciario presenta un conjunto de fallas inversas principales de orientación preferencial de NNE-SSW.

El norte está enmarcado por 2 anticlinales de rumbo NNE-SSW (figura V-36). Hacia el sur se observa fallas inversas con rumbo NNE-SSW con variación de buzamiento tanto al SE como al NW, lo que dio pie a la formación de un depocentro limitado por estas fallas inversas. Finalmente se observa una falla inversa con rumbo NNW-SSE con buzamiento NE.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

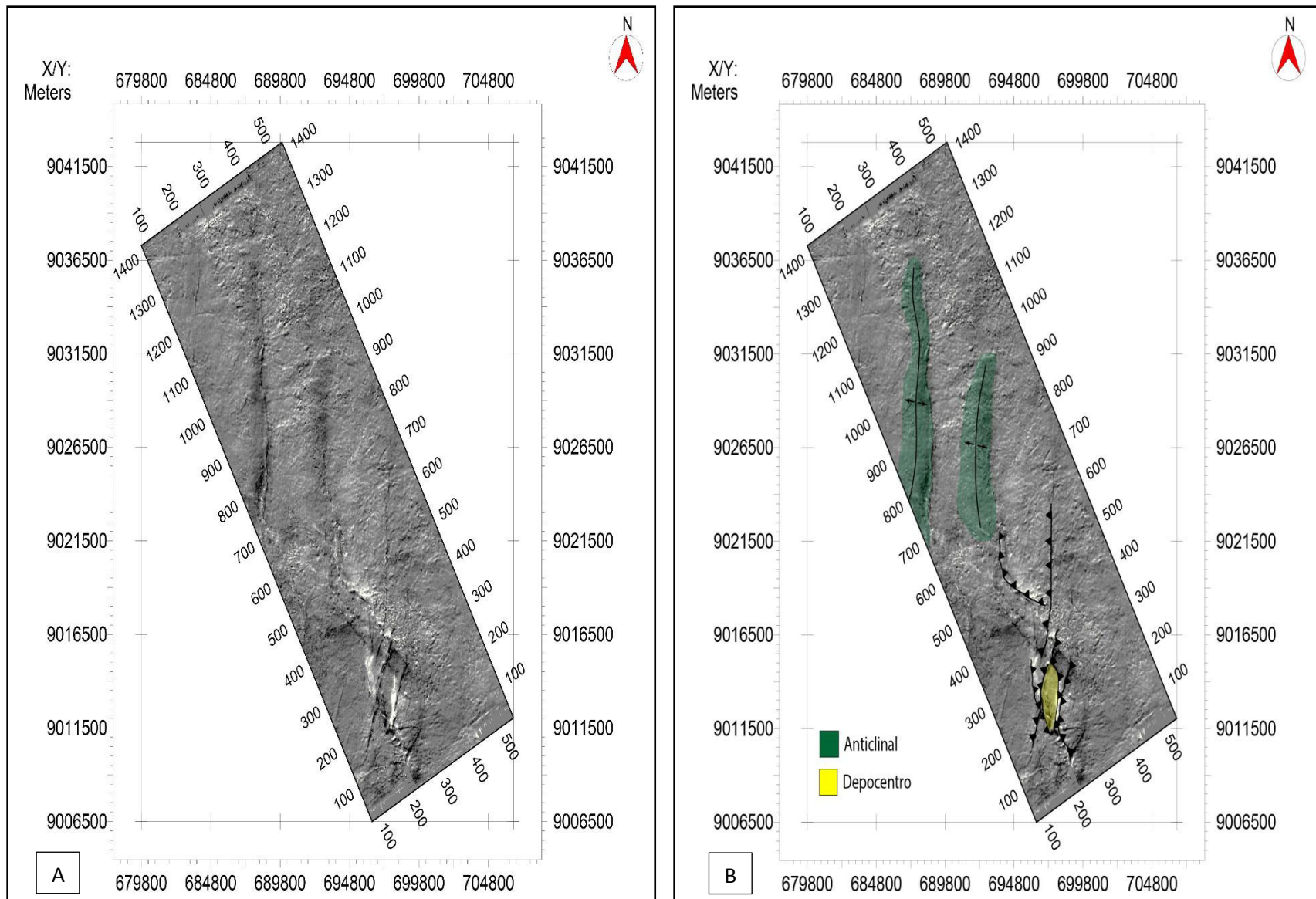


Figura V-36. Mapa del time slice con el atributo inline dip del flattening de la base del Terciario sin interpretar (a) e interpretado (b). Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Para el horizonte denominado base del Mioceno superior, no fue tan fácil identificarlo por no presentar buena continuidad en los reflectores sísmicos y alta amplitud de reflexión, característica que pudo ser reconocida en varias de las secciones sísmicas interpretadas. Se realizó el mapa en tiempo correspondiente de la base del Mioceno superior. En la figura V-37 se muestra la interpretación del horizonte interpretado en una vista 3D y dos secciones sísmicas 2D (Inline y Crossline).

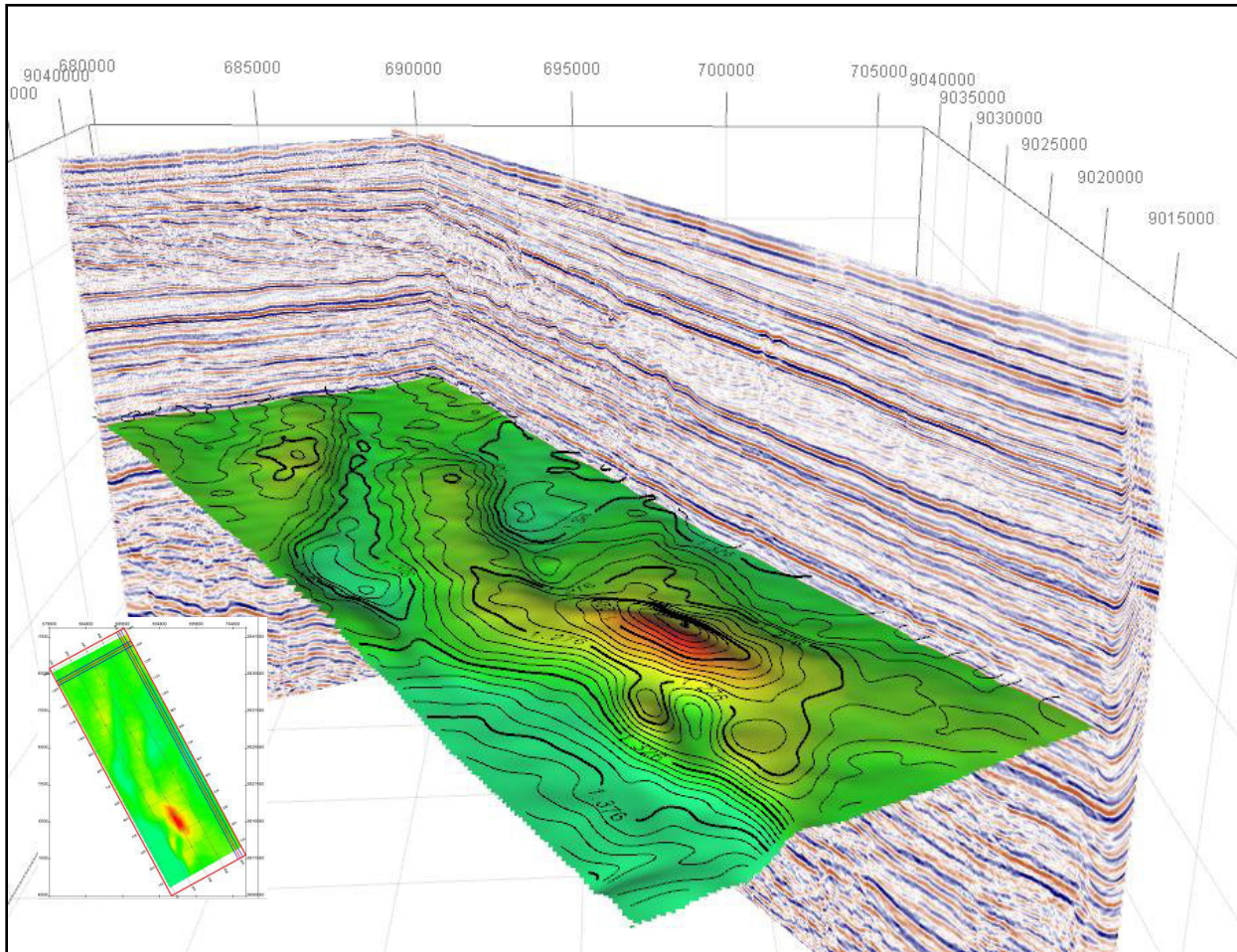


Figura V-37. Mapa en amplitud con interpretación del horizonte Mioceno superior en vista 3D (Cubo Chanchan). **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

En la figura V-38 se observa un time slice del flattening de la base del Mioceno superior en amplitud y con el atributo de inline dip, este atributo permite resaltar y visualizar rasgos estructurales, tendencias de fallas y alineaciones.

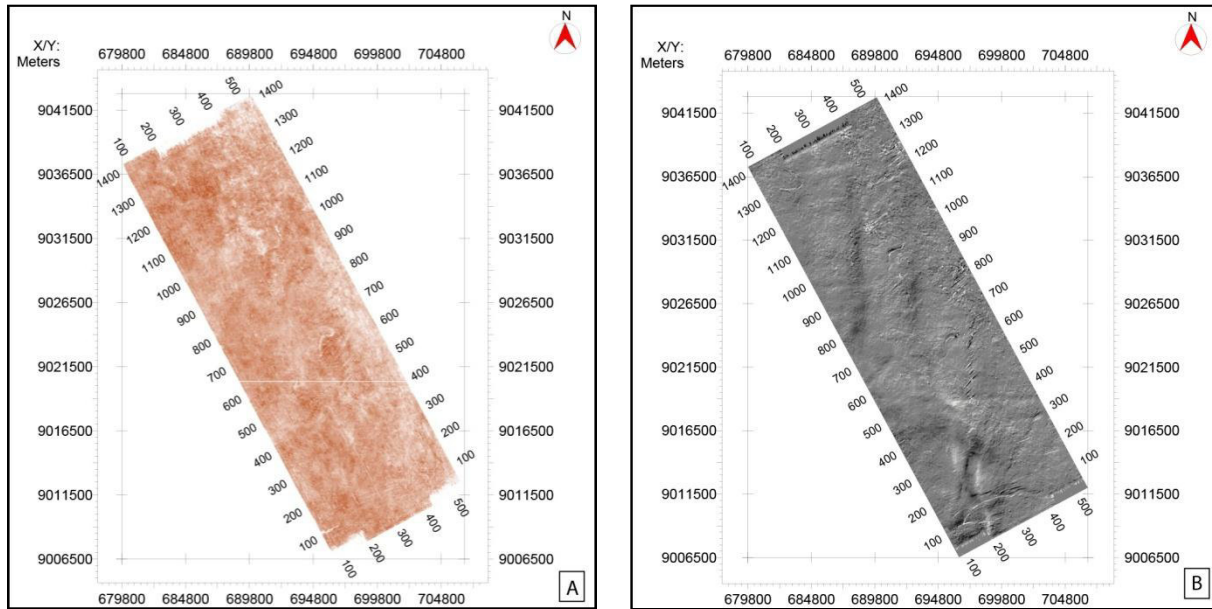


Figura V-38. Diferente presentación para el time slice del flattening del horizonte de la base del Mioceno superior a través del Cubo Sísmico Chanchan. a) Vista en Amplitud b) Vista del atributo inline dip. **Fuente:** propia.

En el mapa de time slice del flattening de la base del Mioceno superior (figura V-39), los anticlinales interpretados al norte presentan una menor intensidad de deformación al igual que al sur. De norte a sur se aprecia un conjunto de fallas normales con rumbo NE-SW y buzamiento variable tanto al NW como al SE, estas fallas normales tienen una geometría estructural de left stepping característica de una zona de cizalla de rumbo (Woodcock & Schubert, 1994). Al sur se observa un sistema de fallas normales con orientación EES-WWN y con buzamiento variable tanto al N como al S, estas fallas normales forman bajos (grabenés y hemigrabenés). Finalmente se observa el depocentro, posible cañón, limitado por altos estructurales

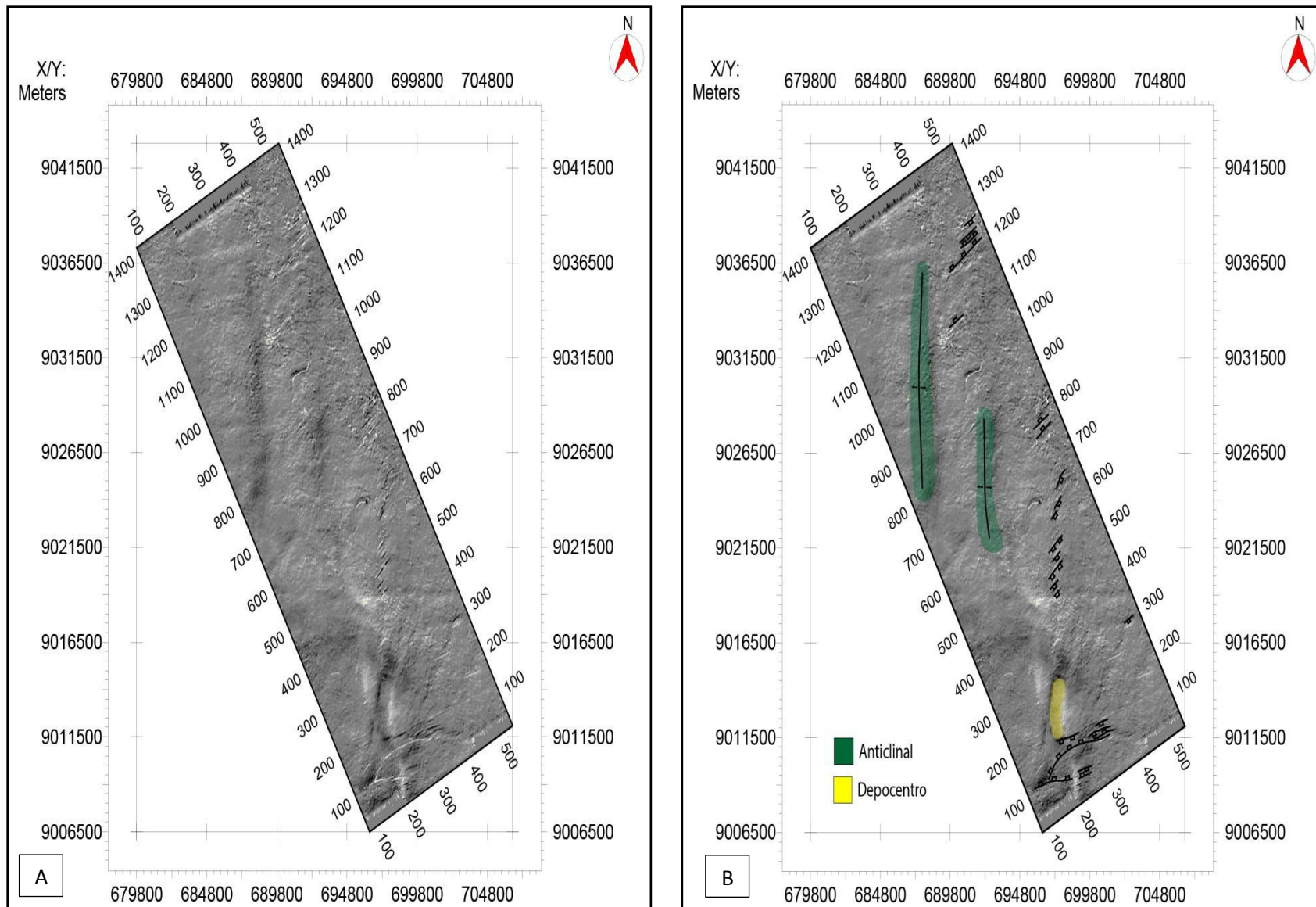


Figura V-39. Mapa del time slice con el atributo inline dip del flattening de la base del Mioceno superior sin interpretar (a) e interpretado (b). Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Para el horizonte denominado base del Plioceno, no fue tan fácil identificarlo por no presentar buena continuidad en los reflectores sísmicos y alta amplitud de reflexión, característica que pudo ser reconocida en varias de las secciones sísmicas interpretadas. Se realizó el mapa en tiempo correspondiente de la base del Plioceno. En la figura IV-40 se muestra la interpretación del horizonte interpretado en una vista 3D y dos secciones sísmicas 2D (Inline y Crossline).

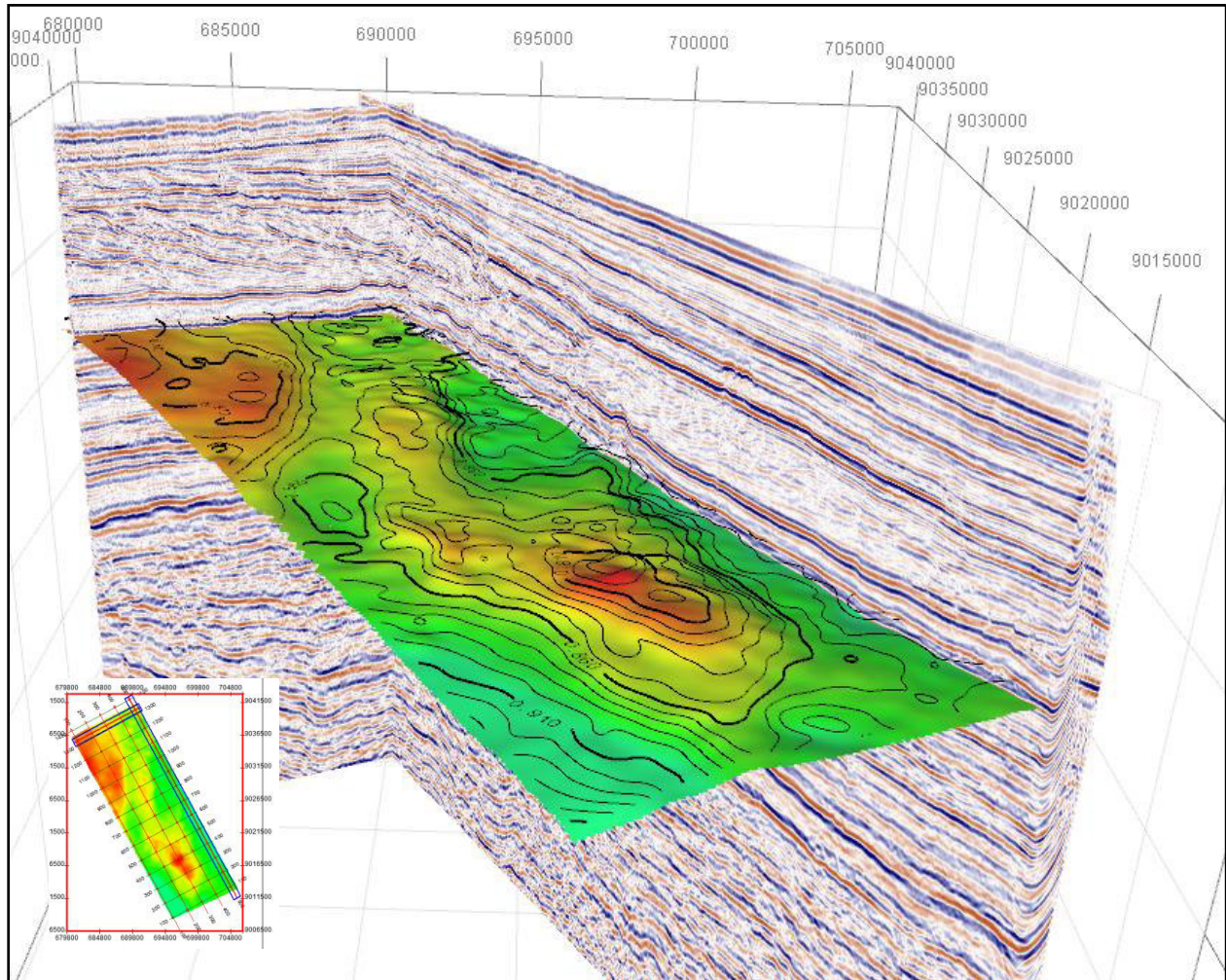


Figura V-40. Mapa en amplitud con interpretación del horizonte Plioceno en 3D (Cubo Chanchan). **Fuente:** propia.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

En la figura V-41 se observa un time slice del flattening de la base del Plioceno en amplitud y con el atributo de inline dip, este atributo permite resaltar y visualizar rasgos estructurales, tendencias de fallas y alineaciones.

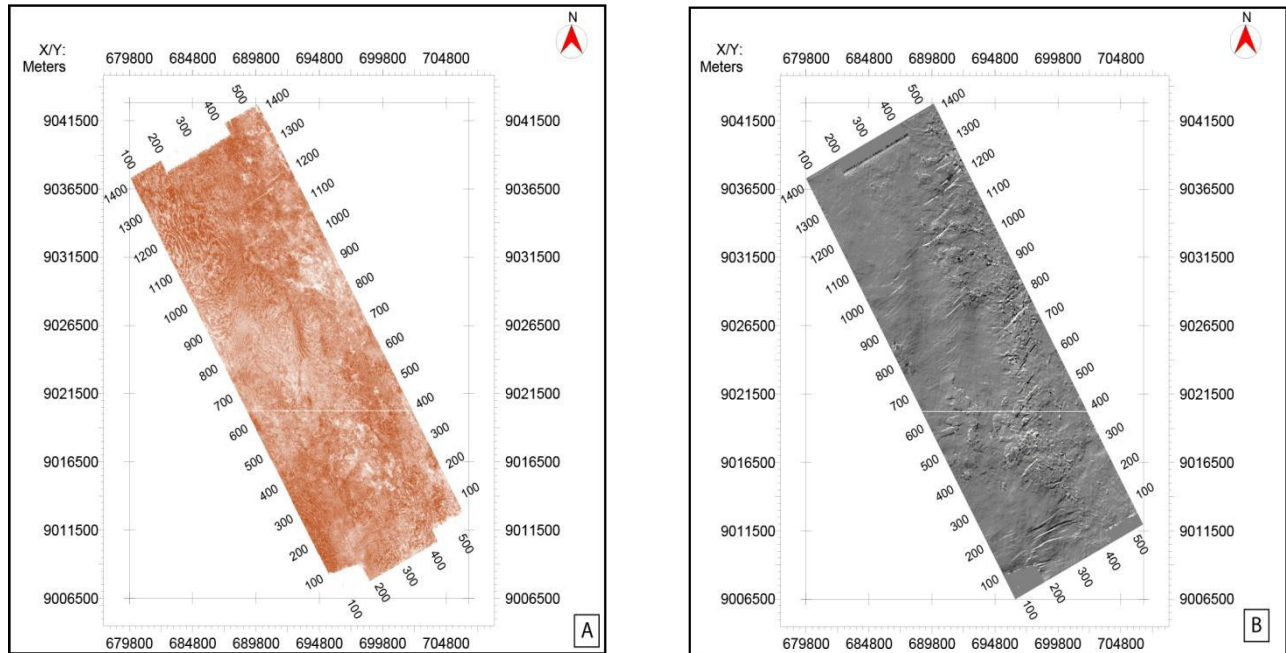


Figura V-41. Diferente presentación para el time slice del flattening del horizonte de la base del Plioceno a través del Cubo Sísmico Chanchan a) Vista en Amplitud b) Vista del atributo inline dip. **Fuente:** propia.

Se observa en el mapa de time slice del flattening de la base del Plioceno (figura V-42) que los anticlinales presentan una suave intensidad de deformación con tendencia al aplanamiento, estos han sido cortado por fallas normales. Se encuentra una mayor cantidad de fallas normales con rumbo NE-SW con buzamiento variable tanto al NW como al SE, lo que dio pie a la formación de bajos (grabenes y hemigrabenes). Al sur se observa un sistema de fallas normales con orientación EES-WWN y con buzamiento variable tanto al N como al S,

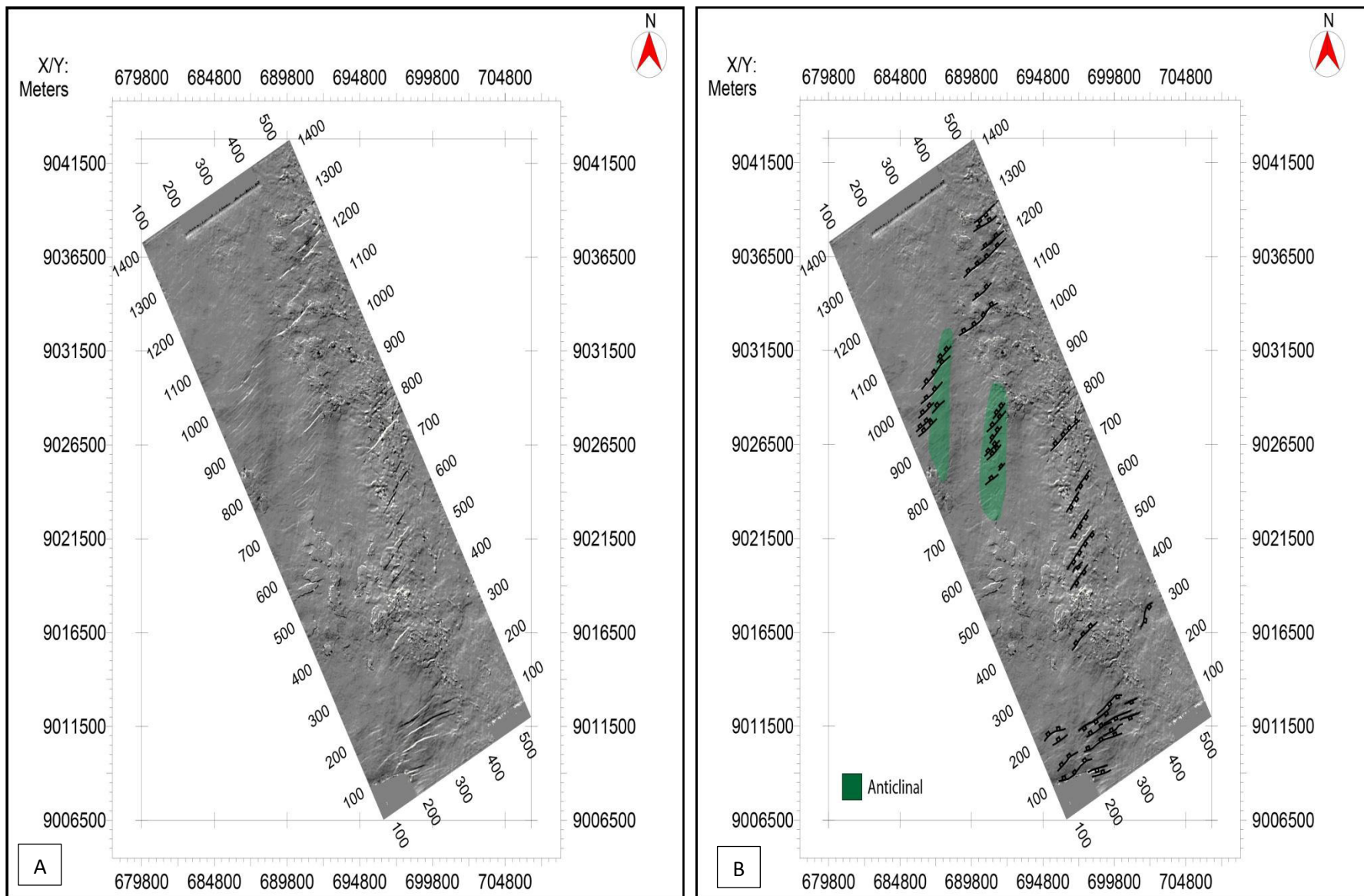


Figura V-42. Mapa del time slice con el atributo inline dip del flattening de la base del Plioceno sin interpretar (a) e interpretado (b). Fuente: propia.

5.5.2 Cubo Sísmico Área 1

En este cubo sísmico ubicado al norte de la zona de estudio cerca de la línea costera (figura V-31) fueron interpretados 3 horizontes (figura V-43 y V-44) los cuales son la base del Terciario, Mioceno superior y Plioceno. También se interpretó un conjunto de falla los cuales desarrollaron estructuras compresivas los cuales fueron mapeados en los mapas generados con la interpretación de cada horizonte. Es este cubo sísmico se pudo reconocer cuerpos volcánicos, estos altos formados son favorables para el entrapamiento de hidrocarburos.

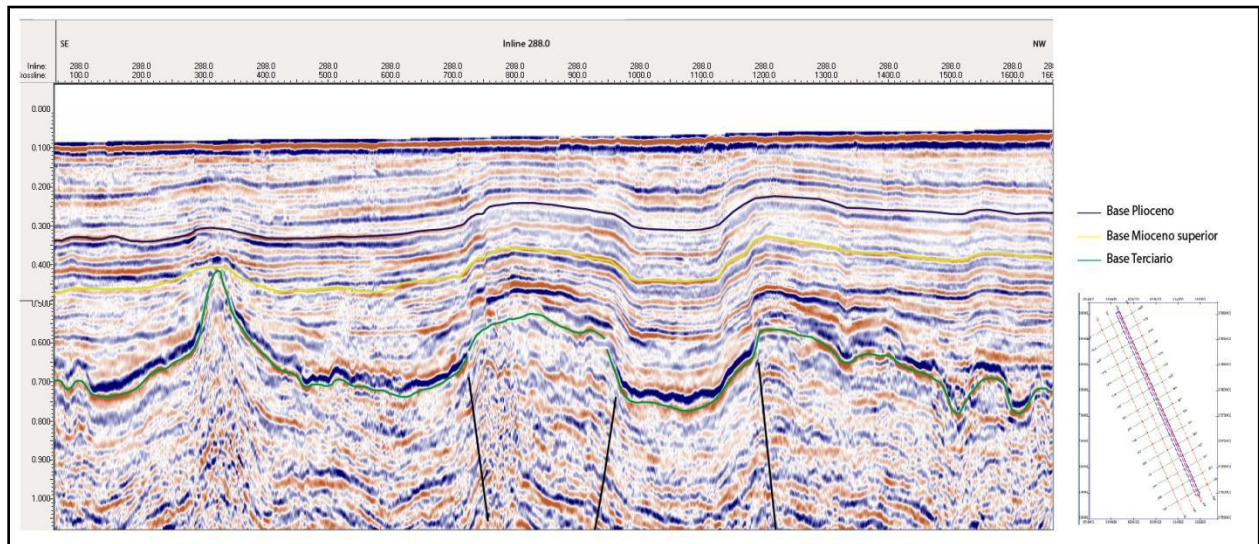


Figura V-43. Inline 288 del cubo sísmico Área 1 mostrando los horizontes interpretados. Fuente: propia.

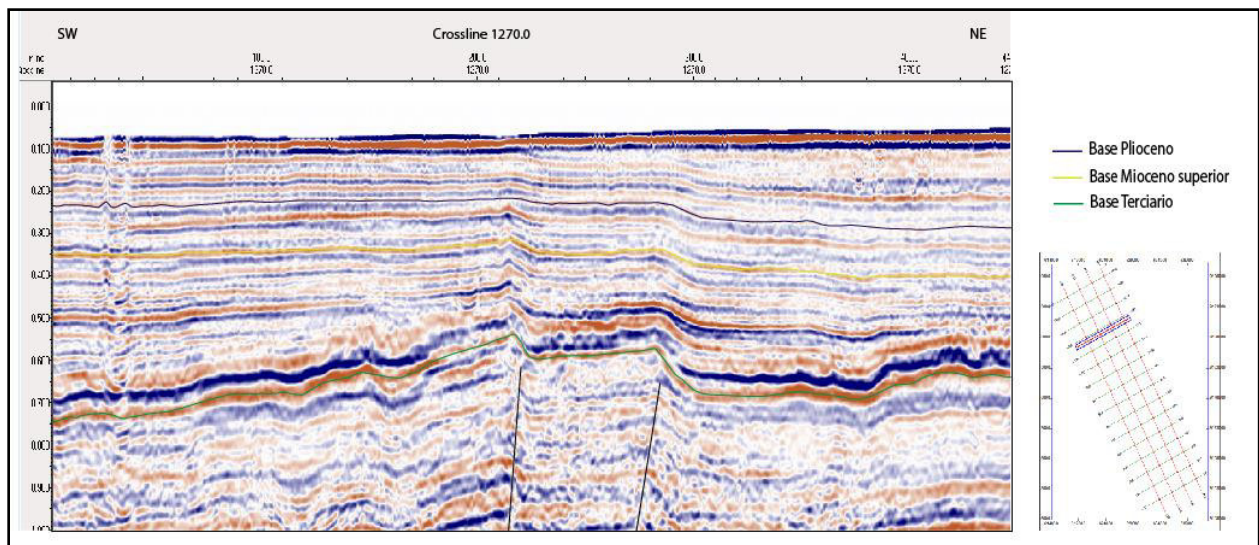


Figura V-44. Crossline 1270 del cubo sísmico Área 1 mostrando los horizontes interpretados. Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Para el horizonte denominado base del Terciario, no fue difícil identificarlo por presentar buena continuidad en los reflectores sísmicos y alta amplitud de reflexión, característica que pudo ser reconocida en varias de las secciones sísmicas interpretadas. Se realizó el mapa en tiempo correspondiente de la base del Terciario. En la figura V-45 se muestra la interpretación del horizonte interpretado en una vista 3D y dos secciones sísmicas 2D (Inline y Crossline).

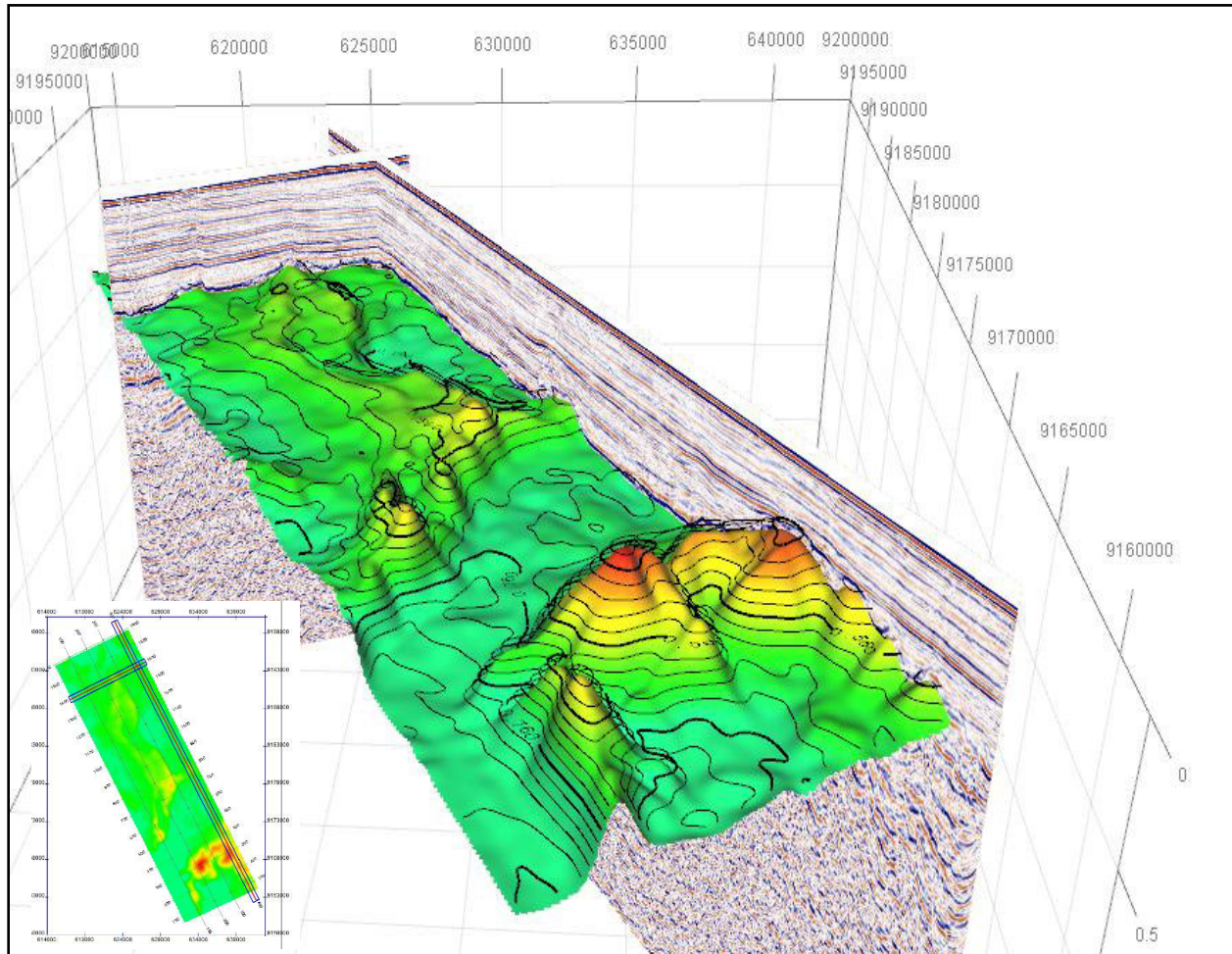


Figura V-45. Mapa en amplitud con interpretación del horizonte base del-Terciario en vista 3D (Cubo Área 1). **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

En la figura V-46 se observa un time slice del flattening de la base del Terciario en amplitud y con el atributo de inline dip, donde se puede observar mejor las estructuras formadas.

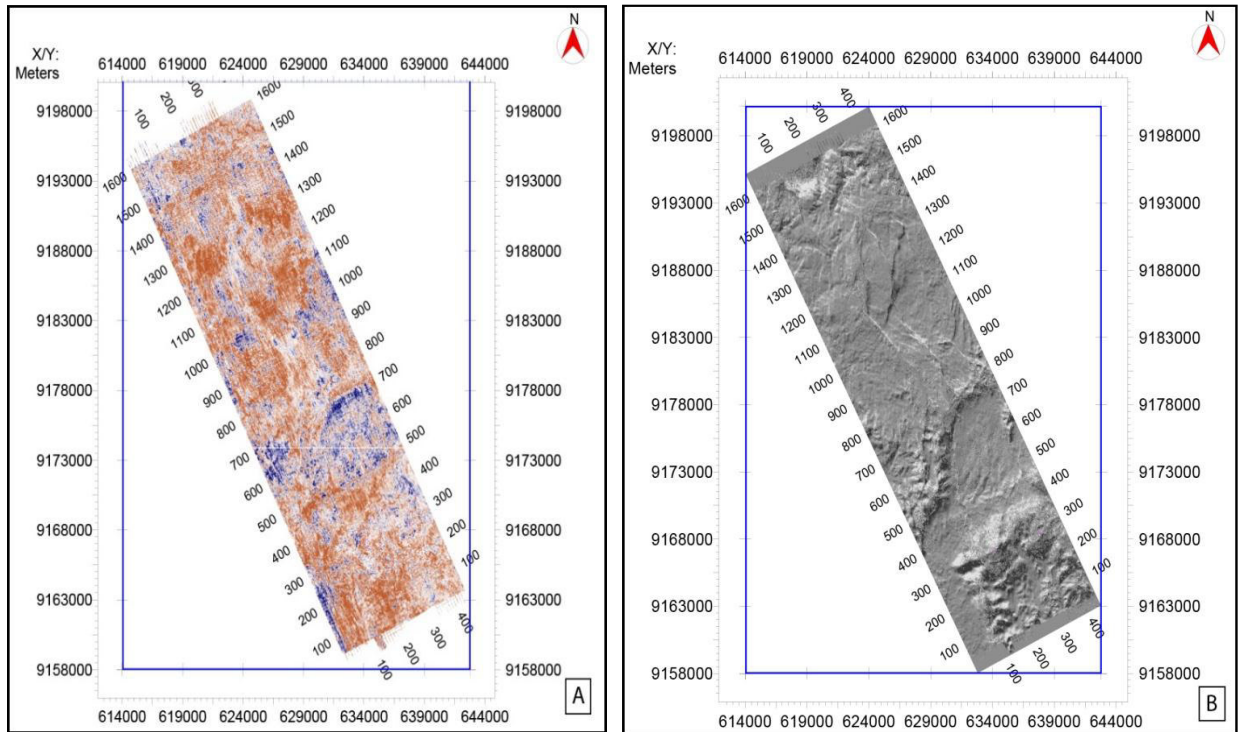


Figura V-46. Diferente presentación para el time slice del flattening del horizonte de la base del Terciario a través del Cubo Sísmico Áreal a) Vista en Amplitud b) Vista del atributo inline dip. **Fuente:** propia.

El mapa de time slice del flattening de la base del Terciario (figura V-47) se pudo verificar al norte la presencia de altos estructurales asociados a fallas inversas de gran longitud con dirección N-S con buzamiento variable tanto al E como al W, también se determinó fallas inversas de menor longitud con orientación NNE-SSW con buzamiento al NW. Al sur se observa posibles estructuras volcánicas, identificadas por los reflectores dispersos y forma irregular en la sísmica, estos cuerpos ígneos limitan la depositación de secuencias posteriores. Estas fallas y estructuras volcánicas limitan un cañón con orientación N-S.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

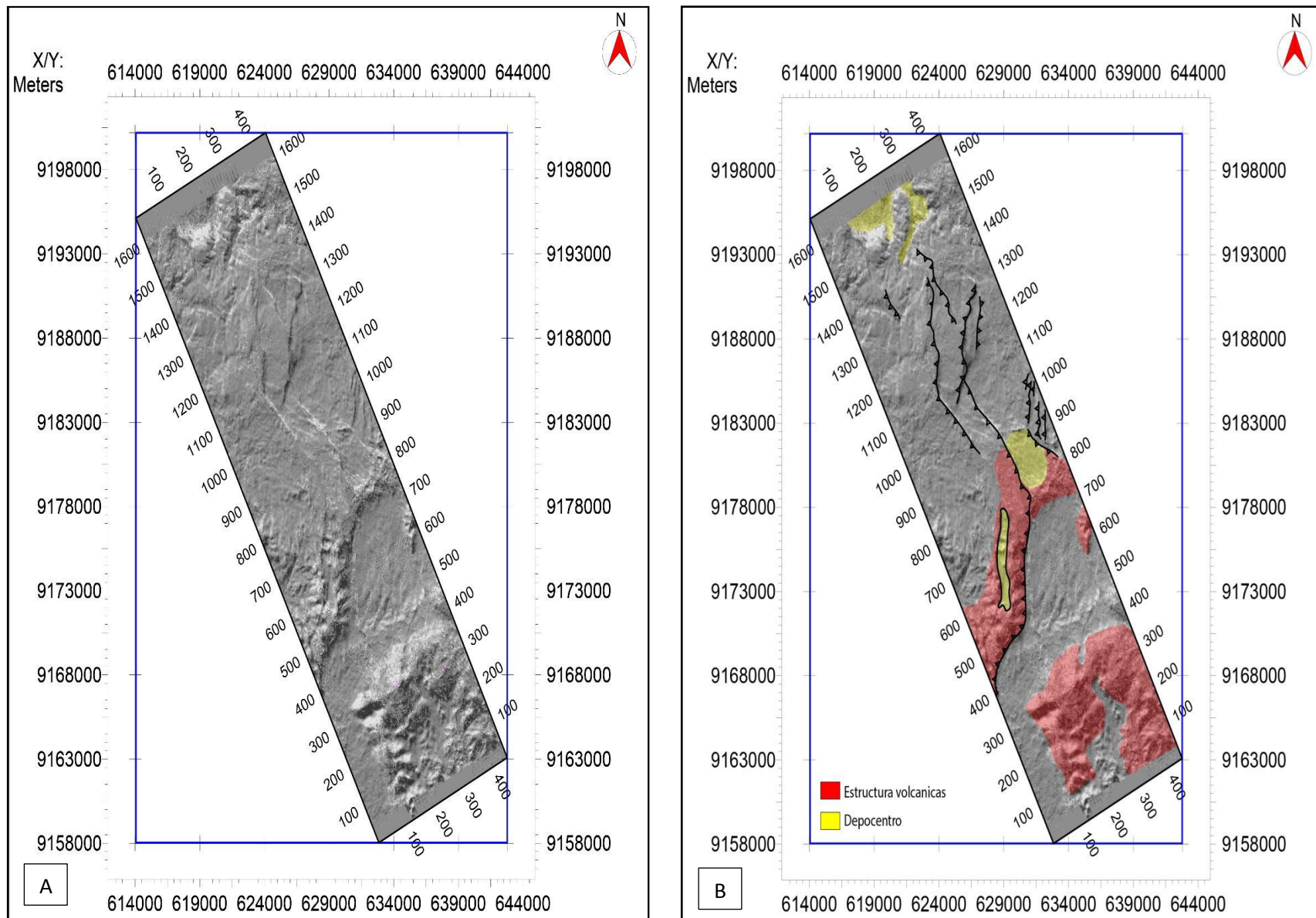


Figura V-47 Mapa del time slice con el atributo inline dip del flattening de la base del Terciario sin interpretar (a) e interpretado (b). Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Para el horizonte denominado base del Plioceno, no fue difícil identificarlo por presentar buena continuidad en los reflectores sísmicos y alta amplitud de reflexión, característica que pudo ser reconocida en varias de las secciones sísmicas interpretadas. Se realizó el mapa en tiempo correspondiente de la base del Plioceno. En la figura V-48 se muestra la interpretación del horizonte interpretado en una vista 3D y dos secciones sísmicas 2D (Inline y Crossline).

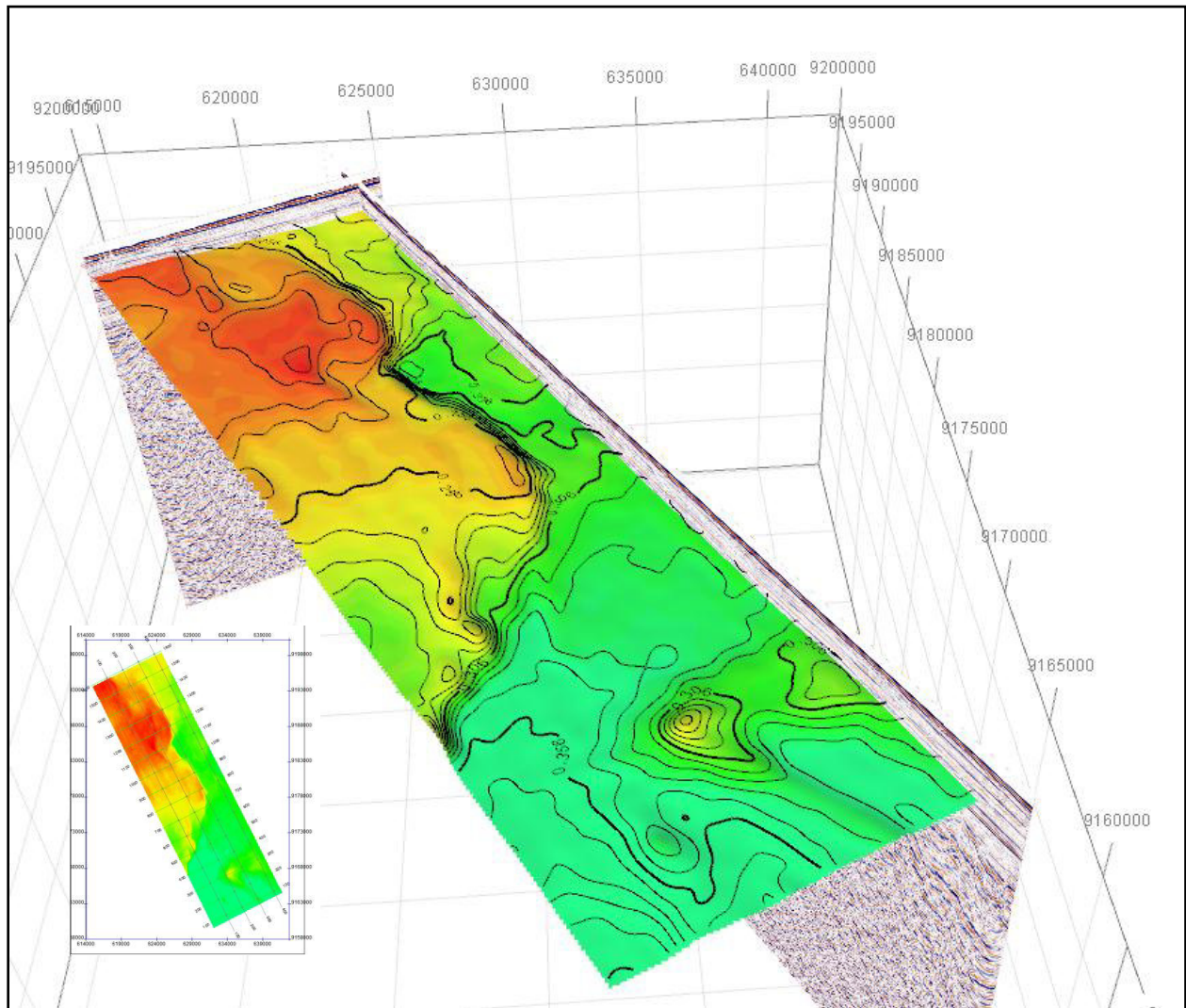


Figura V-48. Mapa en amplitud con interpretación del horizonte Plioceno en vista 3D (Cubo Área 1). **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

En la figura V-49 se observa un time slice del flattening de la base del Plioceno en amplitud y con el atributo de inline dip, este atributo permite resaltar y visualizar rasgos estructurales, tendencias de fallas y alineaciones.

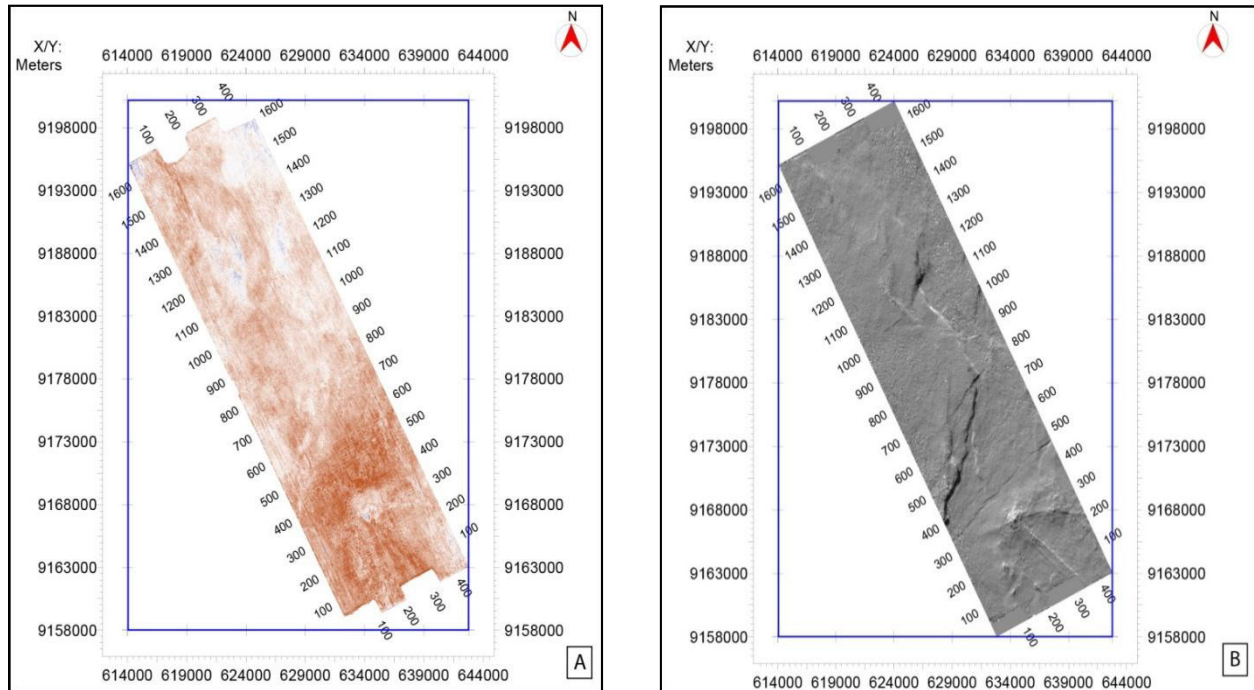


Figura V-49. Diferente presentación para el time slice del flattening del horizonte de la base del Plioceno a través del Cubo Sísmico Areal a) Vista en Amplitud b) Vista del atributo inline dip. **Fuente:** propia.

En el mapa de time slice del flattening de la base del Plioceno (figura V-50) se verifica que en la parte norte no ha sufrido un proceso de deformación relevante. Aun se observa el cañón formado por los alineamientos de altos estructurales asociados a las fallas inversas N-S pero con menor profundidad. Al sur se puede observar una pequeña estructura volcánica, también estructuras extensivas con rumbo NE-SW con variación en el buzamiento NW y SE.

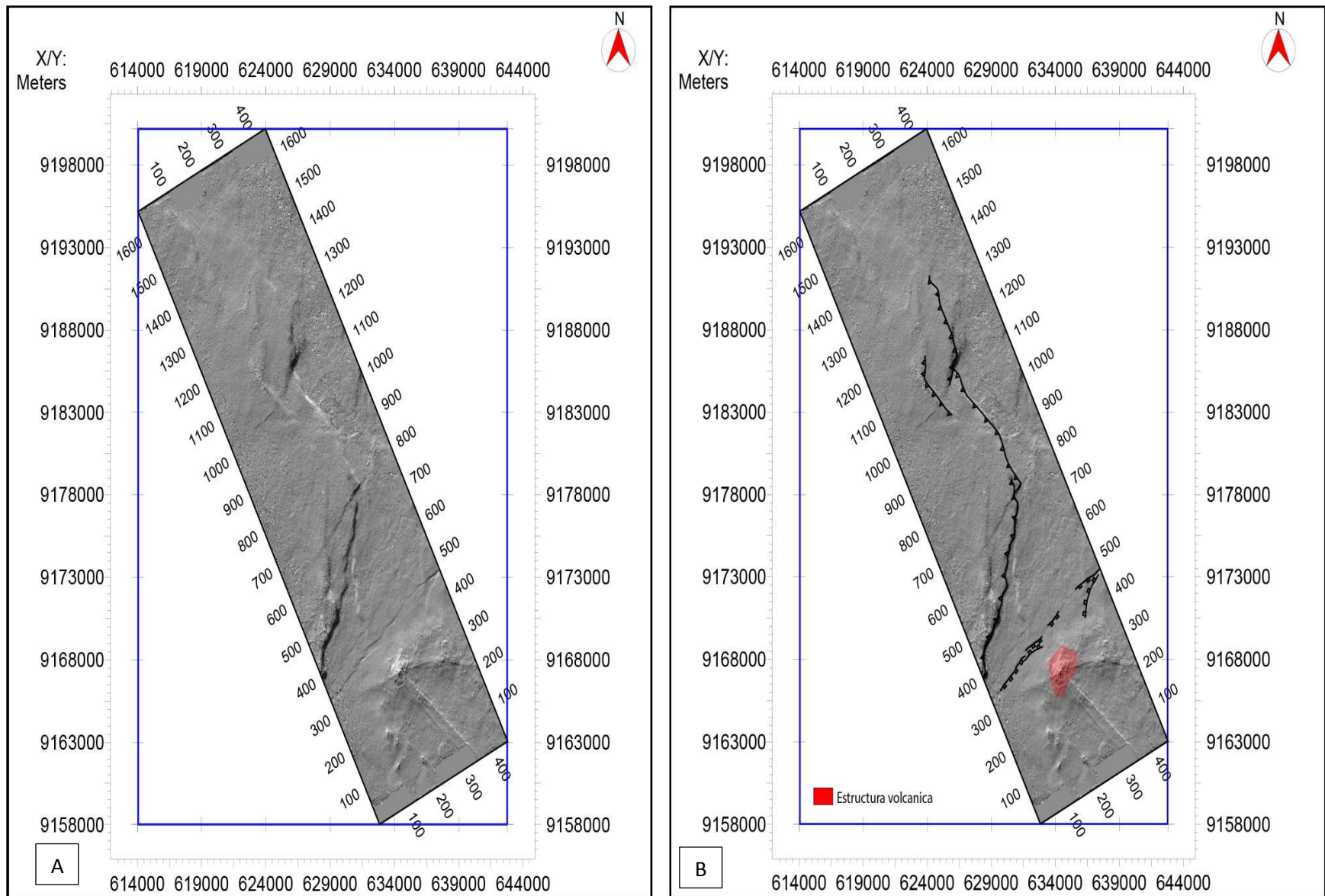


Figura V-50. Mapa del time slice con el atributo inline dip del flattening de la base del Plioceno sin interpretar (a) e interpretado (b). Fuente: propia.

5.5.3 Cubo Sísmico San Jorge

En este cubo sísmico ubicado al centro de la zona de estudio entre la plataforma continental y el talud superior (figura V-31), fueron interpretados 4 horizontes (figura V-51 y V-52) los cuales son la base del Terciario, Mioceno medio, Mioceno superior y Plioceno. También se interpretó un conjunto de fallas, las fallas inversas solo cortan secuencias que se encuentran debajo de la base del Terciario y las fallas normales cortan las secuencias pre-Terciarias como terciarias, los cuales formaron estructuras favorables para el entrapamiento de hidrocarburos.

En la figura V-51 se verifica que las fallas normales cortan las secuencias superiores e inferiores al horizonte de la base del Terciario y las fallas inversas cortan a las secuencias debajo de este horizonte, deformando las secuencias superiores. También se observa como las secuencias cenozoicas basculan hacia el este. Dentro de las secuencias del Mioceno medio se interpretó una discordancia que formó cañones dentro de esta secuencia.

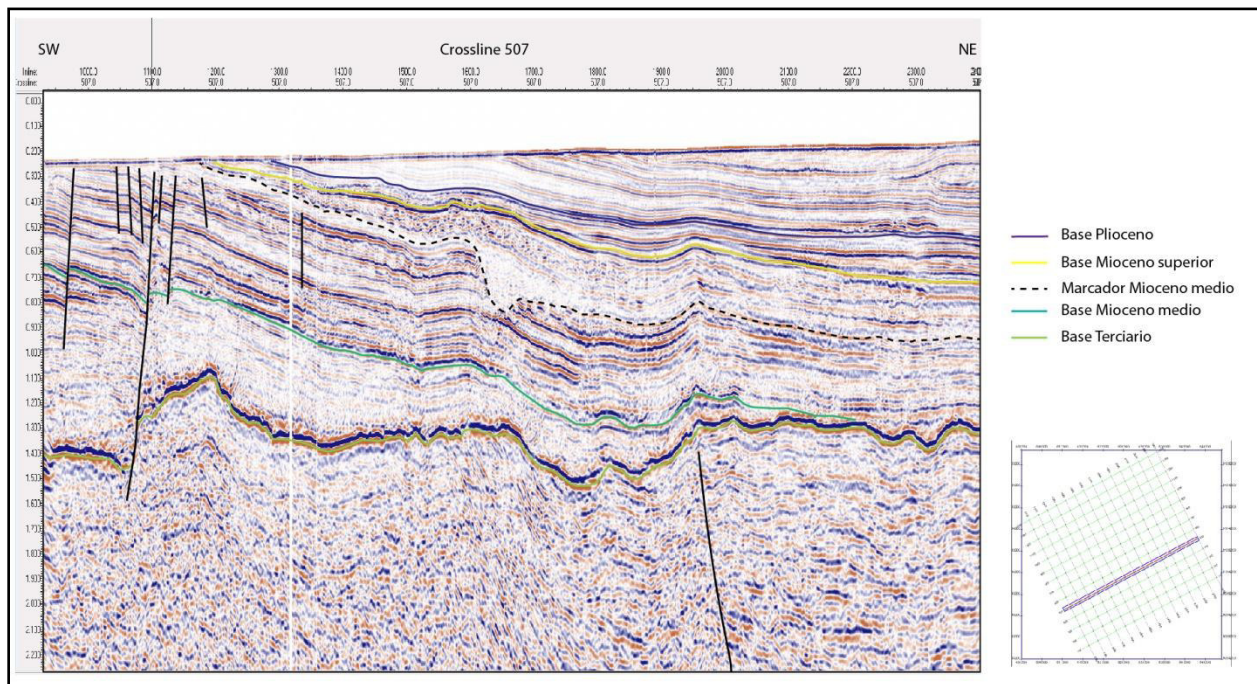


Figura V-51. Crossline 507 del cubo sísmico San Jorge mostrando los horizontes interpretados. **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

En la figura V-52 lo más resaltante es la presencia de un cañón erosionando las secuencias del Mioceno medio y parte de las unidades del Mioceno inferior. Las secuencias del Mioceno superior y Plioceno son cortadas por fallas normales sinsedimentarias.

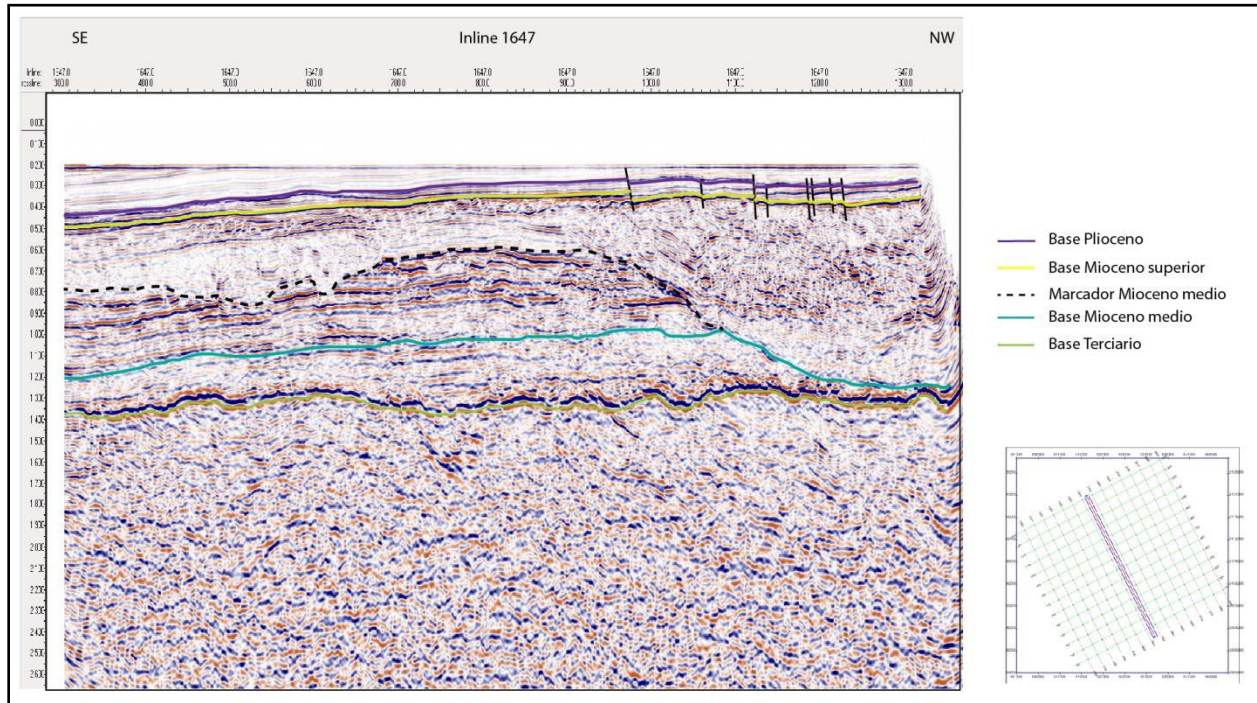


Figura V-52. Inline 1647 del cubo sísmico San Jorge mostrando los horizontes interpretados. **Fuente:** propia.

Para el horizonte denominado base del Terciario, no fue difícil identificarlo por presentar buena continuidad en los reflectores sísmicos y alta amplitud de reflexión. Se realizó el mapa en tiempo correspondiente a la base del Terciario.

En la figura V-53 se muestra la interpretación del horizonte interpretado en una vista 3D y dos secciones sísmicas 2D (Inline y Crossline), donde se verificó la presencia de un alto estructural al este del cubo y un depocentro en el medio del cubo, ambos con una orientación N-S.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

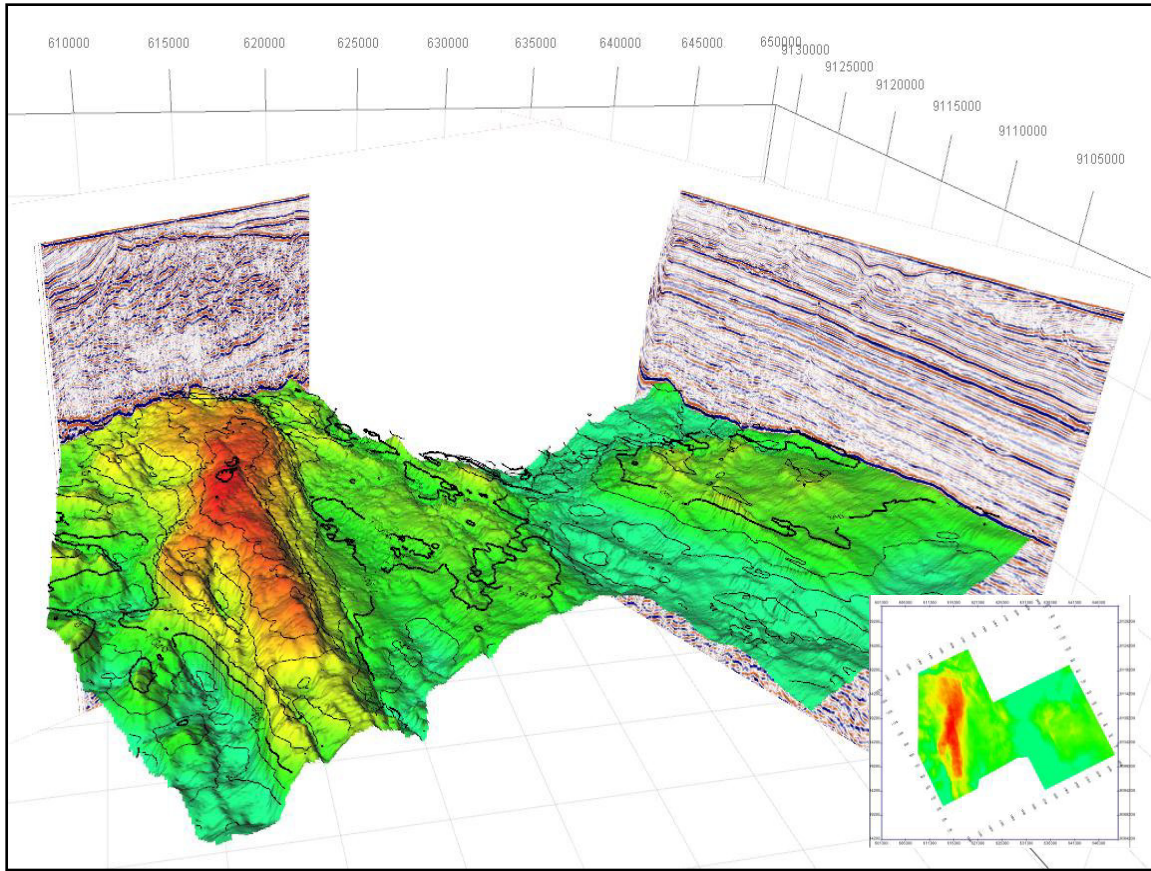


Figura V-53. Mapa en amplitud con interpretación de la base del terciario en vista 3D (Cubo San Jorge). Fuente: propia.

En la figura V-54 se observa un time slice del flattening de la base del Terciario en amplitud y con el atributo de inline dip

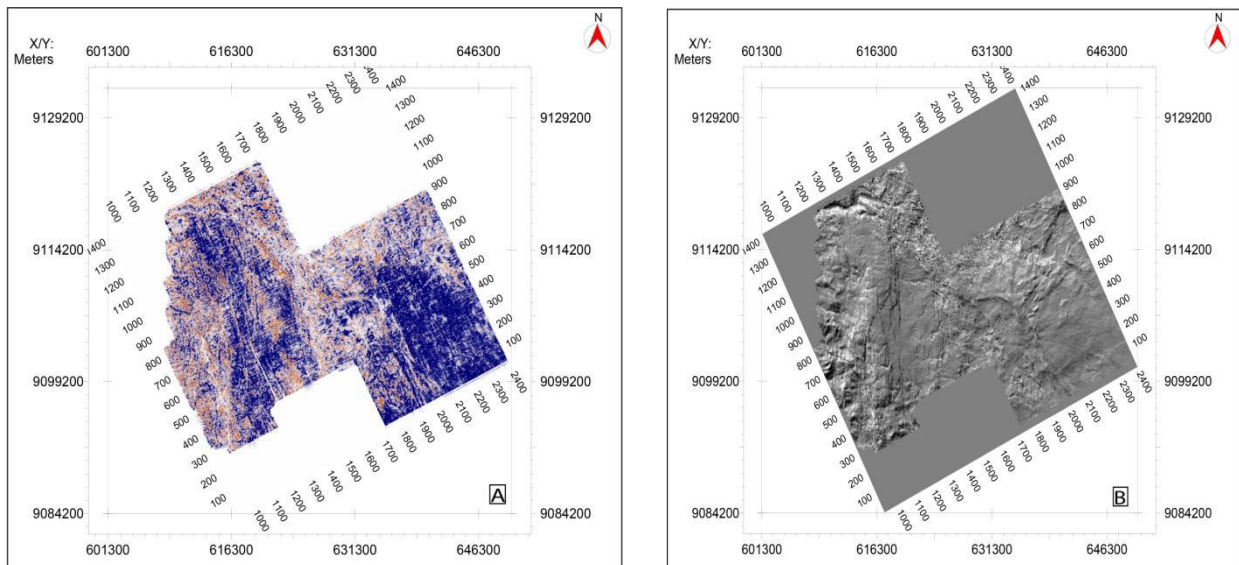


Figura V-54. Diferente presentación para el time slice del flattening del horizonte de la base del Terciario a través del Cubo Sísmico San Jorge a) Vista en Amplitud b) Vista del atributo inline dip. Fuente: propia.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

En el mapa de time slice del flattening de la base del Terciario (figura V-55) se ha interpretado en la parte noroeste un cañón y en la parte sureste una falla inversa, con rumbo NW-SE con buzamiento al NE, que deforma las secuencias posteriores. En la parte oeste se observa estructuras distensivas con rumbo NNW-SSE con buzamiento al este como oeste, estas estructuras cortan un alto estructural.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

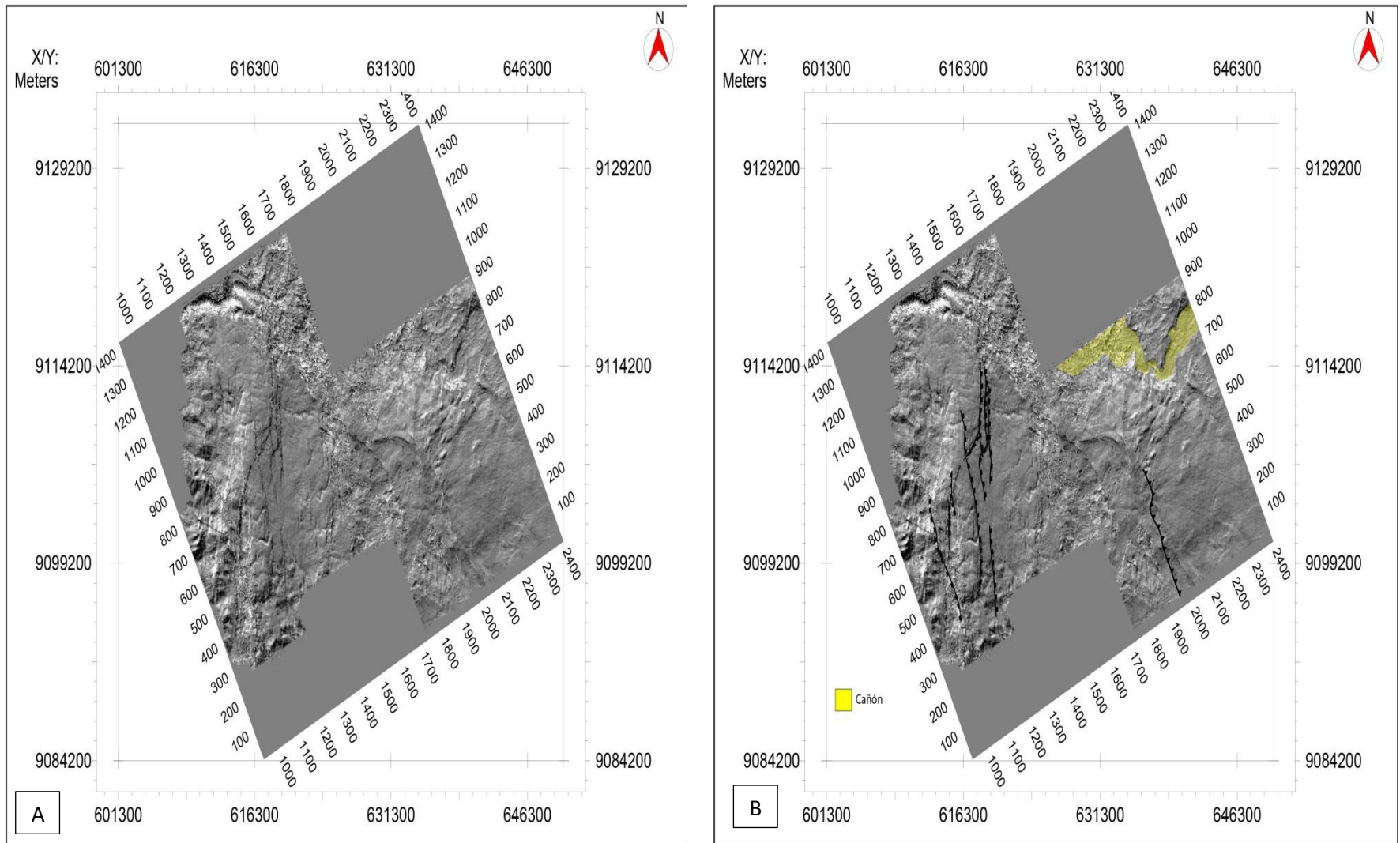


Figura V-55. Mapa del time slice con el atributo inline dip del flattening de la base del Terciario sin interpretar (a) e interpretado (b). Fuente: propia.

5.5.4 Cubo Sísmico Moche

En este cubo sísmico ubicado (figura V-31) al centro de la zona de estudio, en el talud superior, fueron interpretados 7 horizontes (figura V-56) los cuales son la base del Terciario, Eoceno medio, Eoceno superior, Mioceno inferior, Mioceno medio, Mioceno superior y Plioceno. También se interpretó un conjunto de falla los cuales desarrollaron estructuras distensivas.

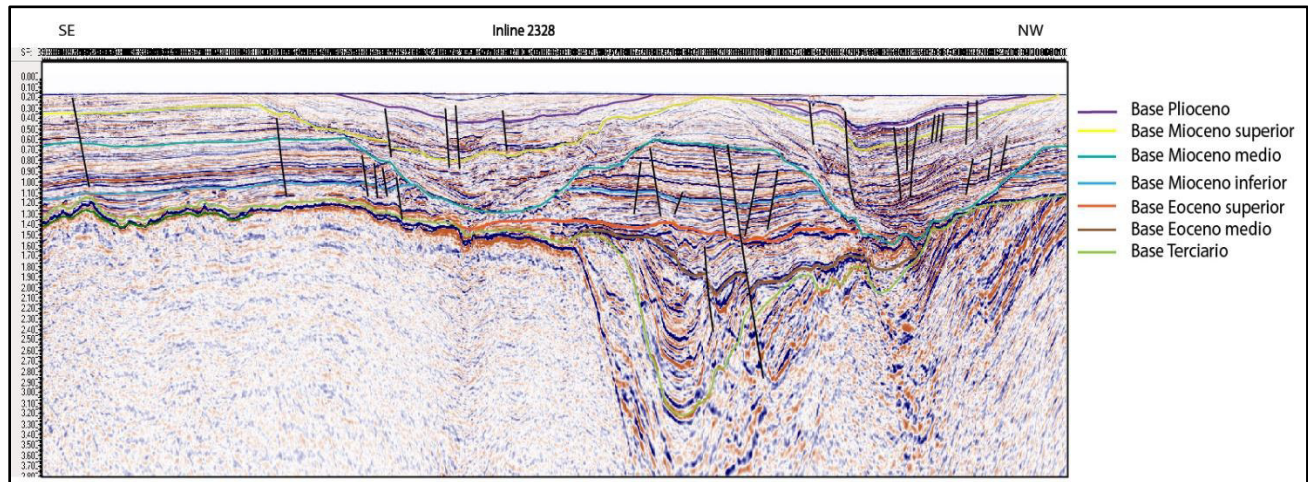


Figura V-56. Inline 2328 del cubo sísmico Moche mostrando los horizontes interpretados. **Fuente:** propia.

La figura V-57 muestra la sección sísmica "inline 4478" donde se observa como las secuencias inferiores al Eoceno medio se encuentran truncando esta base erosiva, la base erosiva del Eoceno superior se encuentra paralelos a las secuencias superiores, también se interpretó cañones formados por las secuencias del Mioceno medio, Mioceno superior y Plioceno, finalmente se interpretó fallas normales que cortan estas secuencias Cenozoicas. Estos truncamientos y bases erosivas forman estructuras favorables para el entrapamiento de hidrocarburo.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

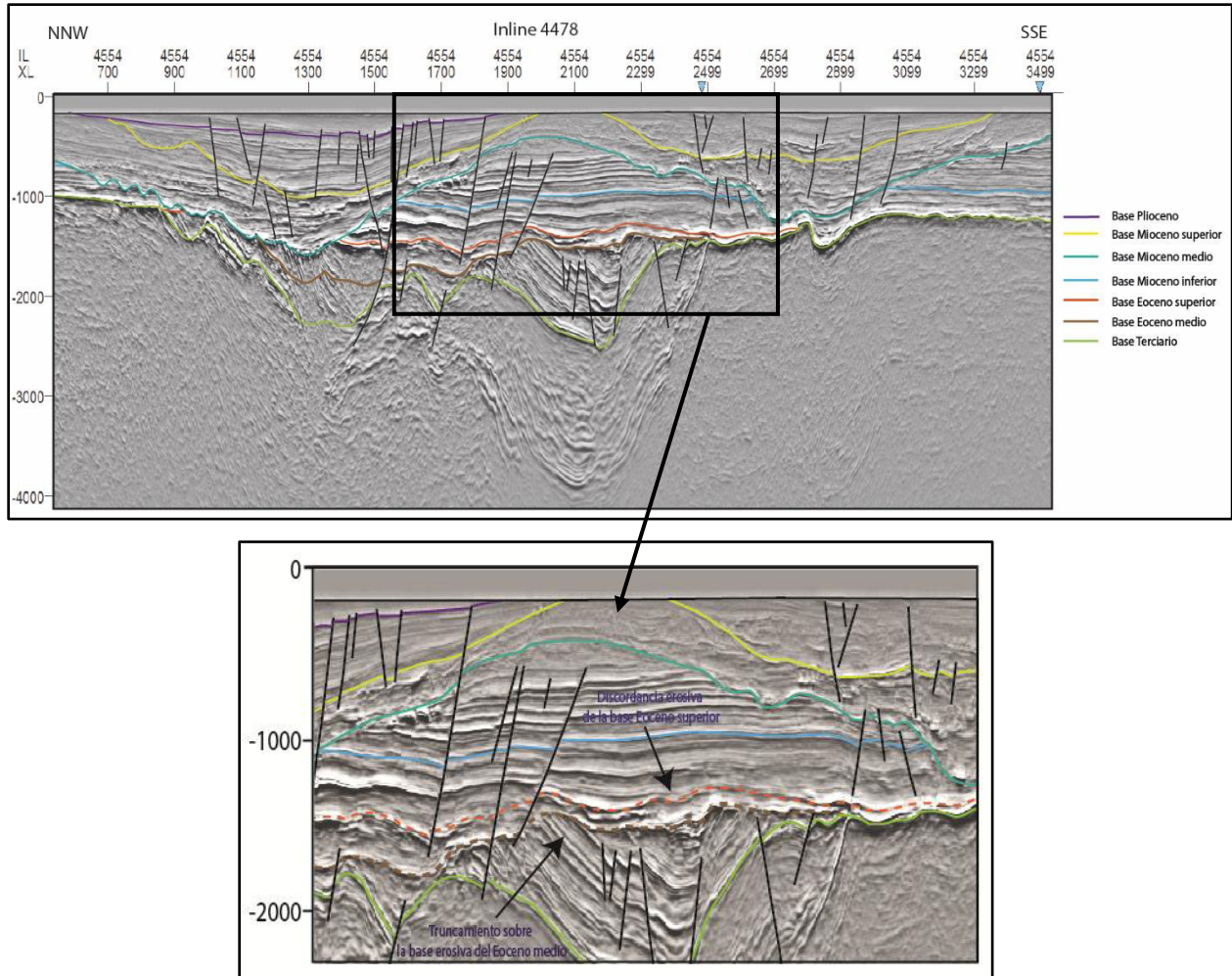


Figura V-57. Inline 4478 del cubo sísmico Moche mostrando la discordancia erosiva de las bases del Eoceno medio y superior.

Fuente: propia.

5.6 MAPA ESTRUCTURAL

Con el fin de desarrollar un modelo estructural de estas cuencas se ha integrado la información obtenida a través de la interpretación sísmica 2D, secciones sísmicas transversales como longitudinales a la línea de costa (figura V-58). Basados en la interpretación de secciones sísmicas en profundidad hemos elaborado un mapa estructural (figura V-59) donde se ilustra la geometría de la plataforma y talud superior marino. Las fallas mapeadas tienen una orientación paralela o ligeramente oblicua, como también ortogonales a la línea de costa.

Estructuralmente el oeste (Cuenca Trujillo) ha sido controlado por una falla maestra sinistral de rumbo NW-SE con componente normal ubicado al oeste de la zona de estudio. Esta falla parece rotacional

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

generando mayor rechazo hacia el norte desarrollando aparentemente un "horsetail splay". Esta falla está asociada a fallas sintéticas y antitéticas, generando altos estructurales y depocentros de sedimentos Cenozoicos y posibles Cretácicos. Esta falla maestra explica la configuración estructural de las diferentes unidades y controla gran parte de la sedimentación. Se pudo también mapear dos fallas de rumbo perpendiculares a la línea de costa ambos con componente normal. La falla maestra sufrió un importante proceso de inversión, reactivando algunas fallas normales antiguas, deformando las unidades estratigráficas, generando anticlinales e importantes procesos de erosión como lo muestran las secciones estructurales descritas más arriba.

De acuerdo a la interpretación sísmica, el este (Cuenca Salaverry) se caracteriza por un conjunto de fallas inversas con orientación NW-SE con vergencia tanto al este como al oeste. Estas fallas deforman las unidades Mesozoicas y Cenozoicas generando anticlinales, todo esto en un período de actividad tectónica compresiva. También se puede observar más al este el límite oeste de las estructuras volcánicas del Batolito de la Costa (Soler 1990; Timoteo 2015).

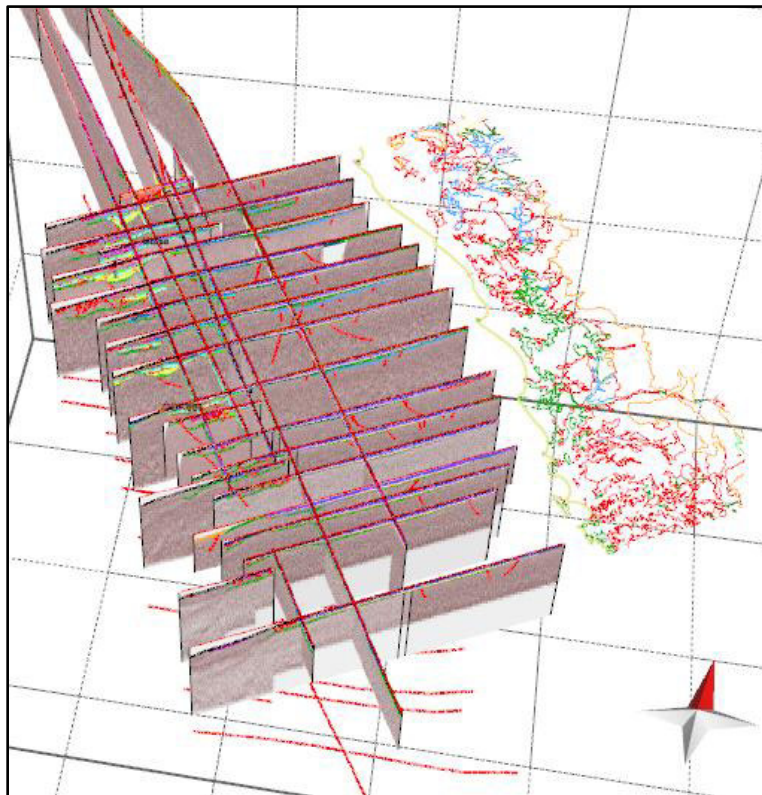


Figura V-58. Líneas sísmicas interpretadas en el software Move. Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

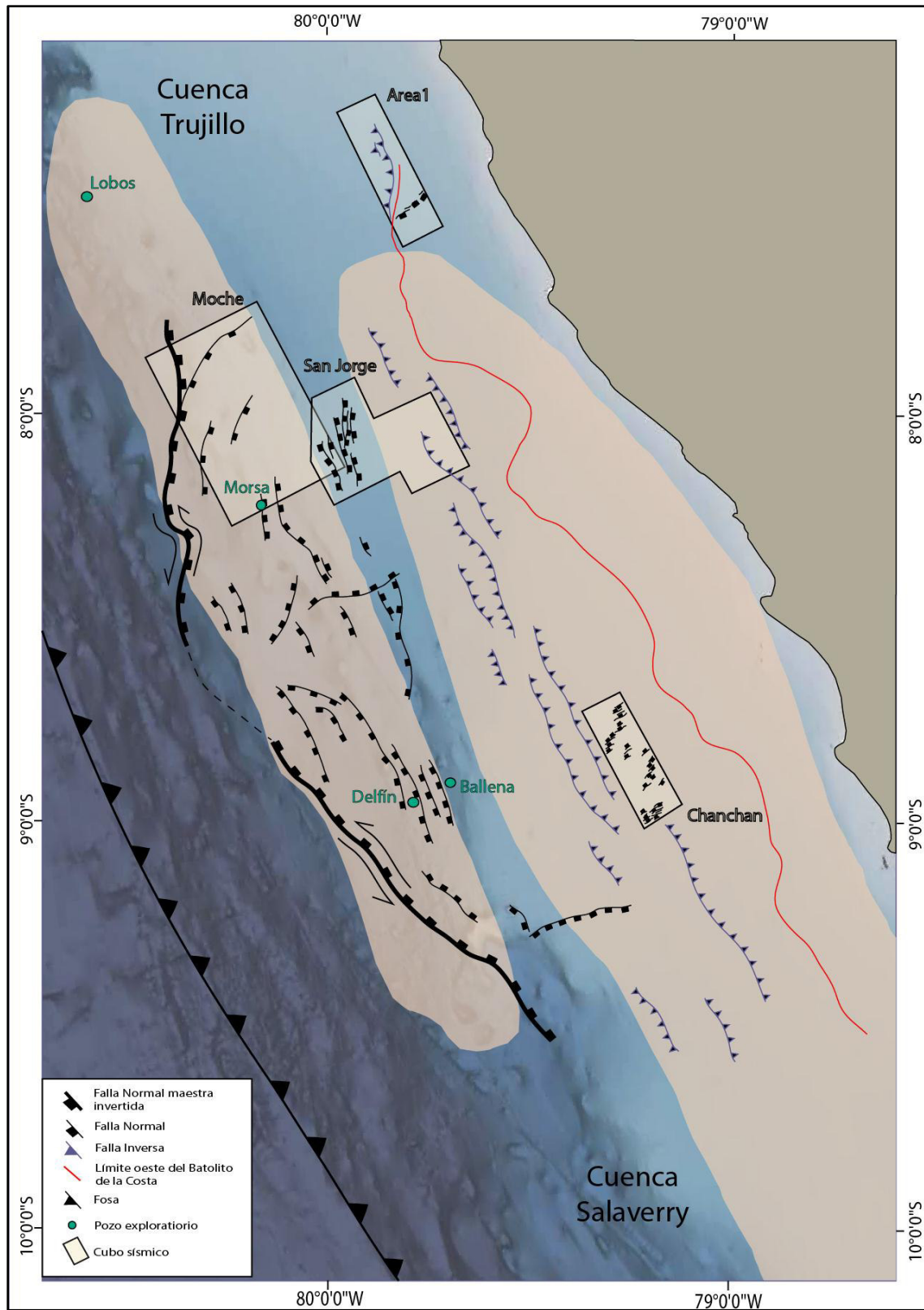


Figura V-59. Mapa estructural de la zona de estudio. Las fallas han sido cartografiadas con la sísmica 2D y 3D interpretadas más arriba. Fuente: propia.

5.7 MODELO ESTRUCTURAL PROPUESTO

La historia estructural de la zona de estudio ha sido desarrollada en respuesta a la cinemática de la convergencia oblicua entre la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. La partición de la deformación en zonas de subducción consiste en la acomodación de la convergencia oblicua entre las placas, mediante la descomposición del vector de convergencia en una componente ortogonal y una componente paralela a la fosa.

En los cubos sísmicos localizados en el lado oriental en la zona offshore (Cuenca Salaverry) se identificó fallas normales superficiales que cortaron solo las secuencias del Mioceno y Plioceno con rumbo NE-SW con alineamientos geomorfológicos “en échelon”, teniendo un arreglo espacial similar a una estructura tipo "left stepping" estructura característica en zonas de cizalla. También fueron identificados pliegues asociados a fallas inversas más profundas que deformaron las secuencias del Mioceno y Plioceno con rumbo NNW-SSE. Estas fallas interpretadas se pueden relacionar con la descomposición del vector de convergencia oblicua cuya dirección es ~W-E del Mioceno al Cuaternario, esto explicaría la ocurrencia de deformación distensiva y sincrónicamente deformación compresiva, desde el Mioceno. Este evento compresional es el responsable de la generación de las principales estructuras existentes en esta zona de estudio (figura V-60).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

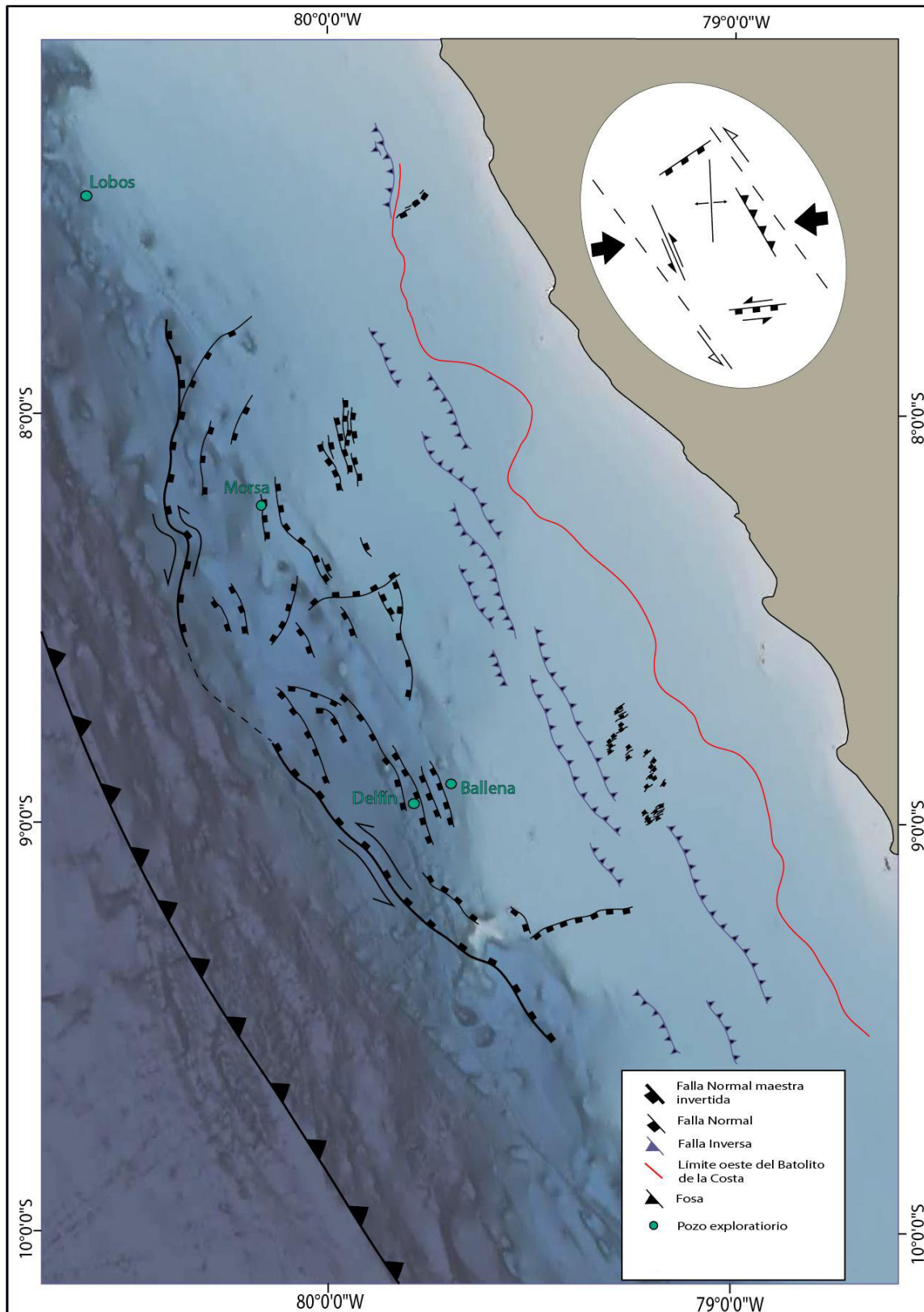


Figura V-60. Modelo de deformación para el vector de convergencia ~W-E. Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Por otro lado, hacia la parte occidental de la zona offshore (Cuenca Trujillo) se ha identificado fallas normales de rumbo NW-SE, estos alineamientos son amplios siendo paralelos y sub paralelos relacionados a la falla maestra. La geometría extensional localizada en esta zona se encuentra asociado a los períodos de calma tectónica, a la gravedad por la pendiente del talud y por el reacomodo de la falla maestra al cambio de la cinemática. Este no solo ha contribuido con la formación de fallas normales sino también al desarrollo de cañones mediante activación de slumps y deslizamientos simultáneamente a los esfuerzos compresivos.

También se pudo verificar discordancias angulares y estructuras plegadas asociadas la tectónica compresiva las cuales se observan en base a la interpretación sísmica. La falla normal maestra ha sufrido un proceso de inversión con un desplazamiento no muy notorio por lo cual ha conservado su estado de falla normal.

Probablemente a partir del Mioceno superior al Plioceno la zona entre el talud y la plataforma continental sufre un proceso de levantamiento, generando un basculamiento en las secuencias del Cenozoico, siendo identificado en las secciones sísmicas, (figura V-61)

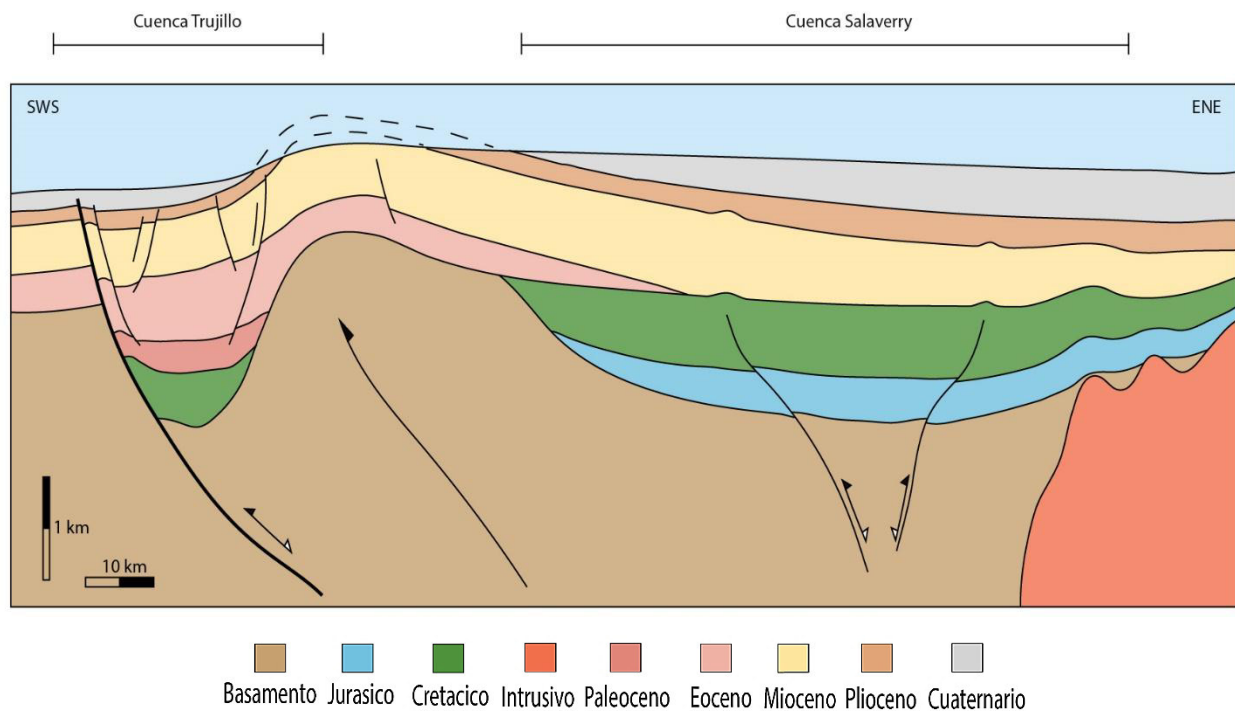


Figura V-61. Imagen esquemática del anticlinal formado por los esfuerzos compresivos del Mioceno-Plioceno para la parte offshore de la zona de estudio. **Fuente:** propia.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y
SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

CAPÍTULO VI. SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS TRUJILLO Y SALAVERRY

6.1. GENERALIDADES

6.1.1. El Sistema Petrolero

Es un sistema natural, que incluye todos los elementos y procesos geológicos (figura VI-1) esenciales para que un yacimiento de petróleo y/o gas exista en la naturaleza. El sistema petrolero se estudia como un modelo dinámico, donde intervienen varios elementos de entrada a la cuenca sedimentaria (sedimentos, materia orgánica) cuando y bajo qué condiciones ocurre su transformación (diagénesis, catagénesis), cuando y donde se genera el petróleo y/o gas, que finalmente puede acumularse en una trampa petrolera (figura VI-2).

Los principales Elementos son:

- Roca madre: es aquella roca que posee las mejores características para la generación de hidrocarburo. Debe contener suficiente materia orgánica para generar grandes volúmenes de hidrocarburos. Las mejores rocas madres son las lutitas negras (que deben su color al alto contenido de materia orgánica), ya que al ser impermeables evitan que la materia orgánica sea destruida por agentes externos.
- Roca Reservorio: es aquella roca que posee excelentes condiciones de porosidad y permeabilidad para permitir que el petróleo fluya libremente a través de ella. Las mejores rocas reservorios son las calizas fracturadas y las areniscas.
- Roca sello: roca impermeable que evita que el petróleo siga desplazándose o se escapé.
- Roca sobrecarga: representa la pila sedimentaria que está sobre el yacimiento, y al pasar el tiempo da las condiciones necesarias de presión y temperatura para que el sistema petrolero se lleve a cabo.

Los principales procesos son:

- Formación de la trampa: son todos aquellos procesos tectónicos que dan origen a las estructuras geológicas, además de los cambios litológicos laterales de las capas.
- Generación – migración – acumulación.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

- **Preservación:** es el tiempo que determina la conservación del hidrocarburo dentro del sistema petrolero, ésta se llevará a cabo hasta que ocurra algún fenómeno geológico que altere la composición del sistema.

| ELEMENTOS | REQUISITOS | CONDICIONES MINIMAS | PROCESOS |
|------------------------|--|--|---|
| Roca Generadora | -Calidad RG -Cantidad RG -Tipo RG -Madurez RG | > 0.5 Riqueza organica > 2000 ppm Hcs. potenciales > IH 400 > 430 - 460 Tmax > Materia algácea - amorfa y herbácea | -Expulsión -Migración Primaria |
| Roca Reservorio | -Calidad tipo de roca almacenadora -Porosidad buena a regular -Permeabilidad buena a alta | > 1% de porosidad en carbonatos > 15% de porosidad en terrigenos - Permeabilidad de 10 md | -Acumulación -Migración Secundaria |
| Roca Sello | -Calidad, tipo de la roca sello: vertical y horizontal -Baja porosidad -Baja permeabilidad | - Composición arcillosa - Alta permeabilidad - Presencia de sello capilar, lateral y vertical | -Sellos laterales y verticales |
| Trampa | -Trampas estructurales -Trampas estratigráficas -Trampas combinadas -Cierre estructural | - Cierre de la trampa mínimo por tres lados - Buena definición en la geometría de la trampa - Área mínima de drene 0.7 km ² | -Formación Trampas Sincronia y Migración Preservación |

Figura VI-1. Cuadro de los elementos y procesos del sistema petrolero

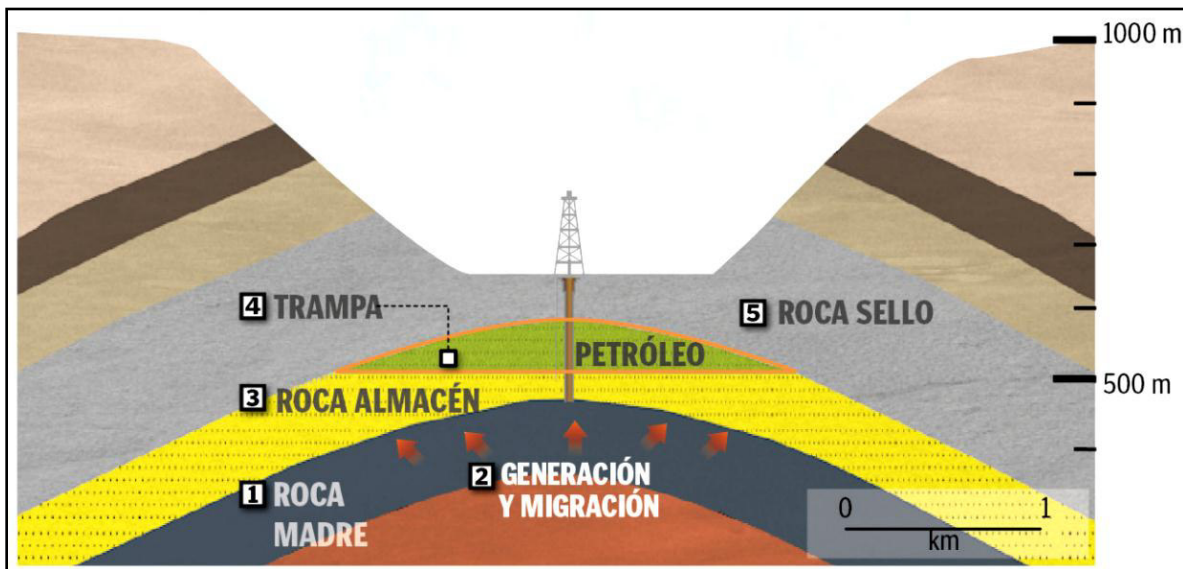


Figura VI-2. Grafico del conjunto de elementos y procesos esenciales en generación y acumulación de hidrocarburos.

6.1.2. Evaluación de la Roca Madre

El principal objetivo de la evaluación geoquímica de la roca madre es establecer el potencial hidrocarburífero de una cuenca. En programas de reconocimiento regionales, la presencia de micro o macro afloramientos de hidrocarburos proveen una evidencia directa de la generación de hidrocarburos. Es decir, se pone en evidencia la presencia de un sistema petrolero activo y se identifican los sectores de la cuenca que son más atractivos.

Adicionalmente, la composición química de estos afloramientos puede indicar si es una cuenca o “play” más propensa para la generación de gas o petróleo ya que nos provee información necesaria para representar en mapas la riqueza de la materia orgánica, tipo de materia orgánica y madurez termal de una roca madre.

Los análisis geoquímicos como %Ro, %TOC y Tmax se realizan en las rocas generadoras.

La reflectancia de vitrinita (Ro) es un parámetro físico que refleja el nivel de madurez termal (figura VI-3) alcanzado por la roca sedimentaria. Esta madurez indica el grado de transformación de la materia orgánica presente en la roca en hidrocarburos. La vitrinita es un maceral (restos de plantas o animales distinguibles al microscopio) que se origina de plantas terrestres (Peters et al., 1994). La reflectancia de vitrinita es directamente proporcional al grado de alteración termal de la roca y su valor no se reduce con la disminución de la temperatura (por levantamientos tectónicos y disminución de la profundidad); es por eso que el Ro es usado para determinar la máxima temperatura a la cual se encontraba la roca.

| Nivel de Madurez Termal | | Ro (%) | Tmax |
|-------------------------|---------------------|----------|---------|
| Inmadura | | 0.2-0.6 | < 435 |
| Madura | de madurez temprana | 0.6-0.65 | 435-445 |
| | de madurez pico | 0.65-0.9 | 445-450 |
| | de madurez tardia | 0.9-1.35 | 450-470 |
| Post-madura | | 1.35 | > 470 |

Figura VI-3. Niveles de Madurez Termal de la materia orgánica para generar hidrocarburos (Peters et al., 1994).

En una roca generadora, la materia orgánica en la etapa inmadura no ha sido muy alterada por la temperatura, por tanto, no generara hidrocarburos; en la etapa madura se encuentra en la ventana de generación de hidrocarburos; y en la etapa post-madura de la roca se encuentra en ventana de generación de gas, es esta etapa donde la materia orgánica es calentada a gran temperatura, reduciendo la cantidad de hidrogeno, provocando solo pequeñas cantidades de hidrocarburos en estado gaseoso.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Los valores de %TOC (Total Organic Carbon) indican la cantidad de carbono orgánico en porcentaje en peso (wt%) presente en una roca generadora (*figura VI-4*), permitiendo evaluar el potencial petrolero de la roca (Peters et al., 1994). Estos valores de TOC son obtenidos en el laboratorio por combustión directa.

| Potencial petrolero | TOC (wt. %) |
|---------------------|-------------|
| pobre | 0-0.5 |
| medio | 0.5-1 |
| bueno | 1-2 |
| muy bueno | 2-4 |
| excelente | >4 |

Figura VI-4. Potencial Petrolero de la materia orgánica (Peters et al., 1994).

El Tmax es la temperatura del horno en un ensayo de Rock-Eval Pirólisis en el momento de máxima generación de hidrocarburos. En este ensayo, una muestra de roca es calentada a diversas temperaturas en un horno cerrado con el propósito de simular en el laboratorio la expulsión de hidrocarburos y poder evaluar su potencial generador de hidrocarburos.

Es por medio de este ensayo de Pirólisis, o mediante análisis de su composición orgánica, que se determina el tipo de Kerógeno (*figura VI-5*), partiendo de los valores de HI (Índice de Hidrogeno) y el OI (Índice de Oxigeno) obtenidos (Peters et al., 1994).

| HI (mgHC/g TOC) | OI (mgCO ₂ /g TOC) | Tipo de Kerogeno | Hidrocarb. Expulsados |
|-----------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|
| >600 | <40 | I | Petróleo |
| 300-600 | 40-70 | II | Petróleo |
| 200-300 | 70-100 | II/III | Petróleo y Gas |
| 50-200 | 100-200 | III | Gas |
| <50 | >200 | IV | Ninguno |

Figura VI-5. Características de los hidrocarburos expulsados en función del tipo de kerógeno (Peters et al., 1994).

El Kerógeno es un material insoluble formado por la descomposición de la materia orgánica, asimilada por los sedimentos (Charles Boyer et al., 2006/2007). Mediante análisis físico-químico, esta se clasifica en cuatro:

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Kerógeno Tipo I: Este es generado principalmente en ambientes lacustres y en algunos casos ambientes marinos. Proviene de materia orgánica algácea, planctónica o de otro tipo.

Kerógeno Tipo II: Generado habitualmente en medios reductores existentes en los ambientes marinos de profundidad moderada. Proviene principalmente de materia orgánica formada por restos de fitoplancton, zooplancton y microorganismos.

Kerógeno Tipo III: Materia orgánica que deriva esencialmente de plantas continentales y restos vegetales, depositados en ambientes marinos y no marinos someros a profundos.

Kerógeno Tipo IV: Es el que se genera habitualmente a partir de sedimentos más antiguos redepositados después de la erosión. Este tipo de kerógeno está compuesto por materia orgánica residual con alto contenido de carbono y ausencia de hidrógeno.

En general los kerógenos tipos I/II producen petróleo, mientras que los de tipo III producen gas. Las mezclas de los kerógenos tipos II/III, son más comunes en facies arcillosas marinas.

6.2. SISTEMA PETROLERO DE LA CUENCA TRUJILLO

La Cuenca Trujillo es una cuenca sedimentaria subexplorada donde se perforó 3 pozos exploratorios, uno por la empresa Occidental (Delfín 1X) y dos por la empresa Repsol (Morsa 1X y Lobos 1X). Para evaluar los procesos y los tiempos de generación de hidrocarburos se ha seleccionado 2 pozos de esta cuenca, Delfín 1X y Morsa 1X, los cuales presentan datos geoquímicos más completos.

La cuenca Trujillo cuenta por lo menos con un sistema petrolero debido a las evidencias tanto como las filtraciones de petróleo en forma de manchas en la superficie del mar (oil seeps), ubicadas a unos cuantos kilómetros al oeste de la Isla Lobos Afuera (SK Innovation Sucursal Peruana, 2012), también por las anomalías presentes en las secciones sísmicas (manchas brillantes, manchas planas y chimeneas de gas) y finalmente por la información de pozos petroleros, presencia de petróleo en el pozo Morsa 1X y gas detectado en el pozo Delfín 1X (figura VI-7).

6.2.1 Análisis de secuencias con potencial de roca madre

Para determinar las posibles rocas madres para la cuenca Trujillo se recopiló información de Repsol, Corelab, LCV, y otros, los cuales realizaron estudios de Carbón Orgánico Total (TOC) y el análisis de potencial generador y madurez térmica de rocas en los pozos Delfín, Lobos y Morsa.

6.2.1.1 Roca madre del Cretácico

La roca madre de la Cuenca Talara son las formaciones cretácicas Muerto y Redondo, en los pozos de la zona de estudio no fueron perforados secuencias del Cretácico, pero en el pozo Lobos 1X (figura V-59), perforado a 110 km hacía el norte de la zona de estudio el cual se encuentra dentro de la Cuenca Trujillo, perforo 500 metros de secuencias de areniscas y conglomerados (Repsol 1996) de edad del Cretácico superior Debido a esto, se interpreta que las unidades del Cretácico (Fm Muerto y Redondo) se encuentran en las partes más profundas de la zona de estudio teniendo una limitada distribución. Los afloramientos de la Fm. Muerto en zonas adyacentes presentan contenido de carbono total de 1.5 a 4%, kerógeno de los tipos II y II/III, generador principalmente de petróleo y secundariamente de gas, también la temperatura máxima (Tmax) en los análisis de pirolisis varía entre 445 y 460 °C, lo que indicaría niveles de maduración térmica de ventana de petróleo (LCV, 2001).

6.2.1.2 Roca madre del Eoceno superior

Compuesto de capaz delgadas de caliza y principalmente de lutitas, intercaladas de arcillas limosas depositados en un ambiente marino. Rico en materia orgánica con valores de regular a bueno con valores de TOC entre 1.46 - 3.61%, de acuerdo a los resultados de los análisis geoquímicos por la empresa Repsol (1996). El Eoceno superior (650 m de espesor) representa la mejor fuente rocosa encontrada en el pozo Delfín 1X, es considerada de aceptable a buena su fuente de roca madre de tipo II-III como buen potencial para petróleo/gas.

6.2.1.3 Roca madre del Mioceno inferior

Compuesto principalmente de lutitas, intercalada con capaz delgadas de caliza y dolomitas depositado en un ambiente marino. Rico en materia orgánica con valores de regular a bueno con valores de TOC entre 1.21 a 2.92 % de acuerdo con los resultados de los análisis geoquímicos en el pozo Delfín por la empresa Repsol (1996). La roca madre del Mioceno contiene kerógeno del tipo II-III buen potencial para petróleo.

6.2.1.4 Roca madre del Mioceno Medio

Compuesto principalmente de caliza, intercalado con lutitas y delgadas capas de areniscas. Rico en materia orgánica con valores de regular a bueno con valores de TOC entre 1.38 a 3.42 % de acuerdo con

los resultados de los análisis geoquímicos en el pozo Delfín por la empresa Repsol (1996). La roca madre del Mioceno (Caliza) contiene kerógeno del tipo II-III buen potencial para petróleo/gas.

Sin embargo, los resultados de los análisis de Reflectancia de Vitritina y Pyrolysis de Rock-Eval de los pozos Delfín 1X y Morsa 1X muestran que la materia orgánica en las secuencias del Terciario es inmadura.

6.2.2 Análisis de las secuencias con potencial de roca reservorio

No se descarta la posibilidad de encontrar reservorios naturalmente fracturados del Precámbrico-Paleozoico y Mesozoico, sin embargo, los reservorios más probables para la cuenca Trujillo son los depósitos de arenas y conglomerados, así como los depósitos turbidíticos del Eoceno. Una breve descripción de los reservorios determinados:

6.2.2.1. Roca reservorio Eoceno inferior

Compuesta de areniscas de granos medio a grueso, varias capas de conglomerados intercalados con lutitas y limolitas, depositados en un ambiente marino. Ratios de arena/arcilla de reservorio en los pozos perforados son bajos en el pozo Delfín 1X con cambio de porosidad de 13% a 24% (Repsol 1997). En la cuenca Talara estas son las secuencias principales para las rocas reservorio, también en el pozo Morsa 1X se encontró muestra de petróleo en estas secuencias.

6.2.2.2. Roca reservorio Eoceno medio

Compuesto de areniscas de grano fino a grueso, baja selección, intercalado con capas de lutitas, limolitas depositado en un ambiente de plataforma. En el pozo Delfín 1X se encontró un reservorio con un espesor de 35 m con una porosidad de 10 a 20% (Repsol 1997). En las secciones sísmicas (93-40, 93-43 y 93-44) se puede apreciar reflectores con fuertes amplitudes el cual podría indicar facies distales de turbiditas.

6.2.3 Análisis de las secuencias con potencial de roca sello

La roca sello interpretada para la cuenca Trujillo son las secuencias del Mioceno inferior compuesto predominantemente de lutitas y calizas, también con capas de arenisca y limolitas la cual es inferida por su continuidad lateral.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Finalmente, también las disconformidades regionales y locales interpretadas actúan como un sellamiento de superficie importante para la zona de estudio.

6.2.4 Análisis de trampas para la acumulación de hidrocarburos.

Con la interpretación de las secciones sísmicas se ha podido identificar varios modelos de trampas para hidrocarburos tanto estructurales; que involucran bloques fallados por la geometría extensional del Eoceno (Figura VI-6d) que se pueden ver como grábenes y horst, anticlinales (Figura VI-6c) formados por fallas inversas en el Mioceno, como también trampas estratigráficas asociadas a discordancias erosivas (figura VI-6b) y angulares (Figura VI-6a) del Mioceno.

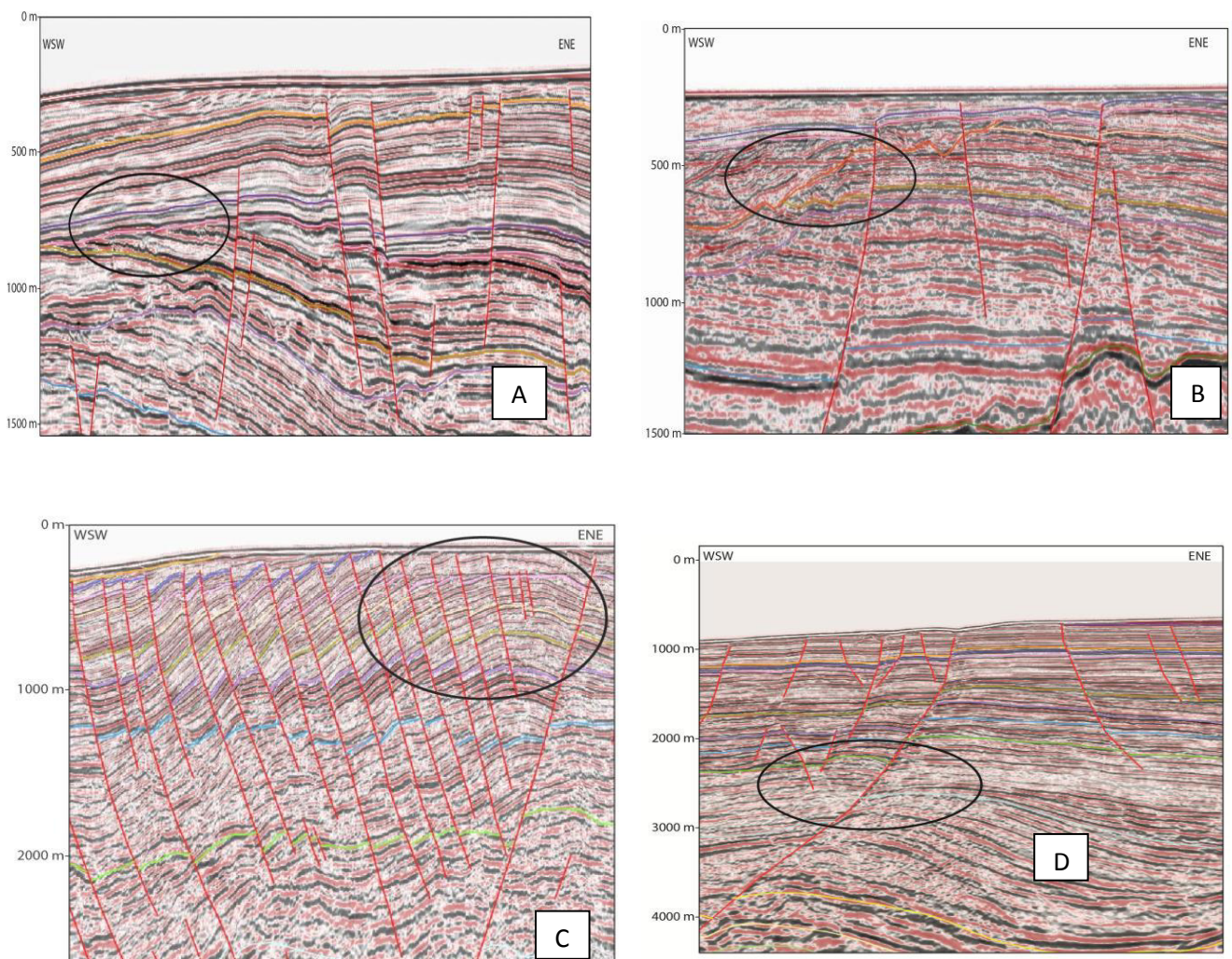


Figura VI-6. A) trampa estratigráfica asociada a discordancia angular B) trampa estratigráfica asociada a discordancia erosiva C) Trampa estructural, anticlinal formado por la inversión tectónica del Mioceno y D) trampa estructural por bloques fallados. **Fuente:** propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

| ERA | SISTEMA | EPOCA | LITOLOGIA | SISTEMA PETROLERO | | |
|-------------|-------------|----------------|-----------|-------------------|-----|-------|
| | | | | R.M | R.S | SELLO |
| CENOZOICO | Cuaternario | | | | | |
| | Neogeno | Plioceno | | | | |
| | | Mioceno | S | | | |
| | | | M | ■ | | ■ |
| | I | | ■ | | ■ | |
| | Paleogeno | Oligoceno | | | | |
| | | Eoceno | S | ■ | | |
| | | | M | | ■ | |
| | | | I | | ■ | |
| | Paleoceno | | | | | |
| MESOZOICO | Cretácico | Maestrichtiano | | | | |
| | | Campaniano | ■ | | | |
| | | Cenomaniano | | | | |
| | Jurásico | Albiano | | | | |
| | | Aptiano | | | | |
| | | Barremiano | | | | |
| | | Hauteriviano | | | | |
| | | Jurasico sup | | | | |
| | | Jurasico med. | | | | |
| | | Jurasico inf. | | | | |
| PALEOZOICO | | | | | | |
| PRECAMBRICO | | | Basamento | | | |

Figura VI-7. Columna estratigráfica mostrando el sistema petrolero de la cuenca Trujillo, basado en trabajos de, Repsol (1999) y Parsep (2001). Fuente: propia.

6.2.5 Modelamiento geoquímico 1D de los pozos Delfín 1X y Morsa 1X.

El modelado del sistema petrolero (PSM por sus siglas en inglés), es un modelo de datos digitales de un sistema petrolero en el que los procesos y sus resultados pueden ser simulados con el fin de comprenderlos y predecirlos (Hantschel y Kauerauf, 2009).

6.2.5.1 Pozo Delfín 1X

Se procedió la modelización del pozo Delfín 1X con el programa de modelamiento geoquímico Petromod. Este pozo cuenta con una profundidad de 2665 metros terminando en roca metamórfica compuesto de micaesquistos. Los datos geoquímicos recopilados (figura VI-8) de diferentes campañas de exploración y trabajos de investigación muestran como principales rocas generadoras presentes a las unidades del Eoceno superior y Mioceno medio.

La calibración se basó en los valores de temperatura de pozo (BHT) (figura VI-9) obtenidos de los registros de perforación y también se utilizó los valores de vitrinita (R_o) donde se calibro la curva de historia termal (figura VI-10). Estos mostrarán el nivel de certeza de los resultados de la modelización y permitirán la aproximación del mismo.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

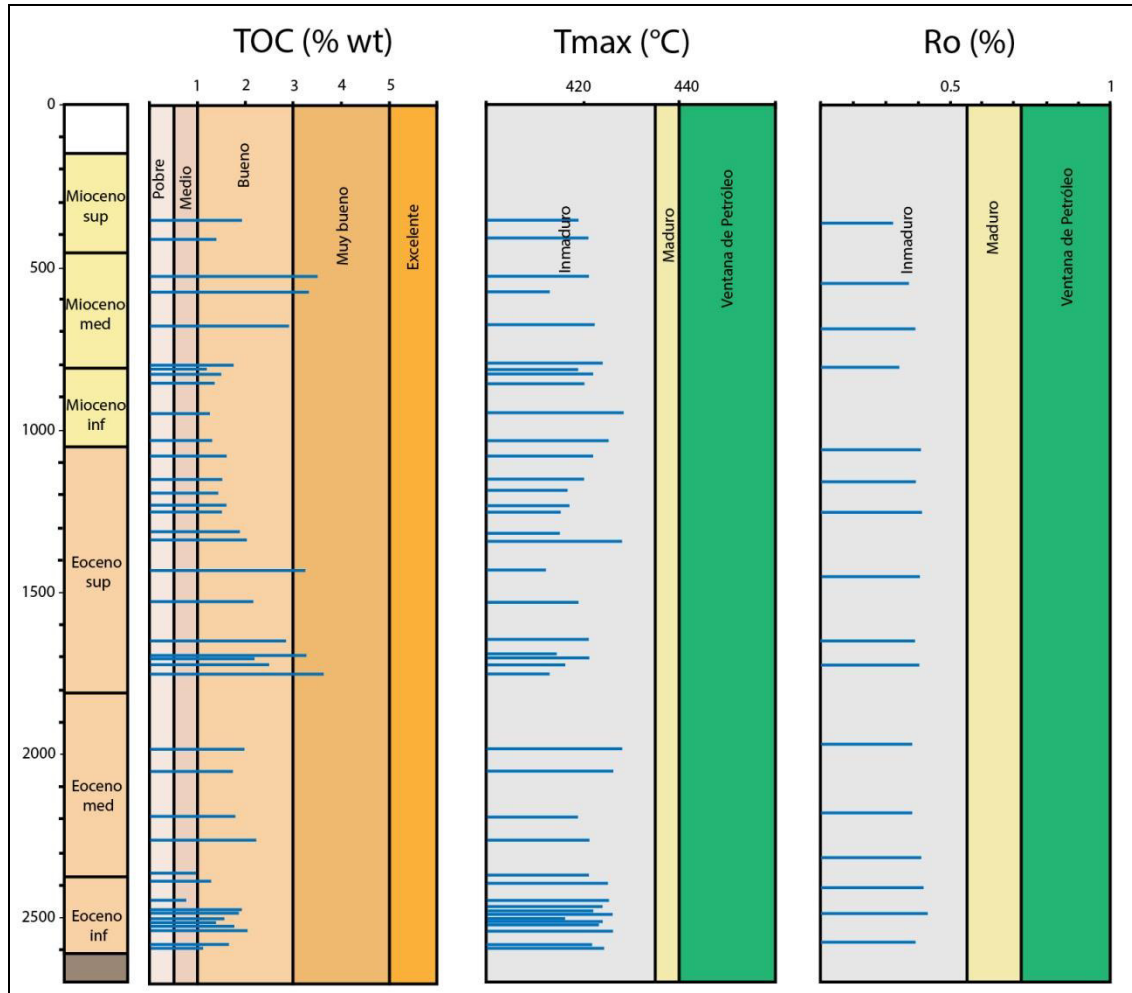


Figura VI-8. Características geoquímicas del pozo Delfín con valores de TOC (%wt), T_{máx} (°C) y Vitrinita (modificado de Repsol-YPF 2000).

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

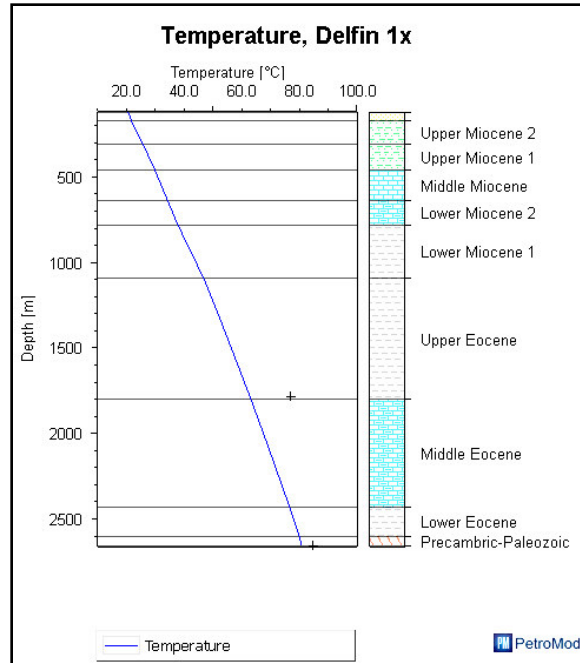


Figura VI-9. Ploteo de valores de temperatura corregida para el pozo Delfin 1X. Fuente: propia.

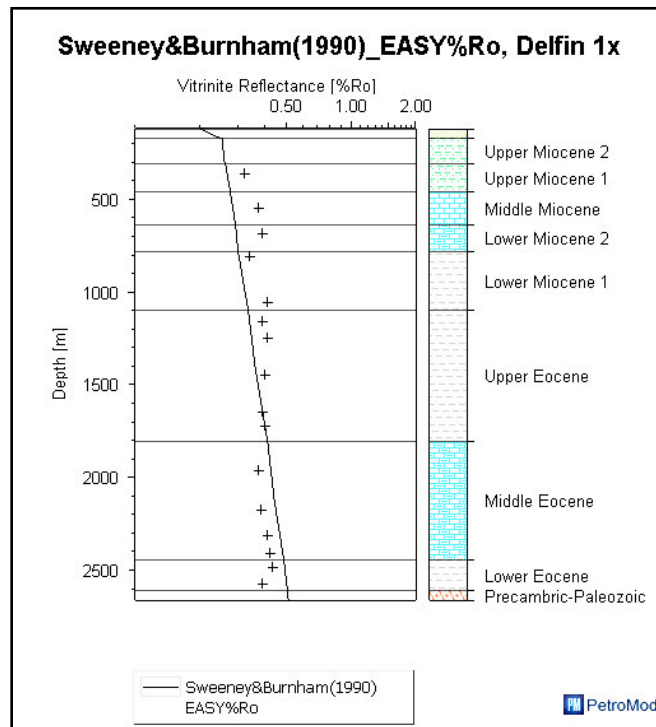


Figura VI-10. Calibración de la curva Ro del Pozo Delfin. Fuente: propia.

Posteriormente al modelizar el pozo, se obtuvo que las posibles rocas madres para este pozo se encuentran en un estado inmaduro (Figura VI-11)

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

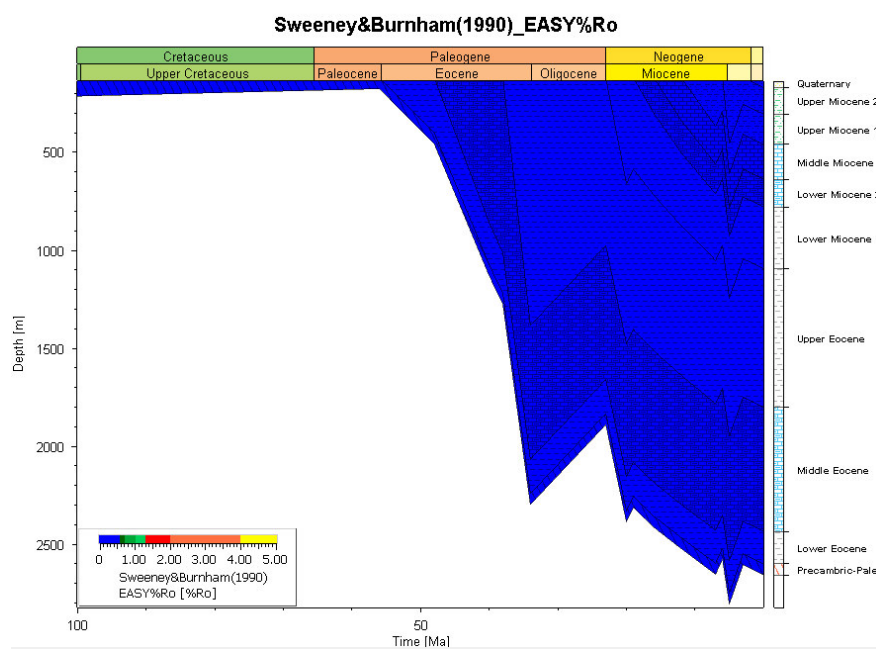


Figura VI-11. Modelización de soterramiento en el pozo Delfín 1X se muestra que se encuentra en estado inmaduro. **Fuente:** propia.

6.2.5.2 Pozo Morsa 1X

Se procedió la modelización del pozo Morsa 1X con el programa de modelamiento geoquímico Petromod. Este pozo cuenta con una profundidad de 1281 metros terminando en roca metamórfica compuesto de micaesquistos. Los datos geoquímicos recopilados (figura VI-12) de diferentes campañas de exploración y trabajos de investigación muestran como principales rocas generadoras presentes a las unidades del Mioceno inferior.

La calibración se basó en los valores de temperatura de pozo (BHT) (figura VI-13) obtenidos de los registros de perforación y también se utilizó los valores de vitrinita (Ro) donde se calibro la curva de historia termal (figura VI-14). Estos mostrarán el nivel de certeza de los resultados de la modelización y permitirán la aproximación del mismo.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

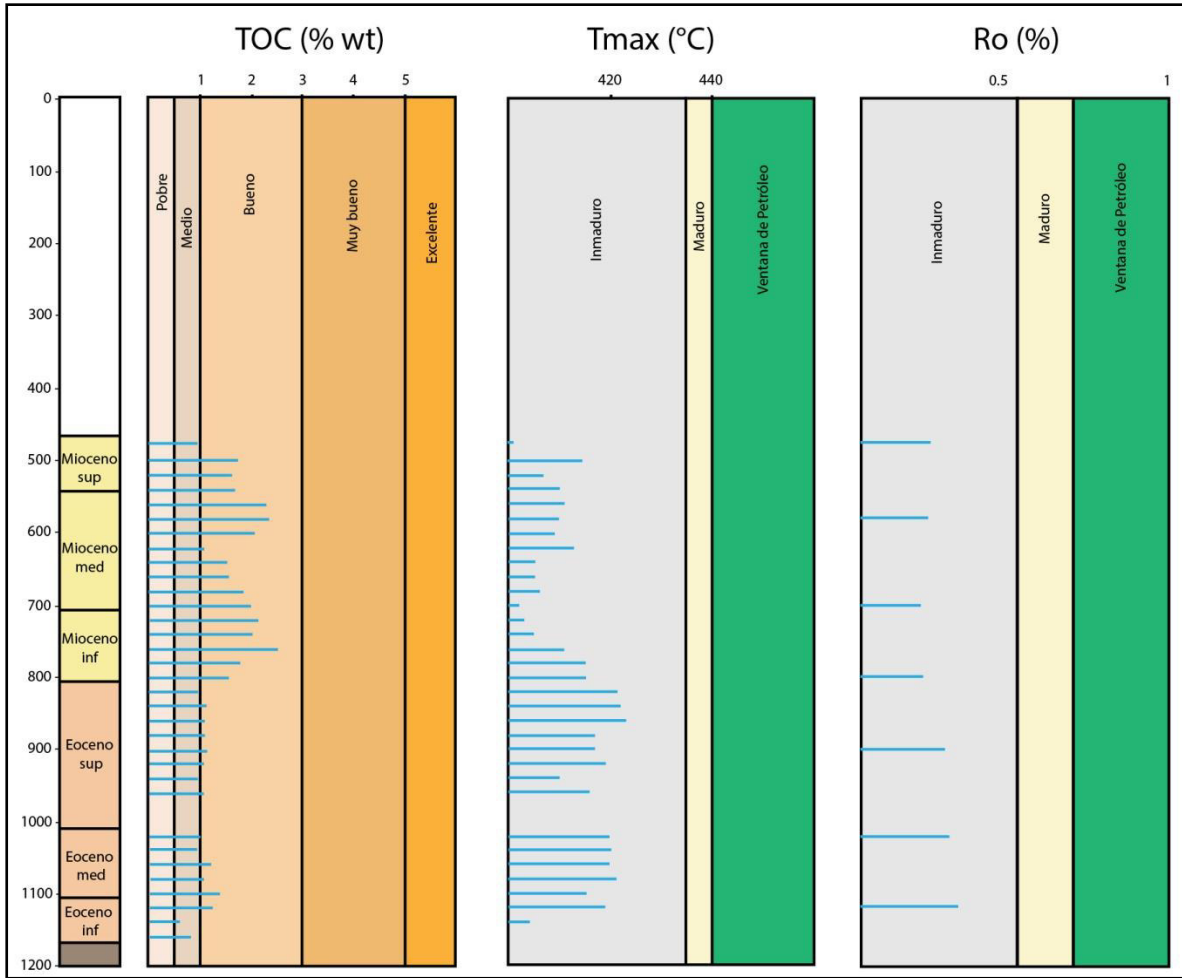


Figura VI-12. Características geoquímicas del pozo Morsa con valores de TOC (%wt), T_{máx} (°C) y Vitrinita (modificado de Repsol-YPF 2000).

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

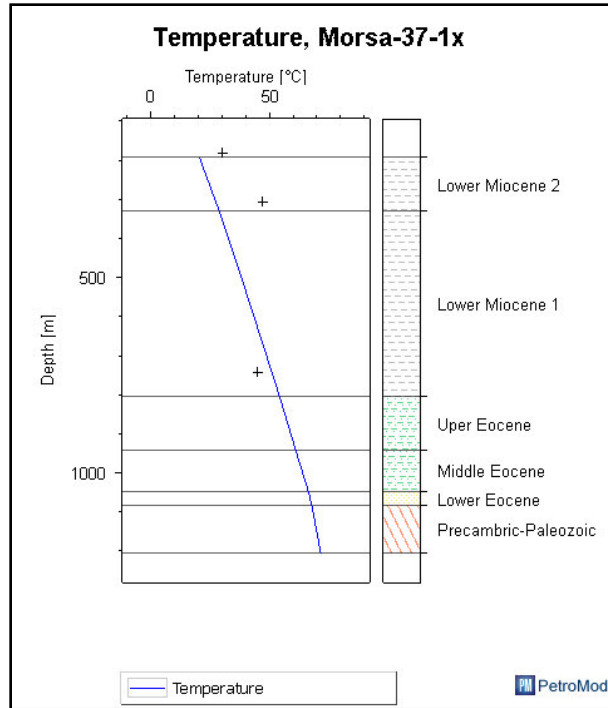


Figura VI-13. Ploteo de valores de temperatura corregida para el pozo Morsa IX. Fuente: propia.

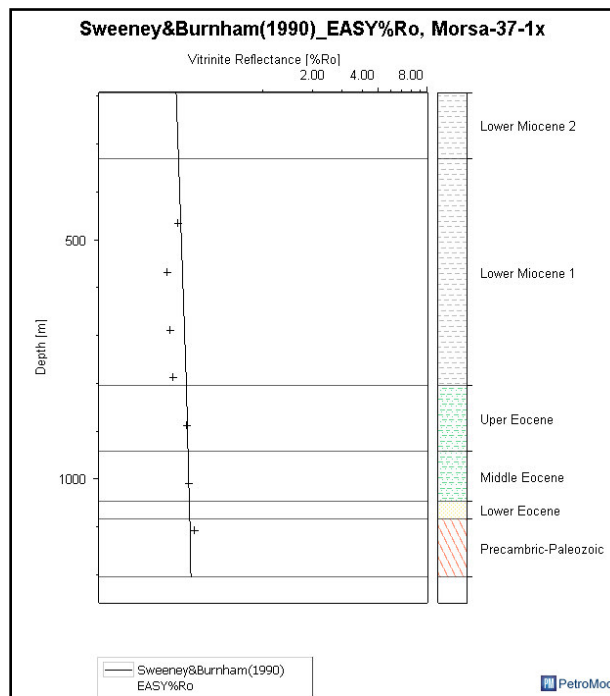


Figura VI-14. Calibración de la curva Ro del Pozo Morsa IX. Fuente: propia.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Posteriormente al modelizar el pozo, se obtuvo que las posibles rocas madres para este pozo se encuentran en un estado inmaduro (figura VI-15). Estos resultados concuerdan con la medida de valores de la Reflectancia de vitrinita y Tmax.

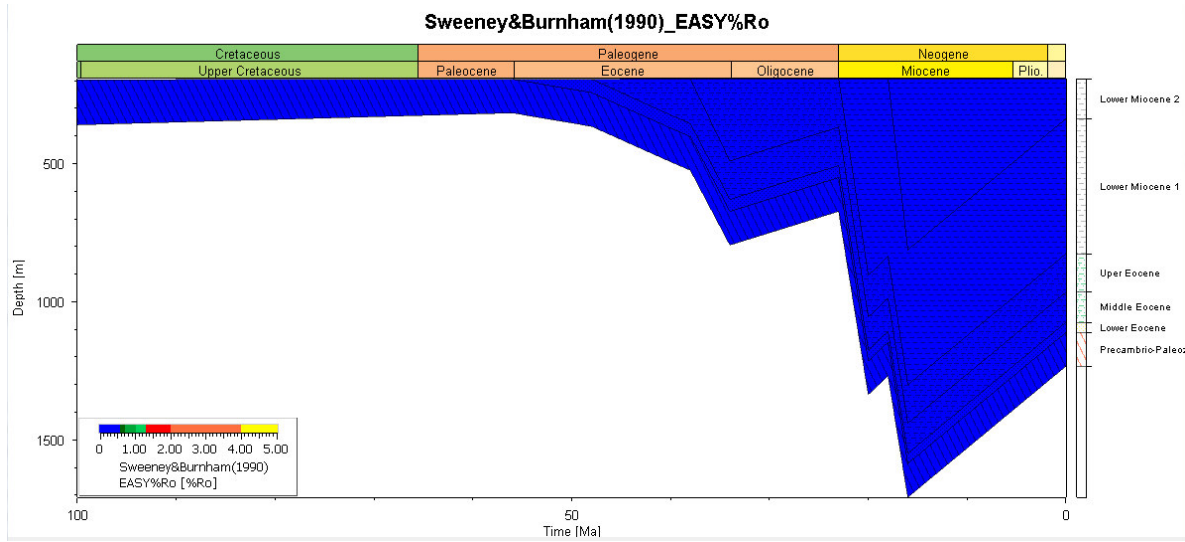


Figura VI-15. Modelización de soterramiento del pozo Morsa 1X se muestra que se encuentra en estado inmaduro. **Fuente:** propia.

6.3 SISTEMA PETROLERO DE LA CUENCA SALAVERRY

La Cuenca Salaverry es una cuenca sedimentaria subexplorada donde la empresa Occidental perforó 1 pozo exploratorio (Ballena 1X) del cual se desarrolló el modelamiento geoquímico 1D. La cuenca Salaverry cuenta por lo menos con un sistema petrolero activo debido a las evidencias de filtraciones de petróleo en forma de manchas en la superficie del mar, también la empresa Savia realizó la extracción de hidrocarburos a una posible roca madre para realizar el análisis de cromatografía de gases - espectrometría de masas y la DHI (Detecciones Indirectas de Hidrocarburo). Debido a que solo se cuenta con un pozo exploratorio al borde Oeste de la cuenca Salaverry, hace que se tome muy en cuenta los datos de afloramientos en la costa para cualquier estudio sobre el potencial hidrocarbúfero de esta cuenca (figura VI-24).

6.3.1 Análisis de secuencias con potencial de Roca Madre

6.3.1.1 Roca madre del Jurásico Superior

Compuesto principalmente de lutitas gris oscura a negra con intercalaciones de arenas, limolitas y calizas de la formación Chicama (Mbo. Zapotal), con materia orgánica con valores de regular a bueno de TOC entre 0.42 - 2.81 %, también se tiene los resultados de reflectancia de vitrinita en el rango de 4% Ro; lo que indica que el valor térmico de esta secuencia es muy maduro de acuerdo con los resultados de los análisis geoquímicos por la empresa Savia (Valencia 2011).

6.3.1.2 Roca madre del Cretácico

Las secuencias del Grupo Goyllarisquizga (Fm. Santa-Carhuaz) del Valanginiano al Aptiano inferior está compuesto por calizas y lutitas que tiene valores de TOC entre 0.66 - 1.46% de TOC con kerógeno de tipo III, en términos de madurez termal tiene valores entre 213 - 524 de Tmax y de reflectancia de vitrinita de 4.62% (Timoteo. 2013). Las secuencias del Albiano compuesto por capas de lutitas oscuras con caliza, con secuencias volcanosedimentarias del Grupo Casma (Fm. La Zorra). Con materia orgánica con valores de regular a bueno de TOC entre 0.6 - 5.7%, también se tiene los resultados de pirólisis y el examen visual de kerógeno indican que estos contienen kerógeno de tipo II-III y en términos de madurez térmica, los resultados de reflectancia de vitrinita indican la última etapa de madurez de acuerdo con los resultados de los análisis geoquímicos por la empresa Savia (Valencia 2011).

6.3.1.3 Roca madre del Mioceno inferior

Compuesto principalmente por capas de calizas intercalado con lutitas y areniscas. Con materia orgánica con valores de regular a bueno de TOC de 2.1%. La roca madre del Mioceno inferior contiene kerógeno del tipo II-III (Repsol 1996).

6.3.1.4 Roca madre del Mioceno medio

Compuesto principalmente por capas de calizas intercalado con lutitas y areniscas. Con materia orgánica con valores de regular a bueno de TOC de 3.7%. La roca madre del Mioceno medio contiene kerógeno del tipo II-III (Repsol 1996).

6.3.2 Análisis de las secuencias con potencial de roca reservorio

Las unidades estratigráficas del Grupo Goyllarisquizga, las rocas volcánicas del Grupo Casma y los intrusivos del Batolito de la Costa, pueden constituir reservorios naturalmente fracturados (Llerena 2013). Como también se puede encontrar los reservorios convencionales en las unidades del Cenozoico, los más probables para la cuenca Salaverry son:

6.3.2.1 Roca reservorio Eoceno superior

Compuesto principalmente de areniscas de barras de frente de delta, de ambientes turbidíticos son típicamente de grano medio a fino, de pobre a bien sorteado y principalmente subfeldespático (Core Laboratories. 2012). La porosidad es pobre a local moderadamente buena (figura VI-16 y 17).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

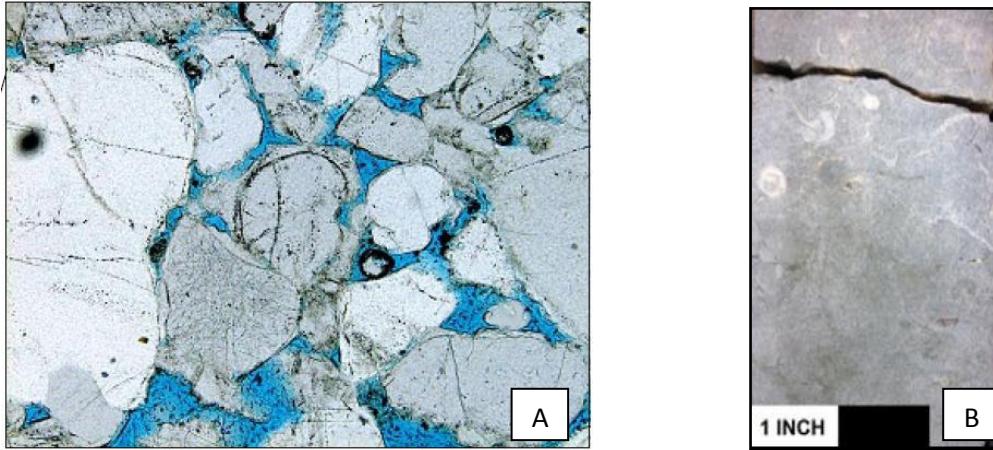


Figura VI-16. Pozo Ballena, a) Microfotografía de sección delgada (929.85 m, dd/x10) de núcleo que muestra una cuarcita de grano medio, mal ordenada, con un potencial de reservorio moderado. b) Foto de núcleo (930 m) mostrando la transición calcárea de arenisca a limonita, estructura muy apretada, debido a la cementación (Corelab 2012).

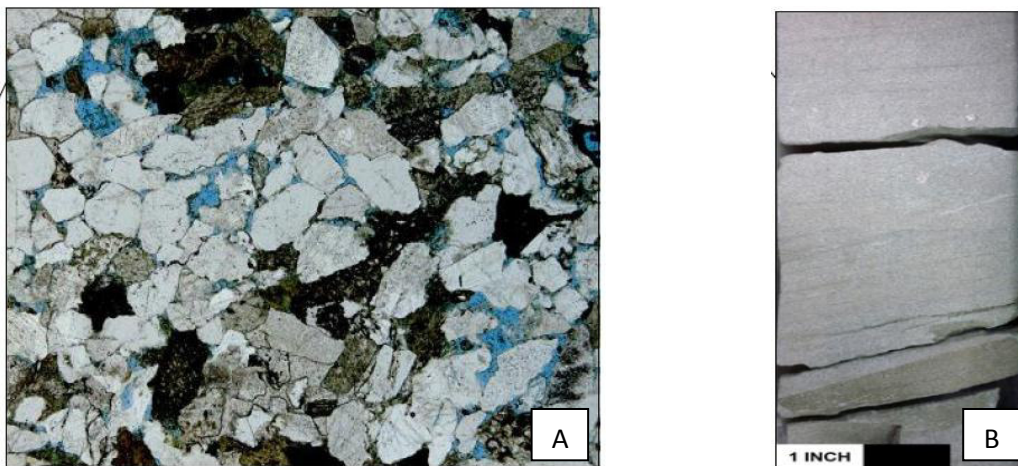


Figura VI-17. Pozo Ballena, a) Microfotografía de sección delgada (912.85 m, dd/x4) mostrando granos de tamaño medio, moderadamente bien clasificado arenisca sublítica con potencial reservorio moderado b) Foto de núcleo (914.05 m) mostrando en la base las areniscas con estratificación cruzada. Se muestra también las láminas delgadas de arcillas, ricas en contenido vegetal (Corelab. 2012)

6.3.2.2 Roca reservorio Mioceno inferior

Compuesto principalmente de areniscas de grano fino a grueso con intercalación de lutitas, limolitas y capas delgadas calizas de depósitos marinos (figura VI-18, 19 y 20). Los registros de GR muestran que el contenido de arenisca incrementa, indicando el aumento de porosidad y su carácter de roca reservorio. En los sedimentos del mioceno decrece la compactación también, teniendo un potencial de reservorio de moderado a bajo (Core Laboratories. 2012).

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

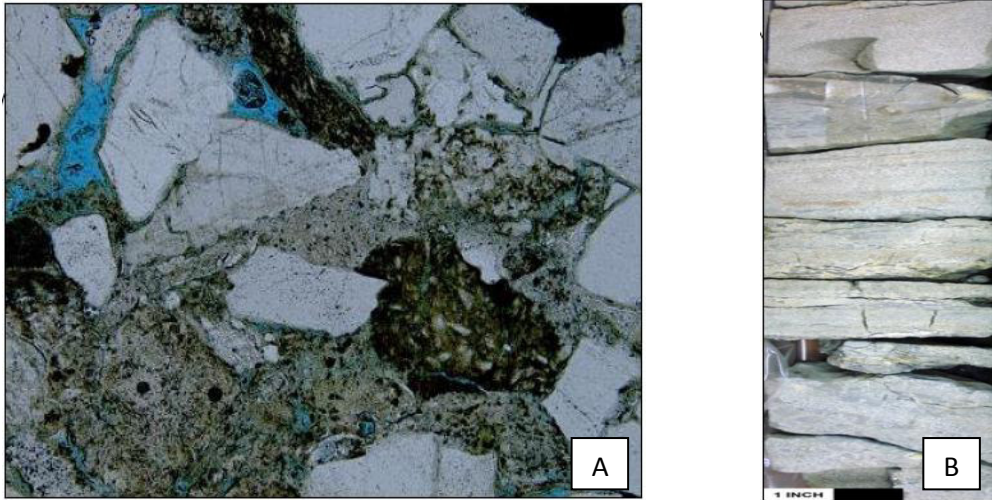


Figura VI-18. Pozo Ballena, a) Microfotografía de sección delgada (825.3 m, dd/x10 que muestra una arenita lítica de grano medio, mal ordenado, con potencial de reservorio de moderada a baja, degradada por arcillas y cemento de cuarzo. b) Foto de núcleo (824.90-40 m) que muestra una secuencia de areniscas con estratificación cruzada (conglomerado arenoso/brechas en la base) (Corelab. 2012).

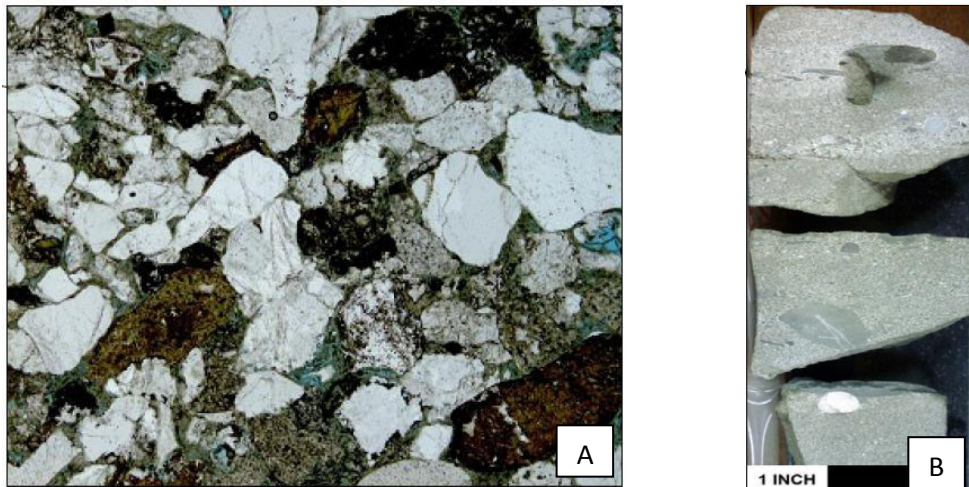


Figura VI-19. Pozo Ballena, a) Microfotografía de sección delgada (710.9 m, dd/x4) que muestra granos de tamaño medio, pobremente clasificado, con una calidad de reservorio de pobre a localmente moderada, degradada significativamente por arcillas autigénicas y crecimiento de cuarzo. b) Foto de núcleo (709.60-80 m) que muestra arenisca guijarrosa. Obsérvese que hay pocos guijarros en la base (probablemente erosionado) y que los rasgos de guijarros sugieren flujos fuertes (Corelab. 2012).

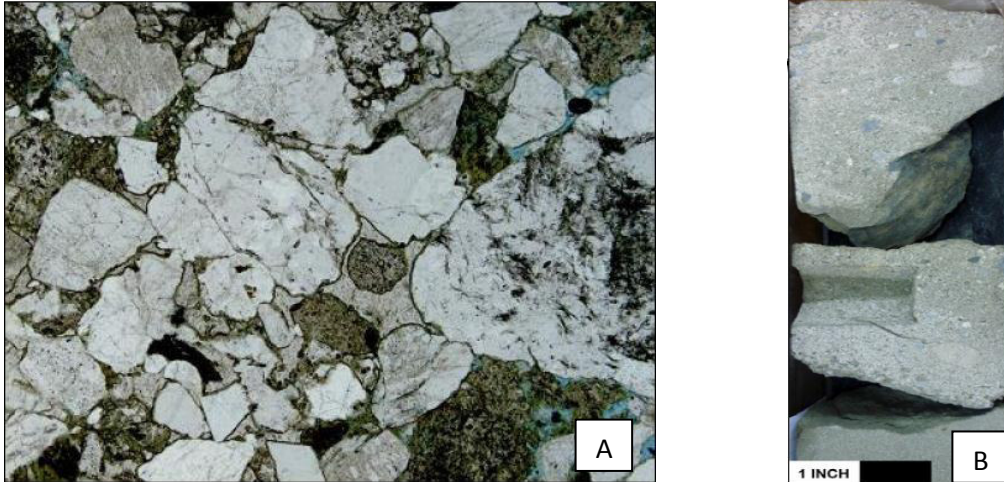


Figura VI-20. Pozo Ballena, a) Microfotografía de sección delgada (666.05 m, dd/x4) que muestra una arenisca lítica de grano media, mal clasificada, con una calidad de pobre a localmente moderada como roca reservorio, degradada significativamente por dolomita/calcita, arcillas y crecimiento de cuarzo. b) Foto de núcleo (666.20 m) muestra la transición entre arenisca masiva (base) a estratificación cruzada, arenisca/conglomerado arenoso (parte media de la parte superior), probablemente una facie de base de canal (turbidita?) (Corelab 2012).

6.3.2.3 Roca reservorio del Mioceno superior

Compuesto principalmente de areniscas y limolitas intercalado con calizas, dentro de un sistema turbidítico (Timoteo 2015).

6.3.3 Análisis de las secuencias con potencial de roca sello

Las rocas sello para la cuenca Salaverry son los depósitos del Mioceno inferior - superior la cual muestra continuidad en la sísmica y donde también se puede definir discordancias que limitan las trampas. Finalmente se tiene los depósitos del Plioceno.

6.3.4 Análisis de trampas para la acumulación de hidrocarburos

Con la interpretación de las líneas sísmicas se ha podido identificar varios modelos de trampas para hidrocarburos tanto estructurales, que involucran bloques fallados por la geometría extensiva del Mioceno inferior donde se observa grábens y horsts (figura VI-21c), anticlinales formados por fallas inversas en el Mioceno (figura VI-21a y d), y como también trampas estratigráficas asociadas a discordancias erosivas del Mioceno superior o trampas mixtas producto de la depositación de las secuencias del Mioceno y Plioceno sobre las estructuras volcánicas (figura VI-21b).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

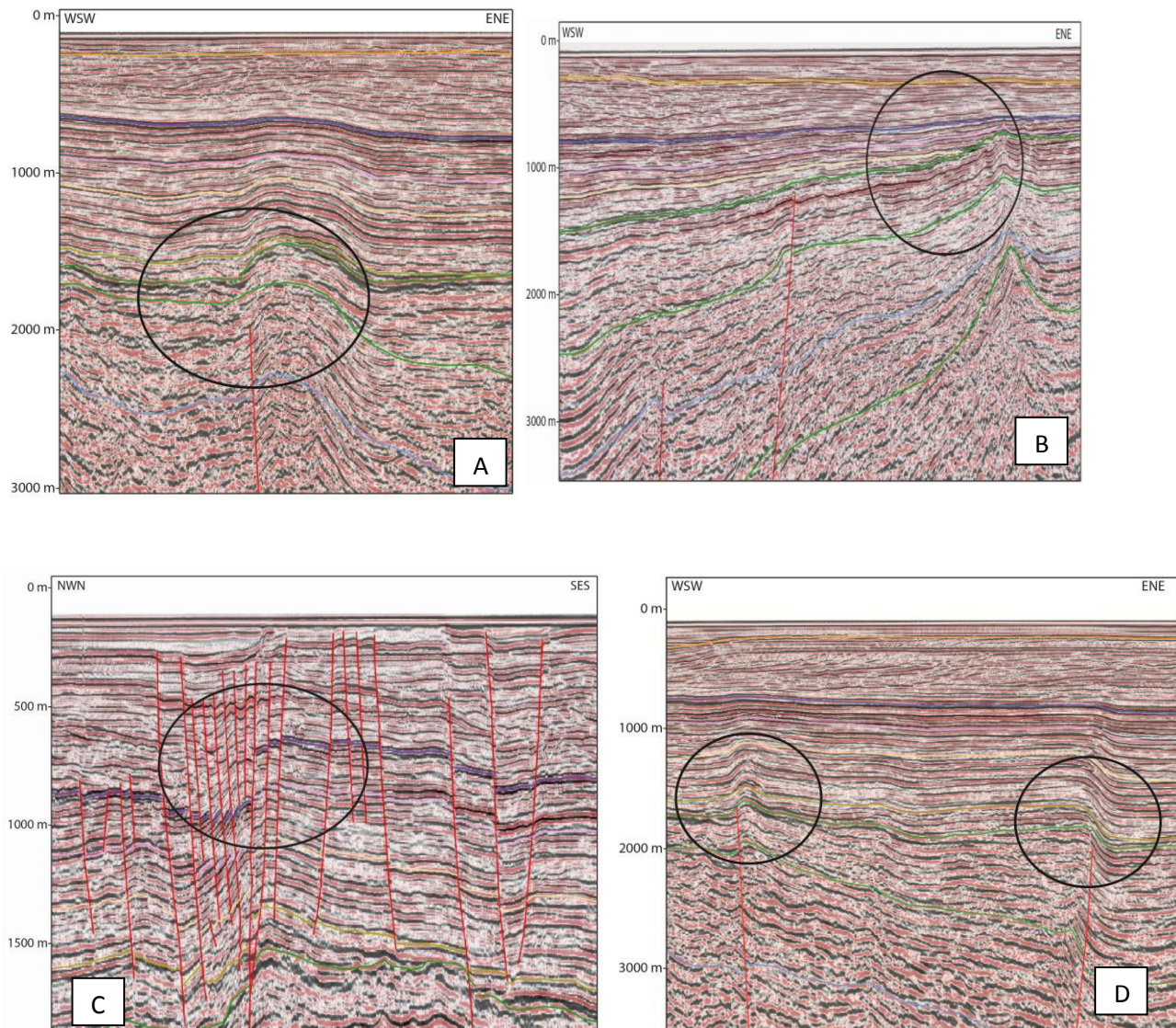


Figura VI-21. a) Trampa estructural, anticlinal formado por la tectónica compresiva b) trampa mixta de truncamiento sobre la estructura volcánica, c) trampa estructural por bloques fallados y d) Trampa estructural, anticlinal formado por fallas inversas.

Fuente: propia.

6.3.5 Modelamiento geoquímico 1D del pozo Ballena 1X

Se procedió la modelización del pozo Morsa 1X con el programa de modelamiento geoquímico Petromod. Este pozo cuenta con una profundidad de 975 metros terminando en roca metamórfica compuesto de gneis. Los datos geoquímicos recopilados de diferentes campañas de exploración y trabajos de investigación muestran como principales rocas generadoras presentes a las unidades del Mioceno inferior - medio.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

La calibración se basó en los valores de temperatura de pozo (BHT) (figura VI-22) obtenidos de los registros de perforación. Este mostro el nivel de certeza de los resultados de la modelización y permitirán la aproximación del mismo.

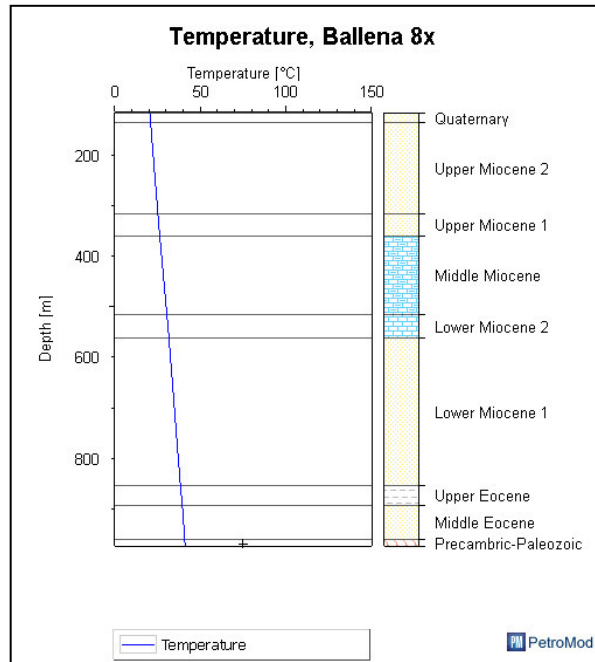


Figura VI-22. Ploteo de valores de temperatura corregida para el pozo Ballena 1X. Fuente: propia.

Posteriormente al modelizar el pozo, se obtuvo que las posibles rocas madres para este pozo se encuentran en un estado inmaduro (figura VI-23).

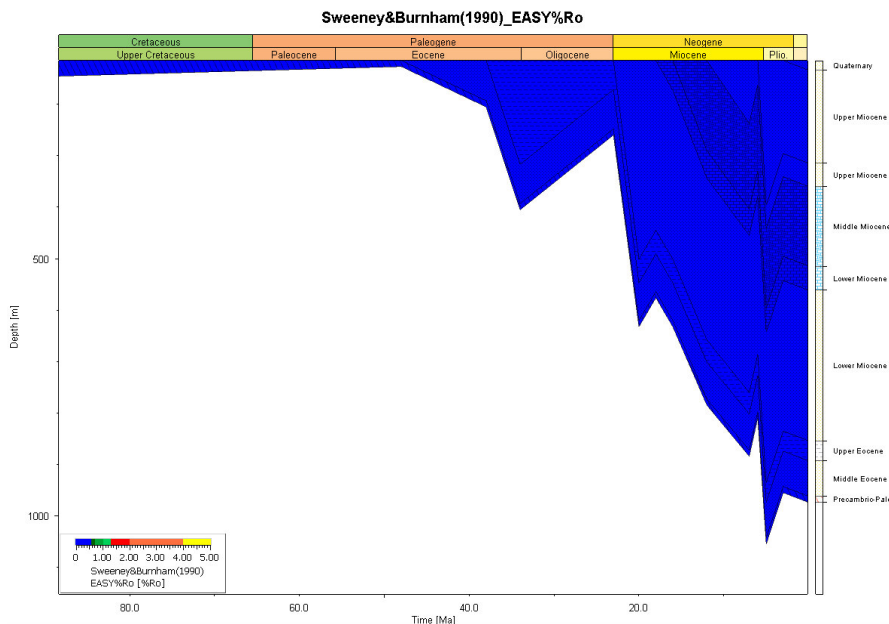


Figura VI-23. Modelización de soterramiento y % Ro del pozo Ballena 1X se muestra que se encuentra en estado inmaduro.

Fuente: propia.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

| ERA | SISTEMA | EPOCA | LITOLOGIA | SISTEMA PETROLERO | | |
|---------------|--------------|----------------------|-------------|-------------------|-----|-------|
| | | | | R.M | R.S | SELLO |
| CENOZOICO | Cuaternario | | | | | |
| | Neogeno | Plioceno | | | | |
| | | Mioceno | S | | | |
| | | | M | | | |
| | I | | | | | |
| | Paleogeno | Oligoceno | | | | |
| | | Eoceno | S | | | |
| | | | M | | | |
| | | | I | | | |
| | | Paleoceno | | | | |
| MESOZOICO | Cretácico | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | Cenomaniano | | | | |
| | | Albiano | Gpo. Casma | | | |
| | | Aptiano | | | | |
| | Barremiano | | | | | |
| | Hauteriviano | Gpo. Goyllarizquisga | | | | |
| | Jurásico | Jurasico sup. | Fm. Chicama | | | |
| Jurasico med. | | | | | | |
| Jurasico inf. | | | | | | |
| PALEOZOICO | | | | | | |
| PRECAMBRICO | | | Basamento | | | |

Figura VI-24. Columna estratigráfica mostrando el sistema petrolero de la cuenca Salaverry, basado en trabajos de Jaimes F. et. al. (2011), Jacay et. al. (2004), Cobbing (1981), Cossio (1967), y Parsep (2001). Fuente: propia.

6.4. MODELAMIENTO GEOQUÍMICO 1D DE LOS POZOS HIPOTÉTICOS

Los pozos hipotéticos fueron seleccionados en estructuras de interés por tener la mayor información geoquímica, estratigráfica y estructural, además de representar las rocas que se consideran con potencial de generación de hidrocarburos. El modelamiento del sistema petrolero se realizó en el software Petromod 1D en 4 estructuras de interés (figura VI-25), las cuales serán descritas a continuación.

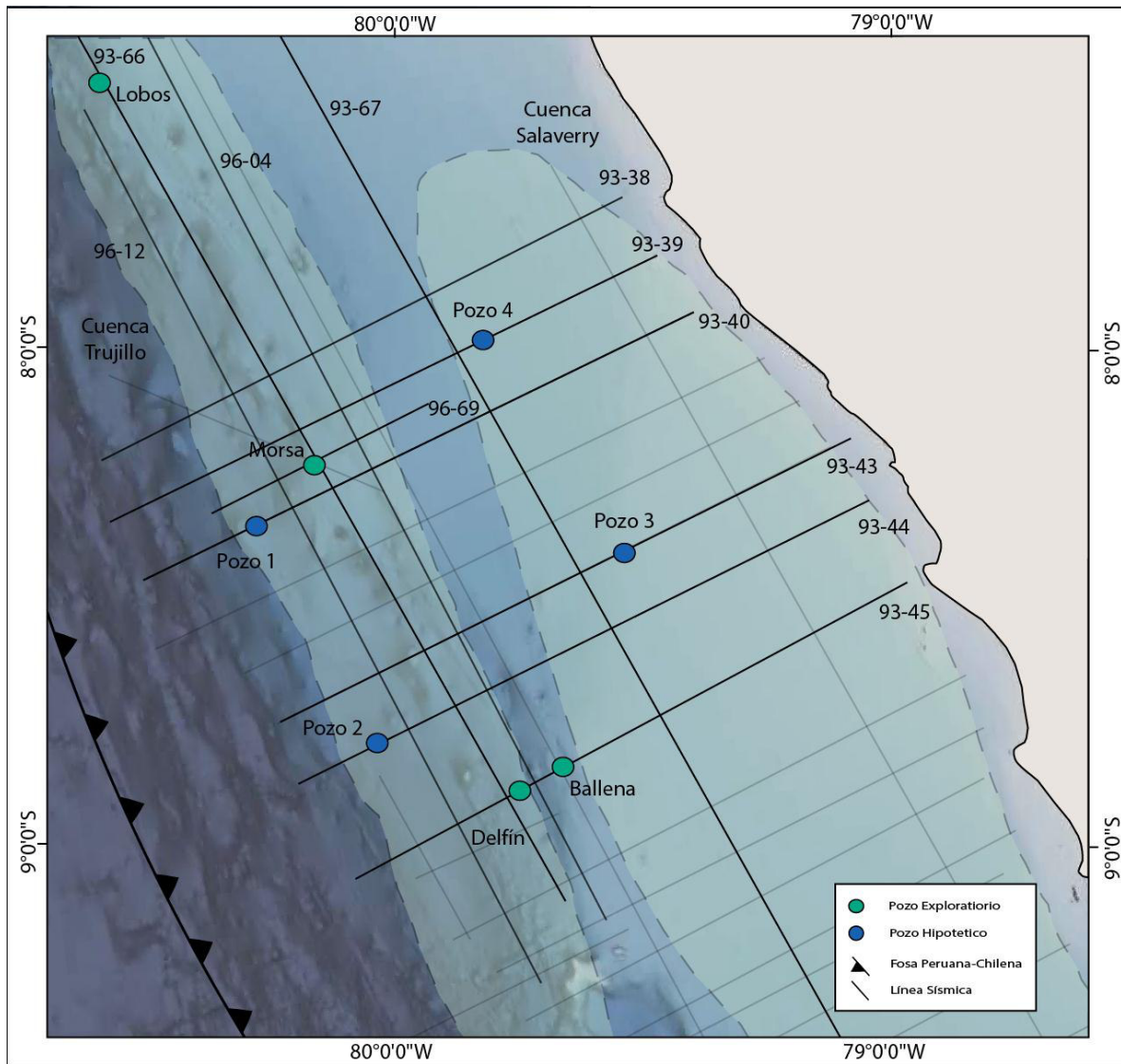


Figura VI-25. Ubicación de los 4 pozos hipotéticos en el área de trabajo. Fuente: propia.

6.4.1 Modelamiento 1D del pozo hipotético 1

El modelamiento del pozo hipotético 1 está localizado en la línea sísmica 93-40 (Figura VI-26) en la parte más profunda en la sección sísmica, siendo controlado por la falla normal maestra y cortando secuencias Cretácicas y Cenozoicas de la cuenca Trujillo. Se considera que, a partir de la mayor carga de sedimentos, así como distintas variables identificables en éste, es posible generar una idea del potencial de generación que pudieron tener las rocas para este sector. La historia de soterramiento fue construida a partir de la interpretación sísmica tomando los espesores y es resumido en la tabla 1.

| CAPAS | Tope (m) | Base (m) | Espesor (m) | Erosión (m) | Depositado desde (Ma) | Depositado hasta (Ma) |
|------------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------------------|-----------------------|
| Cuaternario | 1005 | 1964 | 959 | | 3 | 0 |
| Mioceno medio | 1964 | 2162 | 198 | 600 | 16 | 12 |
| Mioceno inferior | 2162 | 2650 | 488 | | 23 | 16 |
| Eoceno superior | 2650 | 3994 | 1344 | 100 | 38 | 34 |
| Eoceno medio | 3994 | 4230 | 236 | | 48 | 38 |
| Eoceno inferior | 4230 | 5218 | 988 | | 56 | 48 |
| Paleoceno | 5218 | 5536 | 318 | | 66 | 56 |
| Maastrichtiano | 5536 | 5818 | 282 | | 72 | 66 |
| Fm. Redondo | 5818 | 6060 | 242 | | 83 | 72 |
| Fm. Muerto | 6060 | 6403 | 343 | 300 | 113 | 100 |

Tabla 1. Parámetros estratigráficos para el modelamiento del pozo hipotético 1. Fuente: propia.

La secuencia del Albiano (Fm. Muerto) es considerada como la principal roca madre con una potencia de 343 m con un kerógeno de tipo II y un valor de TOC de 3.5%, como segunda roca madre la secuencia del Campaniano (Fm. Redondo) con un espesor de 242 m con un valor de TOC de 1.8% y finalmente la tercera roca madre la secuencia del Mioceno inferior con un espesor 488 m con un kerógeno de tipo II-III y un valor de TOC de 1.57%.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

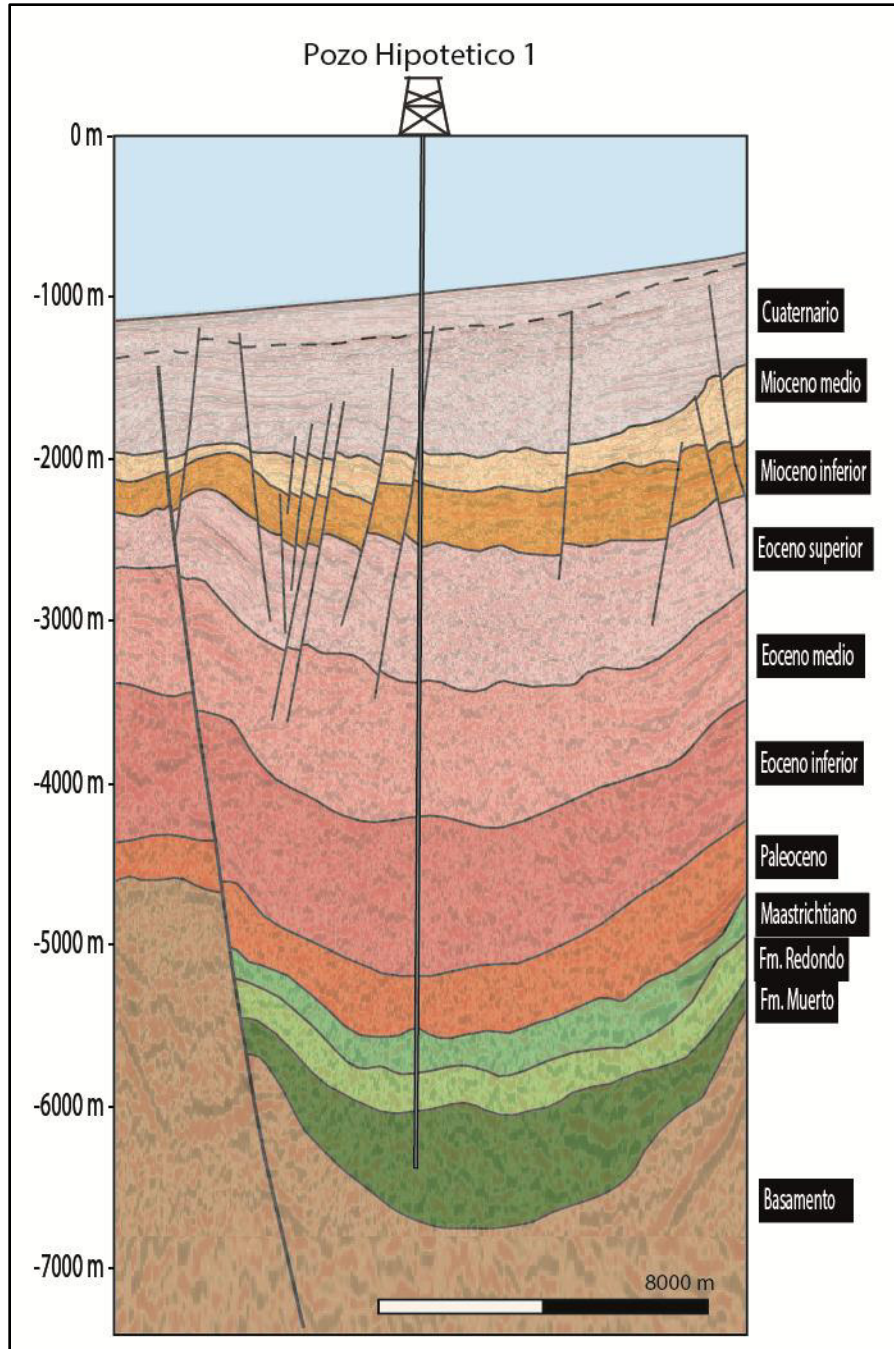


Figura VI-26. Ubicación del pozo hipotético 1 en la sección estructural 93-40. **Fuente:** propia.

Al modelizar el pozo hipotético 1 y obtener la historia de soterramiento (figura VI-27), se obtuvo como resultado que la Fm. Muerto está entrando a la ventana de generación de hidrocarburo en el Eoceno (35 Ma) y la Fm. Redondo en el Oligoceno (32 Ma). Actualmente estas dos formaciones se encuentran en la ventana de generación de gas. Finalmente, las secuencias de la roca madre del Mioceno inferior se encuentra en un estado inmaduro.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

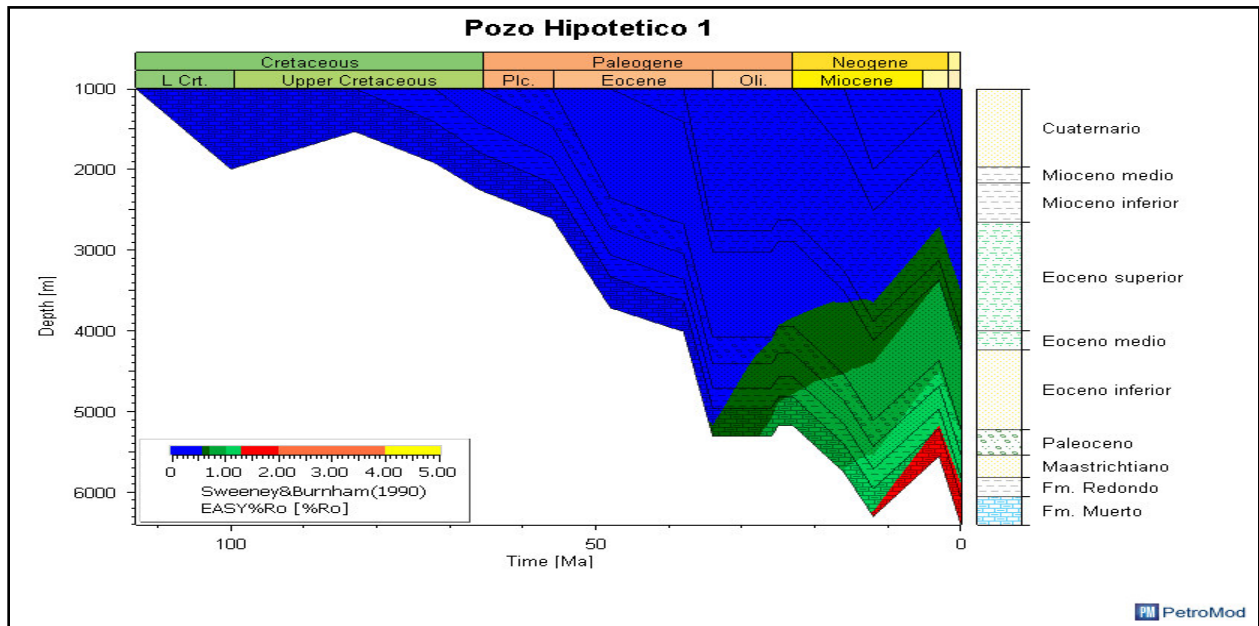


Figura VI-27. Modelización de soterramiento del pozo Hipotético 1. Fuente: propia.

En el caso de generación de hidrocarburos (figura VI-28), la Fm. Muerto comenzó a generar hidrocarburos en el Oligoceno (24 Ma) y la Fm. Redondo en el Mioceno (7 Ma). Para el caso de mayor generación de hidrocarburos en la Fm Muerto es en el Mioceno (10 Ma). Finalmente, en el caso de expulsión de hidrocarburos (figura VI-29), la Fm. Muerto comenzó a expulsar hidrocarburos en el Oligoceno (23 Ma). Para el caso de mayor expulsión de hidrocarburos en la Fm Muerto es en el Mioceno (13 Ma) y la Fm. Redondo en el Mioceno (11 Ma).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

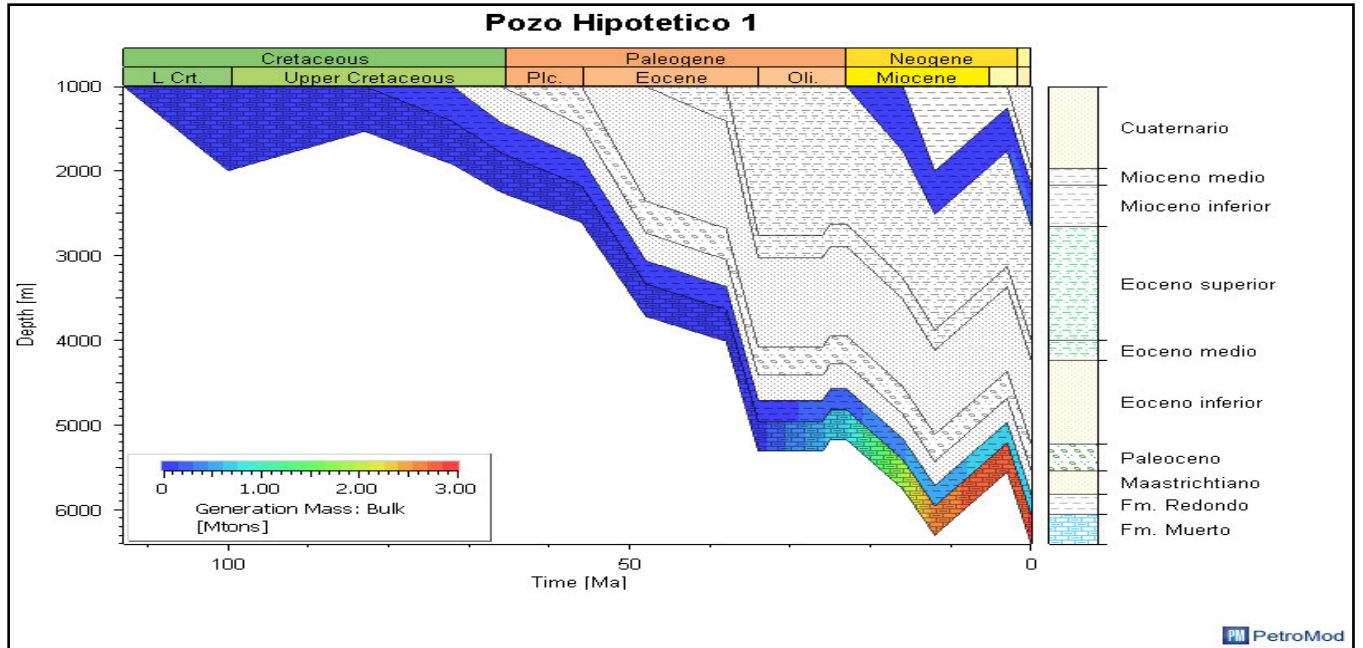


Figura VI-28. Modelización burial del Pozo hipotético 1 mostrando la generación de hidrocarburo de la Fm. Muerto, Fm Redondo y en el Mioceno inferior. Fuente: propia.

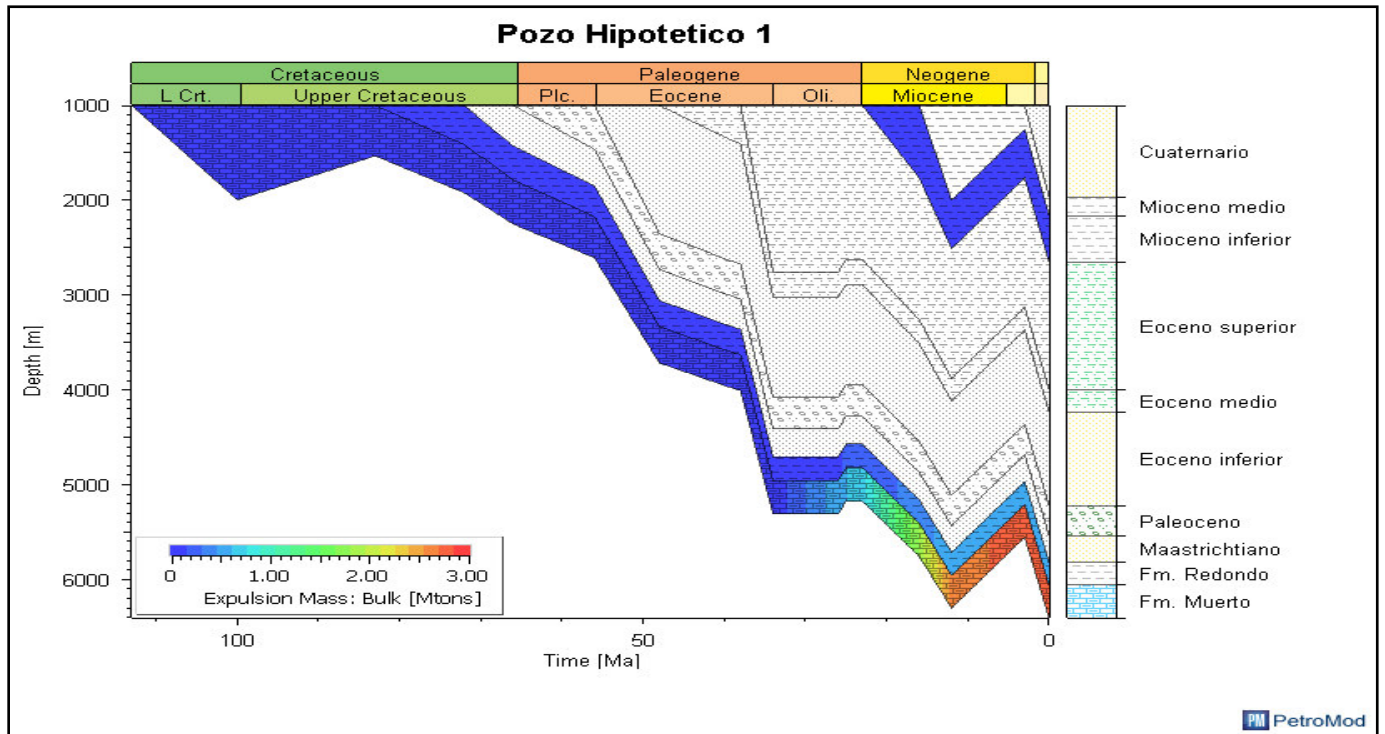


Figura VI-29. Modelización del burial del Pozo hipotético 1 mostrando la expulsión de hidrocarburo de la Fm. Muerto, Fm Redondo y en el Mioceno inferior. Fuente: propia.

6.4.2 Modelado 1D del pozo hipotético 2

El modelamiento del pozo hipotético 2 está localizado en la línea sísmica 93-44 (figura VI-30) en la parte más profunda de la sección sísmica, el pozo pasa por un graben que es controlado por la falla normal maestra el cual corta secuencias Cretácicas y Cenozoicas de la cuenca Trujillo. La historia de soterramiento fue construida a partir de la interpretación sísmica tomando los espesores y es resumido en la tabla 2.

| CAPAS | Tope (m) | Base (m) | Espesor (m) | Erosión (m) | Depositado desde (Ma) | Depositado hasta (Ma) |
|------------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------------------|-----------------------|
| Cuaternario | 821 | 1140 | 319 | | 3 | 0 |
| Plioceno | 1140 | 1191 | 51 | | 4 | 3 |
| Mioceno superior | 1191 | 1239 | 48 | 50 | 6 | 5 |
| Mioceno Medio | 1239 | 1810 | 571 | 200 | 16 | 12 |
| Mioceno inferior | 1810 | 2005 | 195 | | 23 | 16 |
| Eoceno superior | 2005 | 2199 | 194 | 100 | 38 | 34 |
| Eoceno medio | 2350 | 2734 | 384 | | 48 | 38 |
| Eoceno inferior | 2720 | 3825 | 1105 | | 56 | 48 |
| Paleoceno | 3832 | 4237 | 405 | | 66 | 56 |
| Maastrichtiano | 4252 | 4685 | 433 | | 72 | 66 |
| Fm. Redondo | 4515 | 5252 | 737 | | 83 | 72 |
| Fm. Muerto | 4920 | 5312 | 392 | 300 | 113 | 100 |

Tabla 2. Parámetros estratigráficos para el modelamiento del pozo hipotético 2. *Fuente: propia.*

La secuencia del Albiano (Fm. Muerto) es considerada como la primera roca madre con una potencia de 392 m con un kerógeno de tipo II y un valor de TOC de 3.5%, como segunda roca madre la secuencia del Campaniano (Fm. Redondo) con un espesor de 737 m con un valor de TOC de 1.8%, la tercera roca madre la secuencia del Eoceno superior con un espesor 194 m con un kerógeno de tipo II-III y un valor de TOC de 2.18 % y finalmente la cuarta roca madre la secuencia del Mioceno medio con un espesor de 571 m con un kerógeno de tipo II-III y un valor de TOC de 3.41%.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

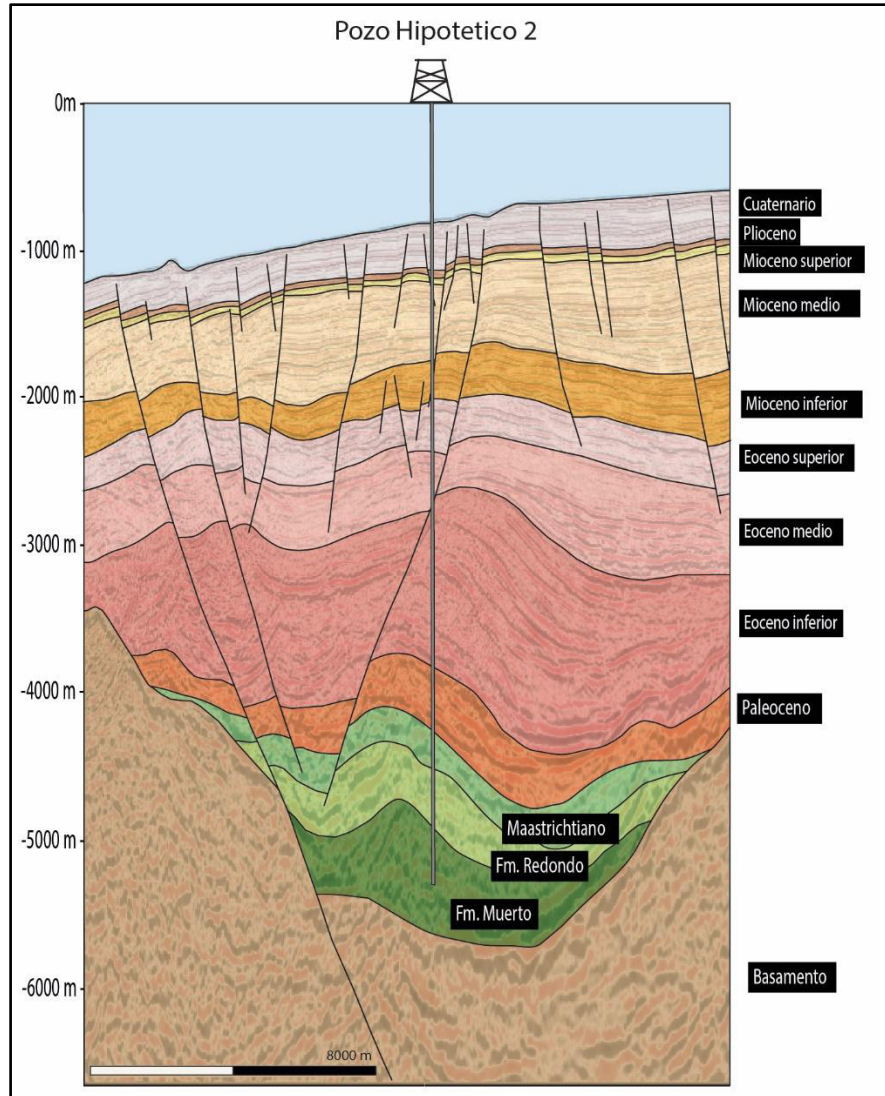


Figura VI-30. Ubicación del pozo hipotético 2 en la sección estructura 93-44. Fuente: propia.

Al modelizar el pozo hipotético 2 y obtener la historia de soterramiento (figura VI-31), se obtuvo como resultado que la Fm. Muerto está entrando a la ventana de generación de petróleo en el Eoceno (38 Ma) y la Fm. Redondo en el Oligoceno (30 Ma) actualmente estas dos formaciones se encuentran en la ventana de Petróleo. Finalmente, las rocas madres del Eoceno superior y Mioceno medio son inmaduros.

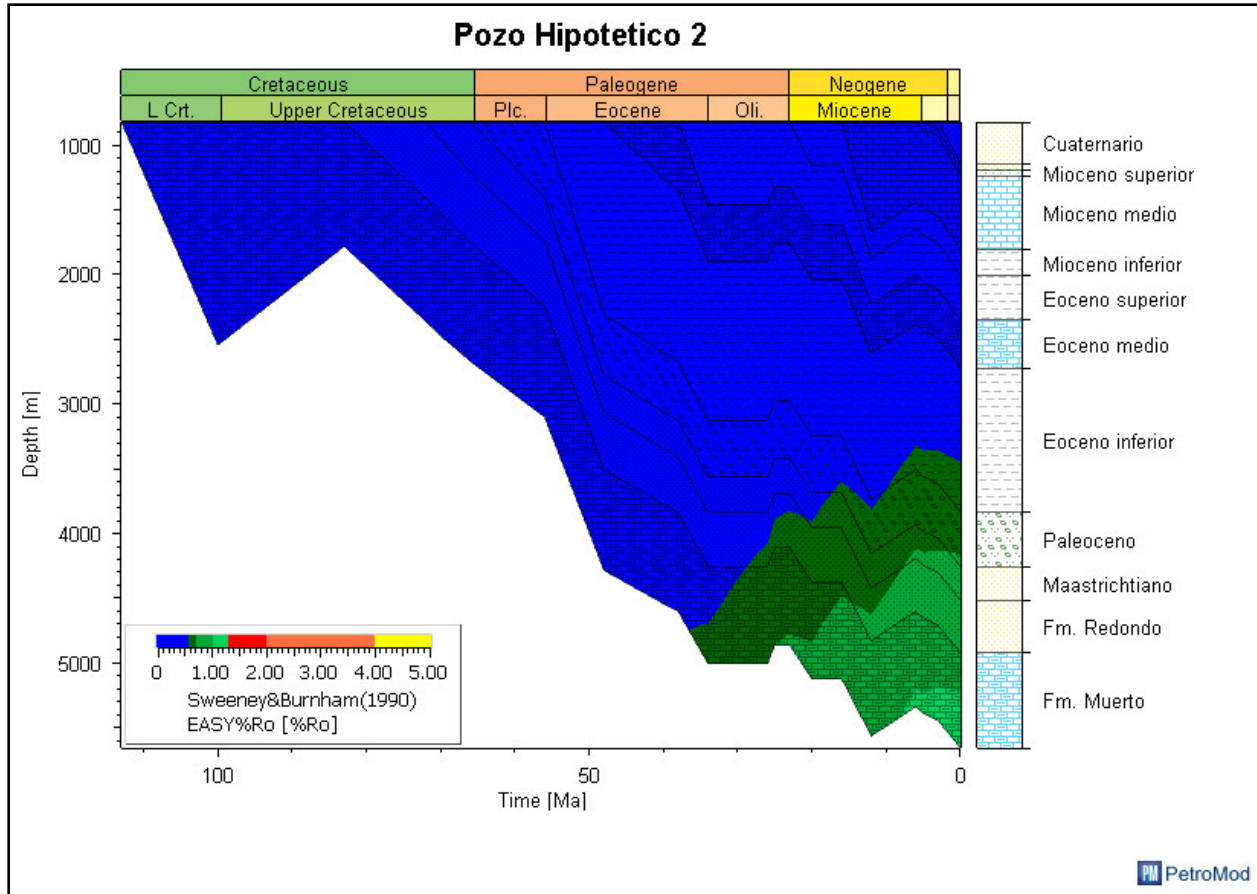


Figura VI-31. Modelización de soterramiento del pozo Hipotético 2. **Fuente:** propia.

En el caso de generación de hidrocarburos (figura VI-32) se tiene que la Fm. Muerto comenzó a generar hidrocarburos en el Oligoceno (30 Ma) y la Fm. Redondo aún no se encuentra generando hidrocarburo. Para el caso de mayor generación de hidrocarburos en la Fm. Muerto es en el Plioceno (3 Ma). Finalmente, en el caso de expulsión de hidrocarburos (figura VI-33) se tiene que la Fm. Muerto comenzó a expulsar hidrocarburos en el Mioceno (12 Ma) y la Fm. Redondo aún no se encuentra expulsando el hidrocarburo. Para el caso de mayor expulsión de hidrocarburos para la Fm Muerto es en el cuaternario (2 Ma).

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

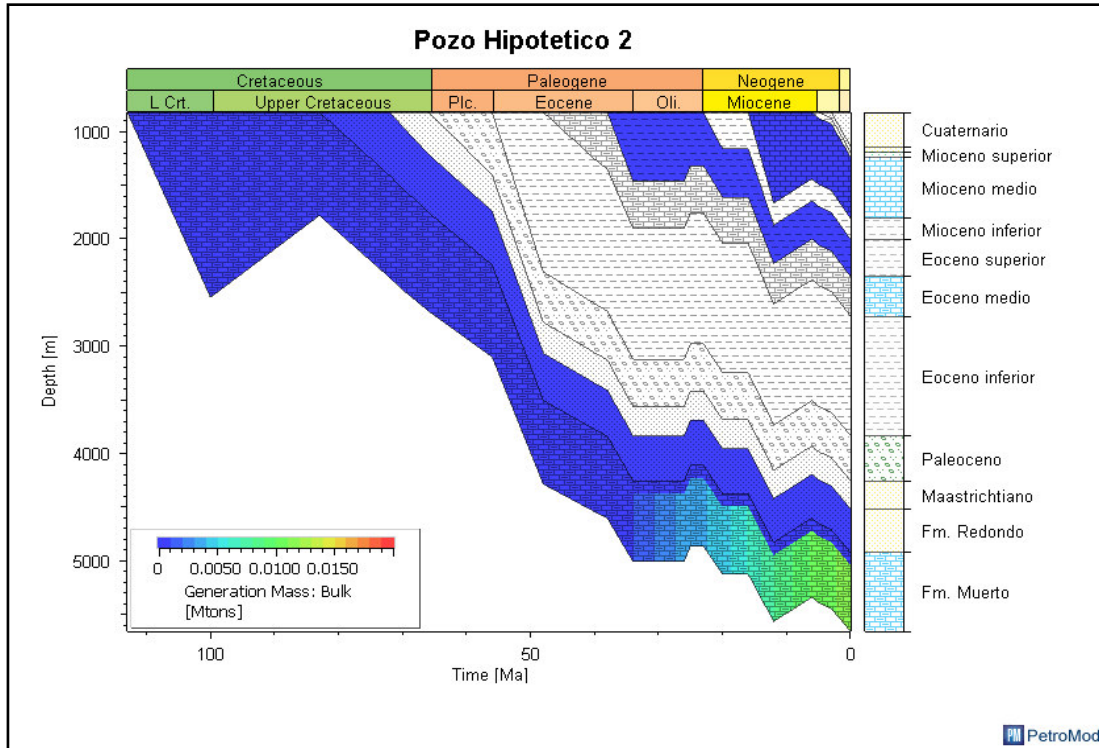


Figura VI-32. Modelización burial del pozo hipotético 2 mostrando la generación de hidrocarburo de la Fm. Muerto, Fm Redondo, Eoceno superior y Mioceno medio. Fuente: propia.

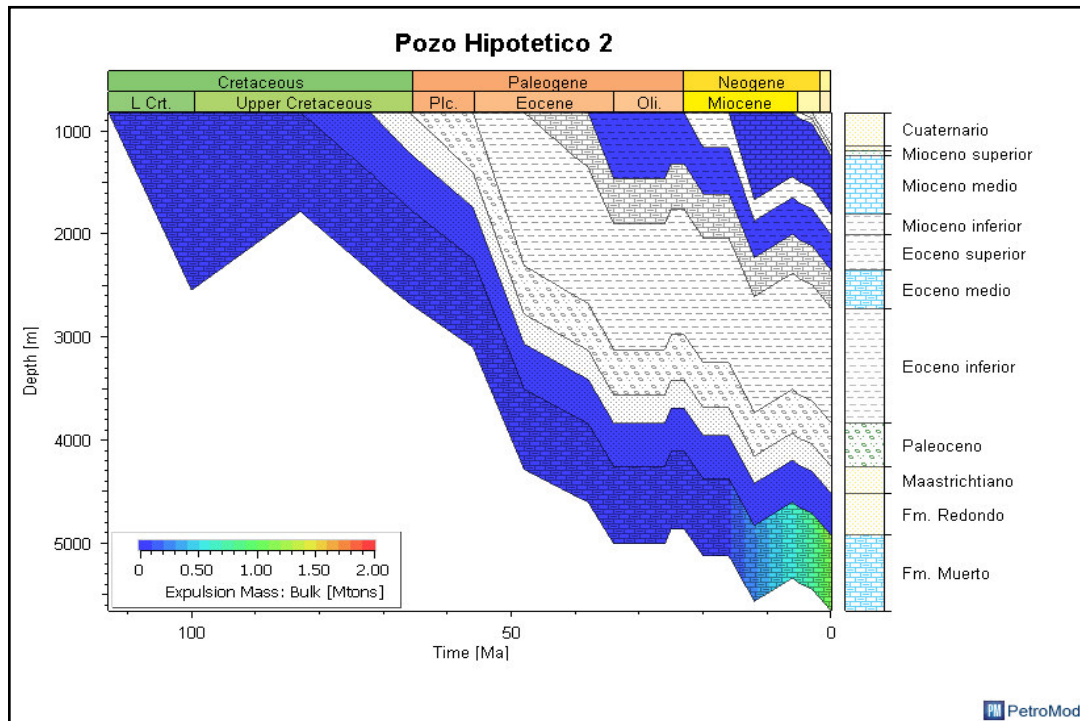


Figura VI-33. Modelización burial del pozo hipotético 2 mostrando la expulsión de hidrocarburo de la Fm. Muerto, Fm Redondo, Eoceno superior y Mioceno medio. Fuente: propia.

6.4.3 Modelado 1D del pozo hipotético 3

El modelamiento del pozo hipotético 3 está localizado en la línea sísmica 93-43 (figura VI-34) al este de sección sísmica (Cuenca Salaverry), este pozo corta un anticlinal y secuencias del Jurásico, Cretácico y Cenozoico. La historia de enterramiento fue construida a partir de la interpretación sísmica tomando los espesores y es resumido en la tabla 3:

| CAPAS | Tope (m) | Base (m) | Espesor (m) | Erosión (m) | Depositado desde (Ma) | Depositado hasta (Ma) |
|--------------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------------------|-----------------------|
| Cuaternario | 106 | 228 | 122 | | 3 | 0 |
| Plioceno | 228 | 798 | 570 | | 4 | 3 |
| Mioceno superior 2 | 798 | 991 | 193 | 50 | 6 | 5 |
| Mioceno superior 1 | 991 | 1106 | 115 | 200 | 12 | 10 |
| Mioceno medio | 1106 | 1644 | 538 | | 16 | 12 |
| Mioceno inferior | 1644 | 1828 | 184 | | 23 | 16 |
| Fm. La Zorra | 1828 | 2707 | 879 | 100 | 105 | 100 |
| Fm. Chicama | 2707 | 3108 | 401 | 200 | 152 | 145 |

Tabla 3. Parámetros estratigráficos para el modelamiento del pozo hipotético 3. Fuente: propia.

La secuencia del Jurásico superior (Fm. Chicama) es considerada como la primera roca madre con un espesor de 401 m con un valor de TOC de 1.7%, como segunda roca madre la secuencia del Albiano (Fm. La Zorra) con un espesor de 879 m con un valor de TOC de 3.1% y finalmente la tercera roca madre la secuencia del Mioceno medio con un espesor de 538 con un kerógeno de tipo II-III y un valor de TOC de 3.7%.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

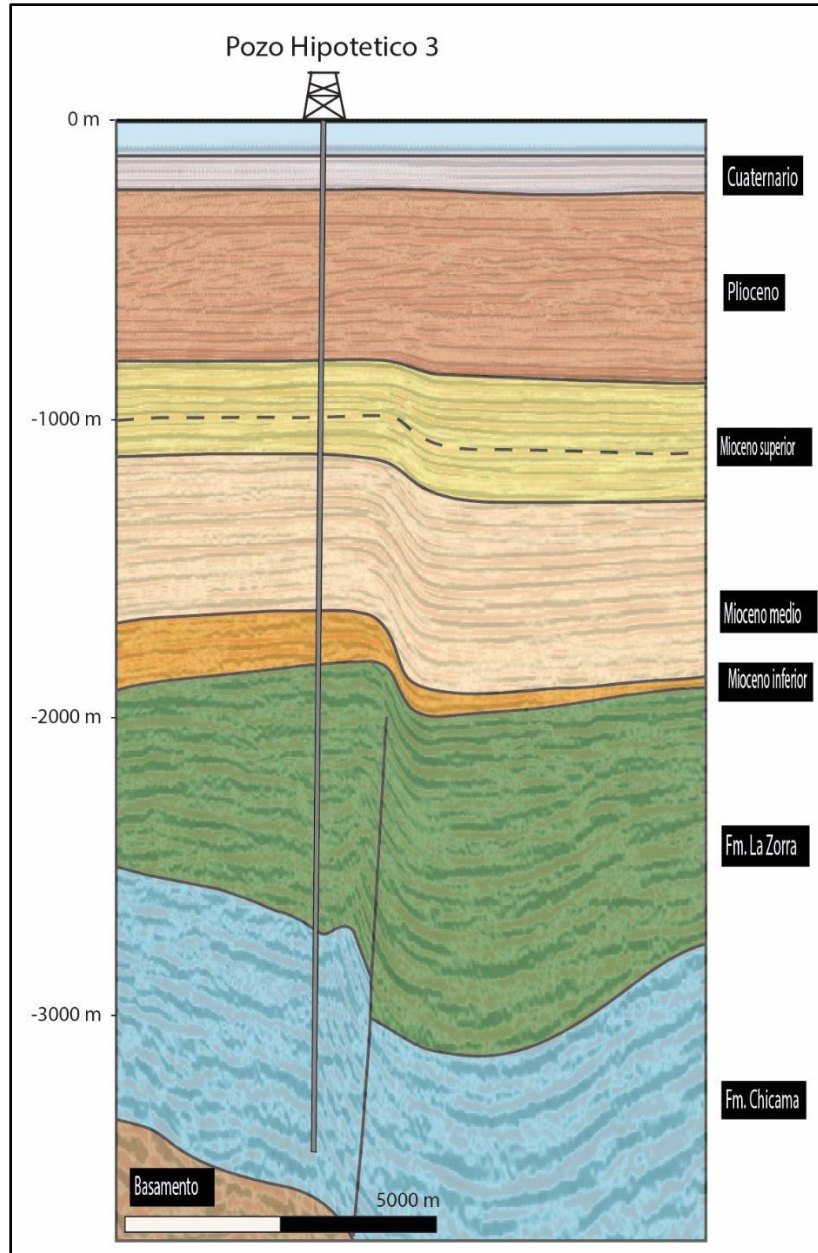


Figura VI-34. Ubicación del pozo hipotético 3 en la sección estructural. **Fuente:** propia.

Al modelizar el pozo hipotético 3 y obtener la historia de soterramiento (figura VI-35), se obtuvo como resultado que la Fm. Chicama está entrando a la ventana de generación de hidrocarburo en el Aptiano (120 Ma) y la Fm. La Zorra en el Albiano (102 Ma). Actualmente la Fm. Chicama se encuentran en la ventana de gas y la Fm La Zorra se encuentra en la ventana de petróleo. Finalmente, las rocas madres del Eoceno superior y Mioceno medio son inmaduros.

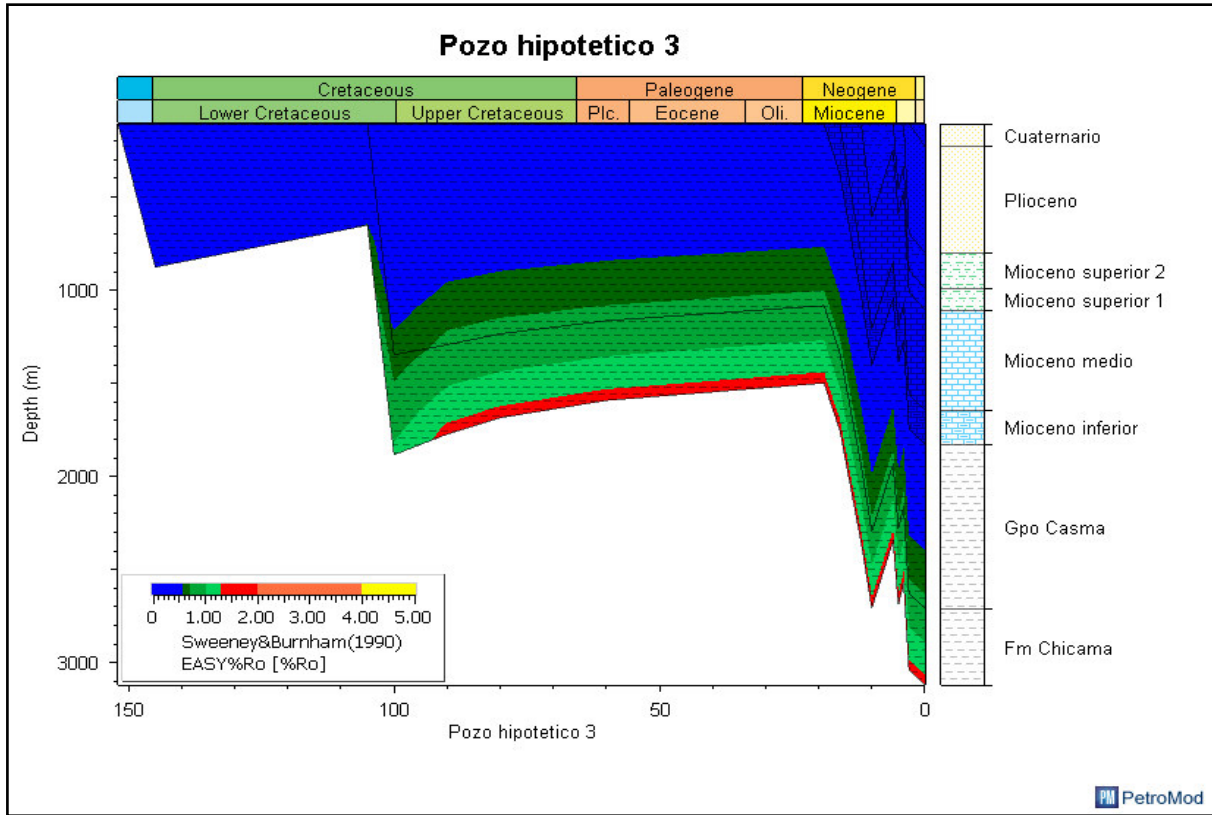


Figura VI-35. Modelización de soterramiento del pozo hipotético 3. Fuente: propia.

En el caso de generación de hidrocarburos (figura VI-36) se tiene que la Fm. Chicama comenzó a generar hidrocarburos en el Albiano (104 Ma) y la Fm. La Zorra aún no se encuentra generando hidrocarburo. Para el caso de mayor generación de hidrocarburos en la Fm Chicama es en el Turoniano (90 Ma). Finalmente, en el caso de expulsión de hidrocarburos (figura VI-37) se tiene que la Fm. Chicama comenzó a expulsar hidrocarburos en el Campaniano (80 Ma) y la Fm. La Zorra aún no se encuentra expulsando el hidrocarburo. Para el caso de mayor expulsión de hidrocarburos para la Fm Chicama es en el Mioceno (22 Ma).

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

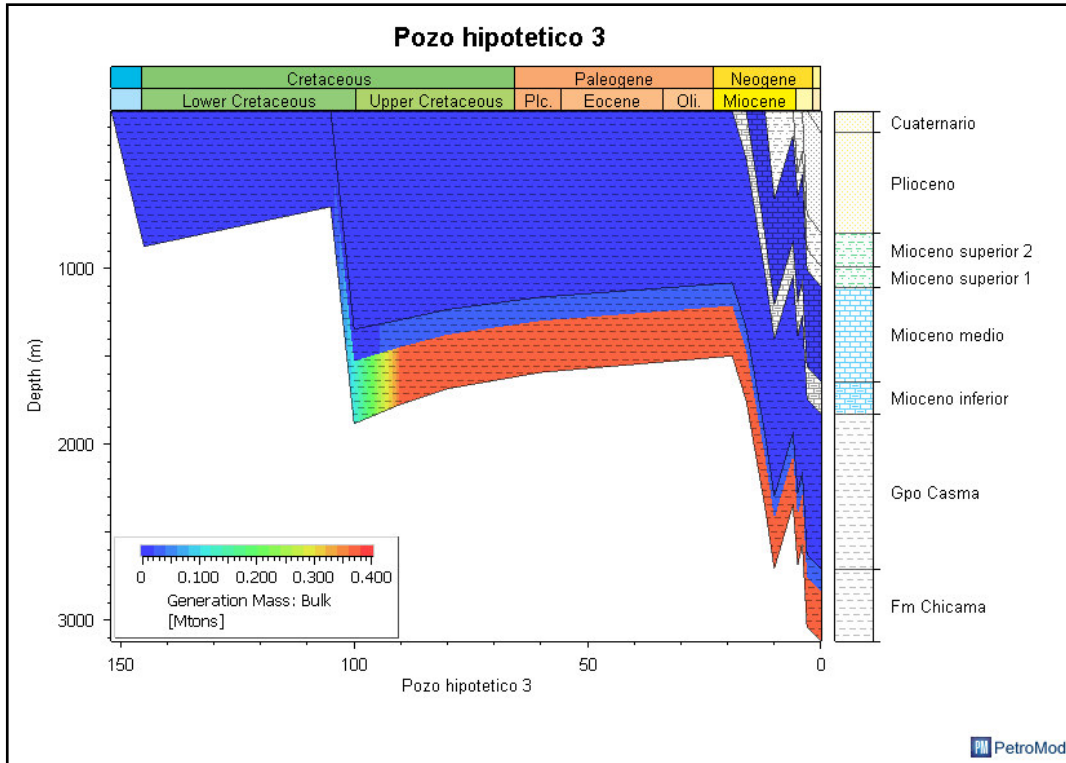


Figura VI-36. Modelización burial del pozo hipotético 3 mostrando la generación de hidrocarburo de la Fm. Chicama, Fm La Zorra y Mioceno medio. Fuente: propia.

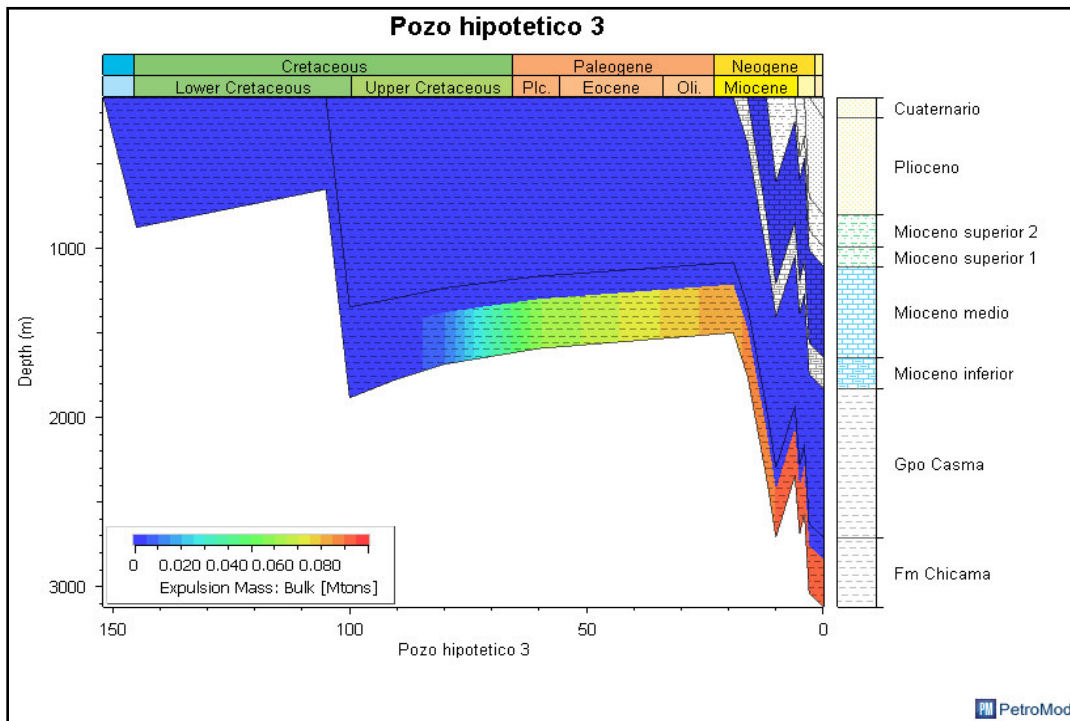


Figura VI-37. Modelización burial del pozo hipotético 3 mostrando la expulsión de hidrocarburo de la Fm. Chicama, Fm La Zorra y Mioceno medio. Fuente: propia.

6.4.3 Modelado 1D del pozo hipotético 4

El modelamiento del pozo hipotético 4 está localizado en la línea sísmica 93-39 (figura VI-38) al este de la sección sísmica (Cuenca Salaverry) este pozo corta un anticlinal y secuencias del Jurásico, Cretácico y Cenozoico. La historia de enterramiento fue construida a partir de la interpretación sísmica tomando los espesores y es resumido en la tabla 4:

| CAPAS | Tope (m) | Base (m) | Espesor (m) | Erosión (m) | Depositado desde (Ma) | Depositado hasta (Ma) |
|--------------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------------------|-----------------------|
| Plioceno | 0 | 498 | 498 | 100 | 4 | 3 |
| Mioceno superior 3 | 498 | 732 | 234 | 50 | 6 | 5 |
| Mioceno medio 2 | 732 | 865 | 133 | 200 | 14 | 12 |
| Mioceno medio 1 | 865 | 1071 | 206 | 300 | 16 | 15 |
| Mioceno inferior | 1071 | 1410 | 339 | | 23 | 16 |
| Fm Santa-Carhuaz | 1410 | 1860 | 450 | 250 | 133 | 125 |
| Fm chicama | 1860 | 2438 | 578 | 200 | 152 | 145 |

Tabla 4. Parámetros estratigráficos para el modelamiento del pozo hipotético 4. Fuente: propia.

La secuencia del Jurásico superior (Fm. Chicama) es considerado como la primera roca madre con una potencia de 578 m con un valor de TOC de 1.7%, como segunda roca madre la secuencia del Cretácico inferior (Fm. Santa-Carhuaz) con un espesor de 450 m con un valor de TOC de 1.2% y finalmente la tercera roca madre la secuencia del Mioceno medio con un kerógeno de tipo II-III y un valor de TOC de 3.7%.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

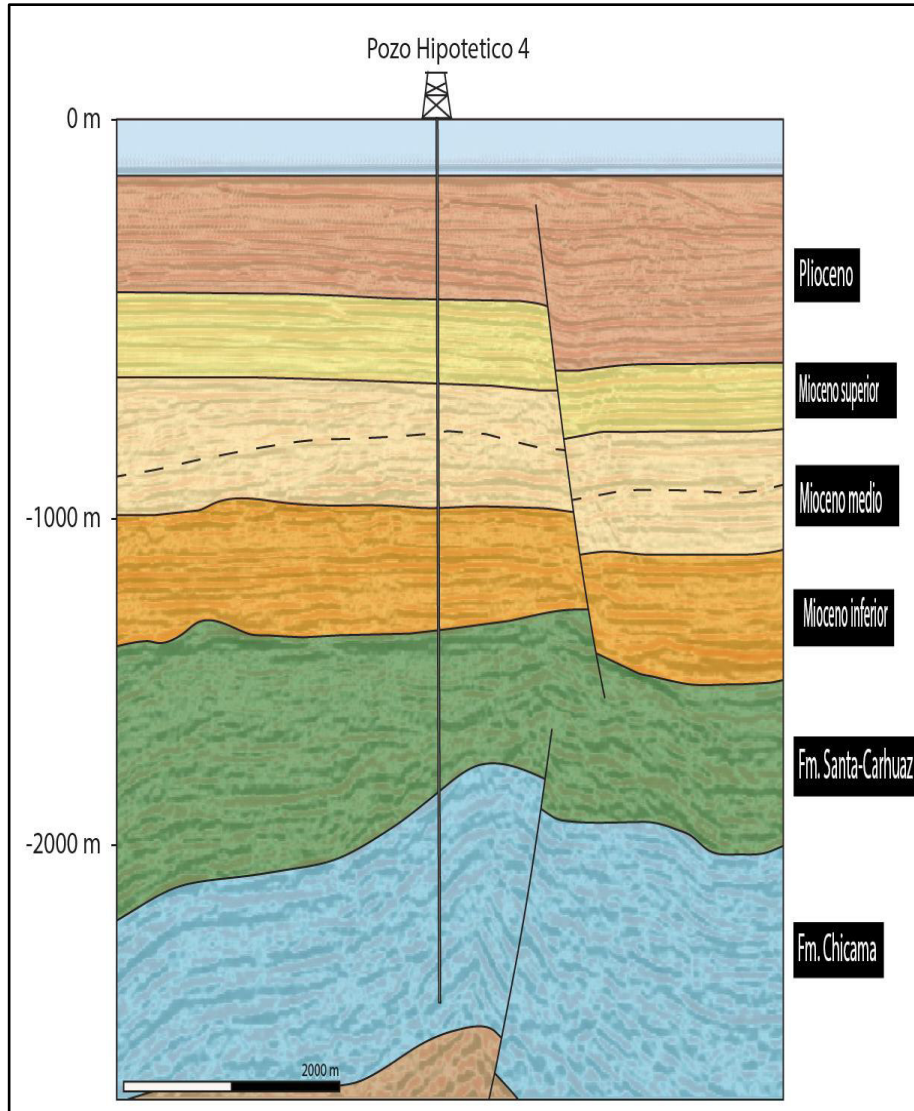


Figura VI-38. Ubicación del pozo hipotético 3 en la sección estructural. **Fuente:** propia.

Al modelizar el pozo hipotético 4 y obtener la historia de soterramiento (figura VI-39), se obtuvo como resultado que la Fm. Chicama está entrando a la ventana de generación de petróleo en el Titoniano (150 Ma) y actualmente se encuentra en la ventana de Petróleo. Finalmente, la roca madre de la Fm. Santa-Carhuaz y Eoceno Mioceno medio es inmaduro.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

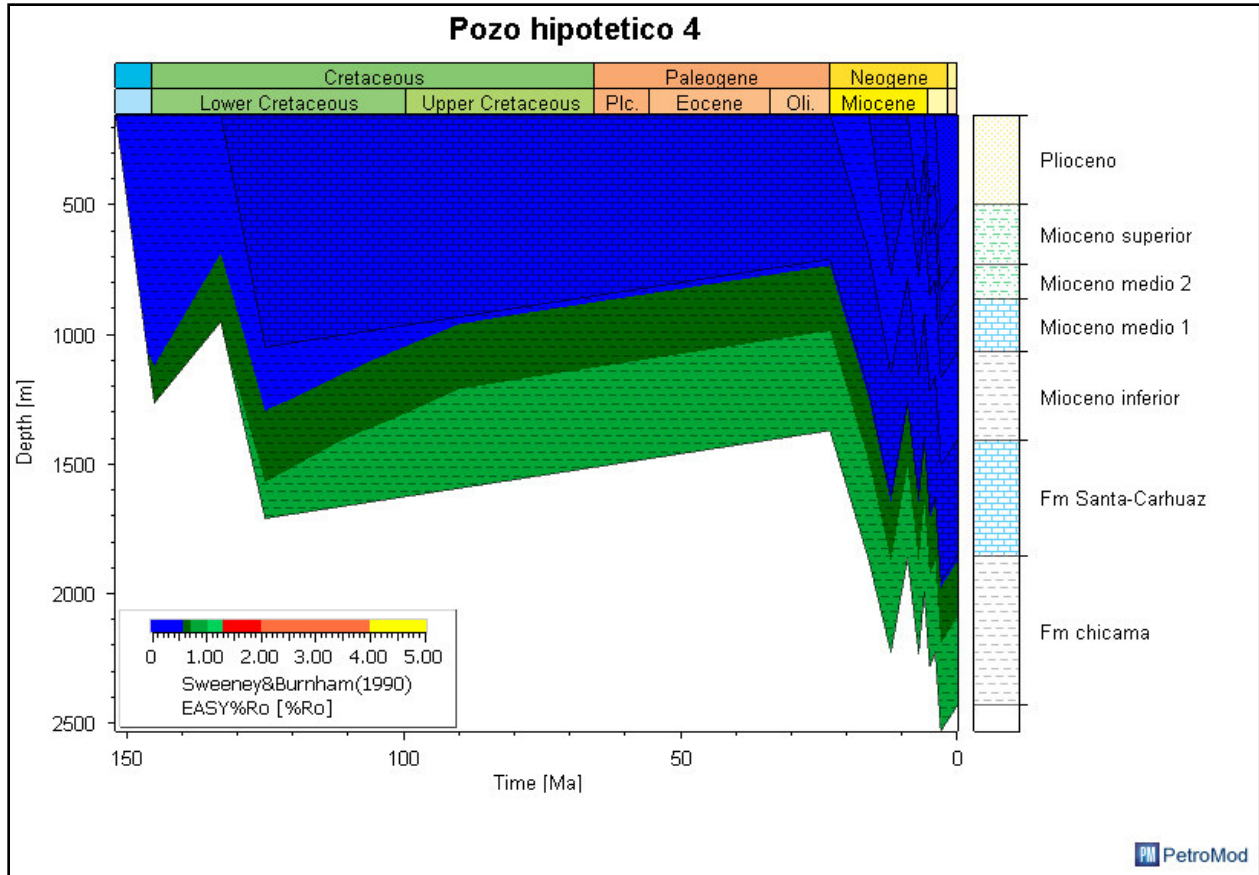


Figura VI-39. Modelización de soterramiento del pozo Hipotético 3. Fuente: propia.

En el caso de generación de hidrocarburos (figura VI-40) se tiene que la Fm. Chicama comenzó a generar hidrocarburos en el Barremiano (128 Ma). Para el caso de mayor generación de hidrocarburos en la Fm. Chicama es en el Cenomaniano (94 Ma).

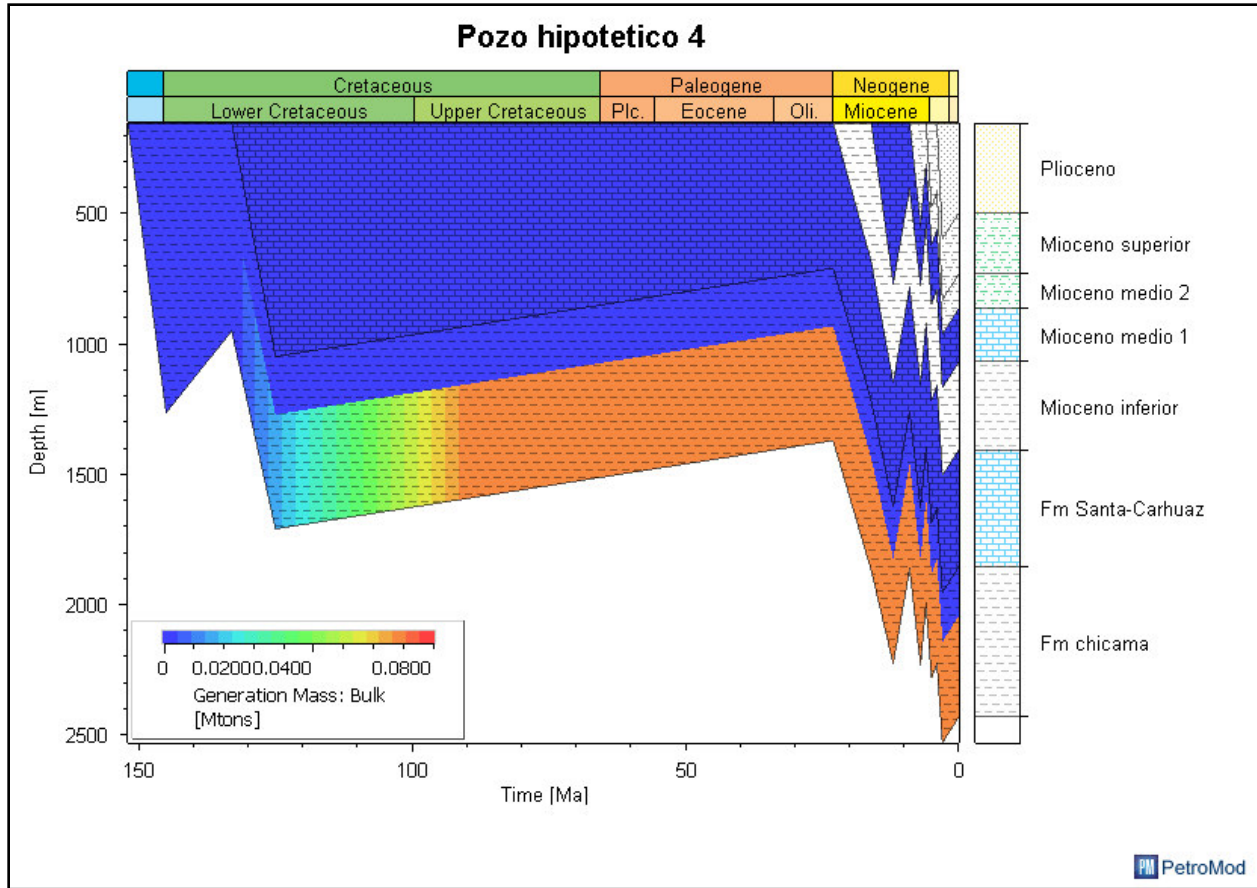


Figura VI-40. Modelización burial del Pseudo Pozo3 mostrando la generación de hidrocarburo de la Fm. Chicama, Fm Santa-Carhuaz y Mioceno medio. **Fuente:** propia.

6.5. PROPUESTA DE NUEVOS LEADS DE EXPLORACION

Los resultados de los estudios de interpretación sísmica y el modelamiento geoquímico de los pozos hipotéticos muestran que pueden existir condiciones para la generación y acumulación de hidrocarburo. La condición de sección "termalmente inmaduro" determinada en los pozos Ballena, Delfín y Morsa, no es representativa del comportamiento de toda el área, ya que los pozos no estuvieron situados en la mejor posición estructural ni estratigráfica (Seiscom-Delta, 1975), sin embargo, en áreas de convergencia de bajos gradientes geotermales y un enterramiento de 4 a 5 km podría producir las temperaturas requeridas (Dow, 1977). Thompson (1976) postula que durante los procesos de subducción en márgenes continentales activos el fallamiento inverso podría generar incremento de la temperatura así acelerando la generación de petróleo.

Los sistemas petrolíferos pueden ser usados como un modelo efectivo para investigar y entender las acumulaciones de hidrocarburo. Más allá del análisis de cuencas y de sistemas petrolíferos, los restantes niveles de investigación en la exploración de petróleo son el análisis de "play" y prospectos. Un play es

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

un conjunto de prospectos los cuales tienen en común, la misma roca reservorio, roca sello, y la misma historia de generación de hidrocarburos, migración y de carga.

Un prospecto, es un destino de exploración, un intervalo estratigráfico en específico, el cual aún no ha sido probado por la perforación (cuando se prueba y los resultados son positivos, se denomina yacimiento y un conjunto de yacimientos forman un campo).

Mientras que un lead, es una oportunidad, o un prospecto hipotético, que necesita mayor estudio o definición.

De acuerdo a la interpretación sísmica y a la evaluación del sistema petrolero en el área de estudio, se ha podido determinar 5 posibles leads de exploración (figura VI-41), conteniendo estructuras potenciales para la generación de hidrocarburos, los cuales serán descritos a continuación.

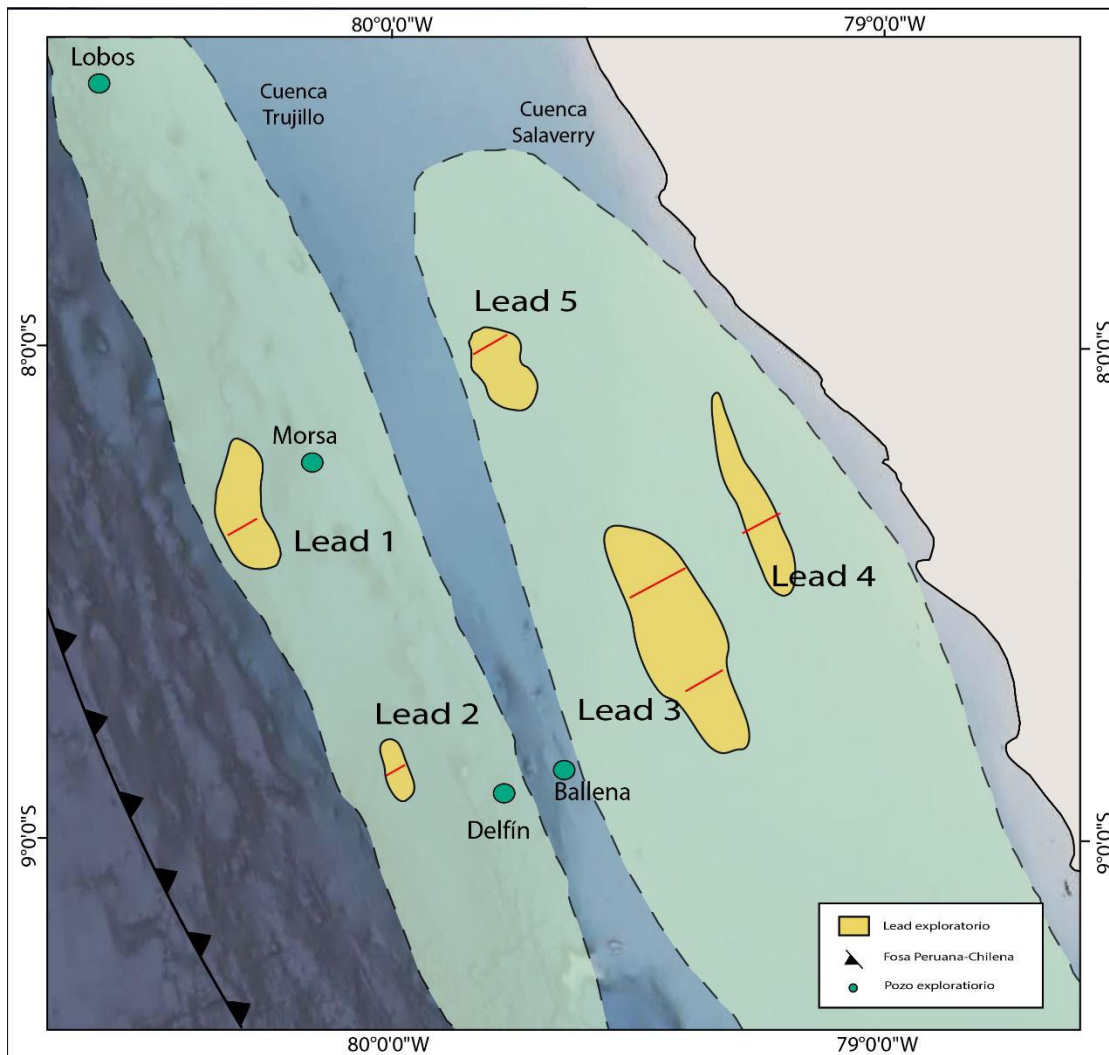


Figura VI-41. Mapa con los leads exploratorios. *Fuente:* propia.

6.5.1. Lead exploratorio 1

Este lead se encuentra localizado en una de las partes más profundas del flanco occidental a 17 Km del pozo Morsa 1X (figura VI-42), este lead dentro de un depocentro controlado por un sistema de fallas normales que sufrieron un proceso de inversión tectónica desarrollando altos estructurales con orientación NO-SE. Se tiene como roca reservorio las secuencias del Eoceno inferior y medio, como roca madre se tiene las secuencias de la Fm. Muerto, Fm. Redondo y Mioceno inferior.

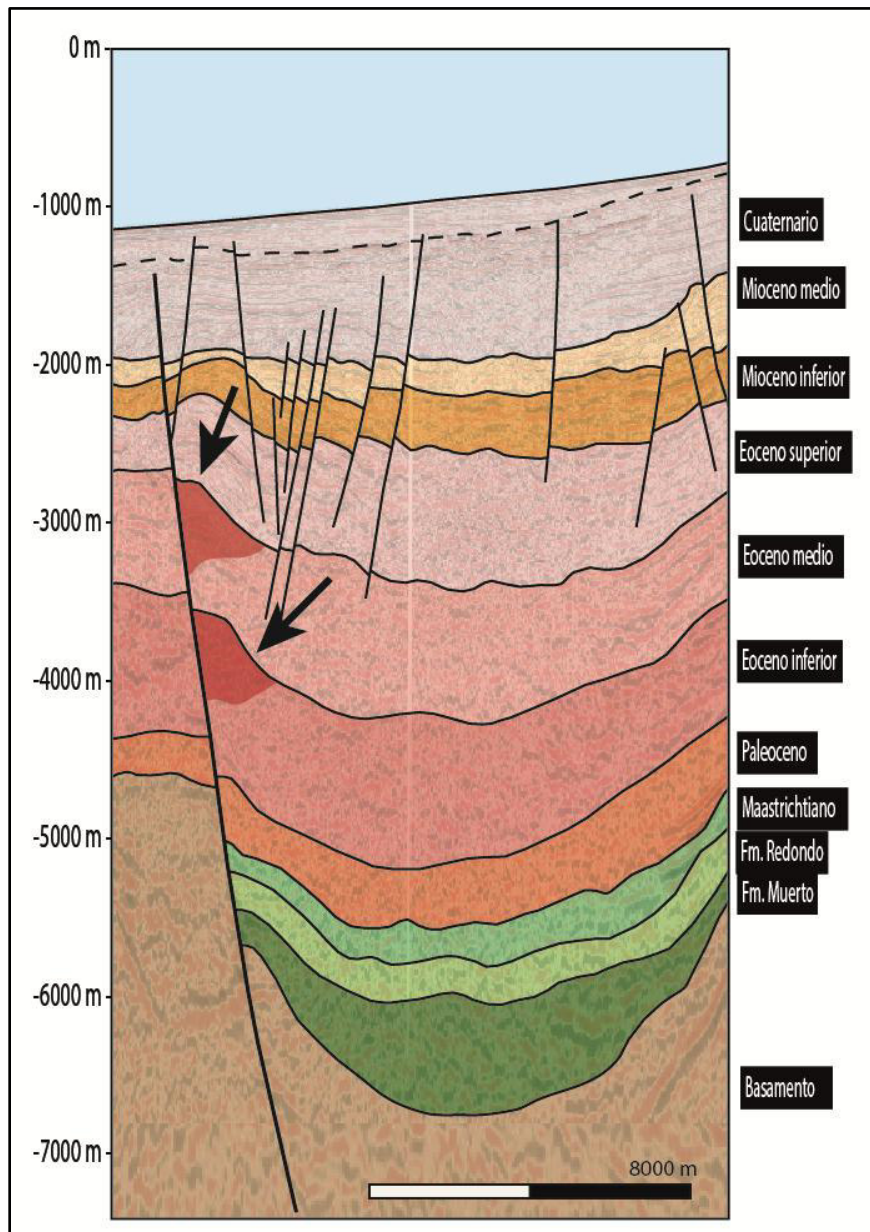


Figura VI-42. Sección sísmica mostrando la trampa estructural en las rocas reservorio reconocida en el lead exploratorio 1.

Fuente: propia.

6.5.2. Lead exploratorio 2

Este lead se encuentra localizado en una de las partes más profundas del flanco occidental a 29 Km del pozo Delfín 1X (figura VI-43), el estilo de trampa para este Lead es estructural con una orientación NO-SE que corresponde a un anticlinal producto de la inversión tectónica. Teniendo como roca reservorio las secuencias del Eoceno inferior y medio, como roca madre se tiene las secuencias de la Fm. Muerto, Fm. Redondo, Eoceno superior y Mioceno medio.

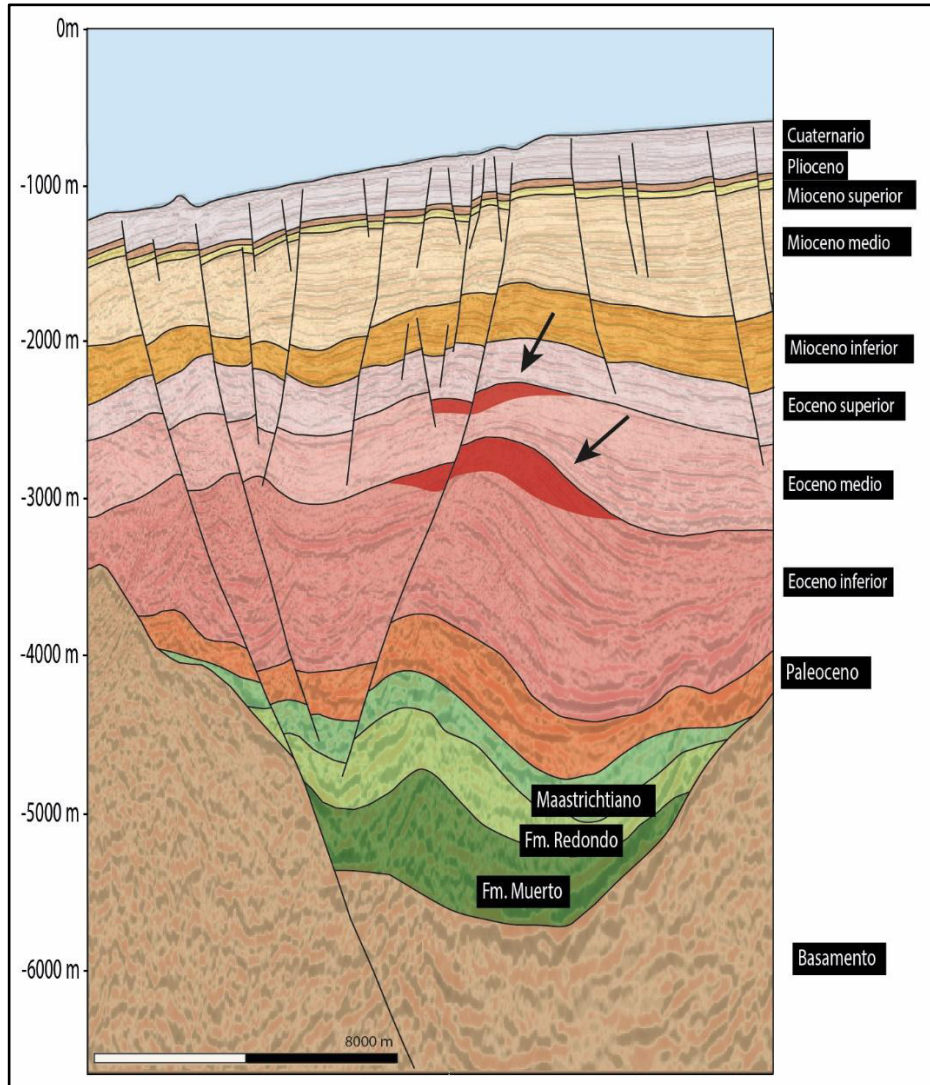


Figura VI-43. Sección sísmica mostrando la trampa estructural en las rocas reservorio reconocida en el lead exploratorio 2.

Fuente: propia.

6.5.3. Lead exploratorio 3

Este lead se encuentra localizado en el flanco oriental a 35 Km del pozo Ballena 1X (figura VI-44), el estilo de trampa para este lead es estructural que corresponde a anticlinales, con orientación NO-SE producto de fallas inversas y discordancias. Teniendo como roca reservorio las secuencias del Mioceno inferior y superior. Como roca madre se tiene las secuencias de la Fm Chicama (Jurásico superior), Gpo. Casma del Cretácico (Albiano) y Mioceno medio.

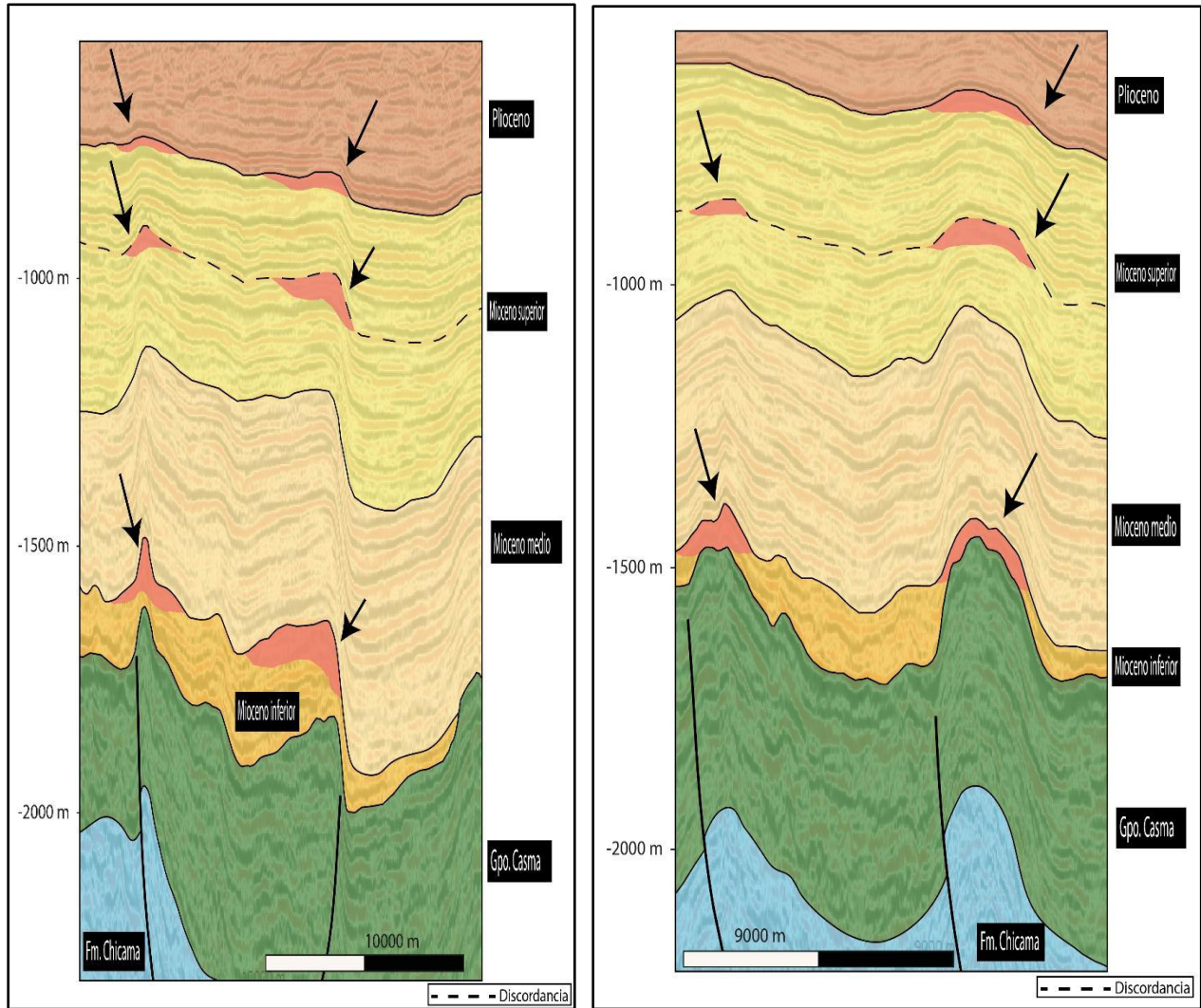


Figura VI-44. Secciones sísmicas mostrando las trampas estructurales en las rocas reservorio reconocida en el lead exploratorio 3. **Fuente:** propia.

6.5.4. Lead exploratorio 4

Este lead se encuentra localizado en el flanco oriental (figura VI-45) con una orientación NO - SE, este lead está definido por una trampa estratigráfica, sobre las secuencias cretácicas deformadas por las rocas intrusivas del Batolito de la Costa. Teniendo como roca reservorio las secuencias del Mioceno superior y las rocas intrusivas como posible reservorio fracturado, como roca sello se tiene la secuencia del Plioceno y como roca madre se tiene las secuencias de la Fm. Chicama (Jurásico superior), Fm. La Zorra (Albiano) y Mioceno medio.

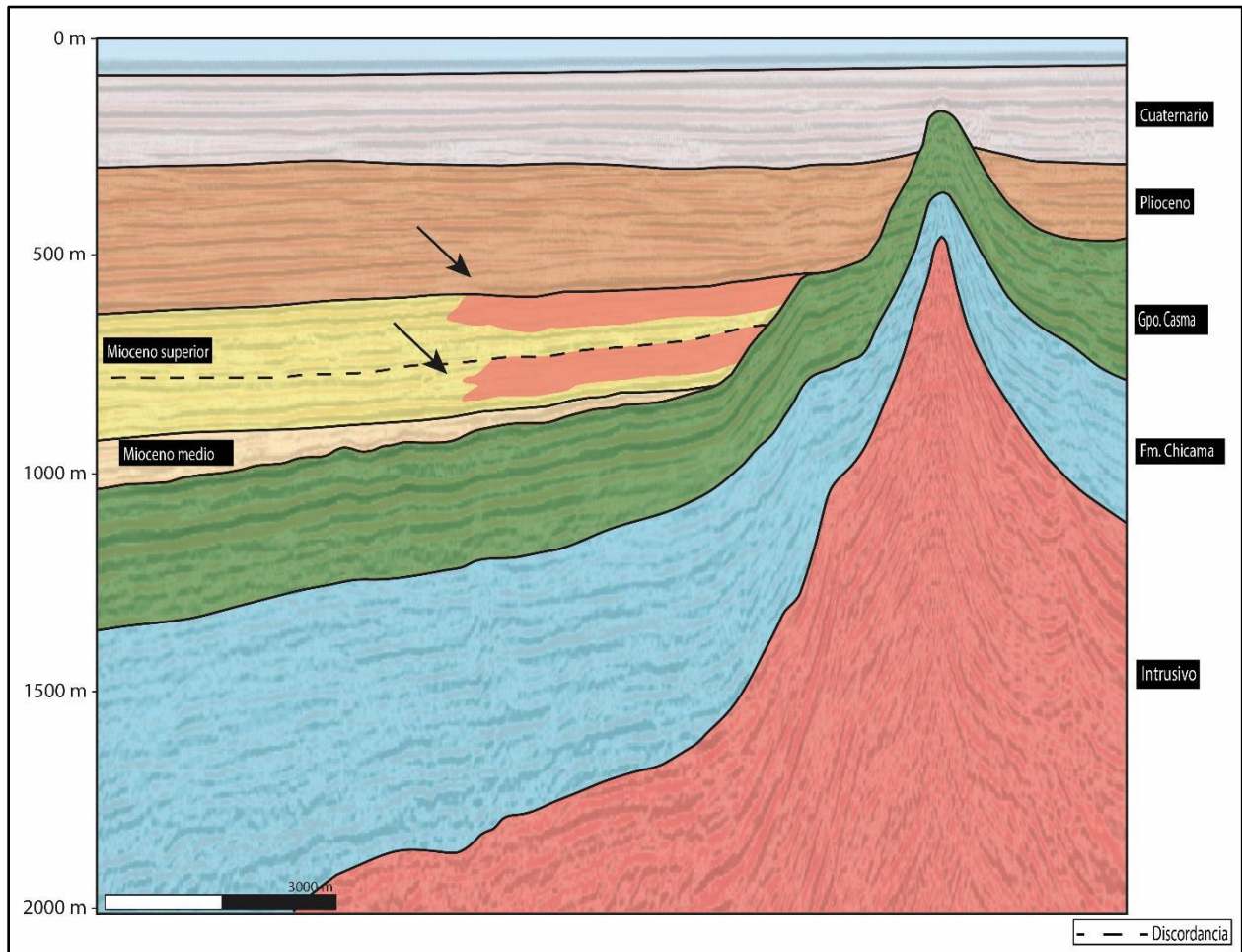


Figura VI-45. Sección sísmica mostrando la trampa estratigráfica en las rocas reservorio reconocida en el lead exploratorio 4.

Fuente: propia.

6.5.5. Lead exploratorio 5

Este lead se encuentra localizado en el flanco oriental (figura VI-46), dentro de una variedad de trampa estructural. Teniendo como roca reservorio las secuencias del Mioceno inferior y superior. Como roca madre se tiene las secuencias de la Fm. Chicama (Jurásico superior), Gpo. Goyllarisquizga (Fm. Santa-Carhuaz) y Mioceno medio.

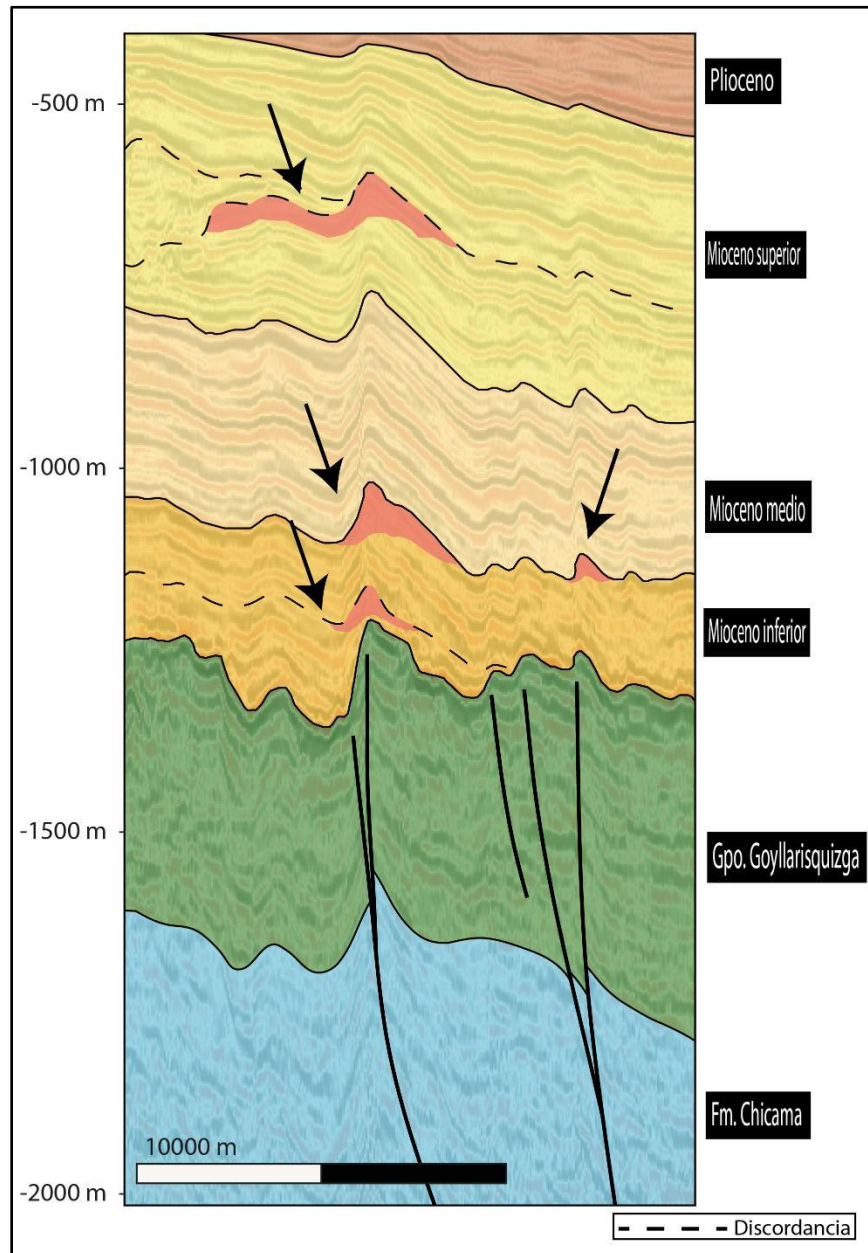


Figura VI-46. Sección sísmica mostrando la trampa estratigráfica en las rocas reservorio reconocida en el lead exploratorio 5.

Fuente: propia.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

La primera conclusión de esta tesis es que se observa que la historia estructural se ha desarrollado en respuesta a la cinemática de las placas Nazca y Sudamericana, ya que los cambios en la velocidad de subducción y del vector de convergencia jugaron un rol importante. A pesar de que las cuencas Trujillo y Salaverry son parte de un marco tectónico común se puede observar características estructurales diferentes, el margen oeste (Cuenca Trujillo) se caracteriza por presentar fallas normales controladas por una falla maestra con orientación NW-SE, estas fallas no son compatibles con la variación del vector de convergencia por lo que se interpreta que estas fallas están asociadas a la gravedad de la pendiente del talud y por el cambio de la cinemática de la falla maestra. En cambio, en el margen este (Cuenca Salaverry) se observa que se formaron pocas estructuras distensivas sin embargo se puede encontrar estructuras compresivas paralelas a la línea de costa de grandes longitudes. Esta conclusión viene a reforzar con los resultados de los estilos estructurales de las cuencas de costa afuera (Trujillo y Salaverry), los cuales están relacionadas a una tectónica transpresiva asociado a la convergencia oblicua, desarrollando la formación de fallas inversas perpendiculares a la dirección del esfuerzo y fallas normales paralelos a la dirección del esfuerzo. Indicando que en zonas de compresión se puede tener zonas puntuales de estructuras extensivas.

La segunda conclusión muestra la relación que hay entre la evolución tectono-sedimentaria y la tectónica regional para esto se realizó un diagrama litoestratigráfico y un modelo esquemático que nos da a conocer la configuración estructural y sedimentaria en el área de estudio, basado en la interpretación de secciones sísmica, análisis de los registros de pozos y datos de campo, el cual nos muestra durante su evolución geológica notables diferencias geométricas y morfológicas a lo largo del margen continental, donde la variación de etapas de hundimiento y levantamiento formaron discordancias que separaron las secuencias cenozoicas (desde el Eoceno medio al Plioceno) formando cañones y teniendo al noroeste mayor espacio para la depositación, representado por la presencia de secuencias cretácicas, las cuales se encuentran ausentes al suroeste.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

La tercera conclusión tiene que ver con el potencial hidrocarburífero de la zona de estudio, se identificaron 5 leads exploratorios (2 en la Cuenca Trujillo y 3 en la Cuenca Salaverry) para incorporar una propuesta coherente con la presencia de grandes anticlinales que forman buenas trampas estructurales, las estructuras volcánicas de gran extensión interpretadas en las secciones sísmicas podrían constituir un gran potencial como roca reservorio (porosidad secundaria), los cuales también podrían funcionar como roca sello y barreras en la migración de hidrocarburos, estas estructuras han tenido un papel importante de norte a sur en la zona de estudio. La ocurrencia de hidrocarburos en los pozos perforados, los oil seeps y el modelamiento geoquímico de los pozos hipotéticos, nos permite tener una perspectiva positiva para nuestra zona de estudio, por lo que nos llevaría a pensar que existe por lo menos un sistema petrolero activo.

CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA

Andamayo K. 2008 Nuevo estilo estructural y probables sistemas petroleros de la cuenca Lancones. Tesis de grado. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Atherton, M.P., Warden, V. and Sanderson, L.M., 1985. The Mesozoic marginal basin of Central Peru: A geochemical study of within-plate-edge volcanism. In: M.P. Pitcher, E.J. Cobbing and R.D. Beckinsale (Editors), *Magmatism at a Plate Edge: The Peruvian Andes*. Blackie Halsted Press, London, pp. 47-58

Azalgara C. 1993. Structural evolution of the offshore forearc basins of Peru, including the Salaverry, Trujillo, Lima, West Pisco and East Pisco basins. Thesis of degree Master. Rice University.

Benavides, V., 1956. Cretaceous System in Northern Peru. *Bulletin American Museum Natural History*, Vol. 108, Art. 4.

Bernal, I y Tavera, H. 2002. Geodinámica, sismicidad y energía sísmica en Perú: Instituto Geofísico del Perú; Centro Nacional de Datos Geofísicos. Lima-Perú.

Bolaños R. 1986. Evaluación Geológica y posibilidades petrolíferas de la cuenca Terciaria Salaverry – Trujillo Petroperu.

Canchaya Z. 1992. Estudio Bioestratigráfico en base a Mannoplancton Calcáreo. Pozo Delfín 20X-1 y Ballena 8X-1. Cuenca Salaverry.

Cobbing et. al., 1981. The Geology of the Western Cordillera of Northern Peru. Institute of Geological Sciences - London. Overseas Memoir 5.

CoreLab. 2012. "Perú Reservoirs and Seals - Offshore Basins" reporte interno Perupetro.

Cossio, A. & Jaen, H., 1967. Geología de los cuadrángulos de Puémape, Chocope, Otuzco, Trujillo, Salaverry y Santa. Servicio Geológico y Minero. Boletín N°17, Serie A, Carta Geológica Nacional.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Daly, M., 1989, Correlations between Nazca/Farallon plate kinematics and forearc evolution in Ecuador: *Tectonics*, v. 8, p. 769–790.

Dewey, J.F., and Pindell, J.L., 1986, Reply to Amos Salvador: *Tectonics*, v. 5,p. 703–705.

Dow, Wallace G. 1977. Petroleum Source Beds on Continental Slopes and Rises: Amer. Asso. of Petrol. Geo. Continuing Education Course Notes Series #5, June 12, 1977 Washington, D.C.

Fossen, H. 2010. Structural Geology. Cambridge University Press. 311-359p.

Gaffney, Cline & Associates, Inc., 2005, Sequence Stratigraphy Analysis of the Peruvian Offshore Continental Shelf-Slope Final Report. 25 Figures, 5 Basin Presentations, 12 Appendices. PeruPetro S.A. Internal report.

Gaviño C. 1987. Evaluación Geologica de la Cuenca Salaverry -Estudio Petrográfico (Áreas Río La Leche y Alto Chicama) Petroperu.

Guevara, C. 1980. El Grupo Casma del Perú central de Trujillo y Mala. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Lima, Volumen 49, 25-52 p.

Hantschel, T., & Kauerauf, A. 2009. Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling. New York: Springer

Herron, E. y Heitzler, J. 1967. Sea-floor spreading near the Galapagos. *Science* 158: 775-780

Jacay et. al., 2004. Litoestratigrafía y sedimentología de las Unidades Jurásicas de los Andes Norperuanos - Cuenca Chicama. *Bol. SGP*, v. 98, pp. 73-83.

Jaillard, E.; Soler, P., 1996. Cretaceous to early Paleogene tectonic evolution of the northern Central Andes (0-18 degrees S) and its relations to geodynamics In: *Geodynamics of the Andes. Tectonophysics*, v. 259, 41-53.

Jaimes F., Navarro J., Russe E., Santos A. y Bellido F. (2011). Geología de los cuadrángulos de Olmos Hoja 12-d. Boletín N°140 Serie A. Carta Geológica Nacional, escala 1:50, 000

Jones, P., 1981. Crustal structures of the Peru continental margin and adjacent Nazca plate, 9°S latitude. In Kulm, L. and others, eds., Nazca plate: Crustal formation and Andean convergence: Geological Society of America, Memoir 154.

Kearey P., Klepeis K. & Vine F. (2009). Global Tectonics, Third Edition, Wiley-Blackwell, pp. 221-222.

Lajo A. 2014. Modelamiento de cuencas y Sistema Petrolero 2d del sector Isla Lobos de Afuera – Chiclayo: Cuencas Sechura y Trujillo, Noroeste offshore de Perú. Tesis de Grado de Master. Universidad Federal de Río de Janeiro.

LCV. 2009 Biostratigraphical study of the Lobos 1X, Morsa 1X, Ballena 1X and Delfín 1X Wells, SK Energy - Sucursal Peruana.

LCV S.R.L 2001. Lote XVII - Cuenca Sechura Estudio Paleontológico, Informe Interno Julio.

Llerena C., Valencia K., Romero D. & Peña D. 2011. Potenciales Reservorios Naturalmente Fracturados en la Cuenca Salaverry, relacionados con el Magmatismo Hauteriviano-Barremiano (Formación Pucusana). Nuevas Dataciones U-Pb Y Ar-Ar. Lima, SGP 2012.

Llerena C. 2014. Evaluación de los potenciales reservorios naturalmente fracturados en la cuenca Salaverry, a partir del análisis estructural de la costa del Perú central. Tesis de grado. Universidad Nacional de San Agustín.

Lowman P., Yates J., Masuoka P. & Montgomery B. 1999. A Digital Tectonic Activity Map of the Earth. Journal of Geoscience Education v. 47, p. 429.

Megard F. 1978. Etude géologique des Andes du Pérou central. Mém. ORSTOM, 86, 310p.

Megard, F., 1984. The Andean Orogenic Period and Its Major Structures in Central and Northern Peru: Journal of the Geological Society, v. 141, 893-900.

Niemeyer, H. 1999. Apuntes de Geología Estructural; Primera parte: Estructuras frágiles.

Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., Mao, A., Dixon, T., Stein, S., Sacks, I., Ocala, L., Ellis, M., 1998. Space geodetic observation of Nazca– South America convergence across the Central Andes. *Science* 279, 358–362.

Ocean Drilling Program (ODP) 1986. Proceeding of the ocean drilling program. Leg 112. Archivo central, Lima.

Okada, H., 1990. Nannofossils biostratigraphy of the Ballena–1X and Delfin–1X wells. In: Azalgara, C. (Msc Thesis), Structural Evolution of the Offshore Forearc Basins of Peru, Including the Salaverry, Trujillo, Lima, West Pisco and East Pisco Basins. Appendix A.

Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Götze, H.-J., Ramos, V.A., Strecker, M.R., and Wigger, P., eds., 2006. The Andes—Active Subduction Orogeny: Berlin, Springer, and *Frontiers in Earth Sciences Series 1*, 570 p.

Pajuelo, D. 2015. "Magmatismo, Petrográfico y Estratigráfico de los depósitos Volcánicos Cenozoicos (Grupo Calipuy), en el segmento Cordillera Negra, Sector Sur Anchas" Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo. UNMSM, Lima- Perú.

Parsep, 2001. The Trujillo Basin-A Study of the Remaining undiscovered Hydrocarbon Potential of the Trujillo Offshore Basin PARSEP (Proyecto de Asistencia para La Reglamentación Del Sector Energético Del Perú TECNICA PERUPETRO S.A. Wine G. (Project Leader), Martínez E., Arcuri A., Monges C., Calderón I., Galdos C. Lima, 2001).

Pardo-Casas, F., and Molnar, P., 1987, Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time: *Tectonics*, v. 6, p. 233–248.

Peter's K., Rose M., 1994: "Applied source rock geometry". En: Magoon & Dow, "the petroleum system-from source to trap" AAPG memoir 60, pp. 93-120.

Pilger, R., 1983. Kinematics of the South America subduction zone from global plate reconstructions. In: Cabre, R., (Ed.), *Geodynamics of the Eastern Pacific Region, Caribbean and Scotia Arcs*, *Geodynamics Series 9*, American Geophysical Union, Washington DC, pp. 113–125.

Ramos, V.A., 1999. Plate tectonic setting of the Andean Cordillera: Episodes, v. 22, no. 3, p. 183–190.

Ramos, V., 2009. Anatomy and global context of the Andes: Main geologic features and the Andean orogenic cycle. The Geological Society of America. Memoir 204.

Ramos, V., 2010. The Tectonic regime along the Andes: Present-day and Mesozoic Regimes. Geological Journal.

Reyes L. & Caldas J. 1987. Geología de los cuadrángulos de Las Playas, La Tina, Las Lomas, Ayabaca, San Antonio, Chulucanas, Morropón, Huancabambam Olmos y Pomahuaca. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 39, 83p.

Repsol Exploracion, 1996. Source Potential-Geochemical modelling. Z-29 Block, Trujillo Basin. Informe de Perupetro.

Repsol Exploracion, 1997. Hydrocarbon Potential Review (Geology). Peru, Z-29 Block Trujillo Basin. Informe de Perupetro.

Repsol Exploracion, 1999. Informe final del sondeo Morsa Norte Z29M-37-1X. Repsol Exploración, Sucursal del Perú.

Repsol Exploracion, 2000. Stratigraphy and sedimentology of wells Morsa Norte Z29M-37-1X and Lobos Z29M-9-1X (Block Z29M, offshore Perú).

Repsol-YPF, 2000. Block Z-29 offshore Peru, Source rock characteristics, maturity modeling and oil to source correlation.

Romero D., Venturo D. & Valencia K. 2010. Evolución Tectono-Sedimentaria de la Margen Continental durante el Jurásico-Cretácico; Costa Afuera del Perú Central. XV CPG.

Romero, D., Valencia, K., Alarcón, P., Peña, D. and Ramos, V.A. 2013. The offshore basement of Perú: Evidence for different igneous and metamorphic domains in the Forearc. Journal of South American Earth Sciences, vol. 42, pp. 47-60.

Schrader H. and Cruzado J. 1990. The Ballena and Delfín wells off central Perú: Revised Ages. Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 112.

Seiscom-Delta Inc. 1975. Seismic Interpretation Report, Joint Venture Seismic Survey for Petróleos del Perú, Peruvian Continental Shelf. Private Report.

SK Energy Sucursal Peruana. 2009. Informe consolidado de actividades correspondiente a la primera fase de exploración del lote Z-46, Cuenca Trujillo, pp 41-45.

SK Innovation Sucursal Peruana. 2012 Lote Z-46, reporte consolidado para el 2do período exploratorio, Cuenca Trujillo, pp 17-20.

Soler, P and Bonhomme, M. 1990. Relation of magmatic activity to plate dynamics in central Peru from late Cretaceous to present; Geological Society of America Special Paper 241.

Soler, P., 1991. El volcanismo Casma del Perú Central: cuenca marginal abortada o simple arco volcanico? Sociedad Geológica de Perú, 7 Congreso Peruano de Geología, Resúmenes Extendidos, Lima, pp. 659-663.

Somoza, R., 1998, Updated Nazca (Farallon)—South America relative motions during the last 40 m.y.: Implications for mountain building in the central Andean region: Journal of South American Earth Sciences, v. 11, p. 211–215.

Somoza, R. & Ghidella, M. 2005. “Convergencia en el margen occidental de América del Sur durante el Cenozoico: subducción de las placas de Nazca, Farallón y Aluk”. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 60 (4): 797-809.

Steinmann, G., 1929. Geologie von Peru. Heidelberg: Carl Winters Universitäts Buchhandlung, 448p.

Tarazona A. 1987. Estudio Palinologico de muestras de Campo Grupo Pucara – Sección Rio la Leche Cuenca Salaverry, Petroperu

Thornburg, T. & Kulm, L., 1981. Sedimentary basins of the Peru continental margin: Structure, stratigraphy, and Cenozoic tectonics from 6° S to 16° S latitude. Nazca plate: Crustal formation and Andean convergence. Geological Society of America, Memoir 154.

ANALISIS ESTRUCTURAL Y SISTEMA PETROLERO DE LAS CUENCAS DE ANTEARCO, TRUJILLO SUR Y SALAVERRY NORTE, CENTRO DE PERÚ

Timoteo, D. 2013. Potencial Generador de Hidrocarburos y Distribución de las Secuencias Cretácicas costa afuera (offshore) del Perú centro-norte (Lima – Chiclayo). Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo. UNI, Lima- Perú.

Timoteo D. 2015. Sismoestratigrafía de los depósitos cenozoicos de la cuenca Salaverry, parte offshore del Perú: Nuevas interpretaciones del sistema petrolero. Tesis de Grado de Master. Universidad de Brasilia.

Thompson, Thomas L. 1976. Plate Tectonics in Oil and Gas Exploration of Continental Margins: Bull AAPG. Vol. 60, N° 9p. 1463-1501.

Valdespino, T., Seminario, F. 1976. Informe Micropaleontológico del pozo Ballena 8X-1 Reporte interno Petroperu.

Valencia K. & Romero D. 2011. Evolución Tectono-Sedimentaria de la cuenca Salaverry y su implicancia en la generación de hidrocarburos.VII INGEPET 201, pp 6-11.

Van Der Pluijm, B. & Marshak, S. 2002 Earth Structure: An introduction to structural geology and tectonics. University of Michigan.

Web 2016. <http://mcee.ou.edu/aaspi/>

Wipf M., 2006. Evolution of the Western Cordillera and Coastal Margin of Peru: Evidence from low temperature Thermochronology and Geomorphology. Tesis Doctor. Swiss fed. Inst. of Tech. Zurich.

Witt, C., 2011, Sistemas Compresivos y Evolución de Fajas Plegadas, VII INGEPET, Lima-Perú.

Woodcock, N. & Schubert, C. 1994. Continental strike-slip tectonics. In: HANCOCK, P. L. (ed) Continental Tectonics, Pergamon Press, Oxford, pp. 251-263.