

**EVOLUCIÓN TECTÓNICA EN EL MARGEN OCCIDENTAL DE LA CUENCA
MARAÑÓN Y ESTUDIO DE VALORES DE ACORTAMIENTO A LO LARGO DEL
RUMBO: IMPLICACIONES EN LA EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS**

YUDY PAOLA ESTÉVEZ PLATA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
MAESTRÍA EN GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2016

**EVOLUCIÓN TECTÓNICA EN EL MARGEN OCCIDENTAL DE LA CUENCA
MARAÑÓN Y ESTUDIO DE VALORES DE ACORTAMIENTO A LO LARGO DEL
RUMBO: IMPLICACIONES EN LA EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS**

YUDY PAOLA ESTÉVEZ PLATA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Magíster
en Geología**

Director

ELISEO TESÓN DEL HOYO

Doctor en Geología

Co-Director

MSc. ALEJANDRO SILVA ARIAS

Magíster en Ciencias

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-QUÍMICAS

ESCUELA DE GEOLOGÍA

MAESTRÍA EN GEOLOGÍA

BUCARAMANGA

2016

Violeta

AGRADECIMIENTOS

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación, conté con el apoyo incondicional de mi Director Eliseo Tesón del Hoyo, persona a la que agradezco inmensamente todas sus enseñanzas, consejos, paciencia y conocimiento, además de otras cualidades y competencias que lo caracterizan; haciendo posible llegar a soluciones alternativas, que introducen nuevas opciones en el entendimiento de la tectónica regional en la zona Subandina Peruana.

De igual forma, infinitas gracias a los calificadores de este trabajo, en especial a Dario Barrero, por sus grandes aportes y sus sabios consejos. Asimismo, a mis compañeros de la segunda Cohorte del programa Maestría en Geología, que estuvieron pendientes de la evolución del trabajo y que de alguna u otra forma aportaron no solo con sus sugerencias sino con sus frases de motivación.

Finalmente, agradezco a mi familia y a mi hija Violeta, por el gran sentido de colaboración y esfuerzo durante las noches y días en los que estuve ausente. También, es gratificante contar con personas que se apropian de situaciones en momentos en donde las cosas no resultan como se espera, o cuando se tienen obstáculos: Gracias Davis por las frases de aliento, las ideas y sobre todo por el amor.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	24
1.1 TEMA DE INVESTIGACIÓN	25
1.1.1 Pregunta de investigación.....	25
1.1.2 Planteamiento del problema	25
1.2 OBJETIVOS.....	30
1.2.1 Objetivo general.....	30
1.2.2 Objetivos específicos	30
2. CONTEXTO GEOLÓGICO	31
2.1 ANTECEDENTES.....	31
2.1.1 Modelo Mobil 1980.....	31
2.1.2 Modelo Antenor, M. 1993.....	32
2.1.3 Modelo Gil Rodríguez, 2001	35
2.1.4 Modelo Hermoza W, 2005	38
2.1.5 Modelo Eude et al., 2015.....	41
2.2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	46
2.2.1 Tectónica zona subandina peruana	47
2.2.2 Estratigrafía.....	53
3. METODOLOGÍA	62
3.1 FASE I	65
3.2 FASE II.....	68
3.2.1 Ajuste sísmica – pozo	68
3.2.2 Interpretación sísmica.....	77
3.2.3 Construcción de secciones en tiempo	81

3.2.4 Conversión a profundidad.....	84
3.3 FASE III.....	87
3.3.1 Balanceo de secciones.....	88
3.3.2 Restauración cinemática.....	90
3.3.3 Modelamiento 3D.....	92
4. RESULTADOS.....	93
4.1 ESTILO ESTRUCTURAL MARGEN OCCIDENTAL CUENCA MARAÑÓN.....	93
4.1.1 Secciones sísmicas Cuenca Marañón.....	93
4.2 ESTILO ESTRUCTURAL CUENCA HUALLAGA.....	103
4.2.1 Secciones sísmicas Cuenca Huallaga.....	103
4.3 SECCIONES ESTRUCTURALES CUENCA HUALLAGA - MARAÑÓN.....	107
4.3.1 Seccion-1.....	108
4.3.2 Seccion-2.....	111
4.3.3 Seccion-3.....	115
4.3.4 Seccion-4.....	119
4.4 RETRODEFORMACIÓN DE SECCIONES ESTRUCTURALES PARA LA CUENCA HUALLAGA – MARAÑÓN.....	123
4.5 VALORES DE ACORTAMIENTO.....	128
4.5.1 Seccion-1.....	130
4.5.2 Seccion-2.....	131
4.5.3 Seccion-3.....	132
4.5.4 Seccion-4.....	133
4.6 CRONOLOGÍA DE LA DEFORMACIÓN.....	135
4.7 MODELAMIENTO 3D.....	140
5. DISCUSIÓN.....	143
5.1 COMPARACIÓN DE MODELOS Y ESTILO ESTRUCTURAL.....	143
5.1.1 Emplazamiento de mantos cabalgantes con rotación de eje vertical en sentido anti horario.....	146
5.1.2 Presencia de zonas de transferencia.....	148
5.1.3 Propuesta modelo de moderado aloctonismo para la Cuenca Huallaga	149

5.2 INFLUENCIA DE NIVELES SALINOS EN LA TECTÓNICA DE LA CUENCA HUALLAGA Y MARGEN OCCIDENTAL DE MARAÑÓN	156
5.3 IMPLICACIÓN EN LA EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS.....	159
6. CONCLUSIONES	164
7. RECOMENDACIONES.....	166
BIBLIOGRAFÍA.....	167
ANEXOS.....	172

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa estructural de las Cuencas Santiago y Huallaga.....	26
Figura 2. Sección estructural para la Cuenca Santiago.	27
Figura 3. Sección sísmica estructural para la Cuenca Huallaga.	28
Figura 4. Secciones estructurales equiparables a lo largo del rumbo. Superior, corresponde a la interpretación estructural para la Cuenca Santiago, latitud (4°S). Inferior, sección para la Cuenca Huallaga, latitud (6°S).....	29
Figura 5. Sección estructural realizada por Mobil (1980) para la Cuenca Huallaga. En rojo, los niveles salinos asociados a las evaporitas del Grupo Pucará. Se evidencia la presencia de rocas de edad Paleozoico debajo de estos niveles salinos y rocas de edad Cretácico suprayaciendo.	32
Figura 6. Sección estructural construida por Antenor, M. (1993) para la Cuenca Santiago.....	34
Figura 7 Superior, sección estructural realizada por Gil Rodríguez (2001), en la Cuenca Santiago. Inferior, sección estructural restaurada para la Cuenca Santiago.....	36
Figura 8. Superior, sección estructural realizada por Gil Rodríguez (2001), en la Cuenca Huallaga. Inferior, sección estructural restaurada para la Cuenca Huallaga.....	37
Figura 9. Perfil sísmico 91-MPH-23 interpretado por Hermoza (2005), a través del sinclinal de Biabo y el Arco de Cushabatay (para localización, ver Figura 2.4). Esta sección sísmica ilustra el estilo estructural y la geometría de las series sin orogénicas de la Cuenca Huallaga.	39
Figura 10. Superior izquierda, localización de la sección estructural construida, marcada con la línea negra en el mapa. Superior derecha, sección estructural	

realizada por Hermoza (2005), en la Cuenca Huallaga. Inferior, corte equilibrado y restauración al estado no deformado para la Cuenca Huallaga.	40
Figura 11. Superior, línea sísmica 91-MPH-23 sin interpretación. Inferior, interpretación sísmica estructural del perfil sísmico 91-MPH-23 en la Cuenca Huallaga, se muestran los datos de buzamiento obtenidos de trabajo de campo.	42
Figura 12. Interpretación sísmica estructural de las líneas que componen la sección estructural balanceada: ARC3, BP19, and DX47.	43
Figura 13. Superior, localización de la sección estructural regional de 500 km de longitud, marcada con línea negra en el mapa, las líneas rojas indican la ubicación de las líneas sísmicas interpretadas en la construcción de la sección estructural. Se toma como referencia para la restitución de la sección regional; la base del Cretácico (Formación Cushabatay, circa 100 Ma). Inferior, localización de los terremotos en círculos amarillos con una incertidumbre en profundidad de ± 5 km y a distancia de ± 10 km	45
Figura 14. Derecha, localización de la Cuenca Huallaga en la zona Subandina del Perú (tomado de IHS). Superior izquierda, límites morfo-estructurales para la Cuenca Huallaga (tomado de Hermoza, 205). Inferior izquierda, Perfil topográfico entre la Cordillera Oriental y la Cuenca Marañón construida a partir de datos de modelos numéricos de campo (DEM, www2.jpl.nasa.gov/srtm/).	46
Figura 15. Localización de los sectores que dividen la cordillera de los Andes: Septentrionales, Centrales y Meridionales según Ganser (1973) y Jordan et al. (1983). También se muestra la división de los andes centrales en negro: Norte, Central y Sur, así como enmarcado en rojo 1, Deflexión de Huancabamba (límite inferior con los Andes septentrionales). 2, Deflexión de Abancay (límite entre los andes centrales del Norte y del centro). 3, límite entre los Andes centrales segmento central y Sur.	49
Figura 16. Columna esquemática resumiendo la evolución lito-estratigráfica de las Cuencas Huallaga y Marañón del Noreste del Perú.	56
Figura 17. Datos disponibles durante el desarrollo del trabajo de investigación, se atribuyen a información geológica y bibliográfica respectivamente.	63

Figura 18. Metodología estructurada de trabajo distribuida en fases principales (color naranja). Sub-fases y tópicos de desarrollo (color azul). Procesos sucesivos correspondientes a las tareas realizadas (color amarillo). Condicionantes que dependen de los resultados obtenidos durante los procesos (color gris). Productos principales generados (color lila).	64
Figura 19. Perfil línea-23 ubicada en la Cuenca Huallaga, observada en el software <i>Seissee</i>	66
Figura 20. Derecha, planchas geológicas 1:100000 del Ingemmet (1999), empleados como información de superficie. Izquierda. Carta geológica nacional de Perú (cuadrángulos publicados por el boletín del Ingemmet, 1999), en amarillo se demarca el área cartográfica utilizada.	67
Figura 21. Control de calidad realizado a la información sísmica y de pozo disponible para la etapa de ajuste sísmica – pozo.....	69
Figura 22. Ejemplo de <i>shift</i> entre dos líneas sísmicas localizadas en el sector Marañón Sur: línea-I-5 y línea-19. Superior, líneas sísmicas antes del ajuste. Inferior, líneas sísmicas ajustadas, teniendo en cuenta como referencia los reflectores característicos del tope de Yahuarango y la base del Cretácico.	70
Figura 23. Relación tiempo – profundidad para el pozo Pozo-1X.	71
Figura 24. Localización de los 13 pozos disponibles, distribuidos de la siguiente manera: 10 en el sector Sur de la Cuenca Marañón, 2 en el Sur - occidente de la Cuenca Marañón y 1 en la Cuenca Huallaga. Para cada uno de los pozos se cuenta con su respectiva línea de amarre como se observa en la figura.	72
Figura 25. Ajuste sísmica – pozo para los pozos localizados en el sector Sur – Occidental de la Cuenca Marañón. Pozo-1X, evidenciando un ajuste consistente con las reflexiones características de las formaciones Yahuarango, Chonta y Pucará, en la línea-15SW.	73
Figura 26. Ajuste sísmica – pozo para los pozos localizados en el sector Sur – Occidental de la Cuenca Marañón. Pozo Pozo-2X, evidenciando un ajuste consistente con las reflexiones características de las formaciones Yahuarango, Chonta y Pucará, en la línea-31.....	74

Figura 27. Sismograma sintético construido para el pozo Pozo-3Y, desplegando la imagen sísmica y las <i>wiggles traces</i> en series positivas de reflectividad. En los recuadros amarillo punteado se observan los niveles en donde el sismograma tiene un buen ajuste.....	76
Figura 28. Sismograma sintético construido a partir del registro sónico y densidad del pozo Pozo-1Y, localizado en la zona Sur de la Cuenca Marañón. Las flechas rojas indican buen ajuste entre los las reflexiones de la línea sísmica Línea-31 y el sismograma generado.	77
Figura 29. Horizontes interpretados para cada una de las Cuencas Huallaga y Marañón.....	78
Figura 30. Distribución de la interpretación y seguimiento de horizontes en el margen Occidental de la Cuenca Marañón. Superior izquierda, horizonte tope Formación Pucará. Superior derecha, horizonte tope Formación Sarayaquillo. Inferior, horizonte Formación Mitú.	80
Figura 31. Localización de las 4 secciones estructurales en línea negra continua e información sísmica disponible (líneas punteadas) para las Cuencas Huallaga (línea continua naranja) y Marañón (línea continua fucsia).	81
Figura 32. Información sísmica y de pozo empleada en la construcción de las 4 secciones estructurales.	82
Figura 33. Izquierda, DEM (Digital Elevation Model), en línea negra continúa los trazos de las 4 secciones estructurales. Derecha. Perfil topográfico para la seccion-1.	84
Figura 34. Izquierda, valores de velocidad intervalo para el pozo Pozo-2X hasta la Formación Pucará. Derecha, tendencia del comportamiento de la velocidad intervalo y ecuación hallada a partir de regresión lineal.	85
Figura 35. Izquierda, valores de velocidad intervalo determinados para todos los horizontes interpretados. Se resalta en color amarillo datos hallados a partir de la ecuación mostrada. Derecha, tendencia incremental de la velocidad intervalo (ms) versus el tiempo (OWT- ms).	85

Figura 36. Generación de polígonos para cada una de las unidades geológicas interpretadas en la sección estructural-1 en tiempo. Se observan con equis de colores los contactos geológicos proyectados del mapa geológico y el perfil topográfico en tiempo.	86
Figura 37. Base de datos para la seccion-1 creada en el software 2D move.	87
Figura 38. Superior, algoritmo de Fault Parallel Flow, en estado previo. Inferior, Fault Parallel Flow después de aplicado el método de join beds, teniendo en cuenta el control geológico sobre el tope de la Formación Yahuarango utilizado como guía.	89
Figura 39. Flujograma adaptado según los algoritmos disponibles en el software 2D move, empleados durante la etapa de restauración cinemática.....	90
Figura 40. Ejemplo proceso de restauración cinemática en la seccion-1. Superior, estado inicial mostrando la línea de referencia al extremo que no debe moverse y la localización del pin a través del eje axial del sinclinal. Inferior, proceso de <i>Fault Parallel Flow</i> , para el <i>Hangingwall</i> de la estructura anticlinal y <i>Flexural Slip Unfolding</i> para la estructura sinclinal.	91
Figura 41. Sección sísmica compuesta entre las líneas Línea-14 y Línea-11. Se observa la disminución de espesor de la Formación Sarayaquillo y el Grupo Pucará hacia el este.	94
Figura 42. Pinchamiento del Grupo Pucará contra rocas de edad Paleozoico. Disminución de espesor hacia el Este en la línea-12.....	95
Figura 43. Superior, línea sísmica Línea-08, se observa falla de inversión listrica afectando rocas del Terciario. Inferior, línea sísmica Línea-15, afectando rocas de edad Paleozoico, sin embargo, se observa deformación menos intensa de rocas de edad Cretácico. Se ejemplifica, paquetes de reflectores tabulares típicos de rocas del Cretácico en la Cuenca Marañón.	96
Figura 44. Evolución de tectónica extensional a tectónica compresiva. Se observa falla de inversión, afectando unidades de edad Cretácico y Terciario.	97
Figura 45. Geometría característica de evento tectónico de inversión positiva. Se observan terminaciones estratigráficas tipo toplap (flechas en amarillo) que limitan	

la etapa syn-rift del post-rift. Así como truncaciones (flechas en rojo) asociadas a periodos de erosión. También, la falla de inversión (color rojo), con acumulación de sedimentos en la etapa extensiva que muestran variación de espesor.98

Figura 46. Evidencia de estructuración producto del proceso de inversión tectónica positiva. En el pliegue generado se observan diferencias de espesor entre la cresta (menor, en color verde) y espesor en los flancos (mayor, en color lila).99

Figura 47. Superior, estructura anticlinal generada durante el proceso de inversión tectónica positiva, evidenciando menor grado de afectación (plegamiento). Además reactivación de fallas normales profundas y disminución de las series *syn-rift* hacia el Este. Inferior, efecto del proceso de inversión tectónica positiva con mayor prominencia al Norte, se observa la estructura fallada y más apretada, adelgazamiento de unidades contra el basamento..... 101

Figura 48. Superior - Inferior, estructura anticlinal generada durante el proceso de inversión tectónica positiva, evidenciando menor grado de afectación (plegamiento) hacia el Sur. En el pliegue generado se observan diferencias de espesor entre la cresta (menor, en color verde) y espesor en los flancos (mayor, en color lila)..... 102

Figura 49. Superior, sección sísmica en tiempo de la línea-23. Inferior, interpretación sísmica en tiempo realizada para la línea-23. Se observa el despegue regional que genera el cabalgamiento de Chazuta, reactivado a través de un nivel discordante, asociado a las evaporitas del Grupo Pucará..... 104

Figura 50. Interpretación en profundidad realizada para la línea-23. Se observa el despegue regional que genera el cabalgamiento de Chazuta, reactivado a través de un nivel discordante, asociado a las evaporitas del Grupo Pucará. También, la falla de inversión Permo-Triásica y las estructuras Neógenas de sinclinal y anticlinal de Biabo..... 106

Figura 51. Seccion-1 en profundidad ajustada con el mapa geológico y el DEM (*Digital Elevation Model*). 108

Figura 52. Seccion-1 en profundidad. Estado presente 0 ma. 109

Figura 53. Sección sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Marañón. Se observa la disminución de espesor hacia el Este y el pinchamiento de la Formación Sarayaquillo y el Grupo Pucará.	110
Figura 54. Línea-31, sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Marañón al Este de la sección-1. Se observa la estructura Loreto, amplia y simétrica. También, disminución de espesor hacia el Este de las unidades de edad pre-Cretácico y Paleozoico.	111
Figura 55. Sección-2 en profundidad ajustada con el mapa geológico y el DEM (<i>Depth Elevation Model</i>).	112
Figura 56. Línea-24, sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Huallaga al Oeste de la sección-2. Se observa el despegue regional que genera el cabalgamiento de Chazuta, reactivado a través de un nivel discordante, asociado a las evaporitas del Grupo Pucará que igualmente son aprovechadas en el desarrollo de estructuración <i>back-thrust</i> . También, la falla de inversión de edad Permo-Triásico.	113
Figura 57. Sección-2 en profundidad. Estado presente 0 ma.	114
Figura 58. Línea-23A, sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Marañón al Este de la sección-2. Se muestra disminución de espesor hacia el Este de las unidades de edad pre-Cretácico y Paleozoico.	115
Figura 59. Sección-3 en profundidad ajustada con el mapa geológico y el DEM (<i>Depth Elevation Model</i>).	116
Figura 60. Línea-27 y 004, sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Huallaga al Oeste de la sección-3. Se evidencia el despegue regional que genera el cabalgamiento de Chazuta, reactivado a través de un nivel discordante, asociado a las evaporitas del Grupo Pucará, así como la falla de inversión Permo-Triásica. Las estructuras de Biabo se localizan cercanas a la superficie.	117
Figura 61. Línea-13, sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Marañón al Este de la sección-3. Se observa disminución de espesor hacia el Este de las unidades de edad pre-Cretácico y Paleozoico.	118
Figura 62. Sección-3 en profundidad. Estado presente 0 ma.	119

Figura 63. Seccion-4 en profundidad ajustada con el mapa geológico y el DEM (Depth Elevation Model).	120
Figura 64. Línea-002, sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Huallaga, como único dato sísmico interpretado en la sección-4.	121
Figura 65. Seccion-4 en profundidad. Estado presente 0 ma.	122
Figura 66. Localización 4 secciones estructurales construidas. Estado presente 0 ma.	122
Figura 67. Restauración secuencial seccion-1.	124
Figura 68. Restauración secuencial seccion-2.	125
Figura 69. Restauración secuencial seccion-3.	126
Figura 70. Restauración secuencial seccion-4.	127
Figura 71. Acortamiento calculado para la seccion-1 de 40 km equivalentes al 15%. Longitud inicial 254 km y longitud final 214 km. Acortamiento para el Paleozoico= 20 km.	130
Figura 72. Acortamiento calculado para la seccion-2 de 30 km equivalentes al 14%. Longitud inicial 205 km y longitud final 175 km. Acortamiento para el Paleozoico= 12 km.	131
Figura 73. Acortamiento calculado para la seccion-3 de 15 km equivalentes al 8%. Longitud inicial 190 km y longitud final 175 km. Acortamiento para el Paleozoico= 7km.	132
Figura 74. Acortamiento calculado para la seccion-4 de 19 km equivalentes al 16%. Longitud inicial 119 km y longitud final 100 km. Acortamiento para el Paleozoico= 19 km.	133
Figura 75. Acortamientos calculados y diferenciados por afectación de rocas de edad Paleozoico, pre-Cretácico y Cretácico-Cenozoico.	134
Figura 76. Restitución cinemática para la seccion-1, ajustada con los datos de AFT de Eude et al. 2015.	136
Figura 77. AFT <i>central age</i> (Ma), AHe <i>age</i> (Ma) e histogramas de distribución para las diferentes muestras analizadas por Eude et al, 2015. Los recuadros amarillos indican la edad de depositación. Los recuadros rojos indican la cantidad de	

enterramiento Cenozoico calculado a partir de datos de Ro. Los recuadros azules y naranjas indican la localización de AFT y AHe.	137
Figura 78. Gráfico de tasa de acortamiento medio acumulado para la seccion-1.....	139
Figura 79. Visualización de las secciones empleadas en el modelamiento 3D, se incluyen las 4 secciones principales y 6 secciones de control, generadas a partir de la interpretación de geometría de las 4 secciones base y ajustadas con superficie.	141
Figura 80. Modelamiento 3D, empleando las 4 secciones principales y las 6 secciones adicionales generadas con base en datos de superficie. Se observan las estructuras del anticlinal y sinclinal de Biabo y el cabalgamiento de Chazuta.	142
Figura 81. Secciones estructurales equiparables a lo largo del rumbo. Superior, corresponde a la interpretación estructural para la Cuenca Santiago, latitud (4°S). Inferior, sección para la Cuenca Huallaga, latitud (6°S). (Modificado de Gil Rodríguez, 2001). Nótese la diferencia sustancial en los valores de acortamiento calculados para cada una de las cuencas, del orden de 15km y 70km respectivamente.....	145
Figura 82. Variaciones en los valores de acortamiento soportadas por un modelo estructural complejo para la Cuenca Huallaga (Gil Rodríguez, 2001. Hermoza, 2005 y Eude et al, 2015), a partir del emplazamiento de escamas cabalgantes con rotación de eje vertical en sentido anti horario planteado por (Soto et al., 2006).	147
Figura 83. Variaciones en los valores de acortamiento soportadas por la existencia de una posible zona transferencia. Los valores de acortamiento calculado para cada uno de los 5 cortes estructurales deben ser similares, si se evidencian diferencias en dichos valores, estará asociado a falta de información o deficiencia en la limitación de la zona de transferencia.	148
Figura 84. Comparación modelo Mobil (1980) (Superior en escala de grises) y modelo propuesto (imagen en color). Se evidencia la influencia de los niveles	

salinos del Grupo Pucará, dentro del despegue regional y la superposición Mesozoico versus Paleozoico.....	151
Figura 85. Comparación modelo Gil Rodríguez (2001) (Indicadas con flechas en azul) y modelo propuesto (indicada con flechas en verde). Se muestra la diferencia en los valores de acortamiento para el modelo actual y el modelo propuesto, en la Cuenca Huallaga. Asimismo, la coherencia de los valores de acortamiento con la sección de la Cuenca Santiago al Norte tomada de .Gil Rodríguez (2001).	152
Figura 86. Estilo estructural del margen Occidental del a Cuenca Marañón, asociado a la inversión tectónica positiva de fallamiento Permo-Triásico.....	153
Figura 87. Semejanza entre el estilo estructural de la Cuenca Huallaga y el margen Occidental Sur de la Cuenca Marañón. Nótese como se evidencia estructuración con menor reactivación en el <i>foredeep</i> (Marañón) y mayor influencia de la deformación en el <i>wedge top</i> (Huallaga), conservando un estilo estructural coherente de moderado aloctonismo.....	154
Figura 88. Relación modelo actual (Gil Rodríguez, 2001) y modelo propuesto. Nótese la diferencia en el estilo estructural. Superior, superposición de unidades de edad Mesozoico y cabalgamiento de gran salto. Inferior, superposición de unidades de edad Mesozoico y Paleozoico, a partir de una discordancia reactivada como falla, condicionada por los niveles salinos del Grupo Pucará.....	155
Figura 89. Sección sísmica de la línea-12 localizada en el margen Occidental de la Cuenca Marañón. Se muestra la geometría típica de un cuerpo salino en forma de <i>turtle anticline</i> , condicionada por tectónica de extensión regional.	157
Figura 90. Sección sísmica de la línea-23 localizada en la Cuenca Huallaga. Se muestra la geometría típica de un cuerpo salino en evolución, como diapirismo en la etapa temprana según estructura de <i>pillowlike</i> , conservando la forma de <i>turtle anticline</i> y condicionada por tectónica de extensión regional.	158
Figura 91. Sección sísmica de la línea-27 localizada en la Cuenca Huallaga. Se muestra la geometría típica en forma de <i>turtle anticline</i> y condicionada por tectónica de extensión regional.....	158

Figura 92. Sección sísmica de la línea-002 localizada en la Cuenca Huallaga. Se muestra la geometría típica de un cuerpo salino en evolución, como diapirismo en la etapa temprana según estructura de *pillowlike*, conservando la forma de *turtle anticline* y condicionada por tectónica de extensión regional. 159

Figura 93. Localización de la Cuenca Marañón, dentro del sistema de cuencas antepaís, mostrando generalidades del sistema petrolífero..... 161

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Sección-1 estado deformado y no deformado	172
ANEXO B. Sección-2 estado deformado y no deformado.	174
ANEXO C. Sección-3 estado deformado y no deformado.	176
ANEXO D. Sección-4 estado deformado y no deformado.	178

RESUMEN

TÍTULO: EVOLUCIÓN TECTÓNICA EN EL MARGEN OCCIDENTAL DE LA CUENCA MARAÑÓN Y ESTUDIO DE VALORES DE ACORTAMIENTO A LO LARGO DEL RUMBO: IMPLICACIONES EN LA EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS*

AUTORA: YUDY PAOLA ESTÉVEZ PLATA**

PALABRAS CLAVE: Cuenca Huallaga, acortamiento, evolución tectónica, zona Subandina Peruana, estilo estructural.

DESCRIPCIÓN

El margen Occidental de la Cuenca Marañón presenta un estilo estructural complejo. La cuenca se encuentra bordeada por un cinturón de cabalgamientos marginal, que parece evolucionar lateralmente, a partir de valores de acortamiento grandes a más pequeños; de Sur a Norte a lo largo de la zona Subandina Peruana.

Se ha planteado que la Cuenca Huallaga representa el *wedge top* (sensu DeCelles and Giles, 1996) de un sistema cabalgante de alta aloctonía, despegado en los niveles evaporíticos Triásico-Jurásicos; asociados a la Formación Pucará, con una interpretación que propone valores de acortamiento de más de 70 km (Gil Rodríguez, 2001. Hermoza, 2005. Eude et al., 2015).

Hacia el Norte, en la Cuenca Santiago, influenciada de igual forma por estos niveles salinos, los valores de acortamiento son menores, del orden de 15 km (Antenor, 1993. Gil Rodríguez, 20001. Hermoza, 2005). Estas discrepancias en los valores de acortamiento, sugieren la existencia de una gran diferencia en el estilo estructural del margen Occidental de la Cuenca Marañón, entre la latitud de Santiago (4°S) y Huallaga (6°S), lo cual obliga a realizar interpretaciones con grandes rotaciones de eje vertical en el emplazamiento de los mantos cabalgantes, o presencia de zonas de transferencia, que permitan explicar las diferencias de acortamiento.

En este trabajo retomamos los modelos de moderada aloctonía de los años 80's (p.e. Mobil, 1980), y planteamos una interpretación en el que las estructuras cabalgantes, corresponden a inversión de antiguas fallas extensivas de edad Mesozoico. Este modelo es más coherente con el estilo estructural observado en todo el margen Occidental de la Cuenca Marañón, arrojando valores de acortamiento que varían entre los 15 y 40 km, consistentes con la tectónica evidenciada al Norte en la Cuenca Santiago.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias Físico-Químicas. Escuela de geología. Maestría en Geología. Director: Eliseo Tesón Del Hoyo, Doctor en Geología. Co-Director: MSc. Alejandro Silva Arias, Magíster en Ciencias

ABSTRACT

TITLE: TECTONIC EVOLUTION ON THE WEST BANK MARAÑÓN BASIN AND STUDY OF VALUES shortening ALONG THE WAY: IMPLICATIONS FOR OIL EXPLORATION*

AUTHOR: YUDY PAOLA ESTÉVEZ PLATA **

KEYWORDS: Huallaga Basin, shortening, tectonic evolution, Peruvian Sub-Andean zone, structural style.

DESCRIPTION

The western margin of the Marañón basin has a complex structural style. The Marginal thrust belt composes the boundary of the basin, which seems to evolve laterally, varying from bigger to smaller shortening values along the sub-Andean Peruvian area from south to north.

The Huallaga basin has been suggested to be linked to the wedge top (sensu DeCelles and Giles, 1996) of the high allochthonous thrust belt System, decollement through the evaporites levels (Triassic-Jurassic) related with the Pucará Formation, linked with a shortening over 70 kilometers according to the current interpretation model (Gil Rodriguez, 2001. Hermoza, 2005. Eude et al., 2015).

To the north of the study area, in the Santiago basin influenced equally by these salt levels, reported shortening seems to be smaller than the Huallaga basin, with values of about 15 kilometers (Antenor, 1993. Gil Rodriguez, 20001. Hermoza, 2005). These inequalities in the shortening values, suggest a big difference in the structural style of the western margin of the Marañón basin existence, between the latitude of Santiago (4°S) and Huallaga (6°S), which can be explained with complex interpretations as big thrusts belts vertical rotation axis or transfer zones presence.

In this paper we retake the 80's models of moderate allochthony (Mobil, 1980), and propose an alternative interpretation to the current models considering high allochthony. According to our model, most part of the structures are generated by inversion of old Mesozoic normal faults. This model is more consistent with the structural style along all western margin of the Marañón basin, with shortening values between 15 and 40 kilometers and coherent with the tectonic style evidenced to the north, in the Santiago basin.

* Work degree

** Faculty of Physical Chemistry. School of Geology. Master of Geology. Director: Eliseo Tesón Del Hoyo, Doctor in Geology. Co-Director: MSc. Alejandro Arias Silva, Master of Science

INTRODUCCIÓN

La Cuenca Huallaga se encuentra localizada en la zona Subandina septentrional del Perú entre 5°30"S y 9°S. Corresponde a la cuenca más amplia del sector nor-Amazonico Subandino, desarrollada como la prolongación meridional de la Cuenca Santiago¹. Esta característica, genera un posible vínculo geológico que debe proporcionar interpretaciones coherentes a lo largo de las dos cuencas.

Sin embargo, variaciones en el modelo estructural de la Cuenca Huallaga; se han puesto en manifiesto a partir de múltiples interpretaciones realizadas en los últimos 30 años^{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}

La cuenca se encuentra influenciada por tectónica salífera, la cual constituye un excelente nivel de despegue, que es observado en la información sísmica de muy buena calidad disponible. A pesar de esto, algunos modelos evidencian diferencias en los valores de acortamiento que no son coherentes con el estilo estructural de la Cuenca Santiago al Norte, también influenciada por los niveles de evaporitas de la Formación Pucará.

¹ GIL RODRÍGUEZ, W., Evolución lateral de la deformación de un frente orogénico: ejemplo de las Cuencas Subandinas entre 0° Y 16°S. Tesis, Universidad Paul Sabatier, Toulouse, p. 150. 2001

² Ingemmet. Carta geológica nacional. Serie A. Lima Perú. 1999

³ GIL RODRÍGUEZ. Op. Cit

⁴ HERMOZA, W et al., The Huallaga foreland basin evolution: Thrust propagation in a deltaic environment, northern Peruvian Andes. Journal of South American Earth Sciences, 19, pp. 21-34. 2005

⁵ BABY, P. et al., Petroleum Systems Logic in Peruvian Subandean Basins. Perupetro, Lima, Peru. Ingemmet. 2009

⁶ PARSEP. The Huallaga basin and adjacent area. The Hydrocarbon Potential of NE Peru: Huallaga, Santiago and Marañón Basins Study. Final Report PeruPetro S.A, pp. 10-41. 2000

⁷ Parsep.. The Huallaga basin and adjacent area. The Hydrocarbon Potential of NE Peru: Huallaga, Santiago and Marañón Basins Study. Final Report PeruPetro S.A, pp. 15-27. 2001

⁸ EUDE et al. Controls on timing of exhumation and deformation in the northern Peruvian eastern Andean wedge as inferred from low-temperature thermochronology and balanced cross section. AGU Publications. Tectonics, 34, doi:10.1002/2014TC003641, pp. 1-16. 2015

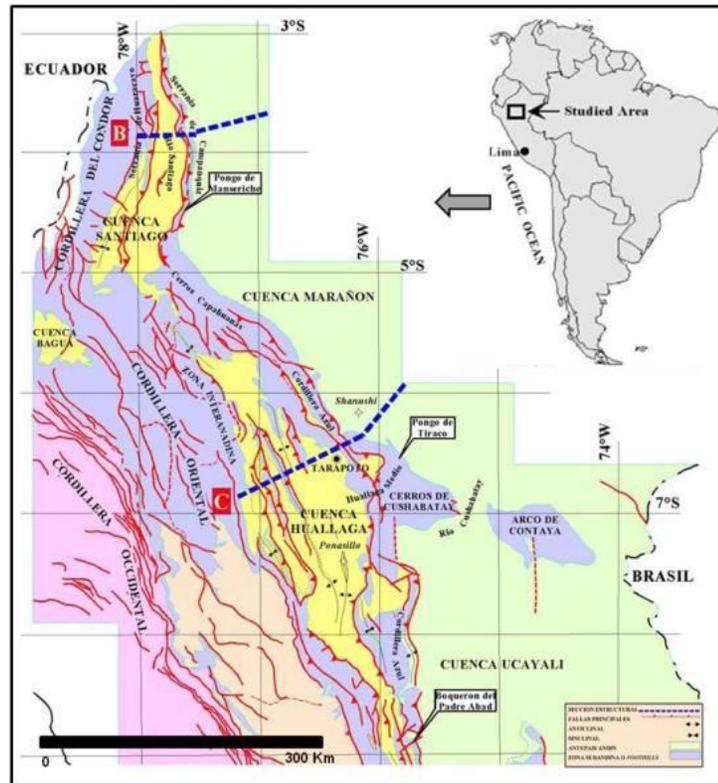
En este trabajo de investigación, se pretende construir un modelo que refleje un estilo estructural coherente con la tectónica evidenciada al Norte en la Cuenca Santiago, analizando los valores de acortamiento obtenidos; a partir de la construcción y restitución secuencial de cuatro secciones estructurales balanceadas seriadas; a lo largo del rumbo, que permitan definir la geometría de la Cuenca Huallaga, empleando e integrando datos sísmicos, de pozo y superficie, suministrados por Ecopetrol S.A Perú.

1.1 TEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.1 Pregunta de investigación. ¿Cómo se explica la relación entre las diferencias sustanciales de acortamiento y el cambio drástico de estilo estructural en el margen Occidental de la Cuenca Marañón?

1.1.2 Planteamiento del problema. El margen Occidental de la Cuenca Marañón presenta un estilo estructural complejo. La cuenca se encuentra bordeada por un cinturón de cabalgamientos marginal, que parece evolucionar lateralmente, a partir de valores grandes de acortamiento a valores pequeños, de Sur a Norte.

Figura 1. Mapa estructural de las Cuencas Santiago y Huallaga.



Fuente: Modificado de Gil Rodríguez, 2001.

La zona Sur, que coincide con la Cuenca de *wedge top*⁹ de Huallaga (Figura 1.1), presenta valores de acortamiento de alrededor de 70 km¹⁰, llegando hasta valores de acortamiento de 142 km¹¹.

Mientras que hacia el Norte, en la zona de la Cuenca Santiago, los valores de acortamiento son moderados, del orden de 10 km.¹²

⁹ HORTON, C., DeCelles, P., The modern foreland basin system adjacent to the Central Andes. *Geology*, 25-10, pp. 895-898. 1997

¹⁰ HERMOZA, W., Dinámica tectono-sedimentaria y restauración secuencial de la cuenca de antepaís de los Andes centrales. Tesis, Universidad Paul Sabatier, Toulouse, p. 258. 2001

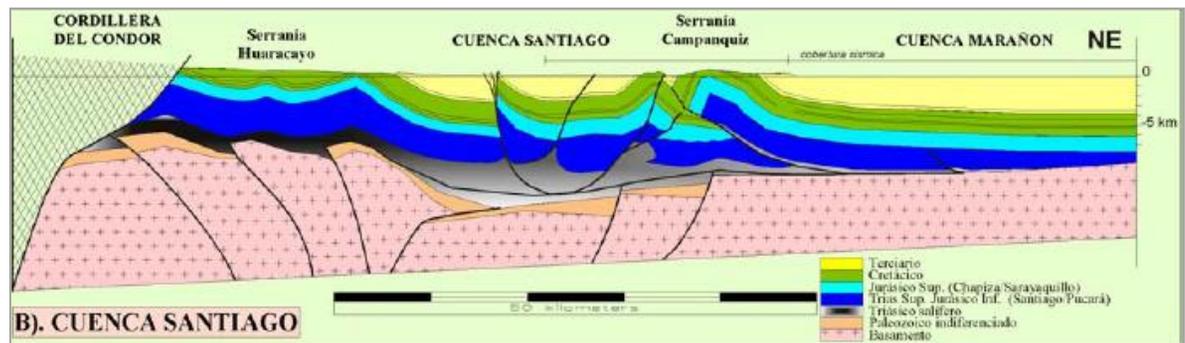
¹¹ EUDE. Op. Cit.

¹² GIL RODRÍGUEZ et al., Structure et contrôle paléogéographique de la zone subandine péruvienne. *Sciences de la Terre et des planètes / Earth and Planetary Sciences* 333, pp. 741-748. 2001.

Estas diferencias se originan a partir de interpretaciones en trabajos previos del área por Gil Rodríguez,¹³ Hermoza¹⁴ y Eude¹⁵, mostrando una gran diferencia en el estilo estructural del Margen Occidental de la Cuenca Marañón, entre la latitud de Santiago (4°S) y la de Huallaga (6°S).

La zona al Norte de 4°S (Figura 1.2) refleja un estilo estructural caracterizado por un acortamiento modesto, con tectónica mixta entre *thick-skinned* y *thin skinned* condicionada por la presencia de niveles salinos de edad Mesozoico, asociados a los niveles de evaporitas de la Formación Pucará (Triásico-Jurásico).

Figura 2. Sección estructural para la Cuenca Santiago.



Fuente: Tomado de Gil Rodríguez, 2001.

El estilo estructural en la Cuenca Huallaga, localizada al Sur (Figuras 1.3 y 1.4) es mucho más extremo que en el Norte. Está dominado por tectónica de tipo *thin-skinned*, influenciada también por niveles salinos, los cuales constituyen un excelente nivel de despegue originando importantes sistemas de corrimientos con vergencia al Este. Estos corrimientos se encuentran deformados en profundidad

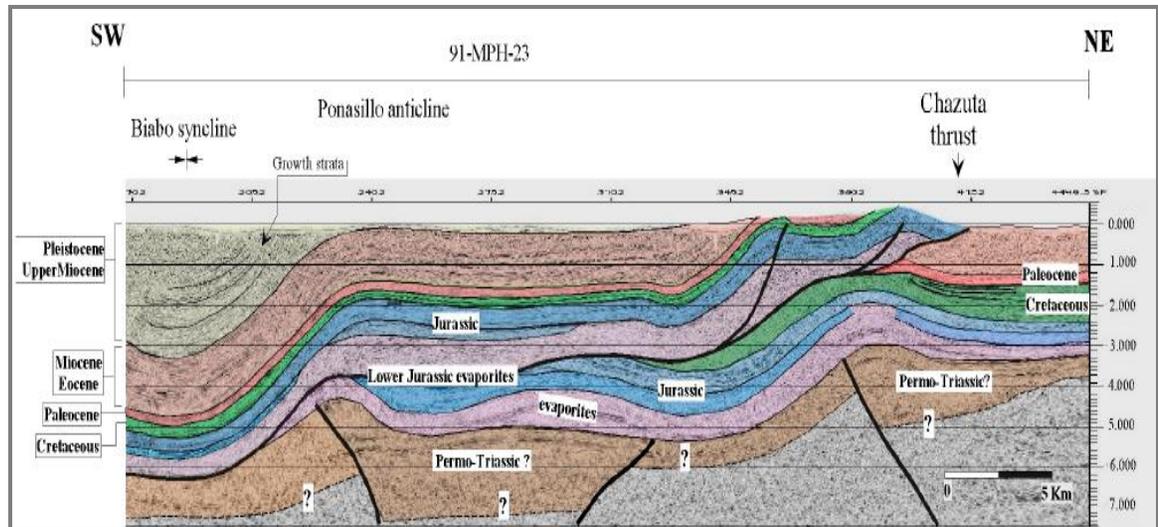
¹³ Ibid

¹⁴ HERMOZA, Op. Cit.

¹⁵ EUDE Op. Cit.

por probables inversiones tectónicas transpresivas, que aún se hacen sentir en estas latitudes de las Cuencas Subandinas.¹⁶

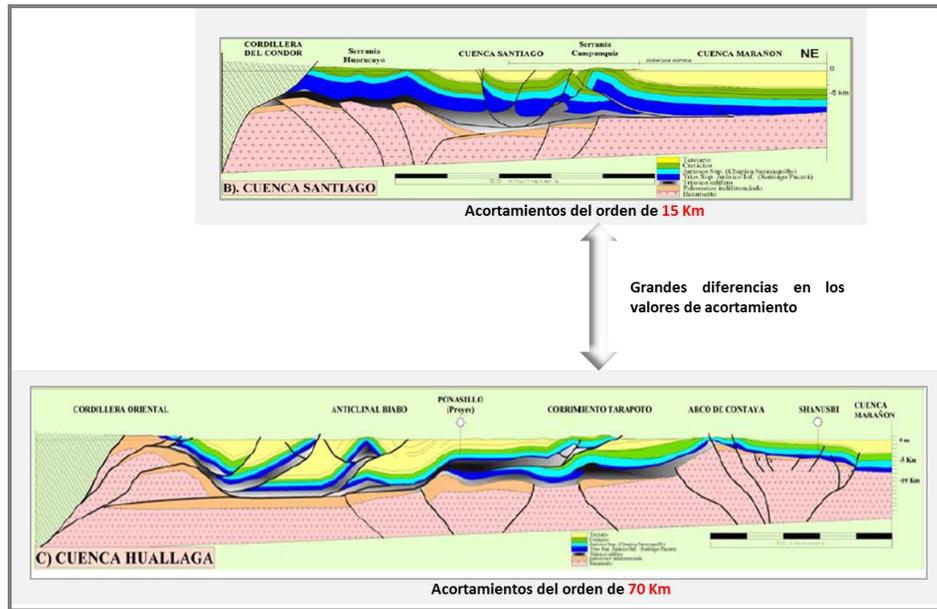
Figura 3. Sección sísmica estructural para la Cuenca Huallaga.



Fuente: Tomado de Gil Rodríguez, 2001.

¹⁶ GIL RODRÍGUEZ Op. Cit

Figura 4. Secciones estructurales equiparables a lo largo del rumbo. Superior, corresponde a la interpretación estructural para la Cuenca Santiago, latitud (4°S). Inferior, sección para la Cuenca Huallaga, latitud (6°S).



Fuente: Modificado de Gil Rodríguez, 2001.

Por consiguiente, entender el estilo estructural del margen Occidental de la Cuenca Marañón y su evolución lateral en detalle, influye y contribuye en el conocimiento del potencial real de hidrocarburos en el área, ya que minimiza el riesgo exploratorio a partir falsas expectativas de potencial Cretácico, teniendo en cuenta que el sistema petrolífero y el tipo de crudo debe estar siempre condicionado por la historia geológica de la región.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general. Establecer el estilo estructural, su evolución lateral y la cronología de deformación, con el fin de entender el impacto que genera el estudio de los valores de acortamiento a lo largo del rumbo, en el potencial de hidrocarburos para el margen Occidental de la Cuenca Marañón.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar geoméricamente el área, por medio de cuatro secciones geológicas balanceadas, utilizando longitud de líneas para niveles competentes y balanceo por área en los casos que se requiera.
- Representar cualitativa y cuantitativamente la evolución lateral de los valores de acortamiento, dentro del área de estudio.
- Determinar la cronología de deformación de las estructuras en el área de estudio, por medio de restitución cinemática de secciones estructurales, con el fin de ilustrar la relación temporal entre los valores de acortamiento. Para ello se utilizarán datos de cartografía, sísmica y de pozo.
- Integración de resultados mediante un modelo geométrico 3D, que permita entender la relación del potencial de hidrocarburos en el área con las diferencias entre los valores de acortamiento.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 ANTECEDENTES

Dentro de los modelos previos realizados para la Cuenca Huallaga, se evidencian diferencias en la interpretación y el estilo estructural propuesto por diversos autores (Parágrafo 2.1.1 a 2.1.4) desde los años 1980 hasta el año 2015.

El área de estudio se encuentra dominada por tectónica de tipo *thin skinned*, influenciada por niveles salinos asociados a las evaporitas del Grupo Pucará de edad Triásico – Jurásico, las cuales constituyen un excelente nivel de despegue que ha sido interpretado de diversas maneras en los últimos 35 años, y en donde se ha empleado generalmente la misma información sísmica correspondiente a la línea 91MPH-23, para la construcción de las secciones estructurales realizadas en la zona.

2.1.1 Modelo Mobil 1980. Este modelo es una de las primeras interpretaciones realizadas para la Cuenca Huallaga. Determinante a la hora de estudiar las diferentes opciones interpretativas que se han venido construyendo en los últimos años, y modelo con el cual se mantiene afinidad en la interpretación realizada en este trabajo de investigación.

muy importante como nivel de despegue. Los pliegues y las fallas no tienen una orientación preferida y la intrusión de diapiros de sal ha dado como resultado la formación de estructuras periclinales. Análisis de huellas de fisión en apatito confirmo una edad de 10 Ma para el fallamiento y plegamiento de esta cadena.¹⁸

El primer análisis desarrollado por Benavides (1968) con respecto a la edad de los diapiros de sal presentes en la Cuenca Huallaga, radica en la limitada relación estratigráfica y estructural que definen la fuente de estos niveles salinos, en donde se llegó a inferir que la edad de la sal podría ser Pérmica, Triásica y/o Jurásica. De la misma manera, no se evidencian patrones que indiquen la posibilidad de tener igual o diferentes fuentes para los domos salinos en la Cuenca Huallaga.¹⁹

Asimismo, Benavides (1968), precisa la presencia de niveles salinos asociados a diferentes unidades estratigráficas dentro de la zona Subandina y el *foredeep* de Perú. El pozo Loreto-1 perforado en la Cuenca Marañón, evidencio anhidrita cristalina intercalada con areniscas rojizas y calizas localizadas en la parte superior del Grupo Pucará, edad Triásico-Jurásico. Calizas y dolomitas se encontraron en la parte superior de la Cuenca Ucayali, así como la presencia de calizas y dolomitas masivas de edad Triásica, con intercalaciones de capas con contenido de yeso en el Valle de Utcubamba en el Norte del Perú. También, capas de edad Jurásico Medio, la cual contiene anhidrita y yeso correlacionable con los niveles yesíferos de la Formación Chambara, cercana a la Formación Tarma en la zona central del Perú.²⁰

¹⁸ Ibid

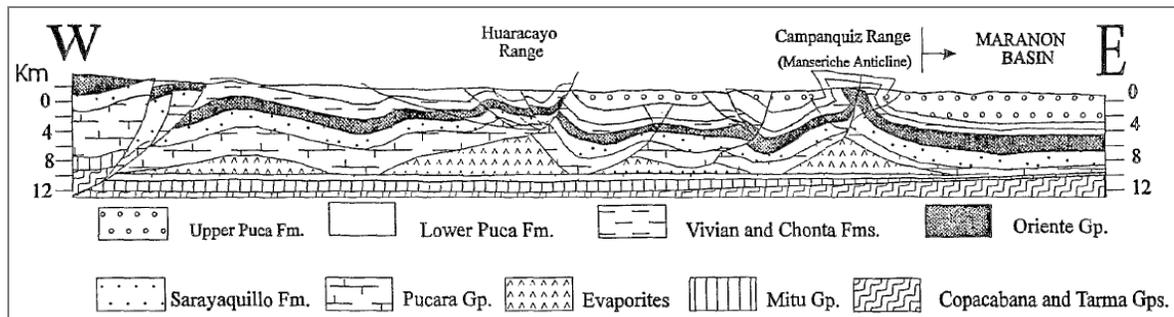
¹⁹ Ibid

²⁰ Ibid

Finalmente, la mayoría de los núcleos en los diapiros de sal de la Cuenca Huallaga, están rodeados por la Formación Sarayaquillo, con edad de la sal aún desconocida y con una fuente que podría estar asociada a una unidad estratigráfica de edad pre Jurásico Inferior.²¹

La distribución de diferentes espesores en las capas o cuerpos de sal a lo largo de los cinturones de cabalgamientos desarrollados en el *foreland*²², juegan un papel importante; no solo en el estilo estructural sino en la prominencia de la variación de espesor en las unidades. Por ejemplo, la distribución y espesor de las capas del Grupo Mitú, está controlada por la preservación de grabens y *half* grabens formados durante la tectónica extensiva en el Pérmico superior (no reconocido en cuencas del Ecuador). Por otro lado, el Grupo Pucará se extiende hasta el Norte en donde se correlaciona con la Formación Santiago, y la Formación Sarayaquillo muestra variaciones de espesor, contemplando grandes espesores hacia el Norte y capas delgadas hacia el Sur en presencia de delgados niveles de evaporitas.²³

Figura 6. Sección estructural construida por Antenor, M. (1993) para la Cuenca Santiago.



Fuente: Tomado de Antenor, M. 1993.

²¹ Ibid

²² ALLEN, P.A., HOMEWOOD, P., WILLIAM, G.D., Foreland basins: an introduction. Special Publication, IAS, 8, pp. 3-12. 1986.

²³ ANTENOR, MARKSTEINER. Op. Cit.

El estilo estructural de la Cuenca Santiago está dominado por tectónica tipo *thin skinned* (Figura 5), influenciada por la presencia de sal y relacionada por la interacción compleja entre las inestabilidades gravitacionales de dichos niveles salinos y los esfuerzos de compresión a las que se encuentra sometido. De hecho, se caracteriza por formar cinturones de cabalgamiento con despegues de bajo ángulo, muy similar al evidenciado en la cuenca Huallaga al Sur. Los pliegues se interpretan como anticlinales con espesores gruesos de sal y sinclinales con espesores de sal delgados, afectados por fallamiento de alto ángulo y *back thrust*. Los domos salinos, generalmente se desarrollan cerca de los ejes de los sinclinales, ya sea por el movimiento de la sal en el *footwall* de las fallas lístrica o por las fallas normales reactivadas²⁴.

2.1.3 Modelo Gil Rodríguez, 2001. Los resultados modelan la evolución lateral de la deformación de un frente orogénico, limitado por las Cuencas Subandinas localizadas entre 0 y 16°S. En donde la información considerada para este trabajo de investigación hace referencia a las secciones estructurales realizadas para las Cuencas Huallaga, Santiago y Marañón.

2.1.3.1 Cuenca Santiago

▬ Sección Estructural Santiago: En la Cuenca Santiago, la deformación es controlada por la presencia y ausencia de las evaporitas de la base del Grupo Pucará.²⁵ En efecto, estas evaporitas que constituyen el nivel de despegue de la Cuenca Santiago, se biselan bruscamente hacia el Este y provocan así un bloqueo de la propagación de la deformación²⁶ y el consecuente desarrollo de retro-corrimientos pasivos.

Hacia el Oeste, la Cuenca Santiago es estructurada por una tectónica de cobertura y una tectónica de basamento asociadas también a fenómenos

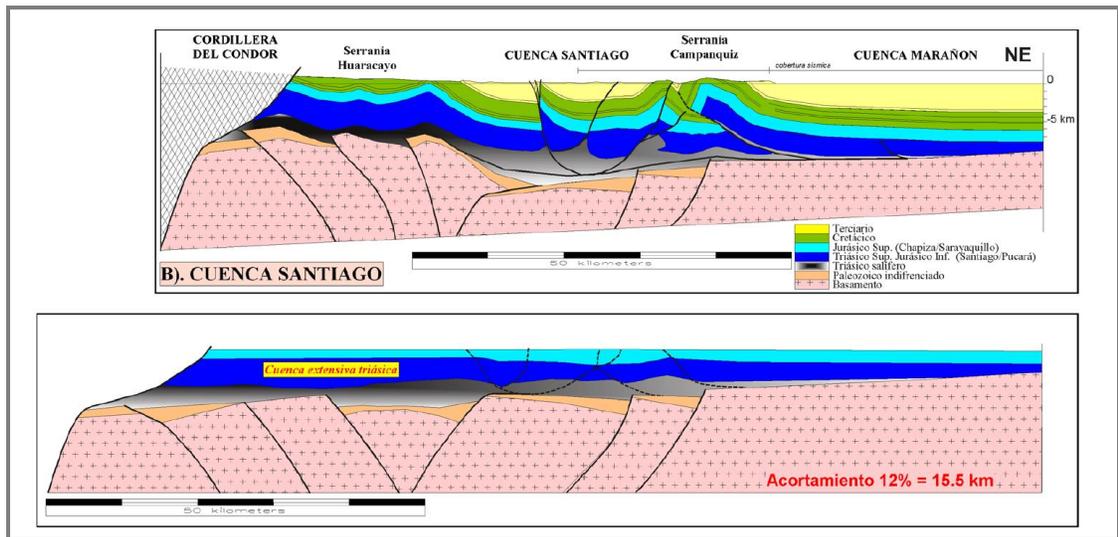
²⁴ Ibid

²⁵ GIL RODRÍGUEZ et al., Op. Cit.

²⁶ BABY, P. et al., Op. Cit.

diapíricos. En esta parte de la cuenca, se estructuran sinclinales relativamente amplios y anticlinales cerrados. La sismica muestra antiguas fallas normales sub-verticales que pudieron haber sido reactivadas y aun transportadas pasivamente por los corrimientos²⁷

Figura 7.0 Superior, sección estructural realizada por Gil Rodríguez (2001), en la Cuenca Santiago. Inferior, sección estructural restaurada para la Cuenca Santiago.



Fuente: Tomado de Gil Rodríguez, 2001.

El valor de acortamiento horizontal calculado por Gil Rodríguez²⁸ para la Cuenca Santiago, a partir de la sección estructural construida (Figura 6), corresponde a 15.5 Km, equivalentes al 12%.

²⁷ GIL RODRÍGUEZ et al., Op. Cit.

²⁸ Ibid

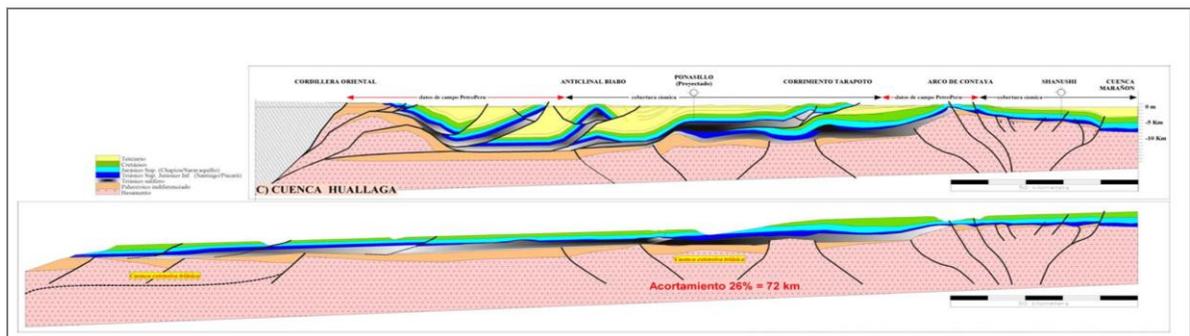
2.1.3.2 Cuenca Huallaga: Sección Estructural Huallaga: La Cuenca Huallaga se caracteriza por tener importantes corrimientos que se conectan sobre un nivel de despegue regional situado a la base de las evaporitas del Grupo Pucará.

De igual forma; como en la Cuenca Santiago, la tectónica de cobertura es controlada por la presencia de las rocas evaporíticas de edad Triásico que tienden a desaparecer hacia el Este, en el límite de la zona Subandina – cuenca flexural.

29

Al interior de la Cuenca Huallaga, las inversiones tectónicas interfieren con el diapirismo. La estructura Biabo (Figura 7), interpretada como un anticlinal de rampa, fue considerada como un domo de sal basándose en mediciones gravimétricas que muestran una anomalía en el núcleo de este anticlinal (MOBIL, 1993). Si bien es cierto que esta anomalía gravimétrica indica la presencia de evaporitas, ello no sugiere de ninguna manera un mecanismo de emplazamiento diapírico.³⁰

Figura 8. Superior, sección estructural realizada por Gil Rodríguez (2001), en la Cuenca Huallaga. Inferior, sección estructural restaurada para la Cuenca Huallaga.



Fuente: Tomado de Gil Rodríguez, 2001.

²⁹ Ibid

³⁰ Ibid

En el borde oriental de la sección (Figura 7), la estructuración de los sinclinales internos es interpretado como el resultado de la acomodación del emplazamiento de duplex de basamento.

El valor de acortamiento horizontal calculado por Gil Rodríguez³¹ para la Cuenca Huallaga, a partir de la sección estructural construida (Figura 7), corresponde a 72 Km, equivalentes al 16%.

2.1.4 Modelo Hermoza W, 2005. Los resultados del trabajo realizado por Hermoza³², establecen la dinámica tectono-sedimentaria y restauración secuencial en la cuenca de antepaís de los Andes centrales para tres grandes regiones: Cuenca Nor-amazónica (3°-8°S), la Cuenca Sur- Amazónica (11°-12°S) y la Cuenca del Sureste Boliviano (19°-20°S)³³.

No obstante, la región que involucra el área de estudio de este trabajo de investigación es equivalente al sistema de Cuenca antepaís nor-Amazonico (3°-8°S), abarcando la Cuenca Huallaga, denominada en la zona Subandina como el *wedge top*³⁴ y la Cuenca Marañón, correspondiente a la llanura Amazónica o *foredeep*³⁵.

2.1.4.1 Cuenca Huallaga: Sección Estructural Huallaga: La Cuenca Subandina Huallaga está deformada por la interacción de cabalgamientos, inversión tectónica positiva y la halogénesis³⁶. Estos diferentes estilos de deformación se encuentran ilustrados en el corte equilibrado A-A' (Figura 8 – Figura 9). La parte oriental de la sección A-A', representada por la Cuenca Marañón, está constituida por el Arco de

³¹ Ibid

³² HERMOZA, W et al., Op. Cit

³³ Ibid

³⁴ DECELLES, P. G., GILES, K. A., Foreland Basin Systems. Basin Research, 8, pp. 105-123. 1996

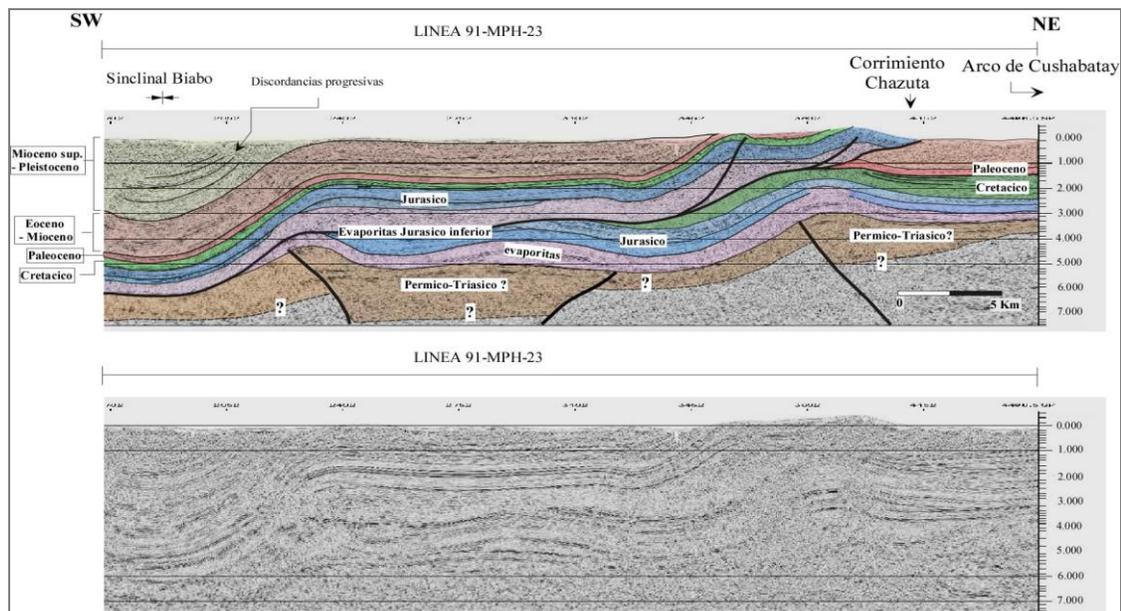
³⁵ Ibid

³⁶ BABY, P. et al., Ibid

Cushabatay orientada ONO-ESE (Figura 7). Esta estructura corresponde a la inversión de antiguas fallas normales Permo-Triásicas³⁷.

La parte central del corte estructural A-A' está deformada por el sistema de cabalgamientos Chazuta, Biabo, Pungoyacu y Pachicillo (Figura 8). Estos cabalgamientos se conectan sobre un nivel de despegue localizado en las secuencias evaporíticas de la parte superior del Grupo Pucará (Triásico- Jurásico Inferior) y la base de la Formación Sarayaquillo (Jurásico). Los cabalgamientos de Chazuta Shanusi representan el frente de deformación de la Cuenca Huallaga.³⁸

Figura 9. Perfil sísmico 91-MPH-23 interpretado por Hermoza (2005), a través del sinclinal de Biabo y el Arco de Cushabatay (para localización, ver Figura 2.4). Esta sección sísmica ilustra el estilo estructural y la geometría de las series sin orogénicas de la Cuenca Huallaga.



Fuente: Tomado de Hermoza, 2005.

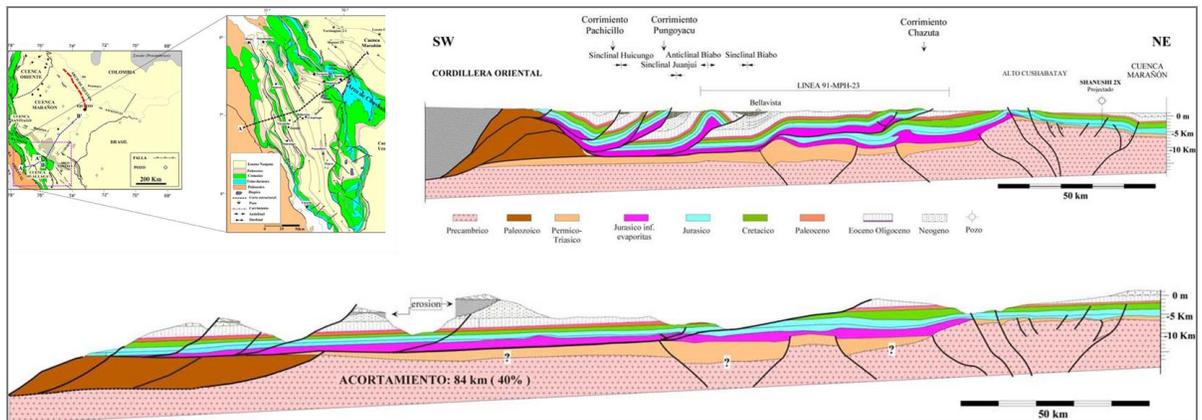
³⁷ HERMOZA, W et al., Op. Cit.

³⁸ Ibid

El límite Occidental de la Cuenca Huallaga constituye la zona de transición con la Cordillera Oriental (Figura 9), que se caracterizan por un sistema de duplex que implican los sedimentos de edad Paleozoico (nivel de despegue localizado en la interface Basamento-Paleozoico).³⁹

Asimismo, la Cuenca Huallaga esta principalmente estructurada por sistemas de cabalgamientos asociados a dúplex, *fault bend folds*, y *fault propagation folds* asociados a sedimentación sintectónica. Los depósitos de edad Cenozoico del *foreland* son relativamente gruesos en este sector de la zona Subandina (alrededor de 8km) y no han sido analizados utilizando parámetros de descripción sedimentaria relacionados con conceptos modernos de propagación de cuencas antepaís.⁴⁰

Figura 10. Superior izquierda, localización de la sección estructural construida, marcada con la línea negra en el mapa. Superior derecha, sección estructural realizada por Hermoza (2005), en la Cuenca Huallaga. Inferior, corte equilibrado y restauración al estado no deformado para la Cuenca Huallaga.



Fuente: Modificado de Hermoza, 2005.

³⁹ Ibid

⁴⁰ Ibid

El valor de acortamiento horizontal calculado por Hermoza⁴¹ para la Cuenca Huallaga, a partir del corte equilibrado construido (Figura 7), corresponde a 84 Km, equivalentes al 40%.

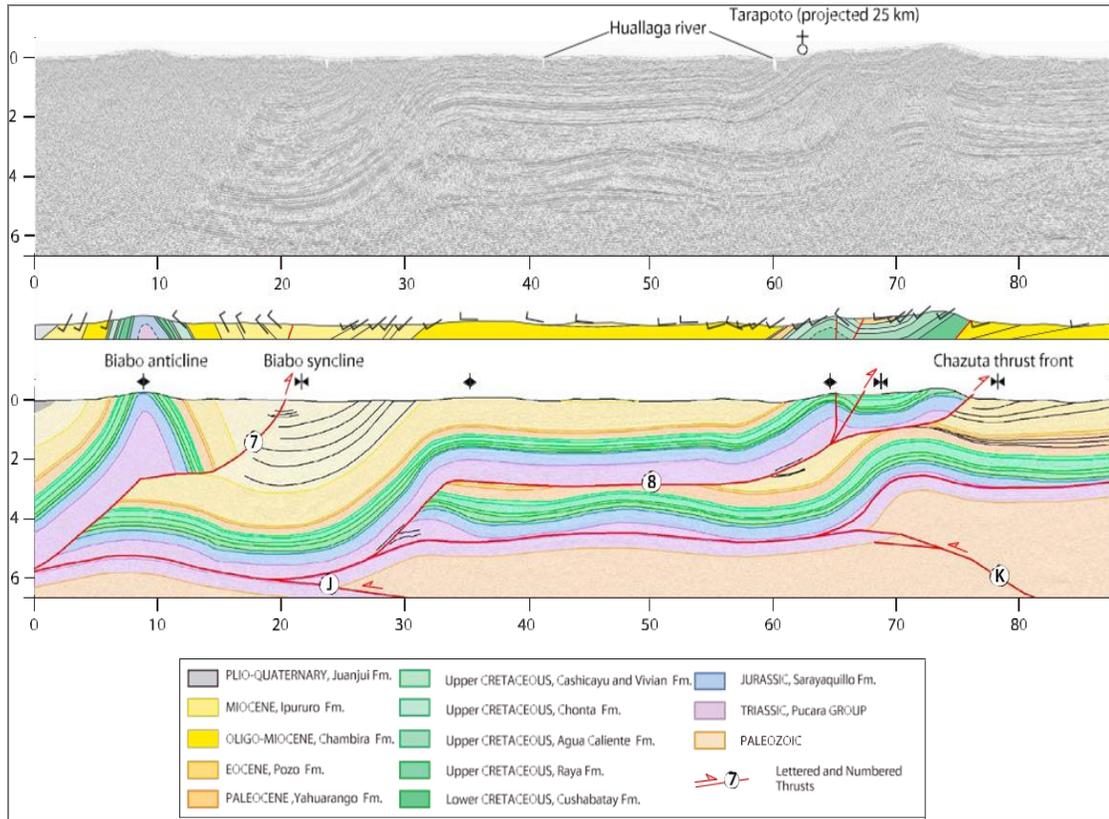
2.1.5 Modelo Eude et al., 2015. Estudio correspondiente a controles atribuidos durante el *timing* en la exhumación y deformación tectónica para el sector nororiental de los Andes Peruanos, a partir de datos de termocronología de baja temperatura y construcción de una sección balanceada regional de 500km de longitud en la Cuenca Huallaga.

2.1.5.1 Cuenca Huallaga: Sección Estructural Huallaga: Estructura caracterizada por tectónica *thin-skinned* dentro de un sistema de cabalgamientos que involucra la cordillera oriental, la zona Subandina y la Cuenca *foredeep* de Marañón. En la zona Subandina localizada hacia el oriente y la Cuenca Marañón, el desarrollo de sistemas de cabalgamientos ha sido impulsado por la combinación de dos eventos estructurales. Fallamiento inverso Pérmico reactivado, el cual se generan estructuras dúplex de basamento subyacente a la zona Subandina y el *foredeep*. Conjuntamente, durante el Triásico – Jurásico la cuenca de carácter extensional es transportada como un anticlinal de rampa hacia el techo de estas estructuras dúplex, dando lugar al levantamiento de la cordillera oriental. Este evento es el responsable de la deformación evidenciada en el sector Subandino del Perú y la propagación de estos corrimientos cabalgantes con vergencia Este⁴².

⁴¹ Ibid

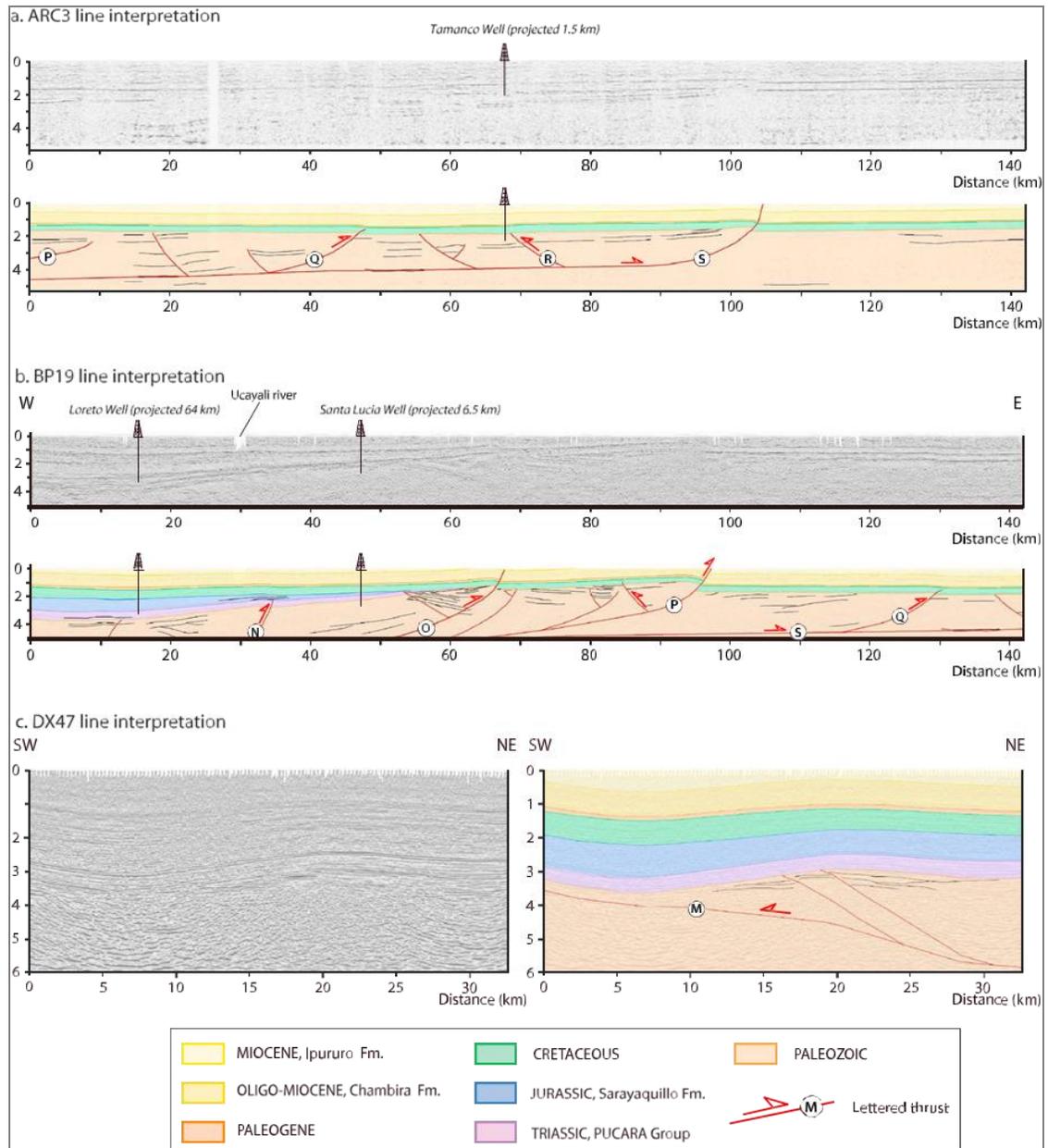
⁴² EUDE et al. Op. Cit.

Figura 11. Superior, línea sísmica 91-MPH-23 sin interpretación. Inferior, interpretación sísmica estructural del perfil sísmico 91-MPH-23 en la Cuenca Huallaga, se muestran los datos de buzamiento obtenidos de trabajo de campo.



Fuente: Tomado de Eude et al., 2015.

Figura 12. Interpretación sísmica estructural de las líneas que componen la sección estructural balanceada: ARC3, BP19, and DX47.



Fuente: Tomado de Eude et al., 2015.

Hacia el Oeste en la Cuenca Marañón, las secciones sísmicas muestran fallas ligeramente invertidas (Figura 11, falla de la N a la Q), mientras que hacia el Este en la Cuenca Huallaga, no se evidencian fallas de inversión sobre el despegue regional de bajo ángulo. (Figura 10). El perfil sísmico DX-47 muestra un anticlinal de rampa con orientación hacia el Oeste en relación con la falla de cabalgamiento de inmersión (Figura 11), sellada por las unidades de la serie Cretácico.

En la zona Subandina, las secciones sísmicas exhiben anticlinales de rampa que deforman los sedimentos Neógenos. Debajo del cabalgamiento de Chazuta, se encuentran otras evidencias de anticlinales de rampa localizados dentro de la geometría de cinturones de cabalgamiento (Figura 12), así como información de terremotos corticales.⁴³

En la sección regional estructural balanceada, los anticlinales de rampa producen deformación de basamento tipo dúplex con vergencia Oeste. Las unidades localizadas sobre el techo del cabalgamiento regional implican un sistema tipo *thin-skinned*. El principal cabalgamiento dentro de este sistema, origina la estructura de Chazuta sobre el despegue regional formado por las evaporitas del Grupo Pucará (Figura 12). La estructura anticlinal de Biabo, aparece alargada alrededor de 200 km con orientación de NNE-SSW a partir de un mecanismo de pliegue por propagación de falla. De acuerdo a lo anterior, y solo con la restitución de los cabalgamientos de Chazuta y de Biabo, se calcula un mínimo acortamiento de 52km.⁴⁴

El valor de acortamiento horizontal calculado por Eude⁴⁵, para la Cuenca Huallaga, a partir del corte equilibrado construido (Figura 12), corresponde a 142 Km, equivalentes al 28%.

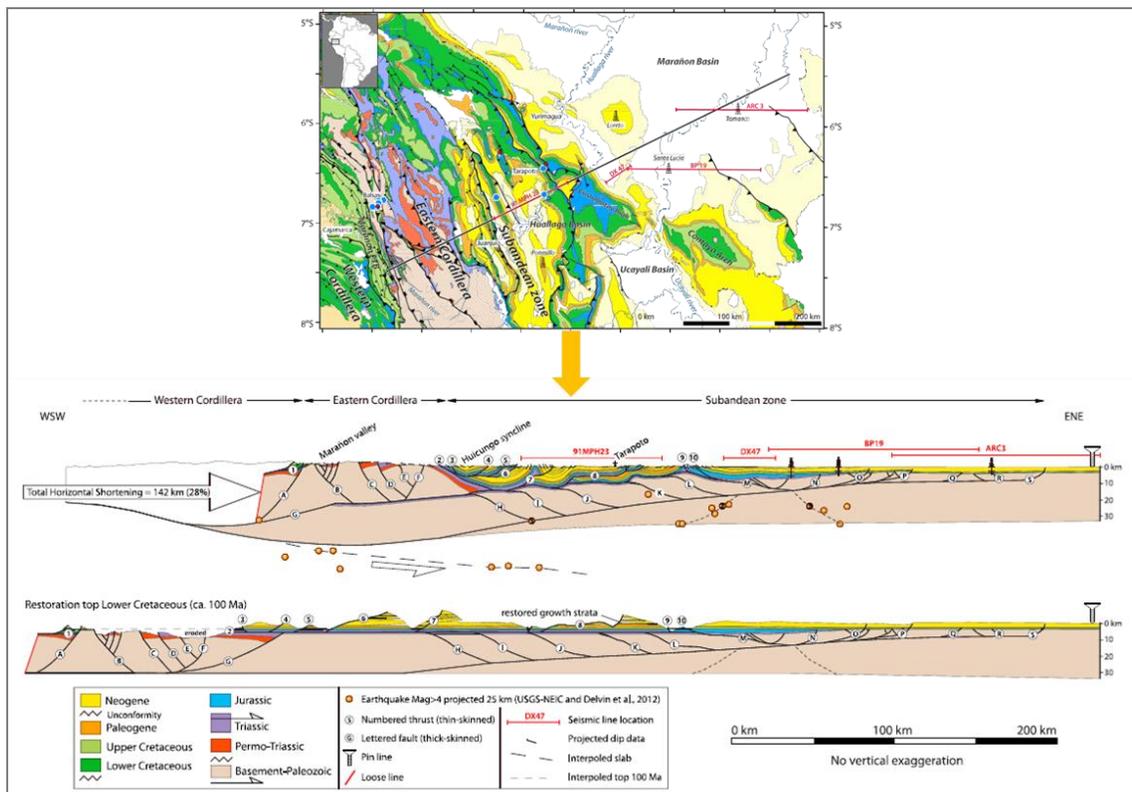
⁴³ Ibid

⁴⁴ Ibid

⁴⁵ Ibid

La restitución secuencial esta calibrada con (U-Th)/He en trazas de fisión datadas en apatito y valores de reflectancia de vitrinita que exhiben tasas de acortamiento que varían desde 7.1 mm yr⁻¹, entre 17 and 8 Ma hasta 3.6 mm yr⁻¹ y 8 Ma hasta hoy.⁴⁶

Figura 13. Superior, localización de la sección estructural regional de 500 km de longitud, marcada con línea negra en el mapa, las líneas rojas indican la ubicación de las líneas sísmicas interpretadas en la construcción de la sección estructural. Se toma como referencia para la restitución de la sección regional; la base del Cretácico (Formación Cushabatay, circa 100 Ma). Inferior, localización de los terremotos en círculos amarillos con una incertidumbre en profundidad de ± 5 km y a distancia de ± 10 km



Fuente: Tomado de Eude et al., 2015.

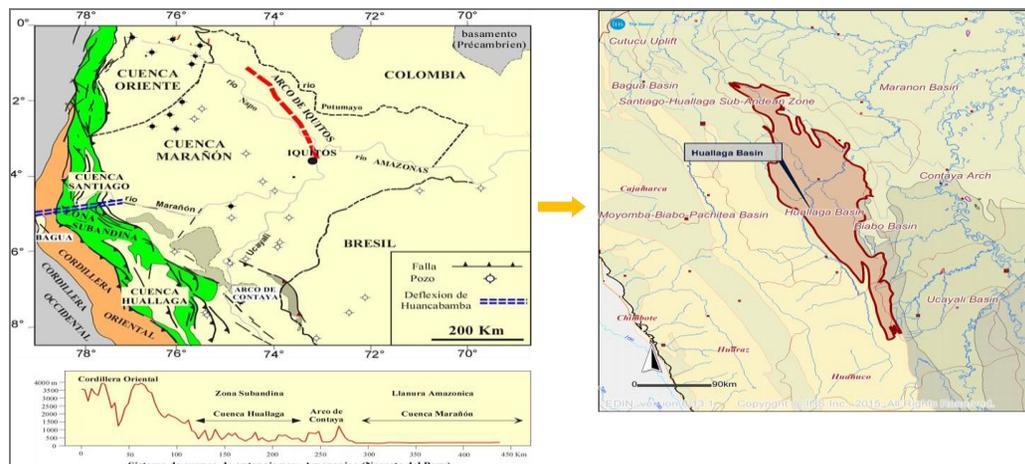
⁴⁶ Ibid

2.2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La Cuenca Huallaga se encuentra localizada en la zona Subandina septentrional del Perú entre 5°30”S y 9°S, presenta una orientación NW-SE, y corresponde a la Cuenca Subandina más amplia del sector nor-amazonico Subandino, desarrollada como la prolongación meridional de la Cuenca Santiago.⁴⁷

Esta cuenca tiene una extensión de más de 400 km de largo y 130 km de ancho, topográficamente presenta altitudes que varían entre los 500 y 1200 msnm (Figura 13).

Figura 14. Derecha, localización de la Cuenca Huallaga en la zona Subandina del Perú (tomado de IHS). Superior izquierda, limites morfo-estructurales para la Cuenca Huallaga (tomado de Hermoza, 2005). Inferior izquierda, Perfil topográfico entre la Cordillera Oriental y la Cuenca Maraón construida a partir de datos de modelos numéricos de campo (DEM, www2.jpl.nasa.gov/srtm/).



Fuente: Modificado de IHS, 2015 y Hermoza, 2005.

⁴⁷ GIL RODRÍGUEZ. Op. Cit.

Asimismo, se encuentra limitada morfológica y estructuralmente por la Cordillera Oriental al Oeste, el arco de Contaya al Este, mientras que al Norte por la Deflexión de Huancabamba y al Sur con la Cuenca de Ucayali (Figura 13). El Arco de Contaya, marca el límite entre el frente Subandino y la Cuenca flexural de Marañón.⁴⁸

2.2.1 Tectónica zona subandina peruana. La Cordillera de los Andes, se desarrolla a lo largo del margen Occidental del continente Sudamericano, representa uno de los más importantes sistemas montañosos del mundo y se extiende sobre más de 8000 km (Figura 14) desde el mar del Caribe, al Norte hasta el mar de Scotia, al Sur. Este sistema montañoso constituye uno de los ejemplos tipo de un margen continental activo, que resulta de la subducción de las placas oceánicas Nazca/Antártica debajo de la placa continental sudamericana.⁴⁹

Ganser (1973) y Jordan et al. (1983) dividen la Cordillera de los Andes en tres segmentos: Los Andes Septentrionales, los Andes Centrales y los Andes Meridionales (Figura 14).

▬ Los Andes Septentrionales se extiende desde el Norte de Venezuela (12° de latitud N) hasta el Norte del Perú (4° de latitud S). La formación de los Andes Septentrionales está ligado a la interacción de las placas del Caribe, Cocos, Nazca y Panamá, su estructuración está relacionada a procesos relacionados a la acreción de fragmentos de corteza oceánica y de arcos insulares durante el Mesozoico y Cenozoico (Aspden y McCourt, 1986; Roperch et al., 1987; Van Thournout et al., 1992).⁵⁰

⁴⁸ Ibid

⁴⁹ HERMOZA, W et al., Op. Cit.

⁵⁰ Ibid

- ▬ Los Andes Centrales se prolongan del Norte Perú (4° de latitud S) hasta la Argentina (40° de latitud S). El desarrollo de los Andes Centrales resulta de la subducción de la placa Nazca debajo el continente Sudamericano.⁵¹

- ▬ Los Andes Australes o Meridionales se desarrollan entre 40° y 55° de latitud S. Este segmento de la Cordillera de los Andes está interpretado como el resultado de la subducción de las placas oceánicas Nazca, Antártica y Scotia.⁵²

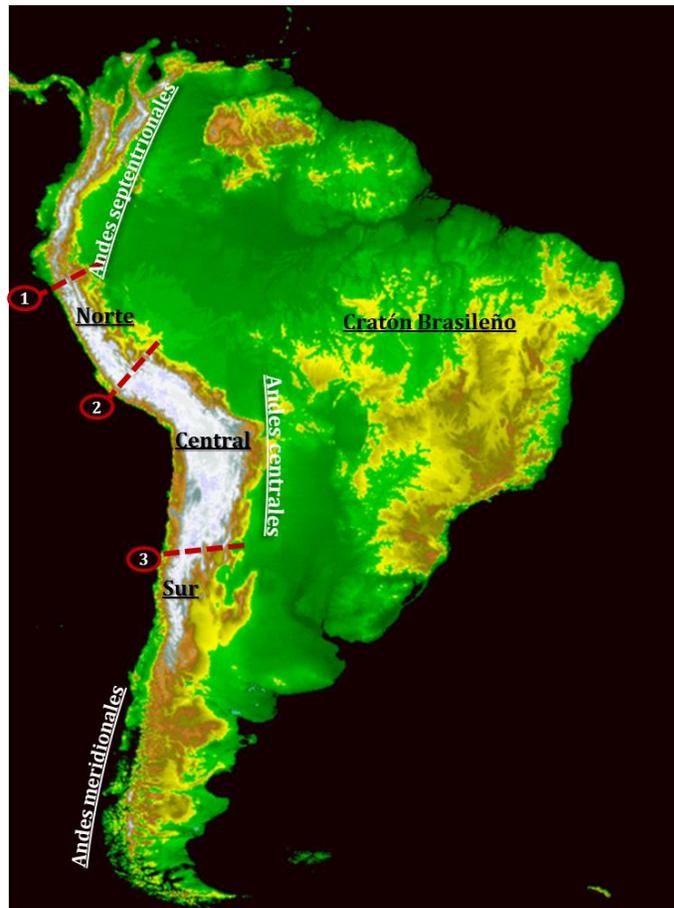
La Cordillera de los Andes Centrales (Figura 14) puede ser dividida en tres partes. i) Los Andes Centrales del Norte circunscritos en territorio peruanos. Su límite Norte coincide con la deflexión de Huancabamba, mientras que al Sur, se encuentran limitadas por la deflexión de Abancay. ii) La parte mediana de los Andes Centrales corresponden al oroclino boliviano que se desarrolla entre el Sur del Perú y el Norte de Argentina. Hacia la parte Norte, las estructuras están orientadas de NO-SE, mientras que al Sur, se encuentran orientadas N-S. iii) finalmente, la parte Sur de los Andes Centrales se desarrolla sobre el territorio de Argentina y Chile⁵³).

⁵¹ Ibid

⁵² Ibid

⁵³ Ibid

Figura 15. Localización de los sectores que dividen la cordillera de los Andes: Septentrionales, Centrales y Meridionales según Ganser (1973) y Jordan et al. (1983). También se muestra la división de los andes centrales en negro: Norte, Central y Sur, así como enmarcado en rojo 1, Deflexión de Huancabamba (límite inferior con los Andes septentrionales). 2, Deflexión de Abancay (límite entre los andes centrales del Norte y del centro). 3, límite entre los Andes centrales segmento central y Sur.



La evolución geológica de la Cuenca Huallaga se encuentra controlada por dos eventos tectónicos de gran magnitud evidenciados en la mayoría de las Cuencas Subandinas. El primero corresponde al evento pre – Andino, abarcando tres ciclos enmarcados durante el Ordovícico, Devónico y Pérmico- Carbonífero. Estas

unidades cubren el basamento de edad Precámbrica asociadas al cratón brasileño y de Guyana. El segundo, hace referencia a la tectónica Andina; iniciando con el proceso de subducción a lo largo de la margen Occidental del Perú. Abarca cuatro ciclos tectono - sedimentarios, que van desde finales del Pérmico hasta el presente.⁵⁴

- **Tectónica Pre-Andina**

Generalmente, durante la etapa de la tectónica pre-Andina se considera que durante el Cámbrico Inferior y el Ordovícico Inferior, el borde Occidental de América del Sur correspondía a una margen pasiva. La expansión máxima de facies marinas en el continente sudamericano se situó probablemente en el intervalo Arenigiano – Llanviarniano (Martínez, 1980; Aceñolaza, 1992). Las superficies de depósito sometidas a la influencia marina disminuyeron en el Ordovícico Medio, mientras que a partir del Ordovícico Superior retomaron su carácter expansivo que continuaría hasta el Silúrico.⁵⁵

En el Ordovícico y parte del Silúrico, la sedimentación comprendía los bordes de una cuenca intracratónica de tipo rift situada entre dos áreas cratónicas “estables” que correspondían al Escudo Brasileño y al Macizo de Arequipa. Al curso del Devónico Superior y Carbonífero Inferior una cuenca de antepaís se estableció sobre una gran parte de la margen Occidental de los Andes Centrales esto en respuesta a la actividad tectónica y magmática situada a nivel de la margen activa de Gondwana.⁵⁶

Durante el intervalo Devónico – Carbonífero, la orogenia herciniana se desarrolló sobre el borde Occidental del continente sudamericano, y fue seguida por el emplazamiento de un importante rift Permo-triásico. Este rift iniciado durante el

⁵⁴ PARSEP. The Huallaga basin and adjacent area. The Hydrocarbon Potential of NE Peru: Huallaga, Santiago and Marañon Basins Study. Final Report PeruPetro S.A, pp. 10-41. 2000

⁵⁵ GIL RODRÍGUEZ, W., Op. Cit.

⁵⁶ Ibid

desmantelamiento de la cadena herciniana continuó hasta el Jurásico, fue acompañado por el establecimiento de depósitos marinos y someros y magmáticos.⁵⁷

A partir del Jurásico, una zona de subducción se estableció sobre la margen Occidental de América del Norte y de América del Sur y fue acompañada de un magmatismo de arco (Mégard 1978; Pardo & Sanz, 1979; Aspden et al., 1987; Jaillard et al., 1990; Roperch & Carlier, 1992; Litherland et al., 1994; Romeuf et al., 1995). Al Este del arco volcánico se desarrolló una cuenca extensiva de tipo de tras-arco o "back arc". Al Oeste del arco volcánico secuencias sedimentarias volcano-clásticas son interpretadas como depósitos de ante-arco o "fore arc" (Mourier 1988).

Entre el Jurásico superior y Cretácico Inferior el régimen tectónico se manifestó por un tectónica transtensiva que originó una cuenca de tras-arco, asociada a importantes movimientos transcurrentes. En efecto, Jaillard (1994) describe en el NW peruano, al Sur del Ecuador, una compresión oblicua asociada a una colisión oblicua de bloques alóctonos individualizados durante el Titoniano. Durante esta época, el oriente ecuatoriano y el conjunto peruano-boliviano, se caracterizaron por eventos extensivos (Moulin, 1989; Soler & Sempere, 1993; Litherland et al., 1994; Rivadeneira & Baby 1999. Gil Rodríguez, 2001).

El Albiano es distinguido por importantes efusiones volcánicas (parte Occidental del Perú y Sur de Ecuador) que desaparecen entre el Albiano y Senoniano (Pitcher, 1978; Cobbing et al., 1981; Atherton et al., 1983; Soler, 1991; Reynaud et al., 1996). Al mismo tiempo se desarrolló un evento tectónico compresivo importante que afectó solamente la porción Oeste de la margen y es llamada "Fase Mochica" (Mégard 1984, Vicente 1989, Jaillard 1994). En el Perú central,

⁵⁷ Ibid

esta época es marcada por el emplazamiento del Batolito de la Costa (Soler & Bonhomme 1990).

Es así, que se considera que los movimientos tectónicos andinos comienzan desde el Triásico Superior, con la extensión que guía la sedimentación de edad Mesozoico. Sin embargo, la tectónica Andina propiamente dicha, o sea la tectónica en compresión se manifestó a partir del Cretácico (Audebaud, 1971; Dalmayrac et al., 1980; Frutos, 1981; Bussel & Pitcher, 1985; Jarrad, 1986; Soler & Bonhomme, 1990; Jaillard & Soler, 1996).⁵⁸

- **Tectónica compresiva andina**

El ciclo sedimentario andino se estableció sobre la margen continental a partir del inicio de la subducción bajo la placa sudamericana desde el Jurásico Superior, no obstante, la tectónica compresiva que afectó el sector Este del back-arc, se manifestó desde el Turoniano.⁵⁹

La tectónica compresiva andina se establece en respuesta a los cambios de velocidad y de la dirección de convergencia de las placas subductadas bajo la placa Sudamericana. En efecto, estos eventos se caracterizan por largos periodos de inestabilidad tectónica y breves episodios de relativa quietud tectónica (Noblet et al., 1996). De una manera o de otra, después de la instauración de esta tectónica en compresión ella se desarrolla de manera continua, es decir desde el Albiano-Cenomaniano (dominio andino) y Turoniano (dominio Subandino) hasta el Cuaternario.⁶⁰

⁵⁸ Ibid

⁵⁹ PARSEP. Op. Cit.

⁶⁰ GIL RODRÍGUEZ. Op. Cit

2.2.2 Estratigrafía. En la Cuenca Huallaga, las unidades litológicas más antiguas conocidas en afloramientos y en pozos corresponden a las series sedimentarias del Grupo Pucará. Solo un pozo exploratorio (Shanusi), localizado en el límite Sur-Occidental de la Cuenca Marañón, alcanzó esta unidad sedimentaria.⁶¹

2.2.2.1 Precámbrico – Paleozoico: Estas unidades litológicas no afloran en la Cuenca Huallaga, sin embargo, las líneas sísmicas muestran importantes reflectores por debajo de las series de edad Mesozoico. Estos horizontes, probablemente Paleozoicos, son preservados en grabens o semi-grabens al igual que en la Cuenca Santiago. El basamento pre-Cambriano se encuentra deformado por fallas asociadas probablemente a movimientos transcurrentes.⁶²

A nivel de la Cuenca Santiago, las series de edad Paleozoico no han sido reportadas, ni en afloramientos ni en pozos. En efecto, en esta parte de la zona Subandina, ningún pozo ha atravesado completamente el Mesozoico, sin embargo, las líneas sísmicas muestran numerosos horizontes profundos que pueden fácilmente ser correlacionados con las series sedimentarias del Paleozoico⁶³.

Según lo anterior, no se tiene información de afloramiento de unidades del Paleozoico para la Cuenca Huallaga. Sin embargo, se afirma que en la información sísmica se evidencian reflexiones que pueden ser atribuidas a series de esta edad, localizadas por debajo de la repetición de rocas de edad Mesozoico, teniendo en cuenta el modelo y estilo estructural actual descrito en el párrafo 2.1.

⁶¹ Ibid

⁶² Ibid

⁶³ Ibid

No obstante, en este trabajo de investigación, se retoma e impulsa la idea de conservar el modelo de Mobil (1980), parágrafo 2.1.1, en donde no existe la superposición de rocas edad Mesozoico, y se conserva un modelo de moderado aloctonismo. Por consiguiente, puede atribuirse para las rocas de edad Paleozoico varias de las reflexiones observadas en la información sísmica, ajustada con la interpretación del margen Occidental de la Cuenca Marañón.

Adaptando la estratigrafía a la nueva interpretación, a continuación se especifican unidades de edad Paleozoico, con descripciones realizadas para la Cuenca Marañón. Esto con el fin de conocer cómo pueden componerse litológicamente, sin ignorar que la tectónica de la cuenca puede ser un poco diferente, y que es probable que se evidencien cambios laterales de facies y espesor durante los procesos de depositación.

- Formación Contaya (Ordovícico): Comprende intercalaciones de lutitas negras fosilíferas con cuarcitas marinas. Estos niveles estratigráficos fueron alcanzados por los pozos exploratorios Tapiche, Palmera, La Frontera, y Yarina 1, localizados en el límite Sur-oriental de la Cuenca Marañón (Velarde et al., 1978).⁶⁴
- Grupo Ambo (Carbonífero Inferior): Está compuesto de areniscas de grano fino con intercalaciones de limolitas, shales grises y ocasionalmente capas de carbón, depositado en ambiente continental a marino somero.⁶⁵
- Grupo Tarma – Copacabana (Carbonífero Medio – Superior): Es una secuencia predominantemente de carbonatos marinos, aunque el ciclo comienza con unas areniscas de grano fino a grueso (la unidad areniscas verdes). Esta es suprayacida por una sucesión gruesa de calizas fosilíferas y capas delgadas

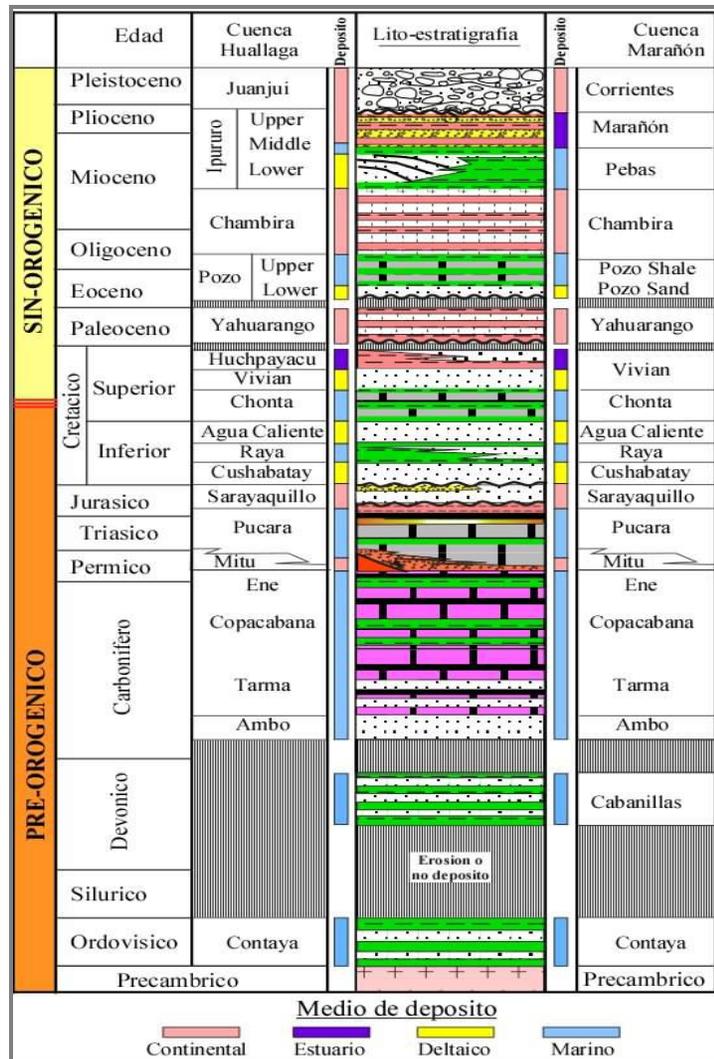
⁶⁴ Ibid

⁶⁵ CÁRDENAS, P., LÓPEZ, G., Definición de un modelo estructural de una transecta retrodeformada en el sector Suroccidental del Piedemonte de la Cuenca de Marañón en Perú. Ecopetrol S.A. 2009.

intercaladas de shales grises y anhidritas. Las calizas de Copacabana cubren la mayoría del área Subandina del Perú con excepción de los lugares donde el Cretácico suprayace las rocas de edad Paleozoico Inferior. La Formación Copacabana es suprayacida por la Formación Ene, una secuencia que contiene shales ricos en orgánicos, dolomitas y en menor proporción areniscas.⁶⁶

⁶⁶ Ibid

Figura 16. Columna esquemática resumiendo la evolución lito-estratigráfica de las Cuencas Huallaga y Maraón del Noreste del Perú.



Fuente: Tomado de Hermoza, 2005.

Las series de edad Paleozoico se encuentran preservadas en antiguos grabens formados durante la tectónica extensiva durante el Permo-Jurásico. El relleno sedimentario de estas estructuras de grabens corresponde a los depósitos del Grupo Mitú.

- = Grupo Mitú (Pérmico superior): Compuesto por conglomerados y areniscas continentales suprayacidos por intercalaciones de calizas arenosas fosilíferas, areniscas y limolitas, localmente se observa niveles volcanoclásticos.

2.2.2.2 Mesozoico: El Mesozoico aflora principalmente al frente de los cabalgamientos Subandinos y en los núcleos de anticlinales de rampa en las zonas más internas.⁶⁷

- = Grupo Pucará (Triásico Superior - Jurásico Inferior). El Grupo Pucará representa una sucesión sedimentaria de importancia económica que se deposita desde el Triásico superior hasta el Jurásico Inferior. Se divide en tres formaciones, que de base a tope se denominan; Formaciones Chambara, Aramachay y Condorsinga, siendo las tres unidades reconocidas a lo largo del Norte y centro de los Andes del Perú. De la misma forma, es reconocida como una importante roca fuente en el sistema petrolífero de las Cuencas Huallaga, Marañón y Ucayali Según Velarde et al., (1978), el Grupo Pucará muestra variaciones laterales de facies. De Oeste hacia el Este, pasa de facies marina a facies continentales⁶⁸.

Asimismo, variaciones de facies son observadas también en las líneas sísmicas⁶⁹. En general, el Grupo Pucará representa el evento de máxima inundación de un gran mega- secuencia, en donde las Formaciones Chambara y Aramachay hacen parte del ciclo menor transgresivo y Formaciones Condorsinga y Sarayaquillo que forman parte del ciclo regresivo superior⁷⁰.

⁶⁷ GIL RODRÍGUEZ, Op. Cit

⁶⁸ PARSEP. Op. Cit

⁶⁹ GIL RODRÍGUEZ. Op. Cit.

⁷⁰ PARSEP. Op. Cit

El Grupo Pucará se caracteriza a manera general por presentar niveles de calizas grises, lutitas negras ricas en materia orgánica de ambiente marino poco profundo, así como niveles de evaporitas que constituyen un nivel de despegue regional en la Cuenca Huallaga⁷¹. La Formación Chambara, es predominantemente dolomítica (> 80 %), intercalada localmente con dolomitas calcáreas y calizas. La Formación Aramachay, está dominada por argilitas negras, calizas y shales. Mientras que para la Formación Condorsinga, predominan los niveles de caliza, difiriendo de la Formación Chambara debido a que presenta menos dolomitización, evidenciada en la restricción de estas litologías hacia la base de la unidad⁷².

En pozo Shanusi localizado en la Cuenca Marañón, atravesó 46 metros del Grupo Pucará, sin haber alcanzado su base.⁷³

- Formación Sarayaquillo (Jurásico Superior – Cretácico Inferior): Está conformada de areniscas rojas con estratificaciones entrecruzadas e intercalaciones de niveles de conglomerados y argilitas rojas que alcanzan un espesor de 2000 m (Kummel, 1948) y depositadas en un medio continental fluvial y eólico⁷⁴. En Tingo María (Koch, 1962), la parte inferior de la Formación Sarayaquillo (>1500 m) presenta un importante nivel de calizas y dolomitas grises que sobreyacen a un importante conglomerado basal.⁷⁵

El espesor de la Formación Sarayaquillo es de 2000 m en la región del Huallaga Superior (Huff, 1949) y 2180 m al nivel del Huallaga Medio.⁷⁶

⁷¹ HERMOZA, W et al., Op. Cit.

⁷² ROSAS, S et al., Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucara Basin, central Peru. Journal of South American Earth Sciences 24, pp. 1-24. 2007

⁷³ GIL RODRÍGUEZ. Op. Cit.

⁷⁴ HERMOZA, W et al., Op. Cit.

⁷⁵ GIL RODRÍGUEZ. Op. Cit.

⁷⁶ Ibid

- Formación Cushabatay (Aptiano - Albiano Inferior): Constituida de areniscas blancas a amarillas bien estratificadas, y algunas veces de microconglomerados. Estas areniscas presentan laminaciones entrecruzadas y alcanzan un espesor de 400 m (Álvarez-Calderón, 1999). En el Valle del Huallaga, a nivel de los Cerros de Cushabatay y Contamana, esta formación se adelgaza hacia el Este y su espesor pasa de 400 m a 270 m.⁷⁷

- Formación Esperanza - Raya (Albiano Inferior-Medio): Conformada de lutitas fosilíferas negras e intercalaciones de delgadas capas de calizas grises y areniscas finas, que pueden alcanzar un espesor total de 150 m (Río Cushabatay). Esta secuencia sedimentaria corresponde al fin del ciclo transgresivo del Aptiano, formado por lutitas y areniscas con restos de plantas y que puede alcanzar un espesor de 155 m (Velarde et al., 1978). Hacia el Este, esta formación marina desaparece y pasa lateralmente a una facies más gruesa que corresponde a la Formación Raya s.s. (Kummel, 1948), que a nivel de los Cerros de Contamana presenta 170 m de potencia.⁷⁸

- Formación Agua Caliente (Cenomaniano): esta formación está constituida de areniscas cuarzosas blancas y masivas de grano fino a grueso con estratificaciones entrecruzadas, presenta también intercalaciones de lutitas negras carbonosas con restos de plantas (Pardo & Zúñiga, 1976). Según Müller (1982), la sedimentación de la Formación Agua Caliente comenzó a inicios del Cenomaniano, pero su límite bioestratigráfico superior (contacto con la Formación Chonta) varía considerablemente. Efectivamente, este límite fue datado del Cenomaniano Medio en la sección de Pardo de Miguel, del Cenomaniano Superior a nivel del Río Huallaga y del Turoniano Inferior en el

⁷⁷ Ibid

⁷⁸ Ibid

Pongo de Tiraco y en el Río Cushabatay. Existe entonces un importante diacronismo al contacto de las formaciones Agua Caliente y Chonta.⁷⁹

- Formación Chonta (Turoniano - Santoniano): Esta formación presenta una distribución regional y se localiza en la mayor parte de afloramientos de la zona Subandina. Está compuesta por lutitas, margas, calizas negras, grises y verdes, y delgados niveles de areniscas calcáreas. Su límite superior corresponde a la zona de transición con las areniscas de la secuencia regresiva de la Formación Vivian.⁸⁰
- Formación Vivian (Santoniano- Maastrichtiano): Unidad sedimentaria que está caracterizada por areniscas cuarzosas de grano fino a medio, comprendiendo intercalaciones de lutitas negras. El contacto de la Formación Vivian con las formaciones que la limitan son concordantes⁸¹
- Formación Cachiyacu (Maastrichtiano Superior): En la zona del Río Huallaga, representa la parte superior del Cretácico de la zona Subandina del Perú.⁸²

2.2.2.3 Terciario: Las unidades litológicas terciarias corresponden principalmente a sedimentos de ambiente continental. De manera general, estas series monótonas están constituidas de conglomerados, areniscas, limos y argilitas bien compactas. En su conjunto, estos sedimentos no son fosilíferos, sin embargo, en algunos horizontes se pueden encontrar restos de carofitas, tallos y hojas de plantas y ostracodos.⁸³

⁷⁹ Ibid

⁸⁰ Ibid

⁸¹ Ibid

⁸² Ibid

⁸³ Ibid

- Formación Huchpayacu (Paleoceno Inferior): Compuesta en su mayor parte de limos rojos y granates con algunas intercalaciones de areniscas finas.⁸⁴
- Formación Casa Blanca (Paleoceno Inferior): Conformada por areniscas blancas masivas intercaladas de argilitas, situada entre las formaciones Huchpayacu y Pozo, fue descrita al Norte del Ucayali Central.⁸⁵
- Formación Yahuarango (Paleoceno Superior): Limoarcillitas rojas (lodolitas rojas), limolíticas, intercaladas con capas rojas, marrones y grises de limolitas; indica además que en la parte inferior existe un conglomerado redondeado a subanguloso fino con estratificación sesgada y señales de oleaje.⁸⁶
- Formación Pozo (Oligoceno): Constituida de argilitas carbonosas finamente estratificadas e intercaladas con niveles calcáreos. Los microfósiles encontrados por Williams (1949) dieron una edad Oligoceno.⁸⁷
- Series sedimentarias del Neógeno (Mioceno - Plioceno – Cuaternario): Constituyen depósitos de antepaís que en el ámbito de la Cuenca Huallaga corresponden a las formaciones Chambira, Pebas y Marañón (Neógeno) y a la Formación Corrientes (Cuaternario). Aparentemente, la transgresión del Mioceno observada en las Cuencas Marañón y Oriente (Pebas y Curaray, respectivamente) no alcanzaron el Subandino central del Perú o ella es poco representada o muy somera.⁸⁸

⁸⁴ Ibid

⁸⁵ Ibid

⁸⁶ Ingemmet. Geología de los cuadrángulos de Moyobamba, Saposoa y Juanjuí. Hols 13-j, 14-j y 15j. Boletín No 122. Serie A: Carta Geológica Nacional. Lima Perú, Capítulo IV. 1999.

⁸⁷ GIL RODRÍGUEZ. Op. Cit.

⁸⁸ Ibid

3. METODOLOGÍA

El estudio de la evolución tectónica en el margen Occidental de la Cuenca Marañón y la Cuenca Huallaga, requieren de una metodología de trabajo estructurada. En este caso, compuesta por 3 grandes fases generales, que permiten en cada una de ellas agrupar diferentes tipos de datos, ya sean de carácter bibliográfico o geológico (Figura 16).

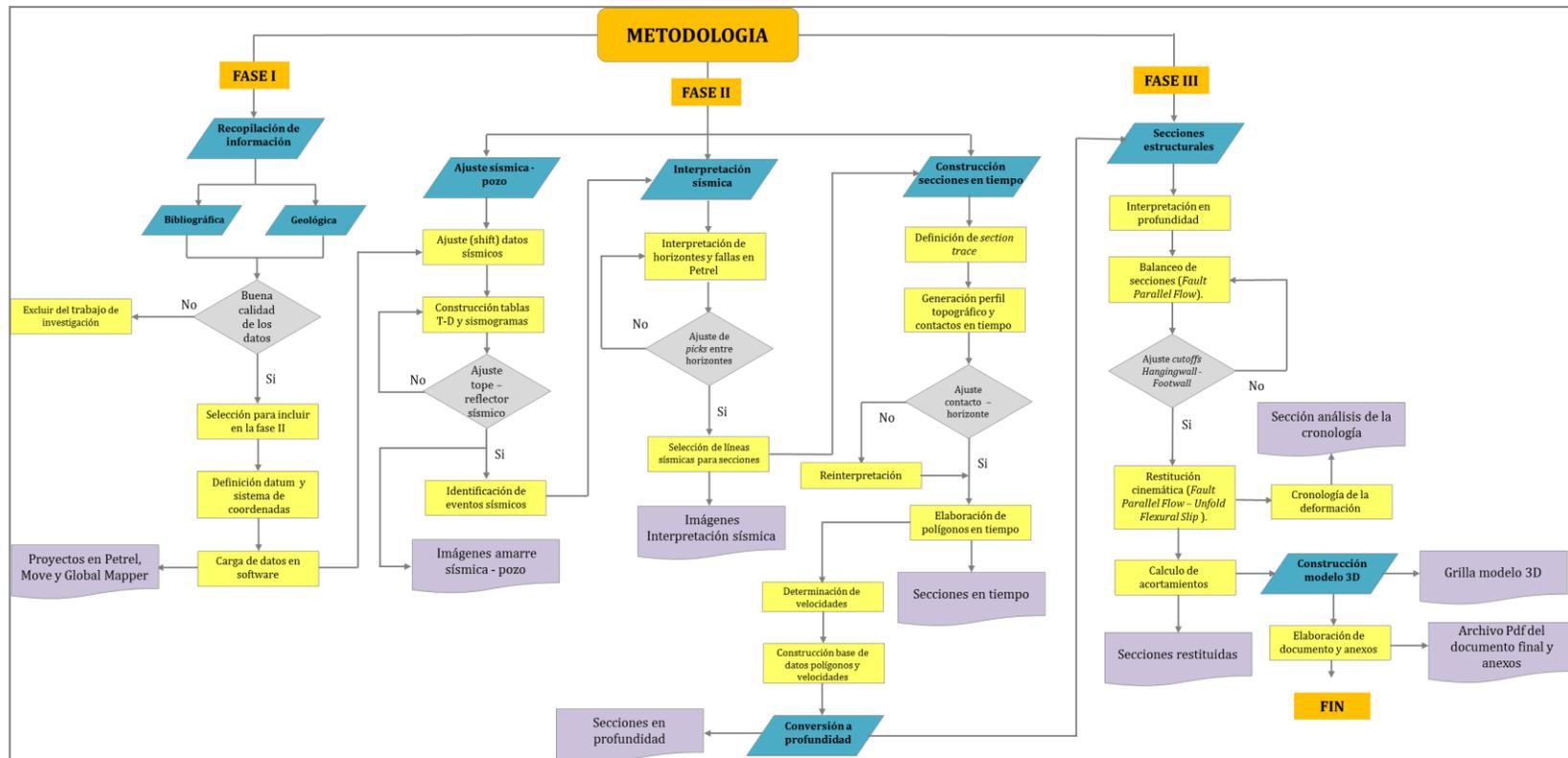
Dentro de este plan de trabajo detallado (Figura 17), se plantea una sincronización continua entre datos, procesos y productos que finalmente llevan al planteamiento de una propuesta como solución a la problemática evidenciada en el capítulo 1, párrafo 1.1. La cual es abordada teniendo en cuenta características espacio (geométricas) – temporales (tiempo), manejo y ajuste en la variabilidad de la escala de los datos que va desde regional hasta información puntual de pozo y una alineación entre diferentes ramas de la geología como son: GIS, geofísica, geología estructural y modelamiento.

Los datos disponibles para este trabajo de investigación consisten en información suministrada por la filial de ECP Perú, durante el desarrollo del estudio regional para las Cuencas Subandinas del Perú.

Figura 17. Datos disponibles durante el desarrollo del trabajo de investigación, se atribuyen a información geológica y bibliográfica respectivamente.

	Cuenca Huallaga	Cuenca Marañón (Margen Occidental y zona Sur)
Superficie	Mapa geológico 1:100000 (Ingemet).	
Sísmica	65 líneas sísmicas	68 líneas sísmicas
Pozo	1	12
Topes	Registro de la secuencia correlacionable con la cuenca Marañón hasta la Formación Sarayaquillo.	Registro de toda la secuencia estratigráfica, registrada en diversos pozos.
DATOS GEOLOGICOS		
Artículos descargados y revisados	Evolución tectónica de Perú	
	Estructural	
	Rocas Evaporitas	
	Tesis de maestría y doctorado en la zona de estudio	
DATOS BIBLIOGRAFICOS		

Figura 18. Metodología estructurada de trabajo distribuida en fases principales (color naranja). Sub-fases y tópicos de desarrollo (color azul). Procesos sucesivos correspondientes a las tareas realizadas (color amarillo). Condicionantes que dependen de los resultados obtenidos durante los procesos (color gris). Productos principales generados (color lila).



3.1 FASE I

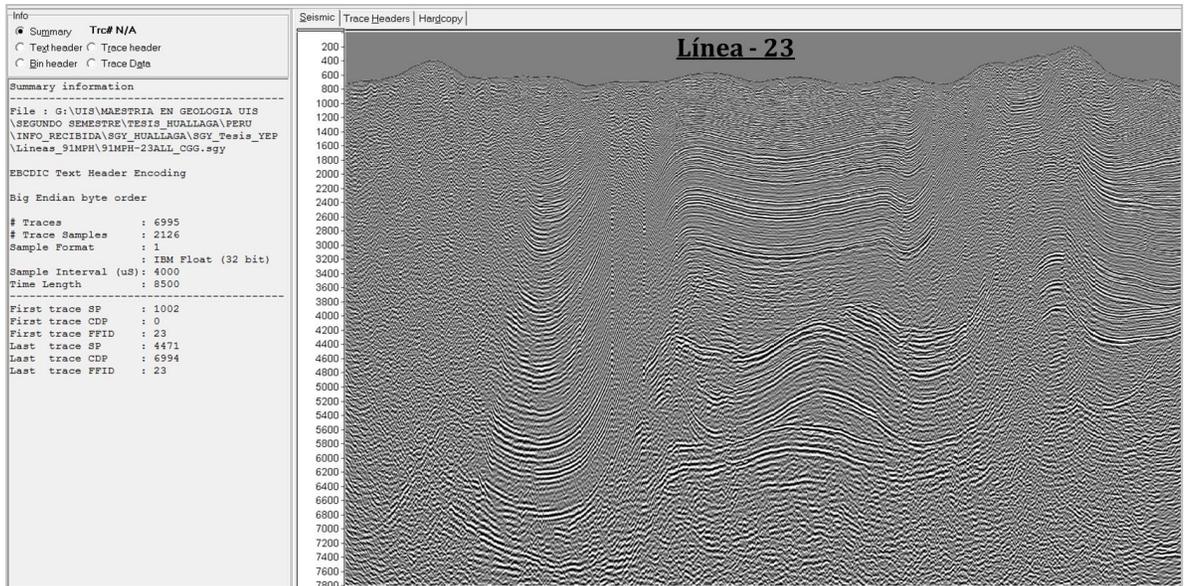
Esta etapa del trabajo de investigación se relaciona con toda la recolección y recopilación de información base para el desarrollo de las actividades planteadas en el plan de investigación propuesto.

A medida que se ejecutan las actividades de la metodología inicial, se va precisando en los procedimientos y tareas, con requerimientos que radican en obtener o excluir tanto datos geológicos como información bibliográfica.

Igualmente, la información geológica recolectada, requiere un control de calidad que es realizado de diferentes maneras al cargarse en diferentes *softwares*. Por ejemplo, para cada una de las líneas sísmicas disponibles en formato SGY, es necesario hacer una revisión exhausta en el programa libre *Seissee*, en donde se inspecciona la información del *header* de la línea, el *datum* y la velocidad de reemplazamiento a la que fue procesada.

Para este caso, la revisión de cada una de las líneas no fue exitosa, ya que todas líneas sísmicas fueron exportadas de diferentes proyectos de interpretación en donde no se incluía la información original en el *header* (Figura 18).

Figura 19. Perfil línea-23 ubicada en la Cuenca Huallaga, observada en el software *Seisee*.



Posteriormente a este proceso, se conocía que la información sísmica tenía buena calidad en imagen y posicionamiento, por lo cual se realizó la respectiva selección de datos para iniciar con la carga y montaje de proyectos en el software Petrel 2013.1 y 2D Move 2013.1 (licencias en versiones académicas disponibles para estudiantes de la Universidad Industrial de Santander).

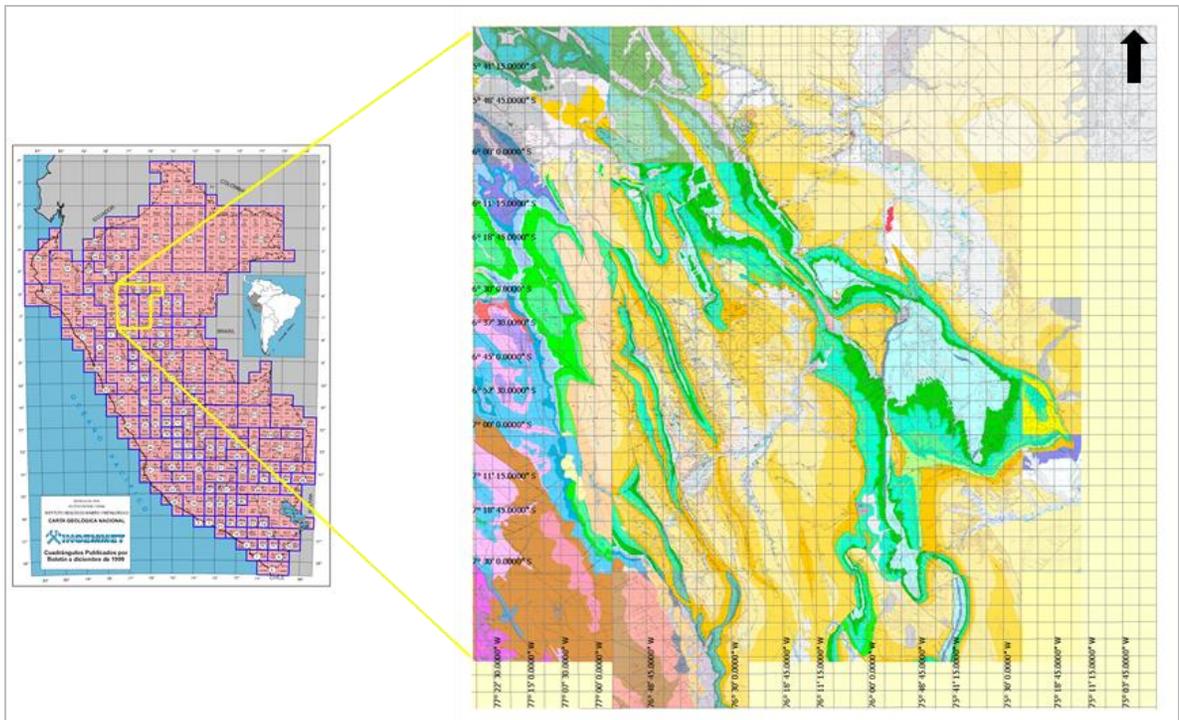
En cuanto a la definición de *datum* y sistema de coordenadas:

- Sistema de coordenadas definido corresponde a: WGS_1984_UTM_Zone_18S.
- *Datum*: 260 ft.

Estos parámetros de georeferenciación son necesarios para iniciar el montaje de cualquier proyecto de modelamiento e interpretación.

Por otro lado, se creó un proyecto en el *software* Global Mapper 13 (utilizando una versión de prueba, descargada de <http://www.bluemarblegeo.com/products/global-mapper-download.php>), con el objetivo de referenciar la información de superficie (Mapa Geológico)⁸⁹. Dentro de las cuales se encuentran las planchas (escala 1:100000): 12i, 13i, 14i, 15i, 12j, 13j, 14j, 15j, 12k, 13k, 14k, 15k, 12l, 13l, 14l, 15l.

Figura 20. Derecha, planchas geológicas 1:100000 del Ingemmet (1999), empleados como información de superficie. Izquierda. Carta geológica nacional de Perú (cuadrángulos publicados por el boletín del Ingemmet, 1999), en amarillo se demarca el área cartográfica utilizada.



Fuente: Modificado de Ingemmet, 1999.

⁸⁹ Ingemmet. Op. Cit.

3.2 FASE II

La fase de trabajo II, comprende tres grandes actividades de desarrollo geológico que permiten delimitar la extensión areal de las unidades geológicas, por medio de la interpretación sísmica y seguimiento sobre horizontes de interés y fallas, las cuales hacen parte de información base en la construcción de secciones estructurales.

3.2.1 Ajuste sísmica – pozo. Idealmente, es significativo contar con información sísmica procesada al mismo *datum*. Sin embargo, los datos sísmicos son el resultado de diversas campañas de adquisición y procesamiento sísmico, que finalmente son originadas en *Surveys* con características geofísicas diferentes, un problema común durante la evolución de proyectos de interpretación sísmica estructural en la industria del petróleo.

La información sísmica empleada se muestra en la Figura 20, así como el control de calidad realizado a la información de pozo y sísmica disponible en esta etapa del trabajo.

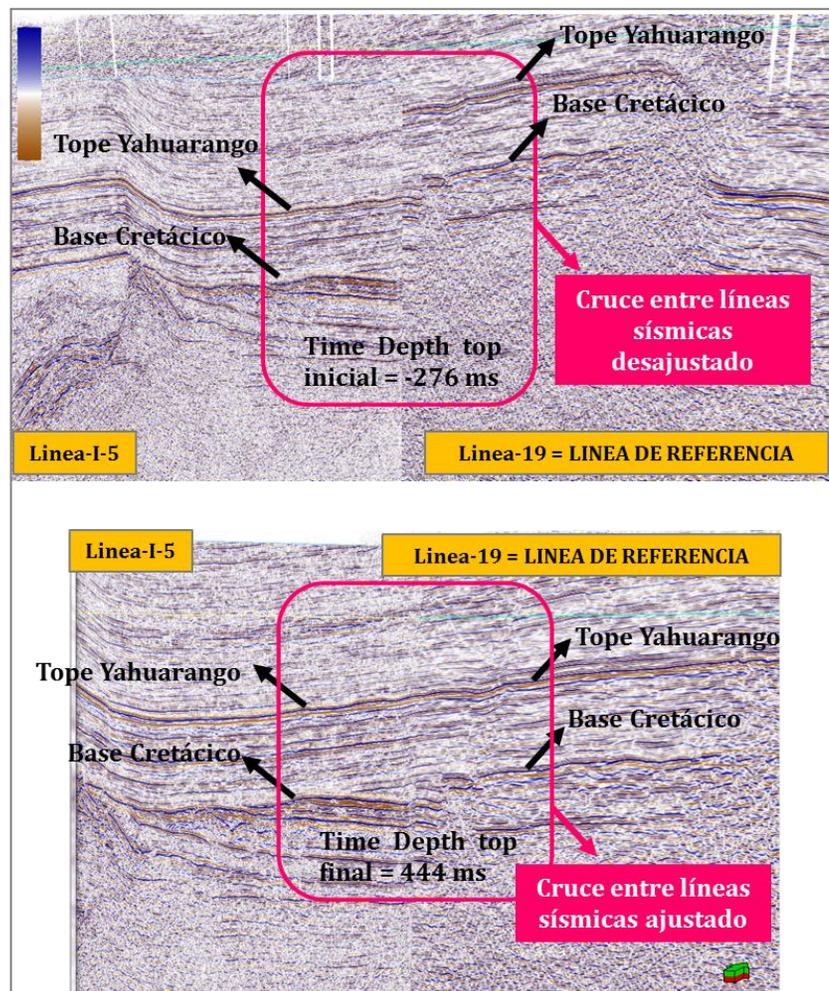
Figura 21. Control de calidad realizado a la información sísmica y de pozo disponible para la etapa de ajuste sísmica – pozo.

QC-ESTADO DEL ARTE INFORMACION SISMICA PARA AMARRE DE POZOS							
POZO	SISMICA	MATCH-POZO		AJUSTE SISMICA-POZO			
		Status	Distancia (m)	TABLAS T-D	REGISTRO DT	RESULTADOS	CUENCA
					REGISTRO RHOB		
Pozo-1Y	Línea-31	Muy Cercano	91	Disponible	Si	Bueno	Marañón Sur
	Línea-28	Muy Cercano	121		Si		
Pozo-2Y	Línea-052	Si	0	Disponible	Si	Bueno	Marañón Sur
	Línea-61	Muy Cercano	154		Si		
Pozo-2X	Línea-14	Muy Cercano	53	Ausente	Si	Bueno	Marañón Occidente
	Línea-31	Muy Cercano	123		Si		
Pozo-3Y	Línea95-07	Muy Cercano	159	Ausente	Si	Malo	Marañón Sur
	Línea95-12	Lejano	1065		Si		
Pozo-4Y	Línea-13	Muy Cercano	282	Ausente	Si No	Regular	Marañón Sur
Pozo-5Y	Línea-038	Muy Cercano	126	Ausente	Si	Bueno	Marañón Sur
	Línea-053	Cercano	444		Si		
Pozo-6Y	Línea-73-36	Si	4	Disponible	Si	Bueno	Marañón Sur
					No		
Pozo-7Y	Línea-06	Si	3	Ausente	Si	Bueno	Marañón Sur
	Línea-25	Cercano	623		Si		
Pozo-1X	Línea-15SW	Muy Cercano	143	Disponible	Si	Bueno	Marañón Occidente
	Línea-104	Cercano	643		Si		
Pozo-8Y	Línea-04	Cercano	568	Ausente	Si	Bueno	Marañón Sur
					Si		
Pozo-9Y	Línea-73-31	Si	12	Ausente	Si	Bueno	Marañón Sur
					No		
Pozo-10Y	Línea-20	Cercano	367	Disponible	Si	Bueno	Marañón Sur
					Si		
Pozo-3X	Línea-02	Cercano	460	Disponible	Si	Bueno	Huallaga
					Si		

De igual manera, al cargar la información sísmica en el proyecto inicial creado en el *software* Petrel, se observó un desajuste entre líneas sísmicas, lo cual radica en que son datos que provienen de múltiples fuentes de procesamiento, por ende ajustadas a *datums* diferentes.

Para esto, es conveniente ejecutar una nivelación minuciosa de líneas sísmicas, identificando reflectores individuales o grupos de eventos sísmicos característicos, que puedan ser observados en la mayoría de los datos y que permitan una buena nivelación o *shift* entre líneas (Figura 21).

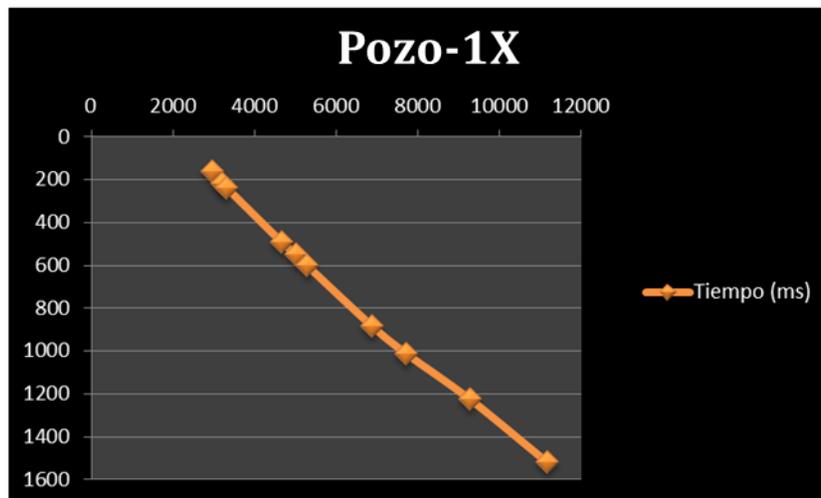
Figura 22. Ejemplo de *shift* entre dos líneas sísmicas localizadas en el sector Marañón Sur: línea-I-5 y línea-19. Superior, líneas sísmicas antes del ajuste. Inferior, líneas sísmicas ajustadas, teniendo en cuenta como referencia los reflectores característicos del tope de Yahuarango y la base del Cretácico.



Con los datos provenientes de archivos Checkshot, VSP y/o registro sísmico de los 13 pozos empleados se realizaron las tablas T-D para cada uno de los mismos, los cuales son utilizados para realizar el amarre tiempo (Sísmica) – profundidad (Pozo).

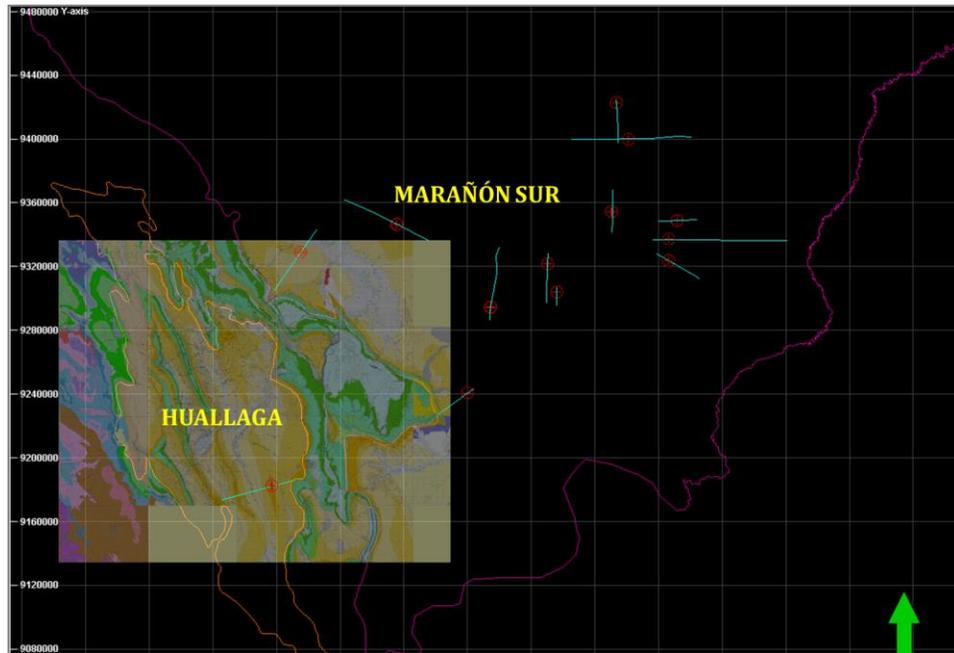
En la Figura 22, se observa la relación tiempo versus profundidad para el pozo Pozo-1X, datos que provienen del archivo Checkshot original del pozo.

Figura 23. Relación tiempo – profundidad para el pozo Pozo-1X.



Siguiendo con el mismo procedimiento, se realizaron las relaciones tiempo – profundidad para los 13 pozos disponibles (Figura 23), cargando las tablas en el software Petrel y ajustando los topes de las unidades en tiempo con las reflexiones sísmicas representativas de cada evento geológico.

Figura 24. Localización de los 13 pozos disponibles, distribuidos de la siguiente manera: 10 en el sector Sur de la Cuenca Marañón, 2 en el Sur - occidente de la Cuenca Marañón y 1 en la Cuenca Huallaga. Para cada uno de los pozos se cuenta con su respectiva línea de amarre como se observa en la figura.



El ajuste sísmica – pozo mostro resultados consistentes evidenciando buena ubicación en tiempo de los topos formacionales versus reflexiones características de cada formación estratigráfica (Figura 24 y Figura 25), en donde se reconocen niveles guía como el tope de la Formación Yahuarango, Chonta y Pucará. Estas unidades exhiben buenas características de reflectividad sísmica, debido a que litológicamente están compuestas por cuarzoarenitas potentes, correspondiendo a la base de la sucesión del Terciario (Formación Yahuarango), niveles de calizas (Formación Chonta) e intercalaciones entre rocas calcáreas y evaporitas (Formación Pucará), lo cual hace que su impedancia acústica sea mayor debido a la alta resistencia y competencia de la rocas.

Figura 25. Ajuste sísmica – pozo para los pozos localizados en el sector Sur – Occidental de la Cuenca Marañón. Pozo-1X, evidenciando un ajuste consistente con las reflexiones características de las formaciones Yahuarango, Chonta y Pucará, en la línea-15SW.

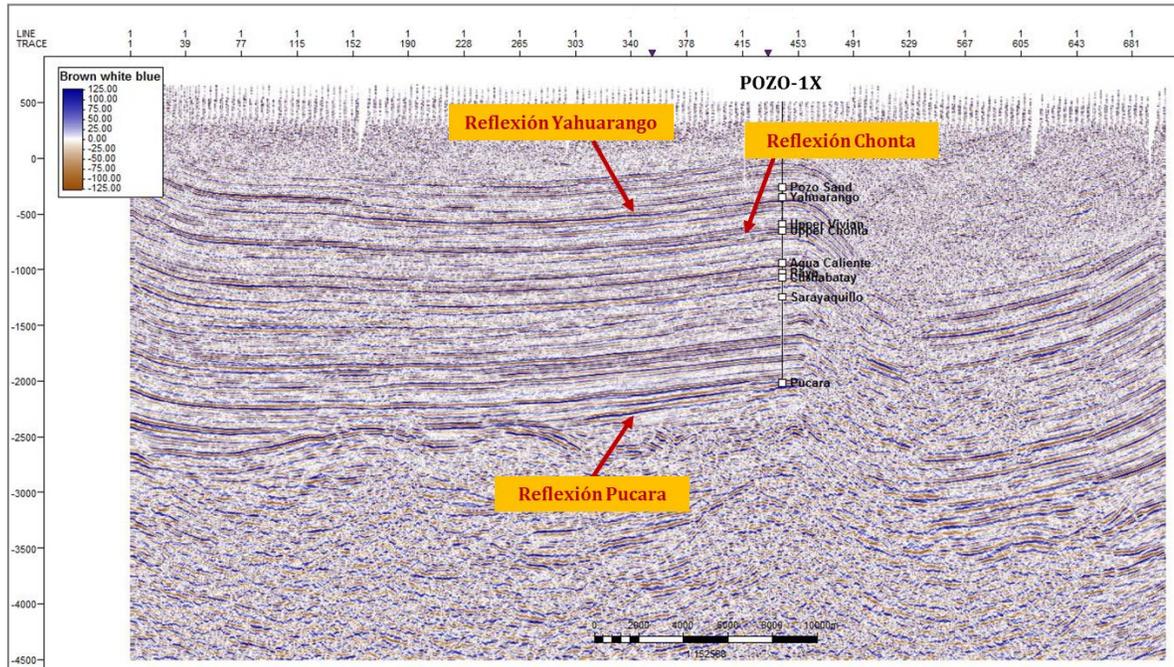
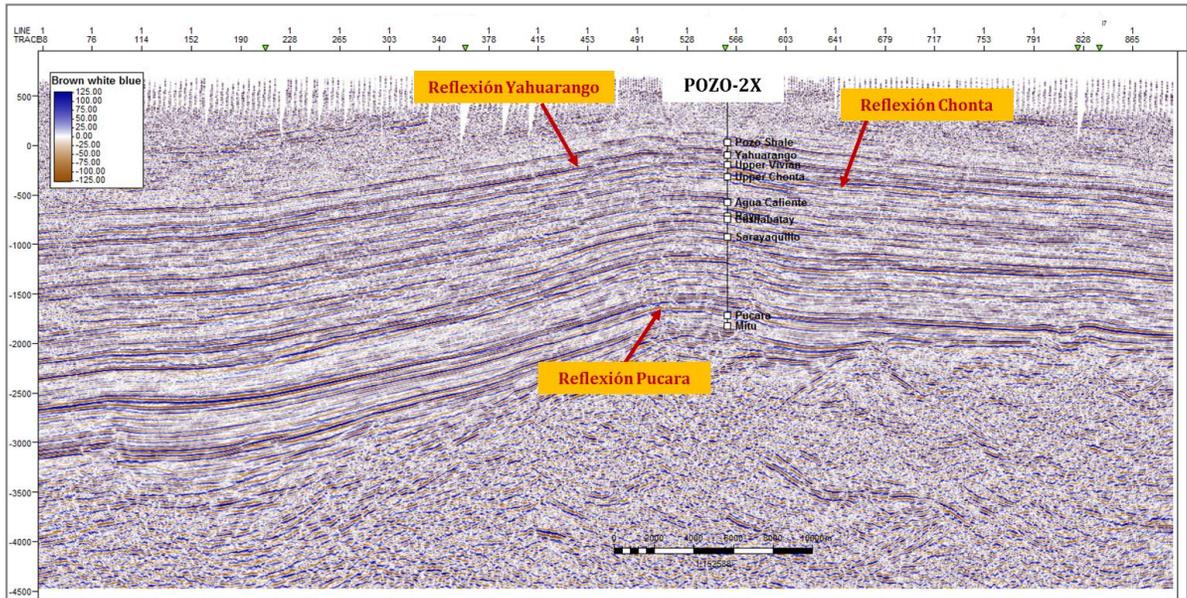


Figura 26. Ajuste sísmica – pozo para los pozos localizados en el sector Sur – Occidental de la Cuenca Marañón. Pozo Pozo-2X, evidenciando un ajuste consistente con las reflexiones características de las formaciones Yahuarango, Chonta y Pucará, en la línea-31.



Igualmente, empleando información referente a los registros de pozo sísmico y densidad, se extendió el proceso de ajuste sísmico – pozo, por medio de la construcción de sismogramas sintéticos a los pozos que contaran con dichos datos, validando el ajuste realizado previamente.

El objetivo de elaborar sismogramas sintéticos, radica en obtener un ajuste entre una ondícula generada para un pozo y la traza sísmica de la línea de amarre sobre la cual se requiere adelantar la interpretación, buscando que los reflectores sísmicos en tiempo correspondan a un evento geológico identificado con los registros de pozo en profundidad.

El proceso consiste en una convolución de la ondícula de la sísmica de superficie y la generación de los coeficientes de reflexión (CR) del pozo. Parasnis (1979) plantea una relación que permite calcular dichos coeficientes a partir de la relación directa entre la velocidad y la densidad entre dos interfaces, o impedancia acústica (Ecuación 1). A partir del coeficiente de reflexión en cada interface, es posible calcular la amplitud de cada pulso reflejado, y por combinación de varios pulsos en la correcta relación de tiempo, se puede sintetizar un registro sísmico.

$$CR = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = \frac{v_2 \rho_2 - v_1 \rho_1}{v_2 \rho_2 + v_1 \rho_1}$$

Ecuación 1

Donde,

I = Impedancia acústica de la interfase.

V = Velocidad de la interfase, dada por el inverso del registro sísmico DT, [ft/s]

ρ = Densidad de la interfase, dada por el registro RHOB, [gr/cc]

De manera general, fue posible construir sismogramas sintéticos para los 13 pozos disponibles en el trabajo de investigación, alcanzando resultados óptimos en el ajuste requerido (Figura 26 y Figura 27), que incorporaron un poco más de certidumbre al proceso de la Fase II.

No obstante, es importante tener en cuenta que estos resultados son aproximaciones que dependen de la calidad de los datos, en especial de los registros de pozos, los cuales pueden venir con defectos que están asociados con la presencia de fluidos y escalas inapropiadas de muestreo durante la adquisición.⁹⁰

⁹⁰ BACON, M. SIMM, R. REDSHAW, T. 3D seismic interpretation. Cambridge University Press pp. 57-66. 2003.

Figura 27. Sismograma sintético construido para el pozo Pozo-3Y, desplegando la imagen sísmica y las *wiggles traces* en series positivas de reflectividad. En los recuadros amarillo punteado se observan los niveles en donde el sismograma tiene un buen ajuste.

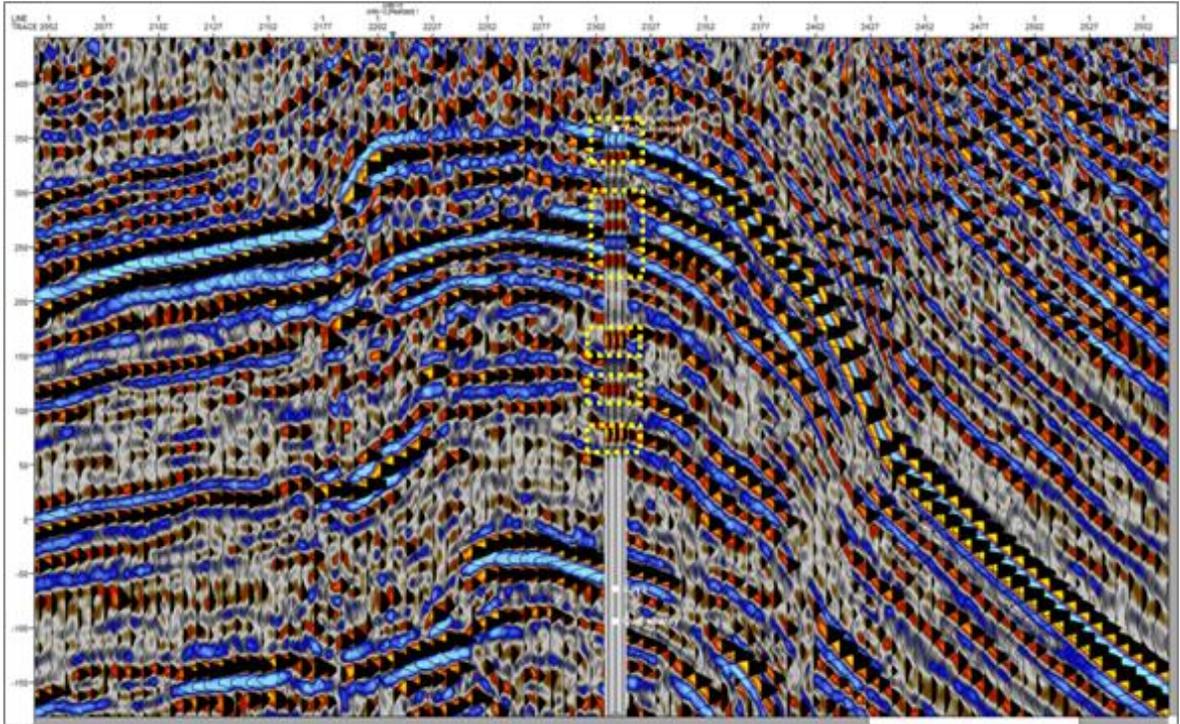
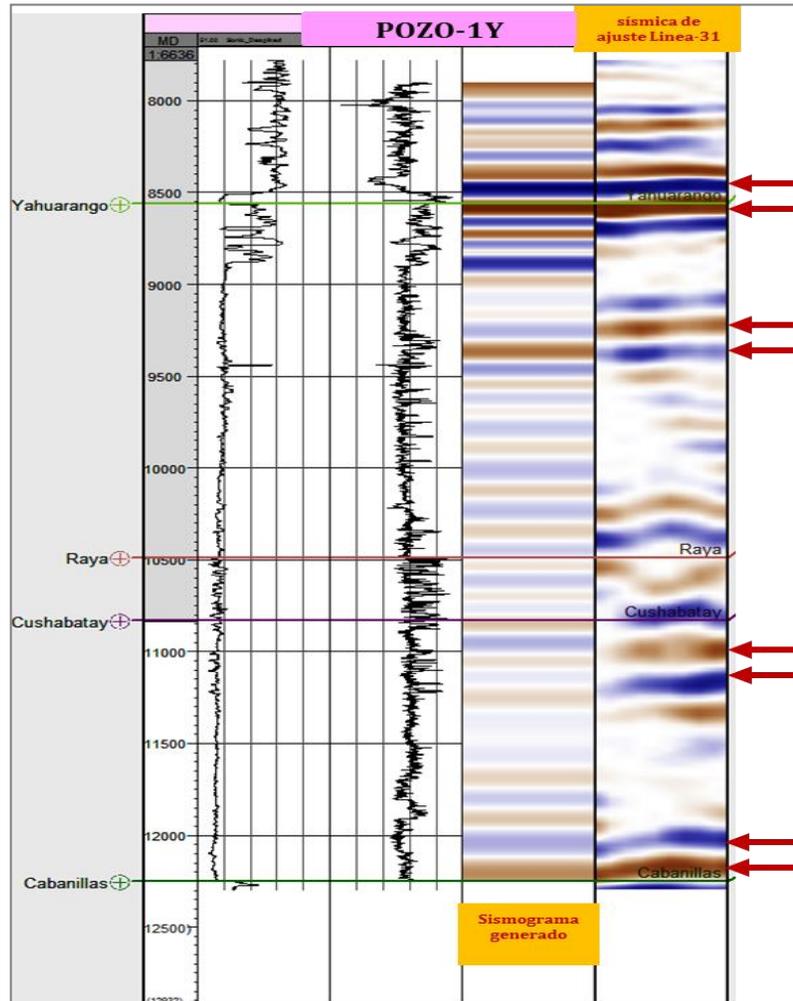


Figura 28. Sismograma sintético construido a partir del registro sónico y densidad del pozo Pozo-1Y, localizado en la zona Sur de la Cuenca Marañón. Las flechas rojas indican buen ajuste entre los las reflexiones de la línea sísmica Línea-31 y el sismograma generado.



3.2.2 Interpretación sísmica. El proceso de interpretación sísmica, es una tarea que depende de tres factores importantes: Contar con información sísmica de buena calidad, distribuida arealmente de manera homogénea, tener un buen control de la secuencia de interés en información de pozos - topes estratigráficos y

entender la tectónica regional del área de estudio, con el fin de realizar una interpretación sísmica estructural coherente.

Es vital tener identificado el objetivo con el cual quiere elaborarse el seguimiento de horizontes. En este caso, se busca conocer la distribución en el área de estudio de las unidades formacionales más representativas de la Cuenca Huallaga y Marañón y mapearlas a través de los *Surveys* sísmicos (Figura 29 y Figura 30).

Asimismo, la calidad de los datos sísmicos en la Cuenca Marañón es excelente, para la Cuenca Huallaga la calidad en imagen disminuye, debido a que esta cuenca se encuentra afectada y deformada por la tectónica compresiva regional cercana la Cordillera Oriental.

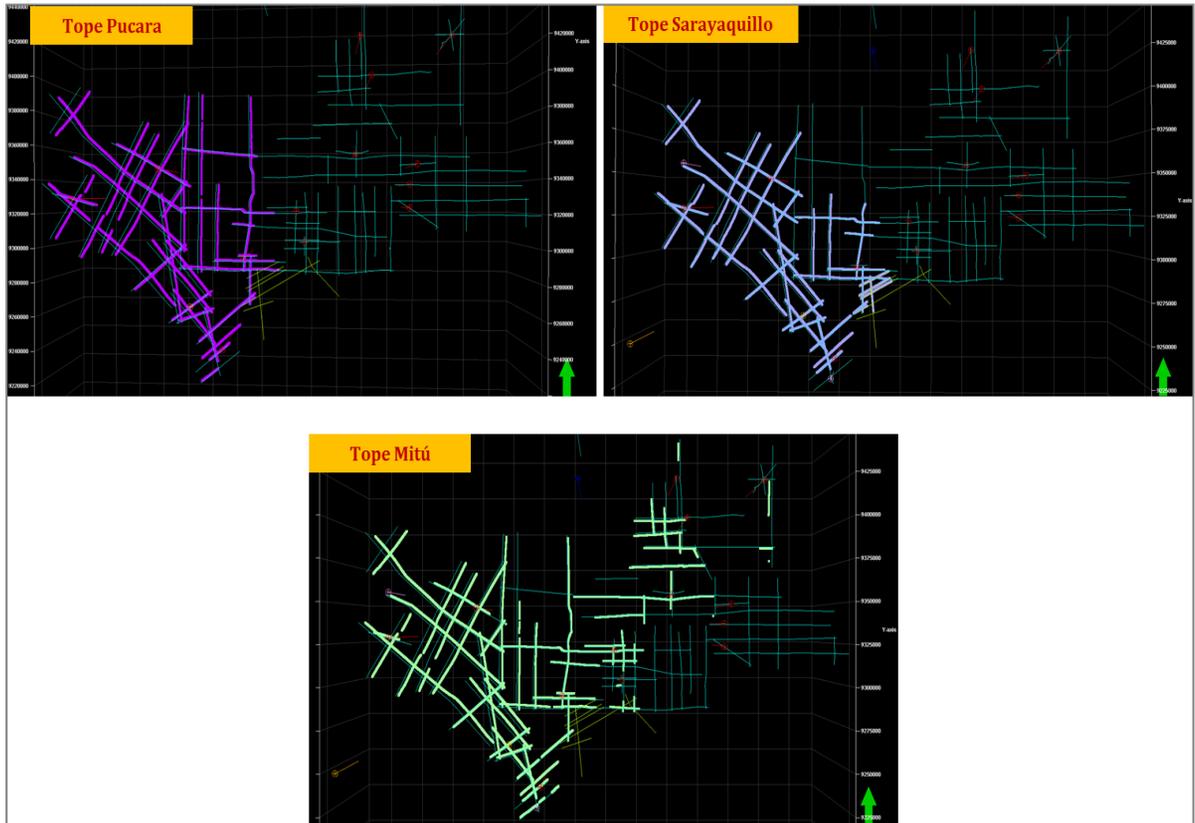
Figura 29. Horizontes interpretados para cada una de las Cuencas Huallaga y Marañón.

EDAD	UNIDAD ESTRATIGRAFICA	Cuenca Huallaga	Cuenca Marañón
Paleoceno		Yahuarango	Yahuarango
Cretácico Superior		Vivian	Vivian
		Chonta	Chonta
Cretácico Inferior		Cushabatay	Cushabatay
Jurásico		Sarayaquillo	Sarayaquillo
Triásico - Jurásico		Pucara	Pucara
Pérmico - Triásico		Mitú	Mitú
Carbonífero		Copacabana	Copacabana
		Tarma	Tarma
Ordovícico			Contaya
Precámbrico			Basamento

En principio, se hace un recorrido general por cada una de las líneas sísmicas y sus respectivos cruces, ya que pueden haber quedado líneas mal ajustadas durante la etapa de *shift* sísmico. De la misma manera, se van identificando aspectos estructurales y estratigráficos relevantes que son posteriormente interpretados. También, se selecciona el área por la cual quiere darse inicio al proceso de interpretación sísmica, la cual es generalmente una zona con buena cantidad de pozos o un pozo que haya perforado la mayoría de unidades estratigráficas.

Cabe destacar, que este proceso se realizó de manera manual, ya que en el módulo de interpretación sísmica del software Petrel, está incluida la herramienta de interpretación guiada (*auto-tracking*), la cual es útil en zonas planas continuas con poco fallamiento y sin variaciones laterales estratigráficas.

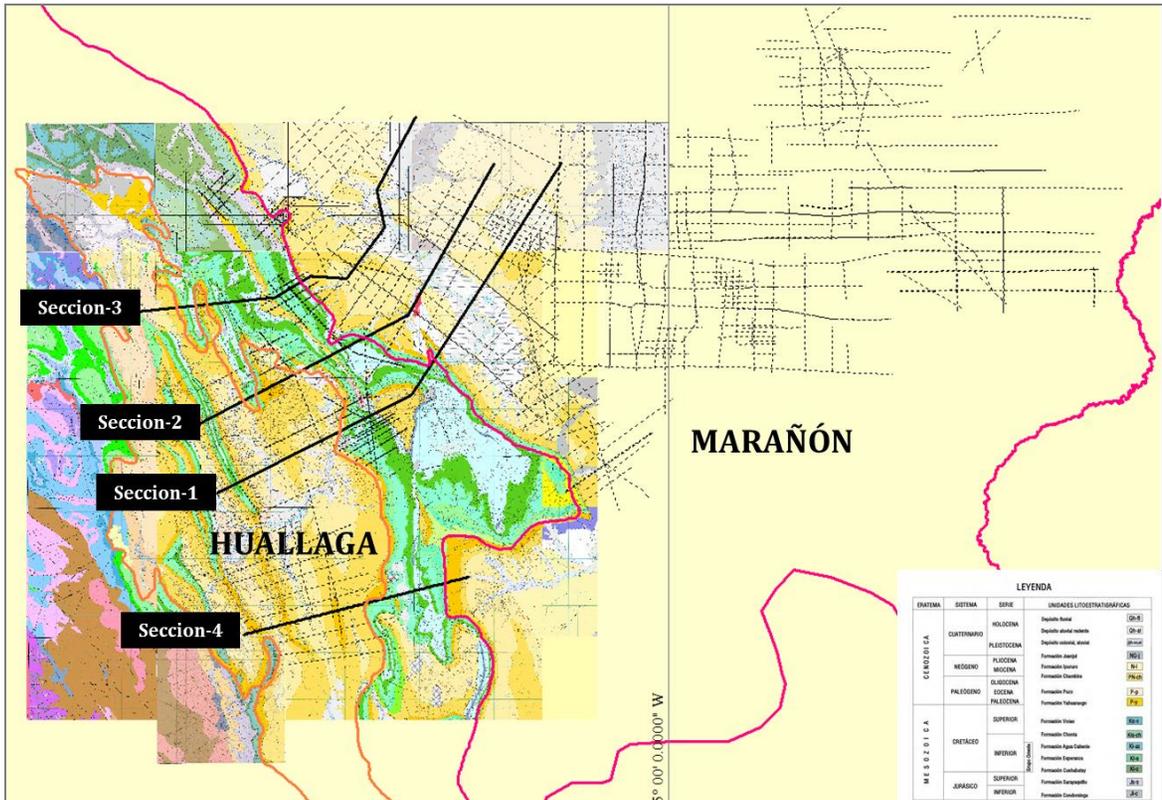
Figura 30. Distribución de la interpretación y seguimiento de horizontes en el margen Occidental de la Cuenca Marañón. Superior izquierda, horizonte tope Formación Pucará. Superior derecha, horizonte tope Formación Sarayaquillo. Inferior, horizonte Formación Mitú.



En las 133 líneas interpretadas se observaron características geológicas que representan diferentes aspectos tectónicos dentro de las Cuencas Huallaga y Marañón. Estos resultados se muestran en el capítulo 4.

3.2.3 Construcción de secciones en tiempo

Figura 31. Localización de las 4 secciones estructurales en línea negra continua e información sísmica disponible (líneas punteadas) para las Cuencas Huallaga (línea continua naranja) y Marañón (línea continua fucsia).



Posterior al proceso de interpretación sísmica, se definieron los trazos de las cuatro secciones estructurales, en donde se tuvo en cuenta la calidad y continuidad de la imagen sísmica, localización dentro de las Cuencas Huallaga y Marañón y el afloramiento de unidades estratigráficas que permitieran el amarre entre los datos sísmicos y la geología de superficie.

Las unidades estratigráficas que afloran en la Cuenca Huallaga se encuentran dentro de una serie de estructuras anticlinales apretadas y sinclinales abiertos, que en algunos sectores están cubiertas por depósitos Cuaternarios. La edad de la unidad estratigráfica más antigua que compone el núcleo de las estructuras anticlinales es Jurásico y corresponde a la Formación Sarayaquillo.

Las cuatro secciones en tiempo están compuestas por información sísmica y de pozo de la siguiente manera:

Figura 32. Información sísmica y de pozo empleada en la construcción de las 4 secciones estructurales.

	Líneas sísmicas	Pozo	Distancia proyección de pozo a la sección
SECCIÓN-1	Línea-23	Pozo - 2X	sobre la línea (0 m).
	Línea - 31		
SECCIÓN-2	Línea -24	Pozo - 1X	20 km aprox.
	Línea - 23A		
SECCIÓN-3	Línea -27	Pozo - 1X	7.3 km aprox.
	Línea-004		
	Línea - 9b		
	Línea - 13		
SECCIÓN-4	Línea - 02	Pozo - 3X	460 m.

Toda esta información fue cargada en el software 2D move, así como el mapa geológico escala 1:100000⁹¹, con el fin de poder ejecutar un ajuste entre las líneas sísmicas interpretadas en Petrel y la información de superficie (teniendo en cuenta que el mapa geológico es un dato público del cual no se hizo control de calidad en

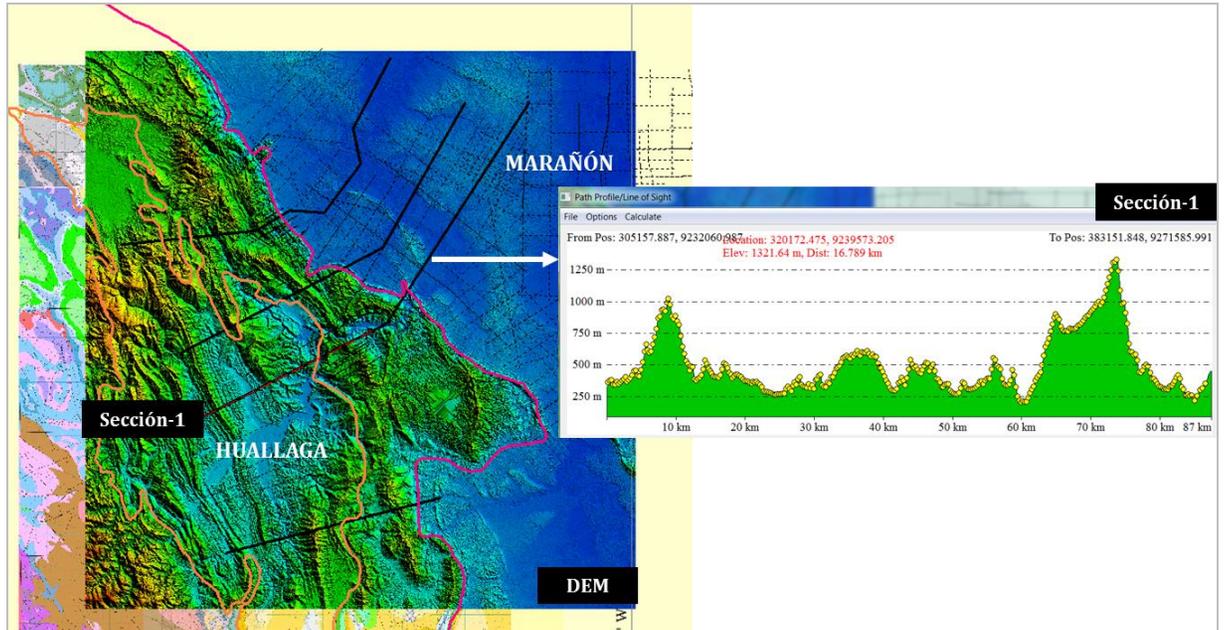
⁹¹ Ingemmet. Op. Cit.

campo), proceso para el cual fue necesario precisar todos los contactos de unidades por los cuales cruza el trazo de la sección estructural o *section trace*.

Para poder hacer la proyección desde la vista de planta (*section trace* y contactos de unidades) a una ventana de sección 2D, se requiere contar con el nivel topográfico o *path profile* de cada trazo de sección. Este procedimiento es realizado en el software Global Mapper a partir del DEM (*Digital Elevation Model*), sobre el cual se exportan los valores en metros de la elevación topográfica del terreno para cada trazo de sección (Figura 32).

Estos valores en metros del nivel topográfico de cada sección se convirtieron al dominio del tiempo (ms), con la finalidad de hacer un ajuste preliminar entre la geología de superficie y la interpretación sísmica de cada una de las secciones construidas en tiempo.

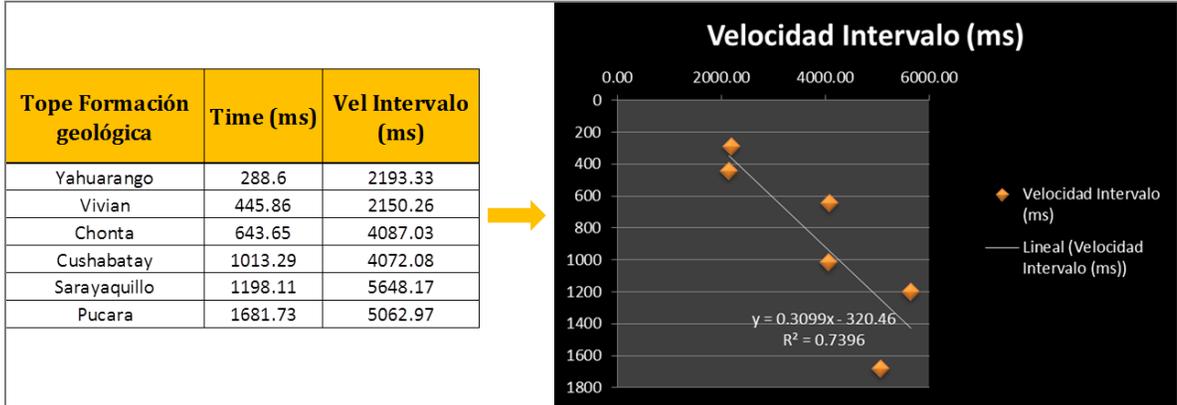
Figura 33. Izquierda, DEM (Digital Elevation Model), en línea negra continúa los trazos de las 4 secciones estructurales. Derecha. Perfil topográfico para la sección-1.



3.2.4 Conversión a profundidad. A partir de los pozos que se tuvieron en cuenta durante la construcción de las 4 secciones estructurales en tiempo (Pozo-1X, Pozo-2X y Pozo-3X), se analizaron los registros sísmicos y se determinaron las velocidades intervalo para cada una de las unidades estratigráficas interpretadas (Figura 29).

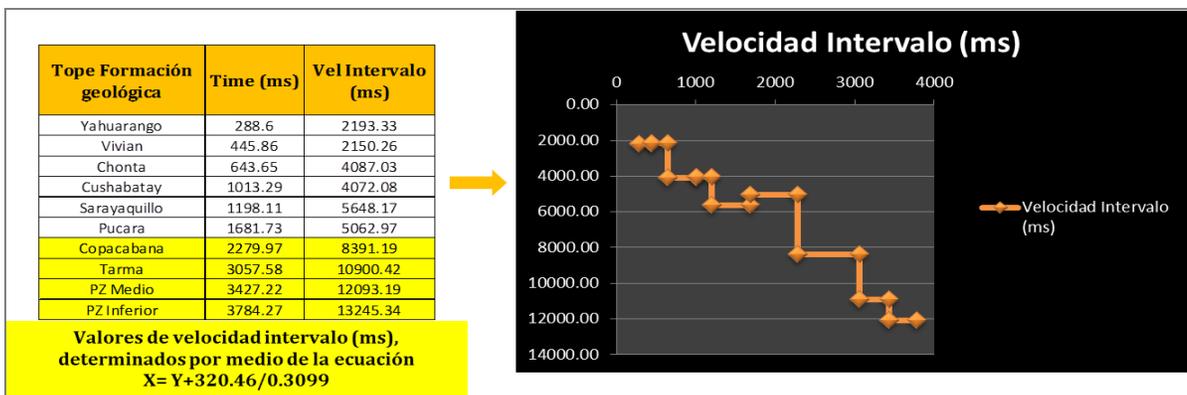
Hallar las velocidades intervalo para todas las unidades estratigráficas interpretadas en las secciones, depende de la profundidad a la cual llegue el pozo y hasta que unidad se haya perforado. El pozo Pozo-2X por ejemplo, perforo hasta la Formación Pucará (Figura 33), por lo cual es posible encontrar velocidad intervalo con datos directos medidos hasta dicho nivel.

Figura 34. Izquierda, valores de velocidad intervalo para el pozo Pozo-2X hasta la Formación Pucará. Derecha, tendencia del comportamiento de la velocidad intervalo y ecuación hallada a partir de regresión lineal.



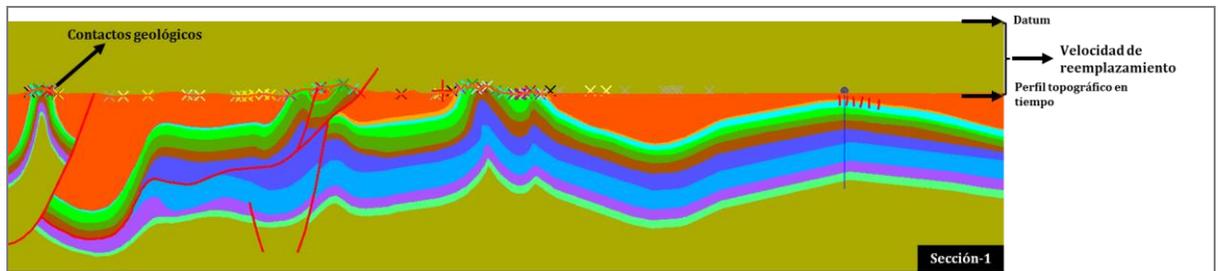
Sin embargo, realizando una regresión lineal con los datos obtenidos, es posible determinar una ecuación que permite hallar los valores de velocidad para los demás horizontes que no tienen información directa leída en el registro sísmico (Figura 34, resaltado en color amarillo).

Figura 35. Izquierda, valores de velocidad intervalo determinados para todos los horizontes interpretados. Se resalta en color amarillo datos hallados a partir de la ecuación mostrada. Derecha, tendencia incremental de la velocidad intervalo (ms) versus el tiempo (OWT- ms).



La herramienta de conversión a profundidad en el software 2D move, brinda la opción de ejecutar el proceso por medio de áreas (polígonos), a las cuales se les puede asignar un valor de velocidad puntual. Por lo tanto, es necesario la construcción y edición de polígonos para cada una de las unidades que se interpretan en tiempo en cada sección estructural (Figura 35).

Figura 36. Generación de polígonos para cada una de las unidades geológicas interpretadas en la sección estructural-1 en tiempo. Se observan con equis de colores los contactos geológicos proyectados del mapa geológico y el perfil topográfico en tiempo.



Eventualmente, al cerrar la interpretación de cada sección estructural, es necesario determinar límites al tope y base de la misma, por lo cual en el límite superior se debe asumir un valor de velocidad (denominada aire en este caso), que es igual a 2200 m/s y que corresponde a la velocidad de reemplazamiento (velocidad entre el *datum* y el perfil topográfico).

Figura 37. Base de datos para la seccion-1 creada en el software 2D move.

Horizon	Colour	Velocity
Aire		2200
Pozo		2092.365743
Yahuarango		2193.329709
Vivian		2150.26091
Chonta		4087.034032
Cushabatay		4072.078671
Sarayaquillo		5648.167108
Pucara-Mitu		5062.973662
Copacabana		8391.190707
Tarma		10900.41949
PZ-Medio		12093.191352
PZ-Inferior		13245.337206

De igual forma, se requiere generar una base de datos dentro del programa que permite tener actualizado *templates* de color, nombre y valores de velocidad (ya determinados, Figura 34) (Figura 36).

3.3 FASE III

Teniendo las secciones estructurales en el dominio de profundidad, es necesario editar y reajustar los horizontes previamente interpretados con la información de superficie (contactos geológicos y valores de buzamiento) y de pozo (Pozo-2X para la seccion-1, Pozo-1X en la seccion-2 y seccion-3, Pozo-3X para la seccion-4).

La construcción de las 4 secciones estructurales adapta conceptos básicos de tectónica y balanceo de secciones definidos por Dahlstrom⁹² y Wilkerson (2001).

3.3.1 Balanceo de secciones. Durante esta etapa se utilizó la herramienta de modelamiento estructural del software 2D move (licencias académicas suministradas por la Universidad Industrial de Santander). Este programa cuenta con múltiples algoritmos que permiten modelar/simplificar procesos geométricos y mecánicos necesarios durante la generación de estructuras geológicas en la deformación. La selección del algoritmo indicado para el balanceo de secciones, es determinado por la mecánica de los horizontes individuales y las condiciones del contexto geológico (*Midland valley overview*, 2015).

Para el balanceo por longitud de línea y de área pueden emplearse los siguientes algoritmos:

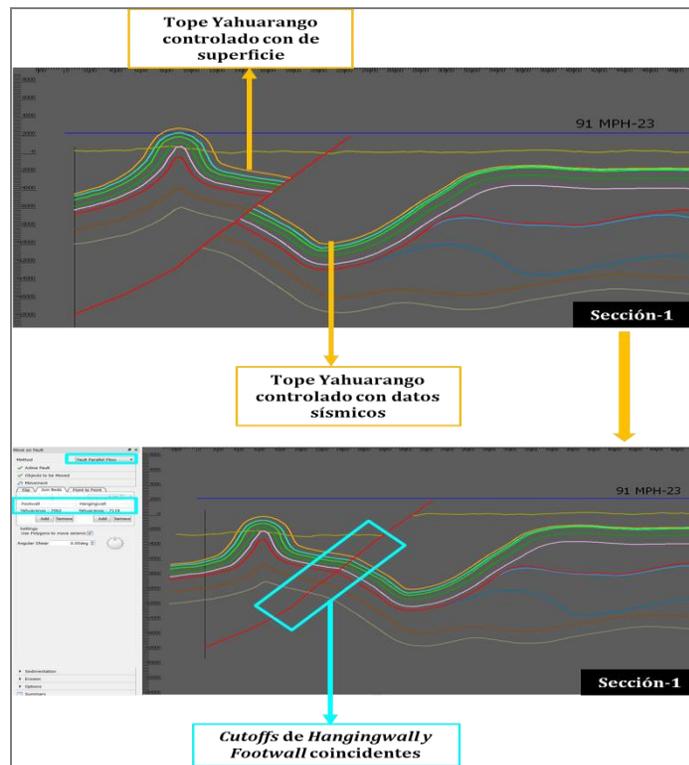
- *Line Length Unfolding.*
- *Fault Parallel Flow.*
- *Flexural Slip Unfolding.*
- *Simple Shear Unfolding.*

En este caso para las cuatro secciones estructurales construidas, se utilizó el algoritmo de *Fault Parallel Flow*, aplicando la técnica de *join beds*, debido a que en todas las secciones se cuenta con algún horizonte que está controlado en superficie con el mapa geológico y en subsuelo con los datos sísmicos (Figura 37).

⁹² DAHLSTROM, C.D.A., Balanced cross sections. Canadian Journal of Earth Sciences. 6, pp. 743–757. 1969

Según Dahlstrom⁹³, existen dos maneras en las cuales los desplazamientos no sean consistentes, el primero corresponde a un intercambio entre el acortamiento por plegamiento y desplazamiento de las fallas. El segundo, hace referencia a mecanismos imbricados.

Figura 38. Superior, algoritmo de Fault Parallel Flow, en estado previo. Inferior, Fault Parallel Flow después de aplicado el método de join beds, teniendo en cuenta el control geológico sobre el tope de la Formación Yahuarango utilizado como guía.

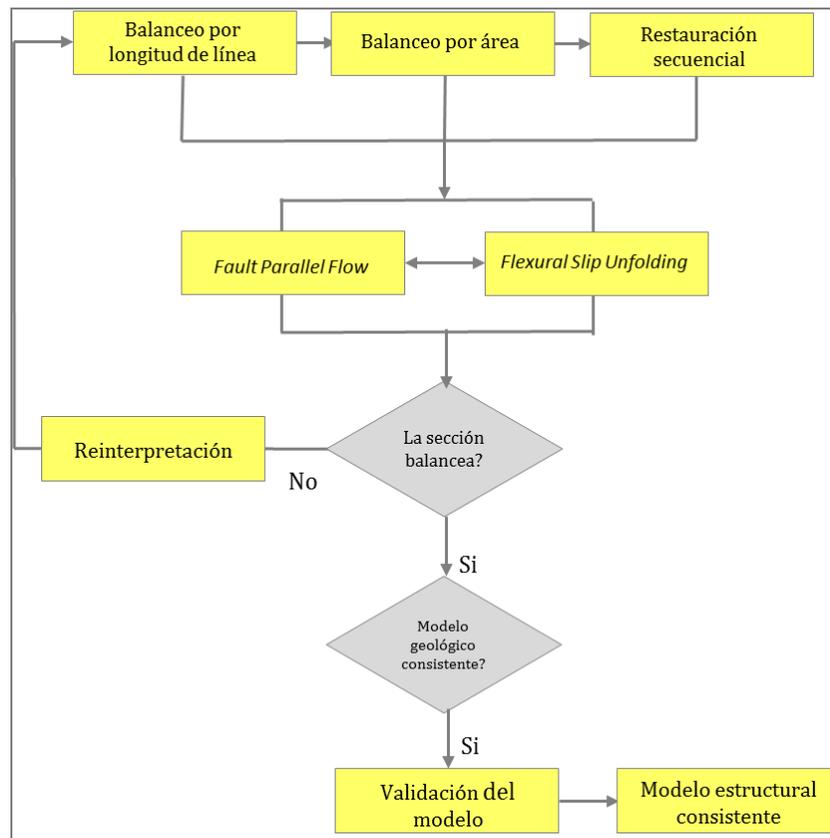


⁹³ Ibid

3.3.2 Restauración cinemática. El proceso de restitución cinemática consiste en definir diversas etapas mediante el cual las cuatro secciones estructurales construidas, transcurren entre estados intermedios; partiendo de un estado inicial hasta un estado no deformado.

Esta restauración se efectuó mediante el empleo de dos algoritmos disponibles en el software 2D move; *Flexural Slip Unfolding* y *Fault Parallel Flow*, que se ejecutan teniendo en cuenta condicionantes que dependen del balanceo de la sección como tal y si corresponde a un modelo geológico consistente (Figura 38).

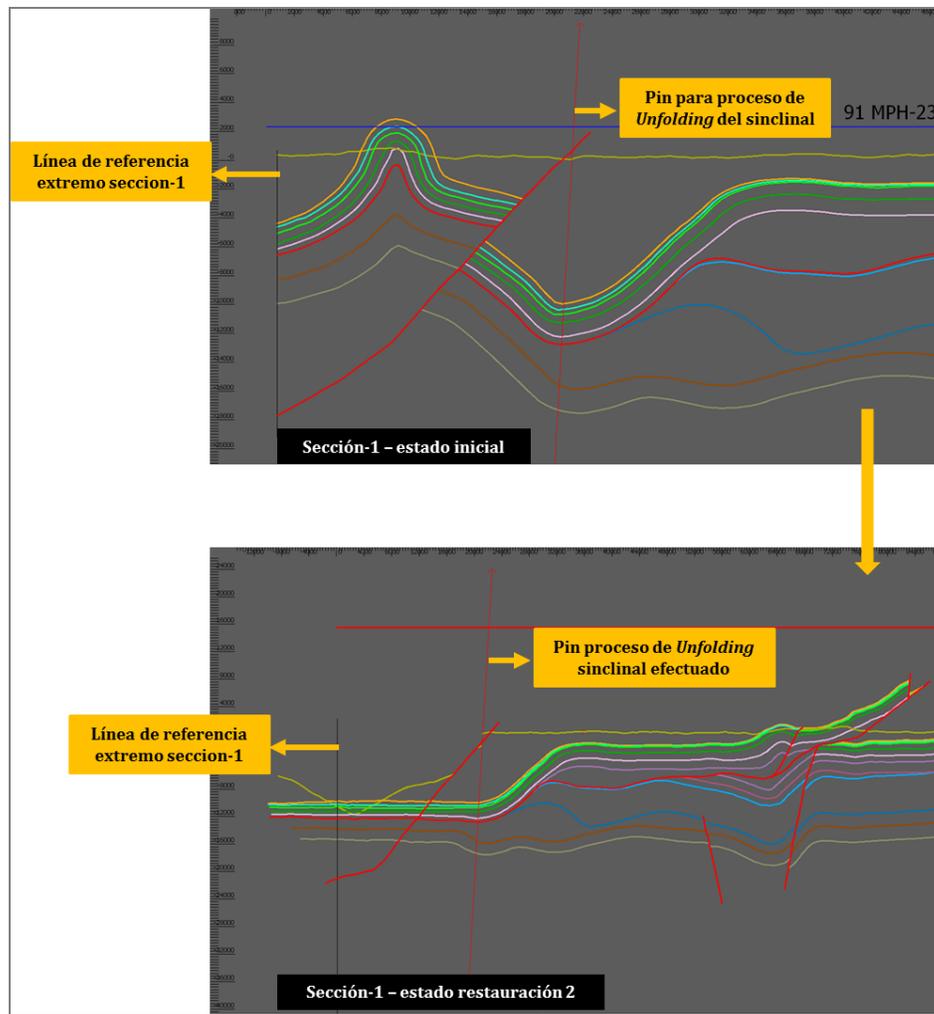
Figura 39. Flujograma adaptado según los algoritmos disponibles en el software 2D move, empleados durante la etapa de restauración cinemática



Fuente: Modificado de www.mve.com.

De hecho, es importante tener en cuenta que el desarrollo de las interpretaciones resultantes están ligadas con la calidad y cantidad de los datos con los que se construye una sección estructural, así como; calidad del mapa geológico utilizado, imagen sísmica, datos de pozo y cantidad de datos de buzamiento.

Figura 40. Ejemplo proceso de restauración cinemática en la sección-1. Superior, estado inicial mostrando la línea de referencia al extremo que no debe moverse y la localización del pin a través del eje axial del sinclinal. Inferior, proceso de *Fault Parallel Flow*, para el *Hangingwall* de la estructura anticlinal y *Flexural Slip Unfolding* para la estructura sinclinal.



El algoritmo de *Fault Parallel Flow*, se empleó con la finalidad de obtener un ajuste entre los *cutoffs* del *Hangingwall* y *Footwall* respectivamente, en donde es vital encontrar una consistencia entre geometría y espesores.

Mientras que para las estructuras referentes a anticlinales y sinclinales, se manejó el algoritmo de *Flexural Slip Unfolding*, estableciendo un par de líneas de referencia en los extremos de la sección, las cuales no podrán ser utilizadas ni movidas durante el proceso de restauración y localizadas en áreas donde no se requiera efectuar desplazamiento de falla y/o Unfolding.

Asimismo, se deben generar líneas de referencia (pin), atravesando la cresta de la estructura (Figura 39), simulando un plano axial entre los sinclinales y anticlinales perpendiculares a las capas que lo componen⁹⁴.

3.3.3 Modelamiento 3D. Esta etapa consiste en exportar las cuatro secciones construidas e integrarlas por medio de la generación de un modelo estructural tridimensional coherente. Para esto, es necesario tener definida la base de datos de horizontes (Figura 36) y establecer la nomenclatura, continuidad y desplazamientos de las fallas que afectan la estructuración de las secciones.

Esta organización de datos, facilita la generación de superficies en profundidad tanto de fallas como horizontes. Además, es prudente verificar que los elementos se encuentren muestreados constantemente, haciendo *resample* a cada uno sin afectar la geometría.

⁹⁴ Ibid

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el estudio de investigación, se relacionan directamente con el desarrollo de la fase II y fase III de la metodología de trabajo implementada (Figura 17), soportada por un flujograma continuo e interactivo, que finalmente permite la definición del estilo estructural en el margen Occidental de la Cuenca Marañón y la Cuenca Huallaga. A partir de la interpretación en tiempo y profundidad de más de 7000 km de datos sísmicos, balanceo, restauración cinemática de 4 secciones estructurales regionales e integración en un modelo tridimensional coherente.

4.1 ESTILO ESTRUCTURAL MARGEN OCCIDENTAL CUENCA MARAÑÓN

El análisis geométrico y cinemático en el margen Occidental de la Cuenca Marañón, se define a partir de la interpretación de datos sísmicos 2D que permiten complementar hacia el oriente las 4 secciones regionales construidas (Figura 31).

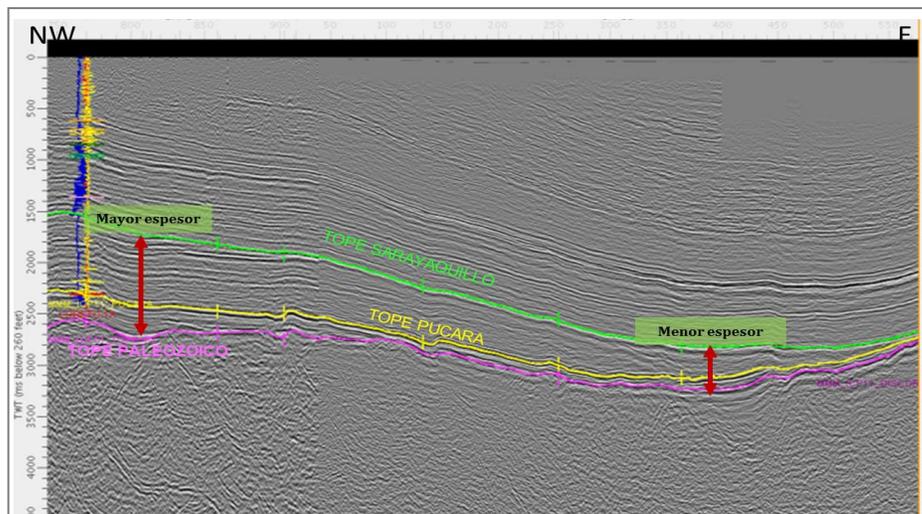
4.1.1 Secciones sísmicas Cuenca Marañón. Los niveles interpretados en los datos sísmicos localizados en la Cuenca Marañón, hacen referencia a horizontes claves que en su mayoría son de edad pre-Cretácico, dentro de ellos encontramos el tope de las formaciones; Sarayaquillo, Pucará – Mitú, Copacabana, Tarma, Cabanillas, Contaya.

Estas unidades, no presentan continuidad lateral constante dentro de la cuenca, lo cual evidencia cambios de espesor (Figura 40) que finalmente definen el borde de la cuenca para algunas de estas unidades para una edad determinada (p.e Formación Sarayaquillo y Pucará). El relleno de la Cuenca Marañón presenta un

importante espesor de series sedimentarias de edad Neógeno, que disminuyen progresivamente hacia el Este y el Sur (Figura 41)⁹⁵.

Empleando información de pozo, se observaron paquetes de reflectores característicos, con geometrías tabulares para las unidades estratigráficas al tope de la Formación Sarayaquillo, Vivian y Yahuarango por ejemplo (Figura 42), permitiendo un seguimiento confiable de los horizontes interpretados y ajustados. Teniendo en cuenta que la Cuenca Marañón corresponde a la zona menos deformada del sistema de Cuenca de antepaís nor-Amazónica (*foredeep depozone*) y que localmente se encuentra deformada por inversiones tectónicas de grabenes pre-orogénicos Paleozoico y Mesozoicos.⁹⁶

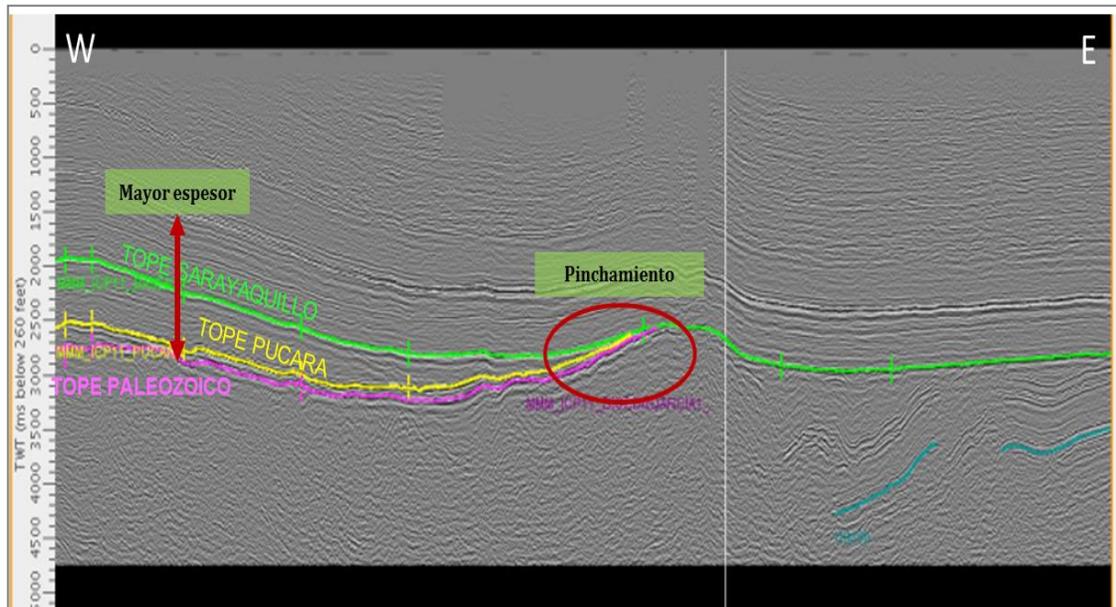
Figura 41. Sección sísmica compuesta entre las líneas Línea-14 y Línea-11. Se observa la disminución de espesor de la Formación Sarayaquillo y el Grupo Pucará hacia el este.



⁹⁵ GIL RODRÍGUEZ, Op. Cit.

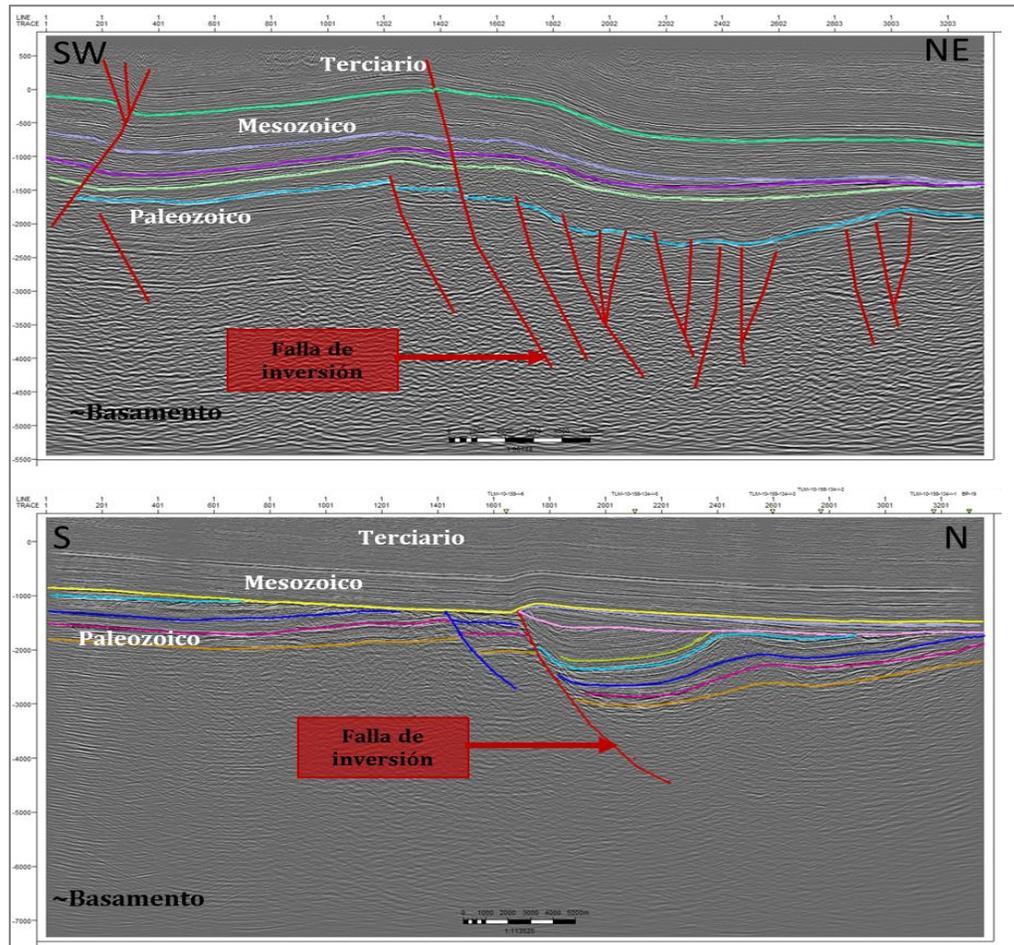
⁹⁶ BABY, P. et al., Op. Cit.

Figura 42. Pinchamiento del Grupo Pucará contra rocas de edad Paleozoico. Disminución de espesor hacia el Este en la línea-12.



El estilo estructural del margen Occidental de la Cuenca Marañón, está definido por la inversión de una serie de fallas normales que afectan rocas de edad Paleozoico. Estas fallas son locales y no presentan mayor continuidad. Sin embargo, algunas de ellas evidencian mayor reactivación que otras, ya que deforman rocas de edad Cretácico, de manera que en algunos sectores se alcanza a romper la secuencia y en otras solo se deforma (Figura 42).

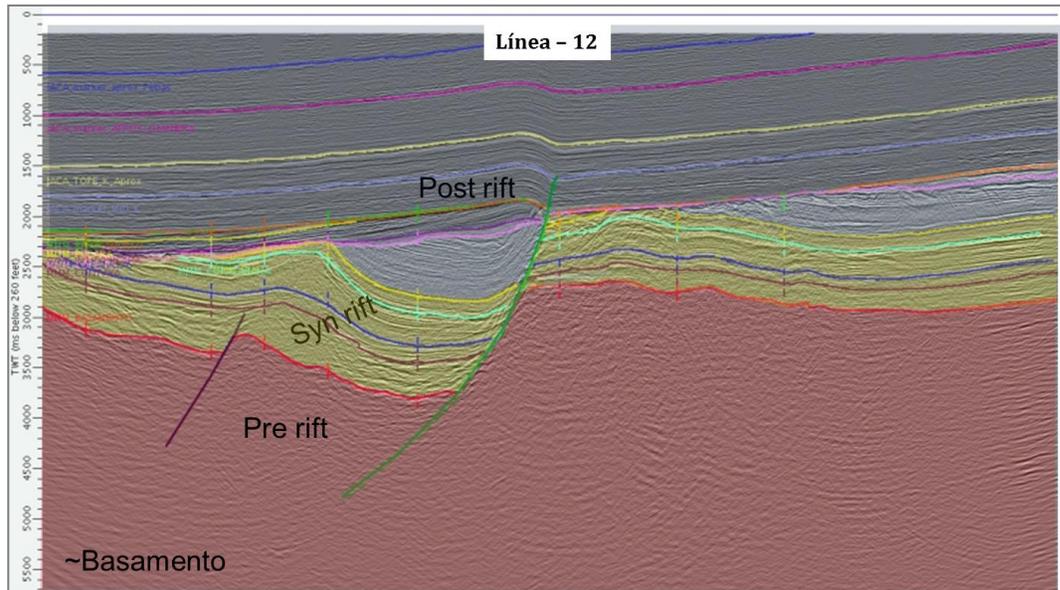
Figura 43. Superior, línea sísmica Linea-08, se observa falla de inversión listrica afectando rocas del Terciario. Inferior, línea sísmica Linea-15, afectando rocas de edad Paleozoico, sin embargo, se observa deformación menos intensa de rocas de edad Cretácico. Se ejemplifica, paquetes de reflectores tabulares típicos de rocas del Cretácico en la Cuenca Marañón.



De igual forma, hacia el sector Sur de la Cuenca Marañón, se contemplan estructuraciones típicas de tectónica extensional, reflejadas en el desarrollo de una geometría sinclinal que evidencia procesos sin-depositacionales en sincronía con el movimiento normal del fallamiento (Figura 43), gracias a la excelente calidad de los datos sísmicos disponibles en el sector. Estos eventos se limitan por

la presencia de discordancias que marcan la relación tectono - sedimentaria del rift.

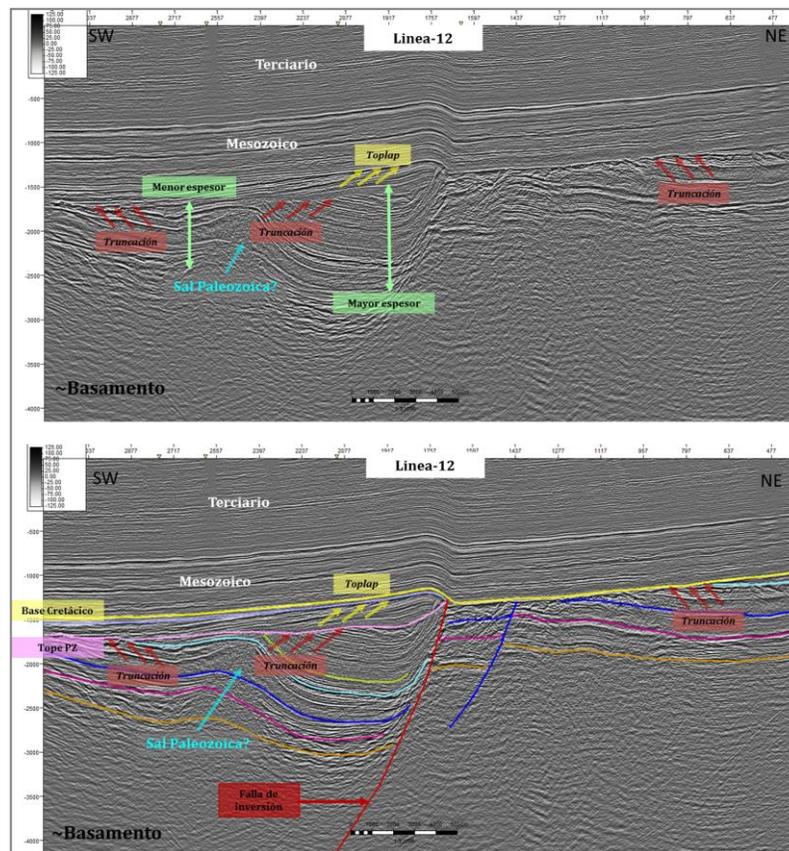
Figura 44. Evolución de tectónica extensional a tectónica compresiva. Se observa falla de inversión, afectando unidades de edad Cretácico y Terciario.



La etapa pre-rift, particularmente marca el límite discordante entre el basamento cristalino y la cobertera sedimentaria, afectada generalmente por fallas normales de basamento y dominada por tectónica tipo *thick skin* (Figura 42). Las características distintivas de la etapa syn-rift (Permo-Triásico) se observan claramente en las secciones sísmicas, en donde se resaltan terminaciones estratigráficas tipo *toplap* contra unidades de la secuencia post-rift, truncaciones que marcan eventos erosivos durante el cese de la sedimentación, geometría con espesores mayores en cercanía del fallamiento y espesores menores que se

adelgazan hacia el sector opuesto (Figura 44), controlados por el movimiento de la falla normal.⁹⁷

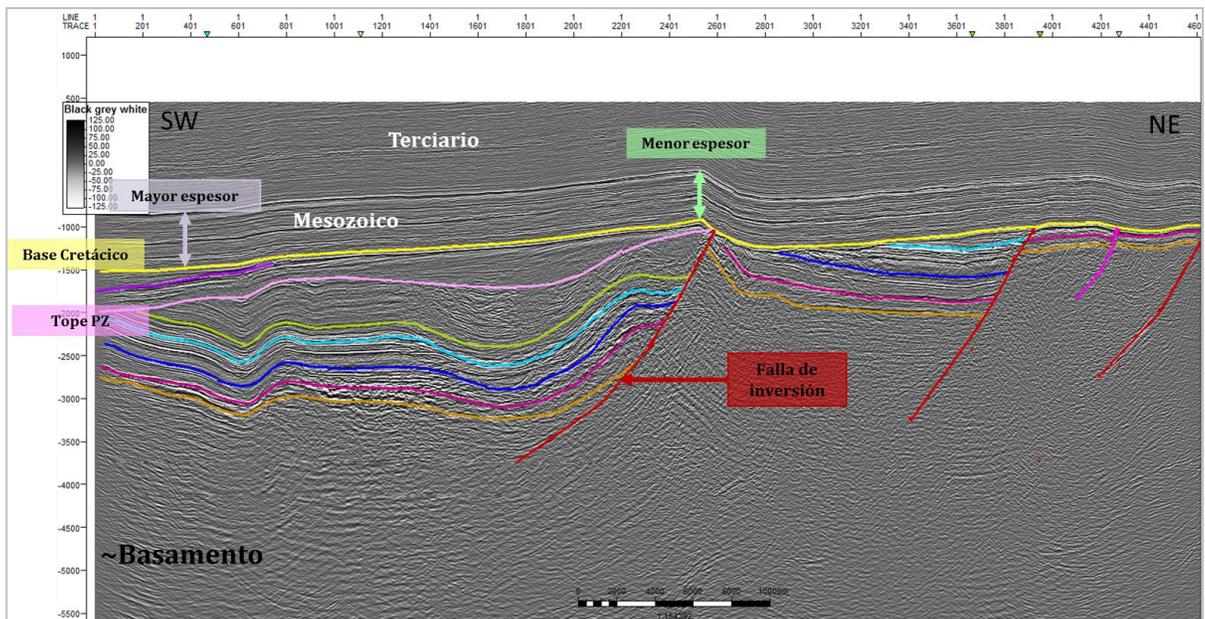
Figura 45. Geometría característica de evento tectónico de inversión positiva. Se observan terminaciones estratigráficas tipo toplap (flechas en amarillo) que limitan la etapa syn-rift del post-rift. Así como truncaciones (flechas en rojo) asociadas a periodos de erosión. También, la falla de inversión (color rojo), con acumulación de sedimentos en la etapa extensiva que muestran variación de espesor.



⁹⁷ MCCLAY, K. R. Tectonic regimes and fault systems: Structural geology for petroleum exploration. Volume I. University of London, pp. 173-182. 2000

Generalmente, en la etapa *post-rift* (Jurásico Tardío), se conservan espesores en la serie sedimentaria y no se registra alguna evidencia de fallamiento normal, simplemente, pueden destacarse estructuras que son consecuencia del comportamiento compresivo en la cuenca⁹⁸. Asimismo, predominan series depositadas discordantemente durante el inicio de la etapa compresiva, las cuales reflejan un estadio primario un poco más complejo asociados al proceso de inversión de fallamiento normal, inherente con la geometría de deformación anticlinal; que es afectada durante la propagación y plegamiento de la falla de inversión reflejando variación de espesores con respecto al eje de la estructura y los flancos (Figura 45).

Figura 46. Evidencia de estructuración producto del proceso de inversión tectónica positiva. En el pliegue generado se observan diferencias de espesor entre la cresta (menor, en color verde) y espesor en los flancos (mayor, en color lila).



⁹⁸ NEMCOK, M. SCHAMEL, S. GAYER, R. Thrustbelts. Structural Architecture, Thermal Regimes and Petroleum Systems. Cambridge University Press, pp. 58-109. 2005.

Hacia el Norte, la prominencia del proceso de inversión es más considerable que en el sector del Sur. Diferenciándose en la afectación de la serie post-rift (Nemcok et al. 2005). La estructura anticlinal de crecimiento generada durante estas etapas, es producto de una inversión estructural positiva que refleja fallamiento al Norte (Figura 46), mientras que al Sur no (Figura 47).

Figura 47. Superior, estructura anticlinal generada durante el proceso de inversión tectónica positiva, evidenciando menor grado de afectación (plegamiento). Además reactivación de fallas normales profundas y disminución de las series *syn-rift* hacia el Este. Inferior, efecto del proceso de inversión tectónica positiva con mayor prominencia al Norte, se observa la estructura fallada y más apretada, adelgazamiento de unidades contra el basamento.

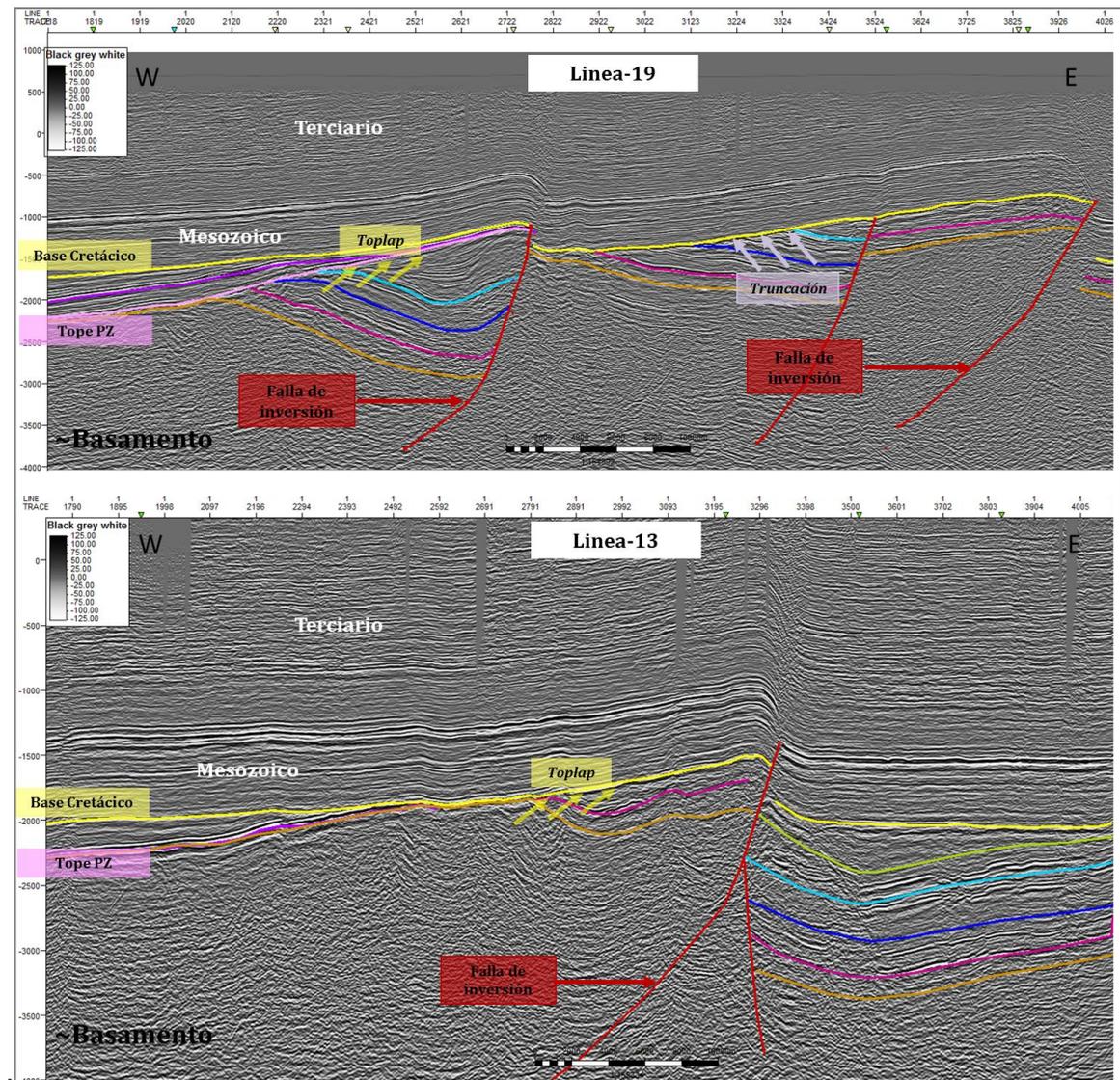
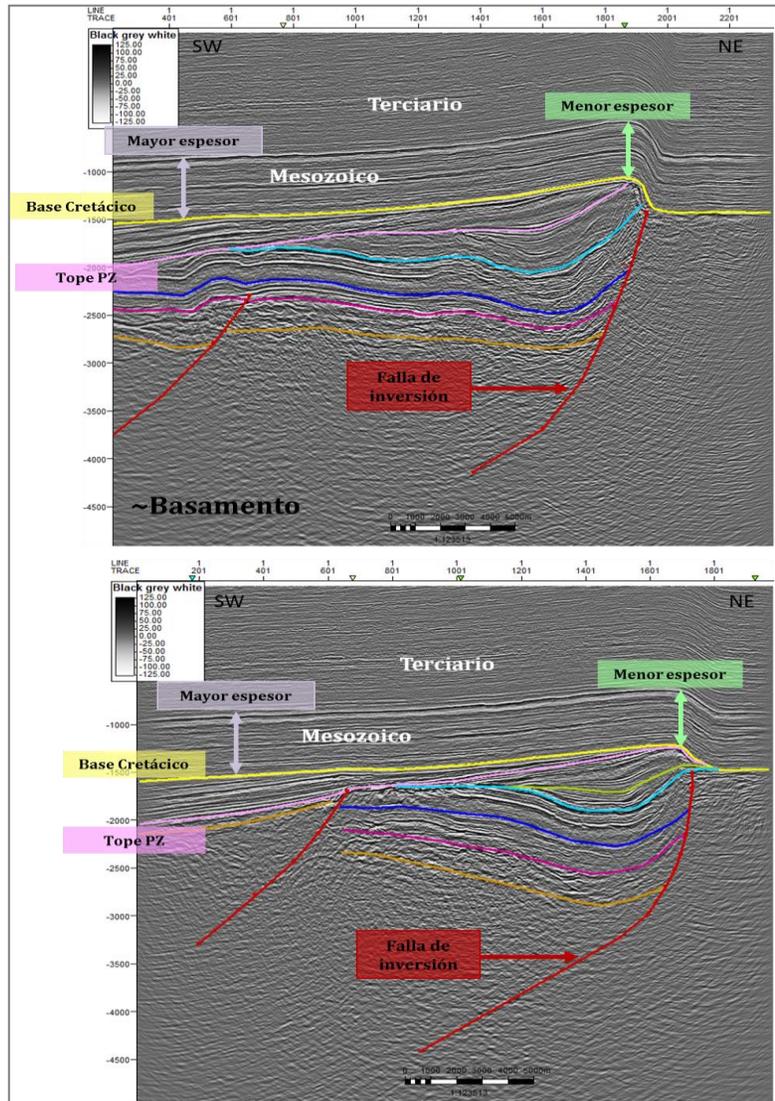


Figura 48. Superior - Inferior, estructura anticlinal generada durante el proceso de inversión tectónica positiva, evidenciando menor grado de afectación (plegamiento) hacia el Sur. En el pliegue generado se observan diferencias de espesor entre la cresta (menor, en color verde) y espesor en los flancos (mayor, en color lila).



4.2 ESTILO ESTRUCTURAL CUENCA HUALLAGA

Para la Cuenca Huallaga, el análisis de la geometría es más complejo, ya que la información sísmica disponible, tiene menor calidad de imagen. Además de contar con poca cantidad de líneas de rumbo, que permitan llegar a una continuidad y ajuste de los horizontes interpretados.

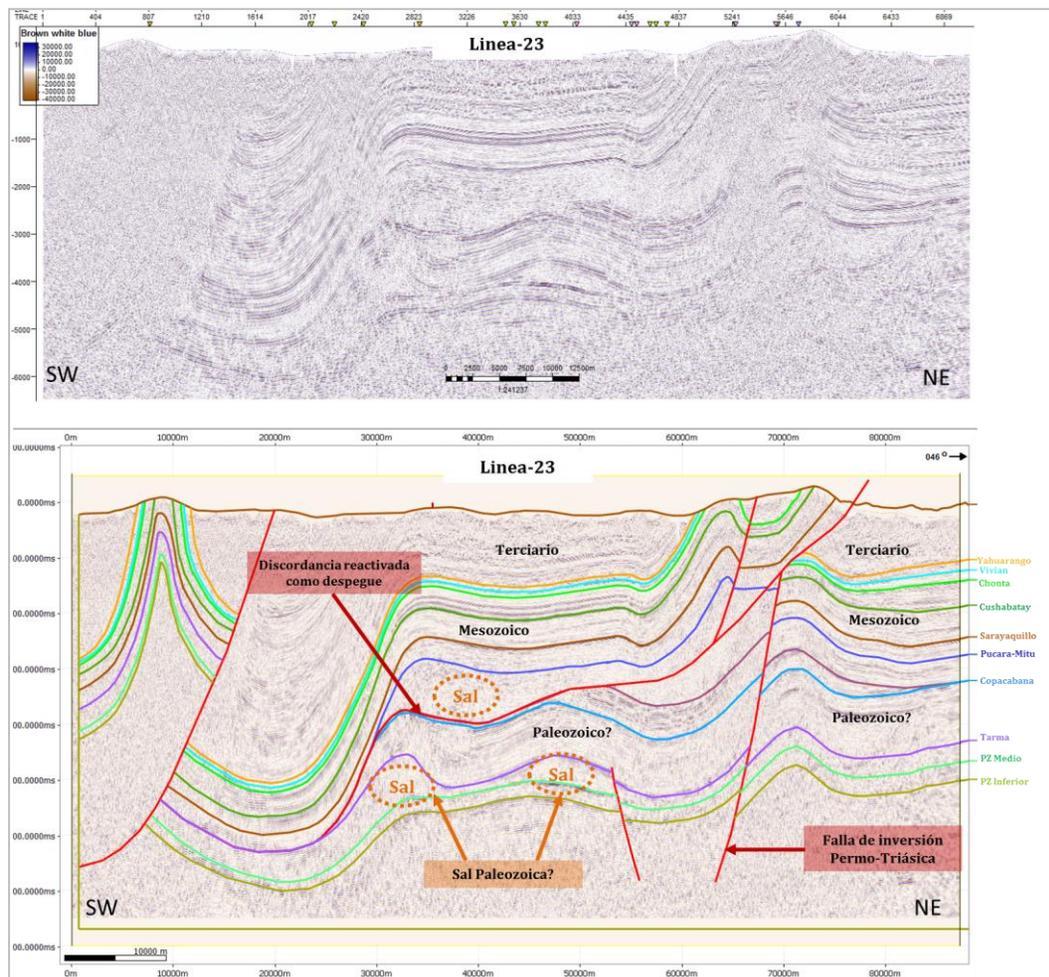
Las líneas sísmicas que componen y complementan en el sector Huallaga las 4 secciones estructurales se localizan hacia el Oeste, y se muestran a continuación.

4.2.1 Secciones sísmicas Cuenca Huallaga. Con respecto a la correspondencia de los horizontes interpretados en la Cuenca Huallaga, se buscó una correlación a nivel sísmico, que permitiera prolongar los niveles asociados a las unidades más representativas de la cuenca; ya definidas en el margen Occidental de Marañón. Teniendo en cuenta que la estratigrafía varía lateralmente y que hay correlación de series litoestratigráficas (Figura 15). Lo anterior, en vista de no contar con información que estuviera superpuesta o cruzara los datos sísmicos localizados en los bordes geográficos de la Cuenca Huallaga y Marañón. El caso, más cercano evidenciado, y con el cual se realizó esta coincidencia entre horizontes, representa una yuxtaposición entre dos líneas sísmicas que marcan estos límites geográficos.

Los horizontes interpretados en la Cuenca Huallaga, trabajados durante el proceso de seguimiento de horizontes; corresponden al tope de las formaciones: Yahuarango, Vivian, Chonta, Cushabatay, Sarayaquillo, Pucará - Mitú, Copacabana, Tarma, dos representativos para el Paleozoico Medio (Ambo? – Cabanillas?) y Paleozoico Inferior como límite basal de la interpretación.

El estilo estructural en la Cuenca Huallaga, está definido por la influencia de una tectónica dominante tipo *thin skin*, con influencia de inversión tectónica. Asimismo, se observan pliegues de gran longitud de onda, como las culminaciones que exponen basamento y son difícilmente explicables por este tipo de tectónica.⁹⁹

Figura 49. Superior, sección sísmica en tiempo de la línea-23. Inferior, interpretación sísmica en tiempo realizada para la línea-23. Se observa el despegue regional que genera el cabalgamiento de Chazuta, reactivado a través de un nivel discordante, asociado a las evaporitas del Grupo Pucará.



⁹⁹ HERMOZA, W et al., Op. Cit.

Sin embargo, la evidencia de inversión tectónica positiva se representa a partir de la influencia en la reactivación de una antigua falla normal de edad Permo-Triásica, que es posteriormente decapitada por estructuras del frente de deformación que se relacionan con la evolución de la etapa compresiva (Figura 48).

Además, se caracteriza por la presencia de un despegue regional inferido sobre los niveles evaporíticos Triásico – Jurásicos del Grupo Pucará, denominado dentro de la nomenclatura tectónica y regional del Perú; como el cabalgamiento de Chazuta^{100, 101, 102, 103, 104, 105, 106} Esta estructura está controlada con datos sísmicos, en donde es claramente observable, dada la buena calidad de la línea-23 (Figura 48), y ajustada con geología de superficie¹⁰⁷. También, representa el frente de deformación de la Cuenca Huallaga y se caracteriza como un despegue casi horizontal con desplazamiento aproximado de 13 km, el cual es posteriormente deformado dando origen a las estructuras de Biabo, relacionadas con la tectónica compresiva de la orogenia Andina.

¹⁰⁰ Ingemmet. Op. Cit.

¹⁰¹ GIL RODRÍGUEZ, Op. Cit.

¹⁰² HERMOZA, W et al., Op. Cit.

¹⁰³ BABY, P. et al., Op. Cit.

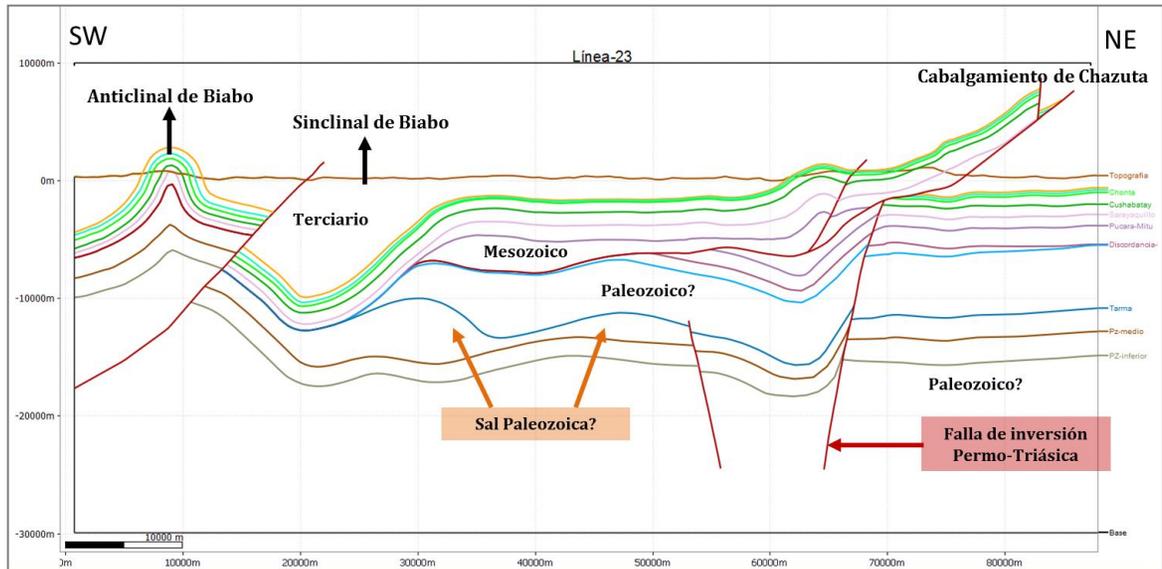
¹⁰⁴ PARSEP. Op. Cit.

¹⁰⁵ PARSEP. 2001. Op. Cit.

¹⁰⁶ EUDE et al. Op. Cit.

¹⁰⁷ Ingemmet. Op. Cit.

Figura 50. Interpretación en profundidad realizada para la línea-23. Se observa el despegue regional que genera el cabalgamiento de Chazuta, reactivado a través de un nivel discordante, asociado a las evaporitas del Grupo Pucará. También, la falla de inversión Permo-Triásica y las estructuras Neógenas de sinclinal y anticlinal de Biabo.



Además del cabalgamiento de Chazuta, dentro de las estructuras interpretadas en este trabajo de investigación, se reconocieron el anticlinal de Biabo y sinclinal de Biabo, definidos en trabajos previos^{108, 109, 110, 111, 112, 113, 114}. El sinclinal de Biabo, observado en la mayoría de las líneas que cubren geográficamente su emplazamiento en la Cuenca Huallaga (Figura 49), es resultado de la depositación sin-orogénica de sedimentos que rellenan la cuenca, reflejando una deformación

¹⁰⁸ Ibid

¹⁰⁹ GIL RODRÍGUEZ, Op. Cit.

¹¹⁰ HERMOZA, W et al., Op. Cit.

¹¹¹ BABY, P. et al., Op. Cit.

¹¹² Parsep, 2000 Op. Cit.

¹¹³ Parsep, 2001. Op. Cit.

¹¹⁴ EUDE et al. Op. Cit.

tardía al afectar unidades de edad Neógeno; que para esta estructura están dimensionados en aproximadamente 7500 metros de espesor.¹¹⁵

Mientras que la otra estructura de Biabo, comprende un anticlinal de rampa¹¹⁶ que deforma unidades del Neógeno (Figura 49). El desplazamiento de la falla se hace prominente hacia el Norte, llegando a valores de 4 km, mientras que en el Sur es menor con valores de 0.2 km.

4.3 SECCIONES ESTRUCTURALES CUENCA HUALLAGA - MARAÑÓN

A partir de la construcción de cuatro cortes o secciones estructurales geológicas regionales (Localización, figura 31), es posible definir la geometría de estructuración de las Cuencas Huallaga y margen Occidental de Marañón.

Empleando información existente, referente a datos de superficie y subsuelo. Incluso, incorporando las interpretaciones realizadas en los 7000km de sísmica 2D, que contribuyeron con la caracterización de estructuras locales y terminaciones estratigráficas que se integran al entendimiento de la evolución tectónica regional de la zona.

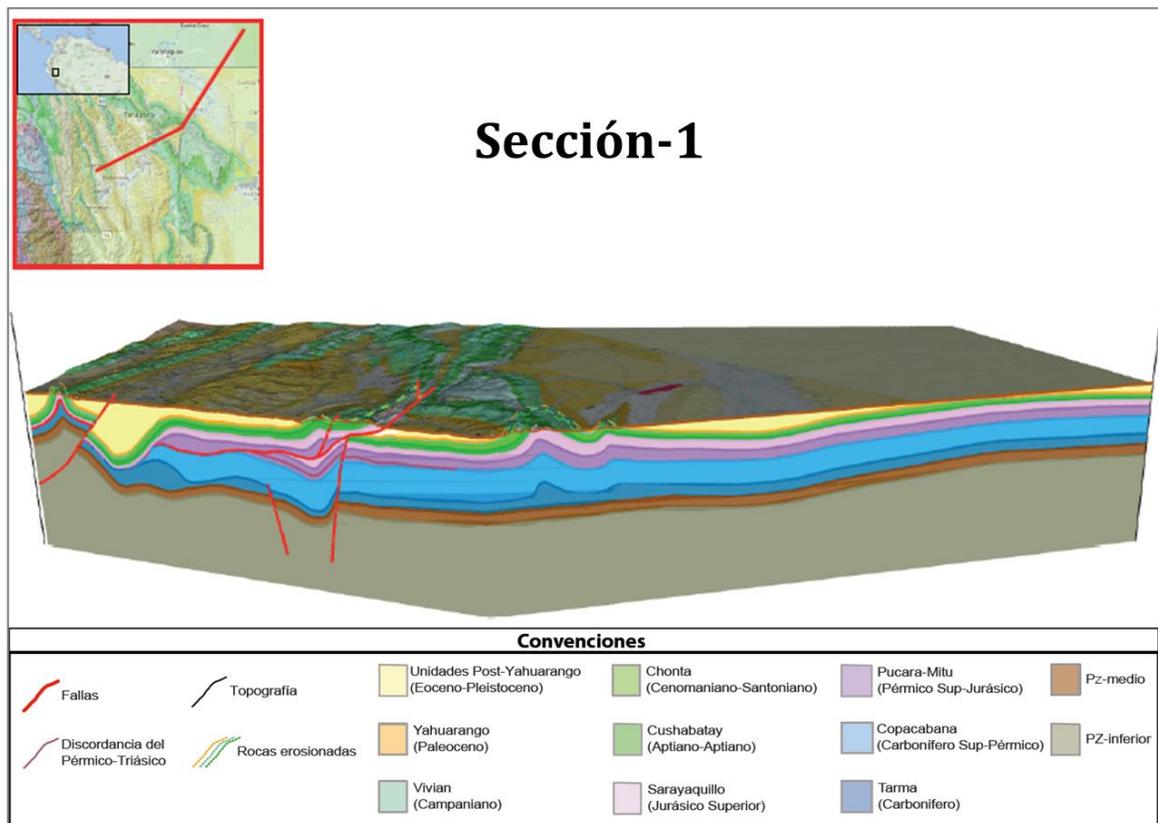
Las cuatro secciones estructurales se constituyen como base principal de información sísmica y superficie (Figura 32), se complementan y ajustan; cuando se cuenta con los datos en totalidad o se emplea solo el mapa geológico donde hay ausencia de sísmica.

¹¹⁵ GIL RODRÍGUEZ, Op. Cit.

¹¹⁶ POBLET, J. Geometría y cinemática de pliegues relacionados con cabalgamientos. Departamento de geología, Universidad de Oviedo, pp. 127-135. 2004.

4.3.1 Sección-1. La sección-1 comprende dos tramos rectos unidos en diferente ángulo (Figura 33); hace parte de la Cuenca Huallaga en su trazo Oeste (WSW-ENE) y hacia el sector del margen Occidental de la Cuenca Marañón abarca el trazo Este de la sección. Tiene una orientación preferencial SW-NE y una longitud de 214 km (Figura 50).

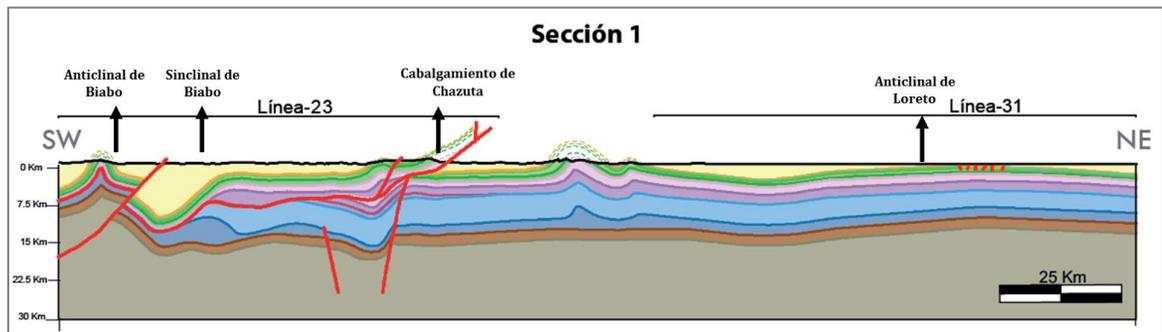
Figura 51. Sección-1 en profundidad ajustada con el mapa geológico y el DEM (Digital Elevation Model).



Esta sección se caracteriza por mostrar claramente en la información sísmica un despegue regional que evoluciona como el cabalgamiento de Chazuta, el cual aprovecha su desarrollo a partir de los niveles de evaporitas que componen el Grupo Pucará (Triásico – Jurásico). Esta deformación interrumpe la evolución de la falla de inversión reactivada (Figura 50). La tectónica y evolución de las

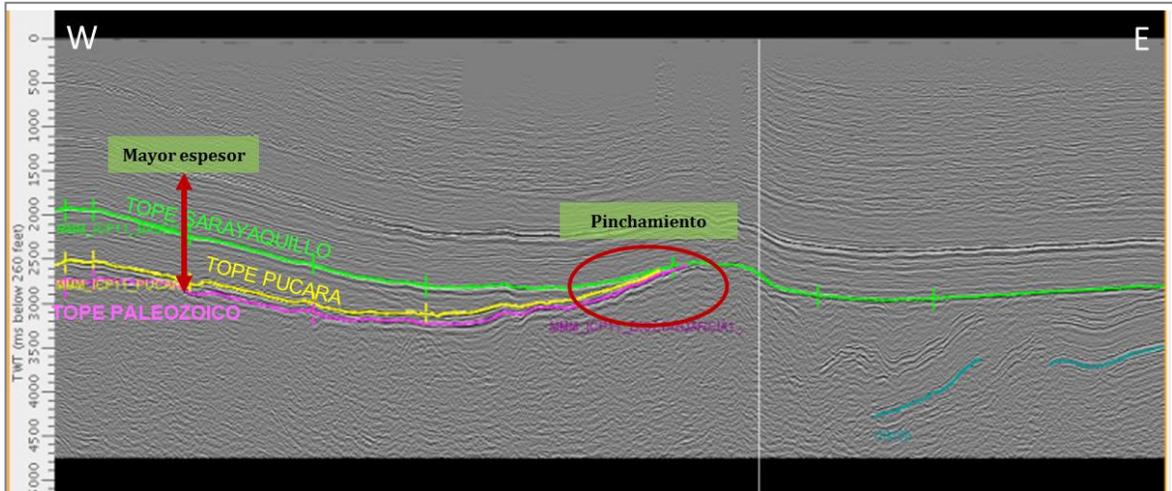
estructuras de edad Mesozoico, está condicionada por procesos de halogénesis; sujetos a la existencia de dichos niveles salinos, los cuales migran en dirección Este, reflejando una variación de espesor; que se hace menor en zonas próximas al límite de la zona Subandina, adelgazándose hasta que tienen a desaparecer al nivel de la parte media de la Cuenca Marañón (Figura 51).

Figura 52. Sección-1 en profundidad. Estado presente 0 ma.



De igual manera, hacia el Este, en la Cuenca Marañón, se evidencia en la información sísmica las discordancias erosivas del tope de la Formación Sarayaquillo y el Grupo Pucará, el cual se preserva en estructuras de grabens durante el desarrollo de la etapa *syn-rift* (Figura 51).

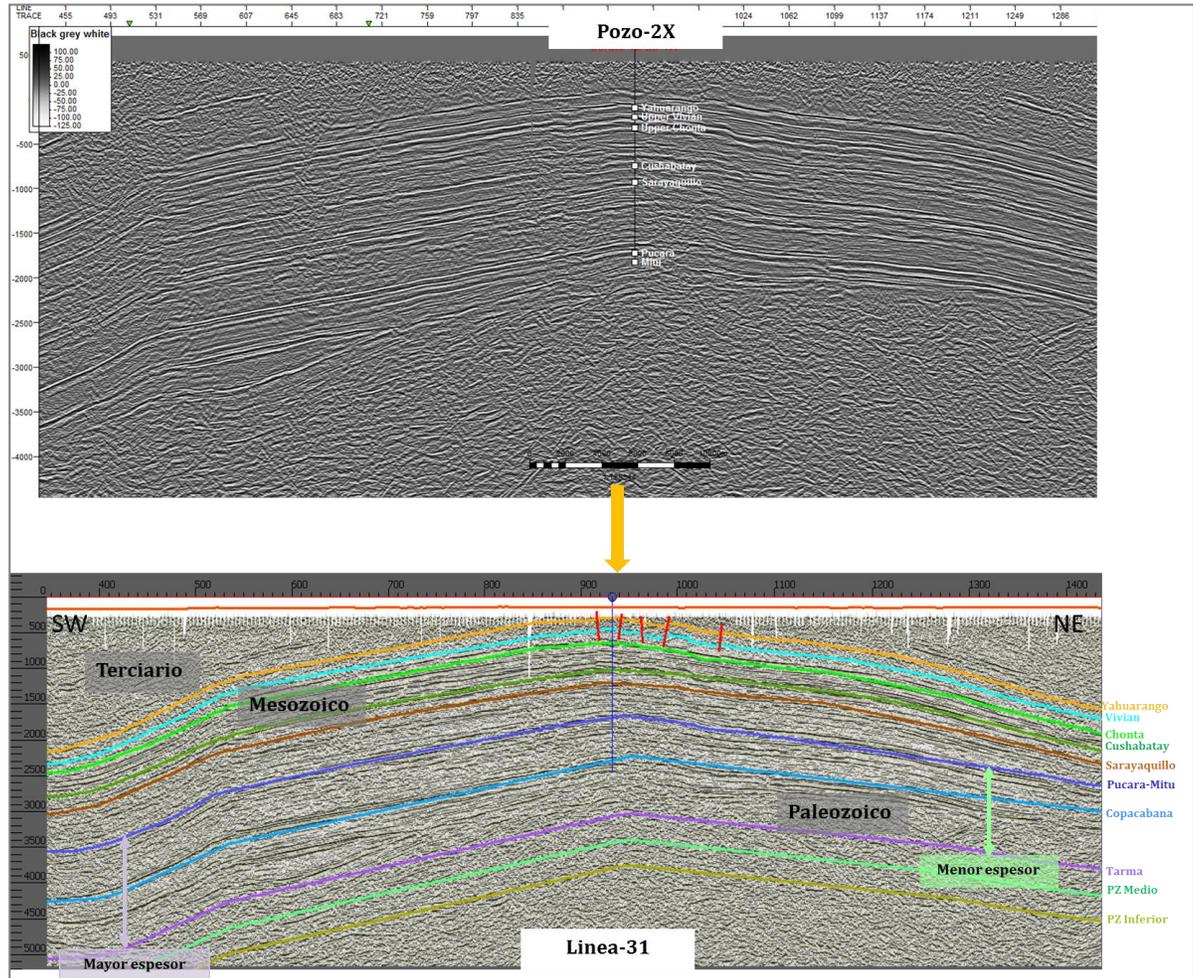
Figura 53. Sección sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Marañón. Se observa la disminución de espesor hacia el Este y el pinchamiento de la Formación Sarayaquillo y el Grupo Pucará.



La estructura anticlinal Loreto, corresponde a un anticlinal abierto y simétrico, producto de una deformación tardía que afecta rocas del Neógeno (Figura 52).

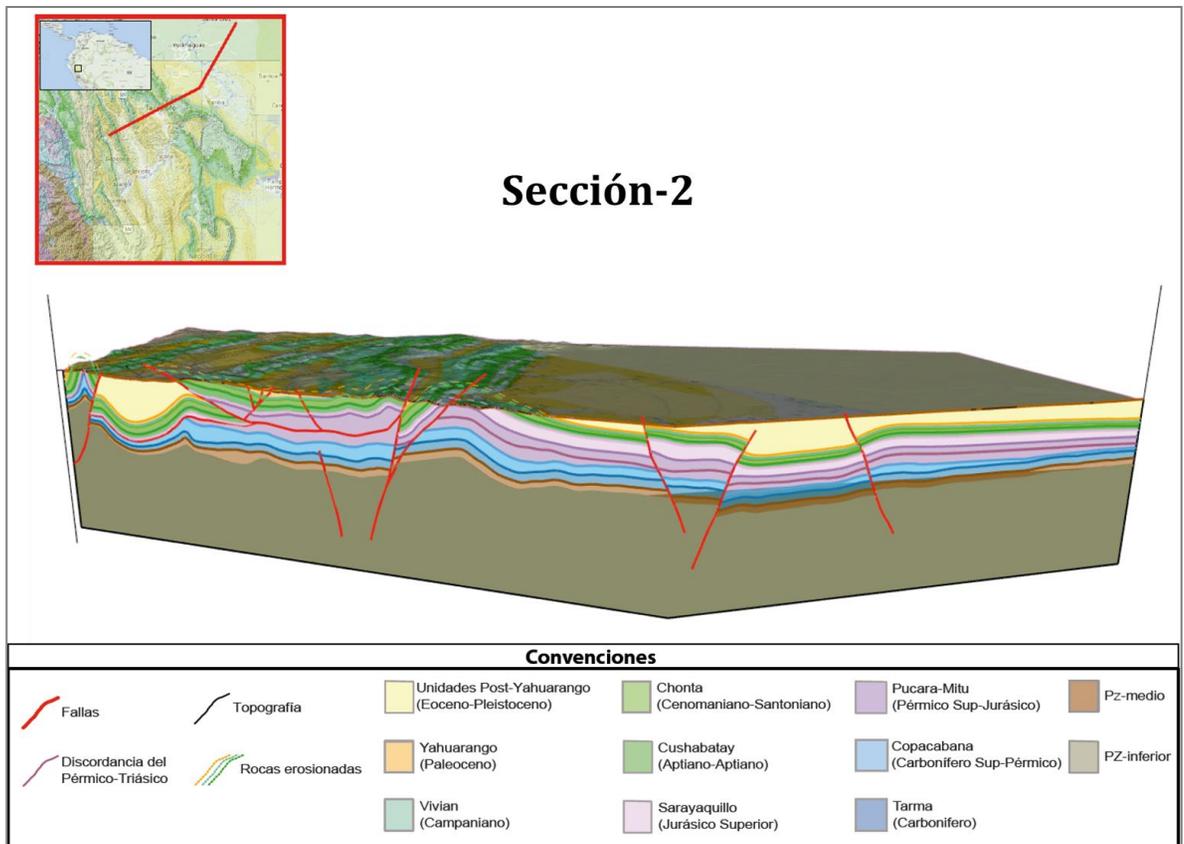
También se observa disminución de espesor en unidades con edad pre-Cretácico y Paleozoico hacia el flanco Este de la estructura.

Figura 54. Línea-31, sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Marañón al Este de la sección-1. Se observa la estructura Loreto, amplia y simétrica. También, disminución de espesor hacia el Este de las unidades de edad pre-Cretácico y Paleozoico.



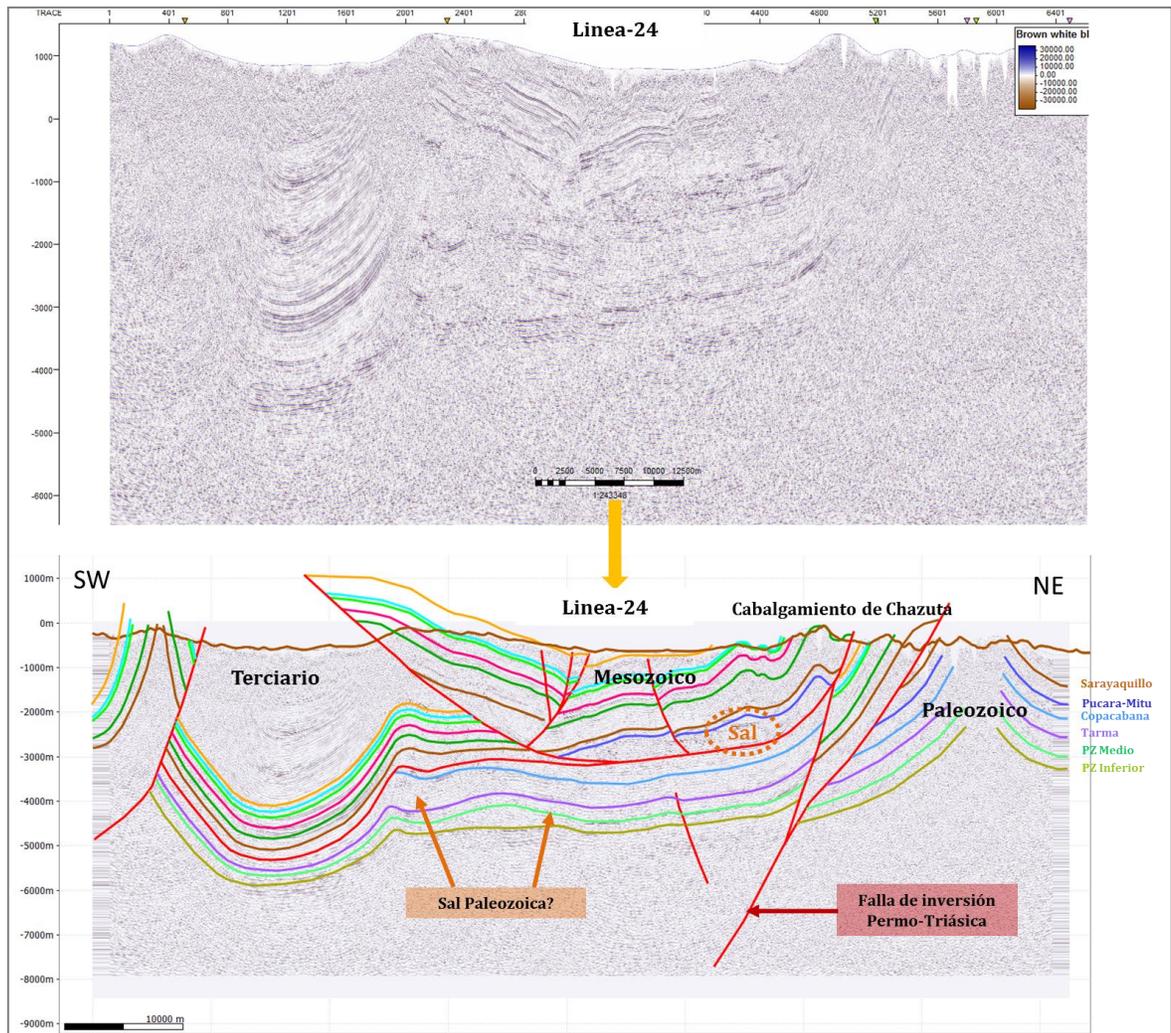
4.3.2 Sección-2. La sección-2 está compuesta por dos tramos rectos en diferente ángulo y es casi paralela a la sección-1 (Figura 31), de la misma forma; hace parte de la Cuenca Huallaga en su trazo Oeste y hacia el sector Marañón abarca el trazo Este de la sección. Tiene una orientación preferencial SW-NE y una longitud de 177.5 km (Figura 53).

Figura 55. Sección-2 en profundidad ajustada con el mapa geológico y el DEM (Depth Elevation Model).



La prominencia de la tectónica compresiva es más evidente en esta sección, validando la evolución del frente de deformación a partir del despegue de cabalgamiento de Chazuta, el cual aparentemente refleja un bloqueo de la deformación que es representado por el desarrollo de estructuración *back-thrust*, aprovechando de la misma forma los niveles salinos del Grupo Pucará.

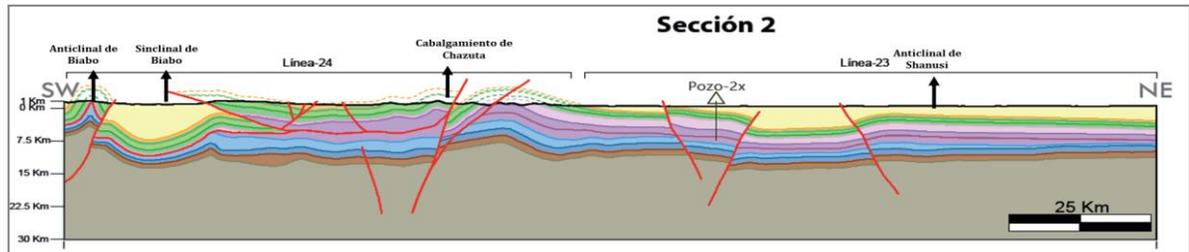
Figura 56. Línea-24, sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Huallaga al Oeste de la sección-2. Se observa el despegue regional que genera el cabalgamiento de Chazuta, reactivado a través de un nivel discordante, asociado a las evaporitas del Grupo Pucará que igualmente son aprovechadas en el desarrollo de estructuración *back-thrust*. También, la falla de inversión de edad Permo-Triásico.



De igual modo, esta configuración estructural de la deformación, favorece la generación del anticlinal de Biabo (Figura 55), el cual puede ser interpretado como una estructura fuera de secuencia, afectando toda la serie sedimentaria. Este tipo

de estructuración es propagada después del desarrollo de la cuenca y son constituidas como efectos de ajuste tectónico (Nemcok et al. 2005).

Figura 57. Seccion-2 en profundidad. Estado presente 0 ma.



El anticlinal de Biabo, conserva en su núcleo la presencia de niveles salinos asociados al Grupo Pucará, según la geometría irregular y diferencia de espesor que manifiesta en dirección Oeste.

No obstante, esta estructura fue considerada como un domo de sal en base a mediciones gravimétricas que muestran una anomalía en su núcleo, indicando la presencia de evaporitas, que no sugieren de ninguna manera un mecanismo de emplazamiento diapírico^{117, 118},

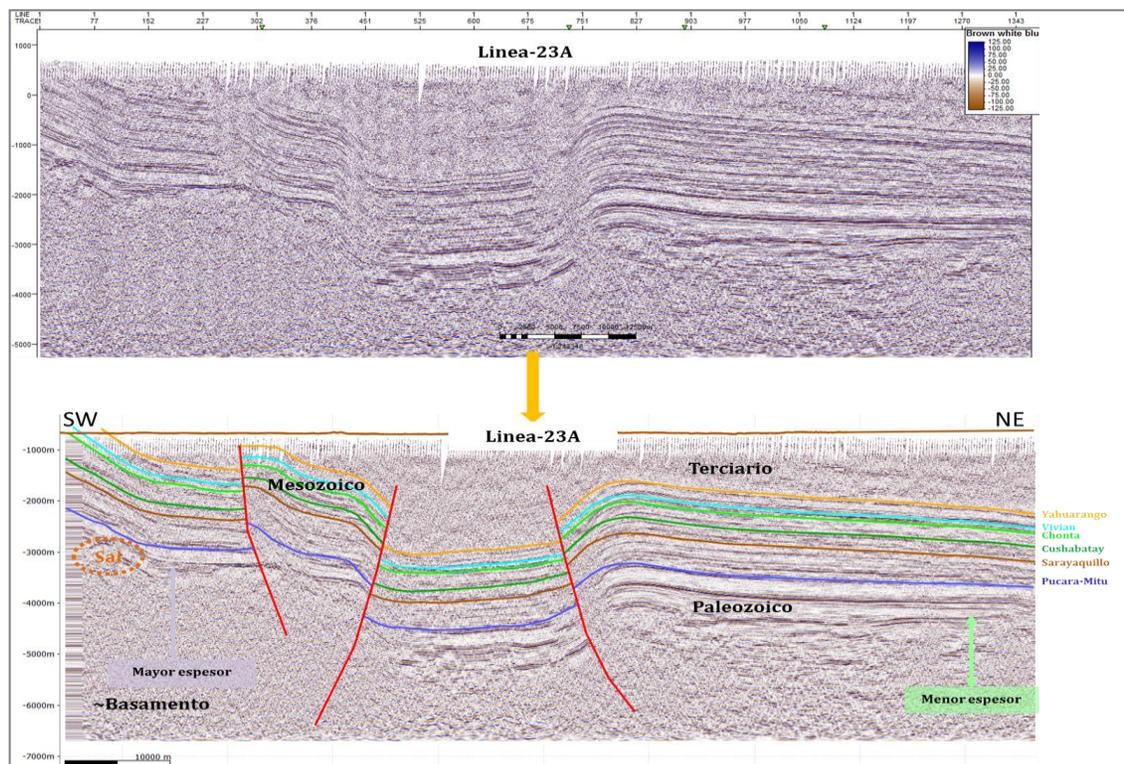
En la Cuenca Marañón hacia el Este, se destaca la reactivación de antiguas fallas normales profundas que afectan rocas de edad Oligoceno, y que constituían estructuras tipo graben durante el periodo extensivo en el Triásico – Jurásico (Figura 46). Igualmente, se refleja el adelgazamiento de las unidades sedimentarias hacia el Este de la Cuenca Marañón.

¹¹⁷ Mobil. Final Report: Huallaga Basin, Peru Blocks 28, 29, 30 and 53. Mobil Expl. and Prod. Peru Inc. 1980.

¹¹⁸ Gil Rodríguez, 2001. Op. Cit.

La estructura Shanusi es equiparable con la estructura Loreto, la cual hace referencia de la misma forma a un anticlinal producto de una deformación tardía que afecta rocas de edad Neógeno.

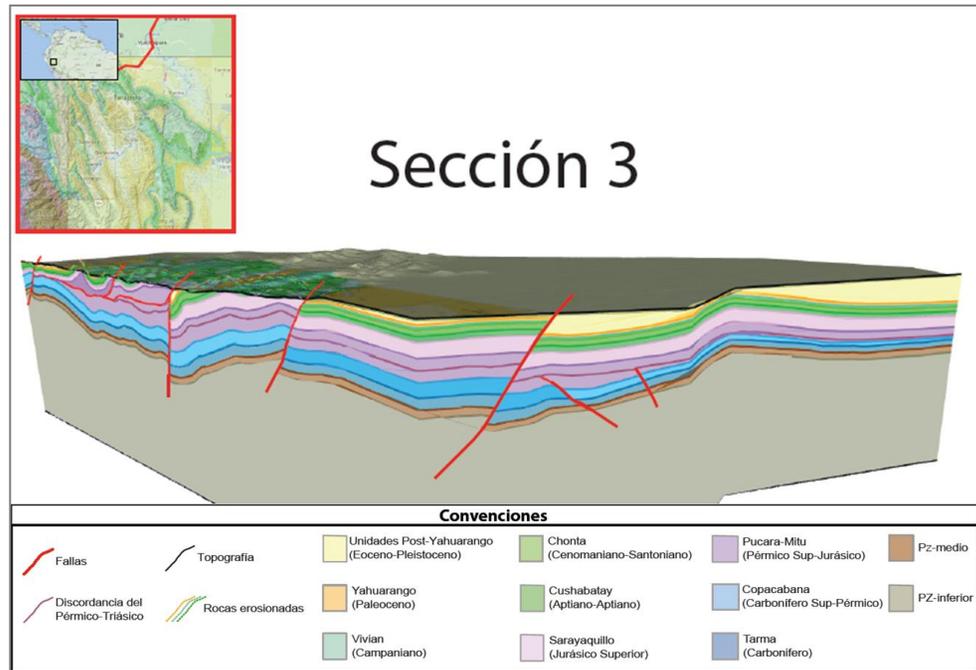
Figura 58. Línea-23A, sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Marañón al Este de la sección-2. Se muestra disminución de espesor hacia el Este de las unidades de edad pre-Cretácico y Paleozoico.



4.3.3 Sección-3. La sección-3, se localiza en el extremo Norte de la Cuenca Huallaga y constituye un trazo irregular que incorpora varias líneas sísmicas con moderada calidad en la imagen de los datos sísmicos. La línea-27 y la línea-004 comprenden el sector Oeste de la sección que se localiza dentro de la Cuenca Huallaga, mientras que la línea-13 y la línea-9b, componen la zona Este en la

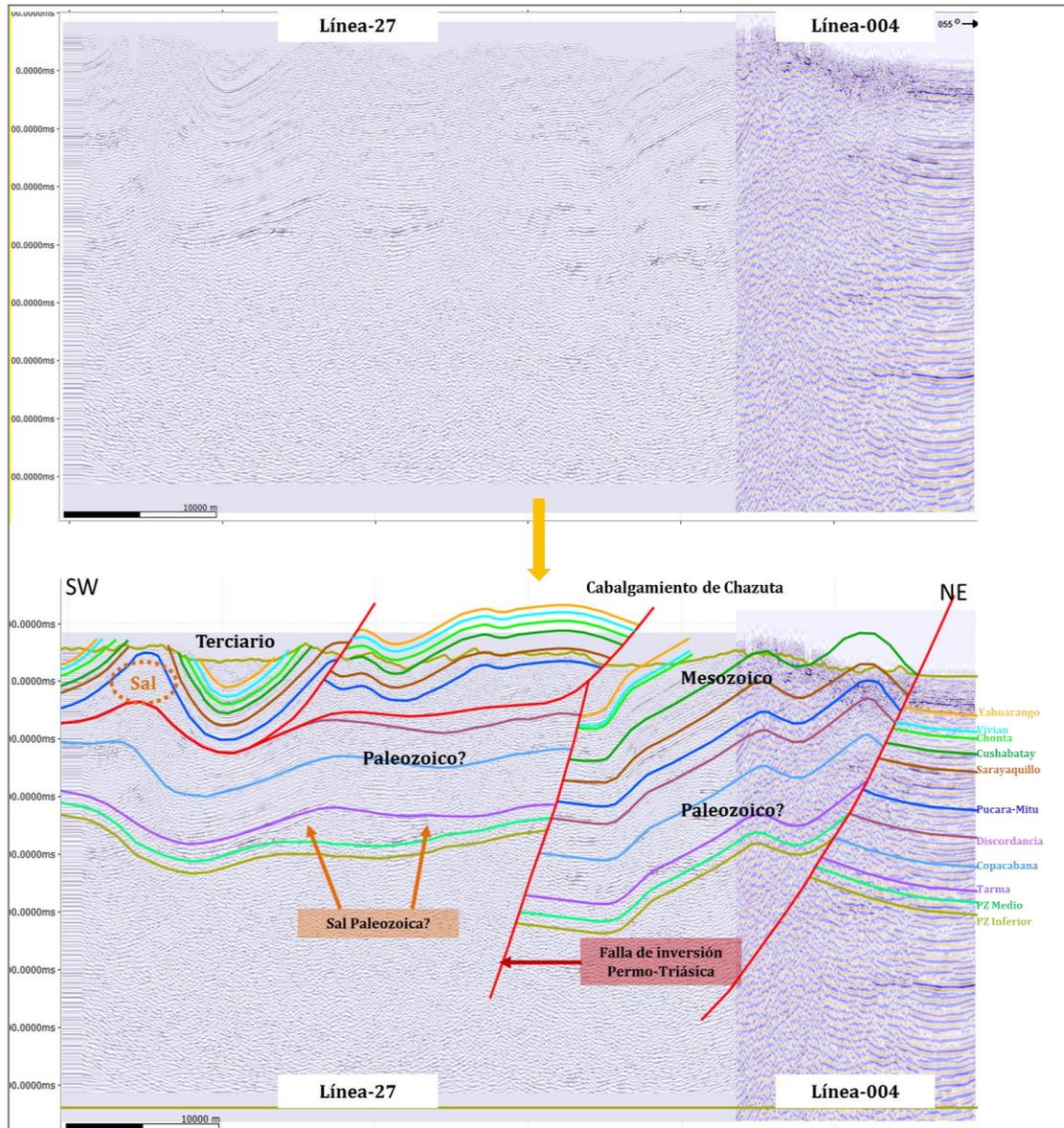
Cuenca Marañón. Tiene una orientación preferencial WSW-ESE y una longitud de 237.8 km (Figura 57).

Figura 59. Sección-3 en profundidad ajustada con el mapa geológico y el DEM (Depth Elevation Model).



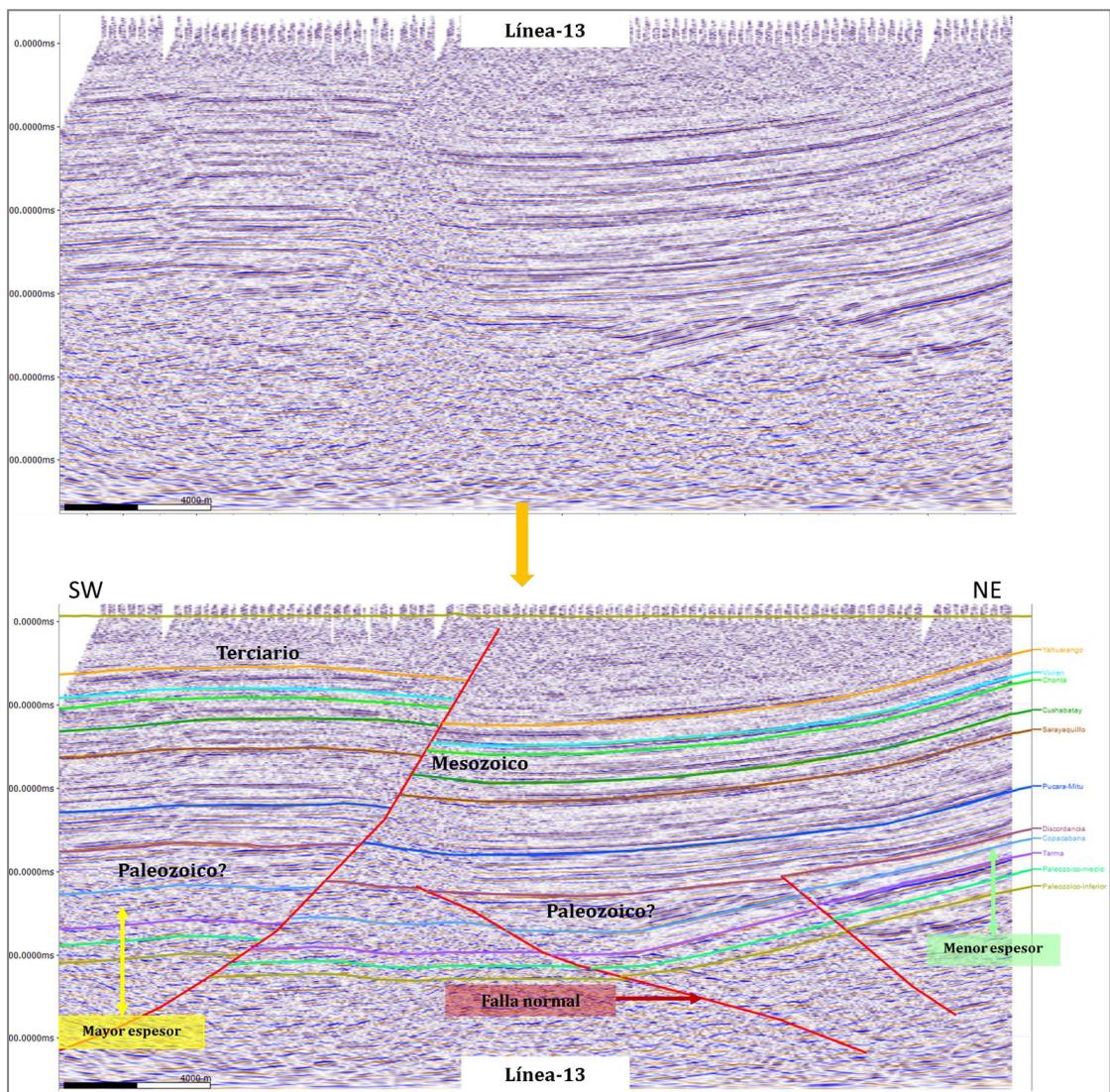
La configuración estructural evidenciada en la sección-3, conserva el desarrollo del frente de cabalgamiento de la Cuenca Huallaga, igualmente influenciado por los niveles salinos Triásico – Jurásicos del Grupo Pucará. Asimismo, muestra una reducción en los valores de acortamiento a simple vista, reflejado en la poca prominencia de las estructuras de Biabo, las cuales se somerizan con respecto al relieve estructural en el anticlinal de Biabo y espesor en el sinclinal de Biabo mostrado en el sector Sur (Sección-1 y Sección-2).

Figura 60. Línea-27 y 004, sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Huallaga al Oeste de la sección-3. Se evidencia el despegue regional que genera el cabalgamiento de Chazuta, reactivado a través de un nivel discordante, asociado a las evaporitas del Grupo Pucará, así como la falla de inversión Permo-Triásica. Las estructuras de Biabo se localizan cercanas a la superficie.



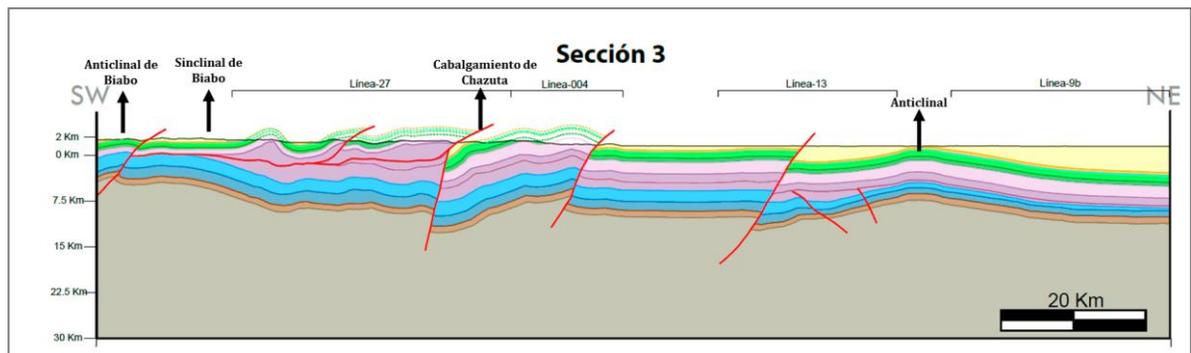
De igual forma, hacia el Este en la Cuenca Marañón, se manifiesta la reactivación de antiguas fallas normales, producto de la inversión tectónica positiva profunda que afectan la cobertera sedimentaria Neógena.

Figura 61. Línea-13, sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Marañón al Este de la sección-3. Se observa disminución de espesor hacia el Este de las unidades de edad pre-Cretácico y Paleozoico.



Por otro lado, en esta sección es claramente apreciable; el adelgazamiento hacia el Este que sufren unidades de edad Cretácico y Terciario. Se destaca que de Oeste a Este, el Grupo Pucará y Mitú sufre una terminación estratigráfica tipo *toplap*, debajo de la discordancia de la Formación Sarayaquillo (Figura 60).

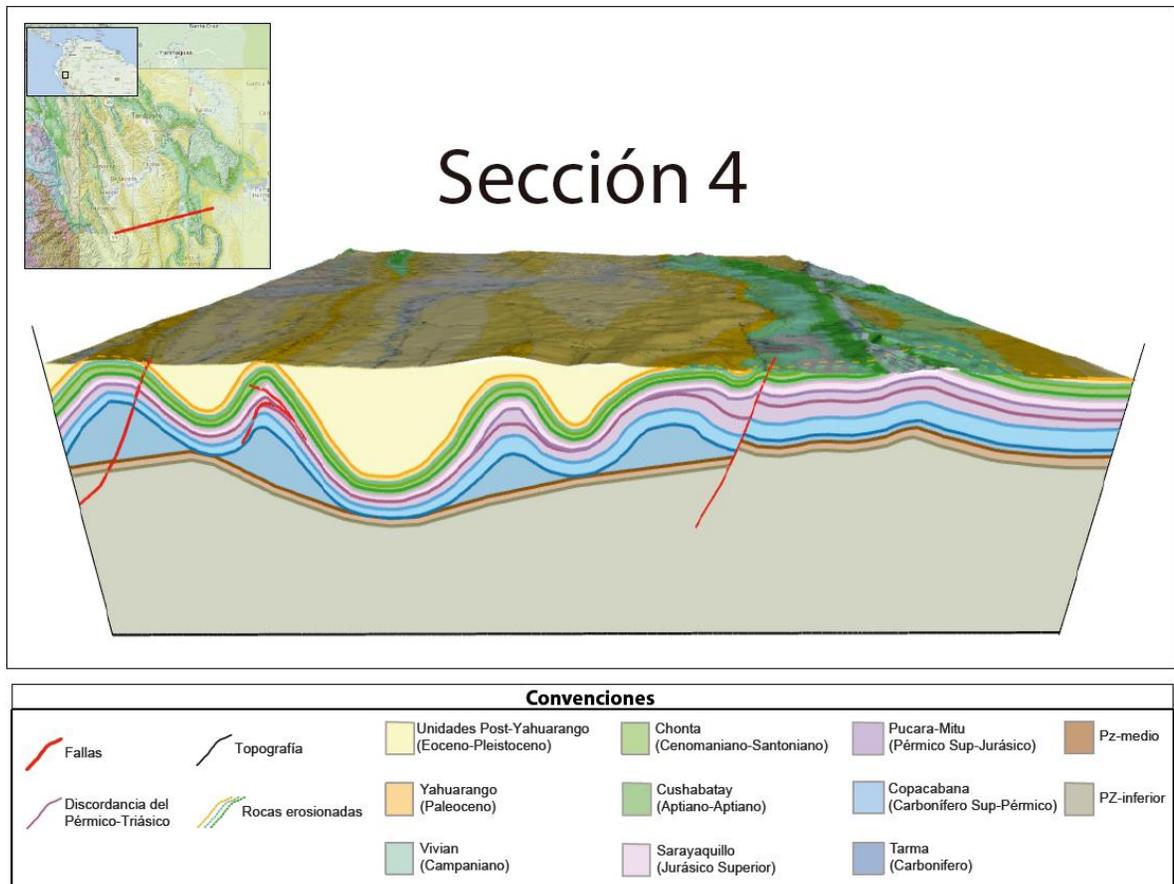
Figura 62. Sección-3 en profundidad. Estado presente 0 ma.



Finalmente, la estructura anticlinal mostrada en la sección, es producto de una deformación tardía que afecta rocas de edad Neógeno y que puede ser simultánea con las estructuras anticlinales de Loreto y Shanusi localizadas hacia el Sur en las secciones 1 y 2 respectivamente (Figura 60)

4.3.4 Sección-4. La sección-4, se localiza en el extremo Sur de la Cuenca Huallaga y está comprendida por una sola línea sísmica. Su trazo, se constituye a través de la Cuenca Huallaga casi en su totalidad y solo ocupa una parte extrema del margen Occidental de la Cuenca Marañón. Tiene una orientación preferencial WSW-ENE y una longitud de 10 km (Figura 61).

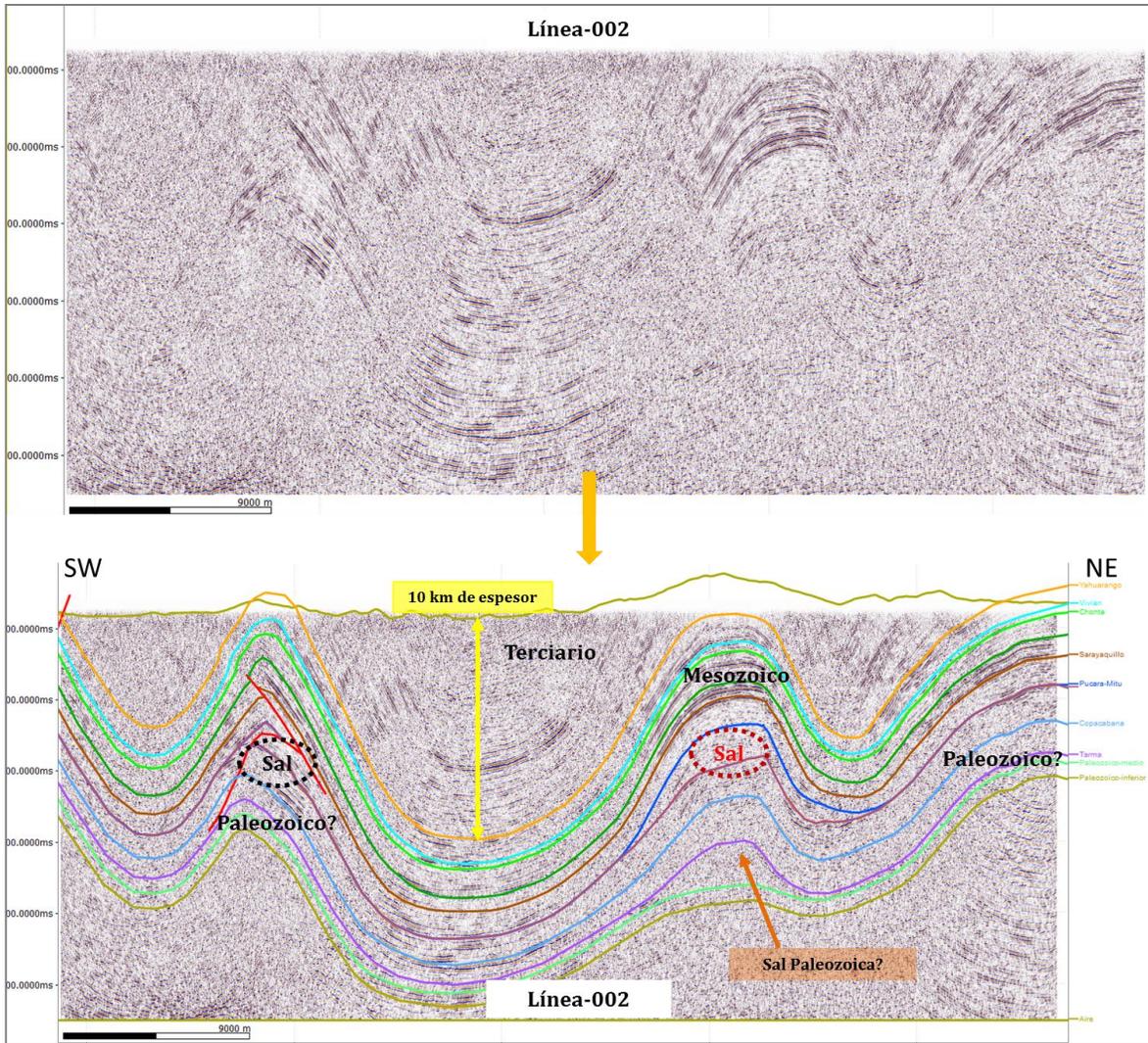
Figura 63. Sección-4 en profundidad ajustada con el mapa geológico y el DEM (Depth Elevation Model).



La estructura de Ponasillo, es desarrollada como un anticlinal simétrico apretado, que evidencia una deformación en su mayoría de tipo dúctil, condicionado por la presencia de los niveles salinos del Grupo Pucará (Figura 62).

Sobre el flanco Oeste de esta estructura, los depósitos de edad Terciaria alcanzan 10 km de espesor, y pueden ser contemporáneos con la sedimentación Neógena que da lugar a las estructuras de Biabo, las cuales se extienden por toda la Cuenca Huallaga en dirección preferencial NW-SE.

Figura 64. Línea-002, sísmica en tiempo localizada en la Cuenca Huallaga, como único dato sísmico interpretado en la sección-4.



Por otro lado, el sector este de la estructura Ponasillo, revela la relación con eventos más antiguos a través de la evolución del proceso de inversión tectónica positiva, puesta en manifiesto en las 3 secciones anteriores y que representan la reactivación de una falla normal de edad Triásica profunda. Esta falla muestra grandes espesores de sedimentos, acumulados durante la etapa extensiva y en caso contrario a lo observado anteriormente, las series sedimentarias del Terciario

se adelgazan hacia el frente orogénico, donde la deformación debe ser más compleja (Figura 63).

Figura 65. Seccion-4 en profundidad. Estado presente 0 ma.

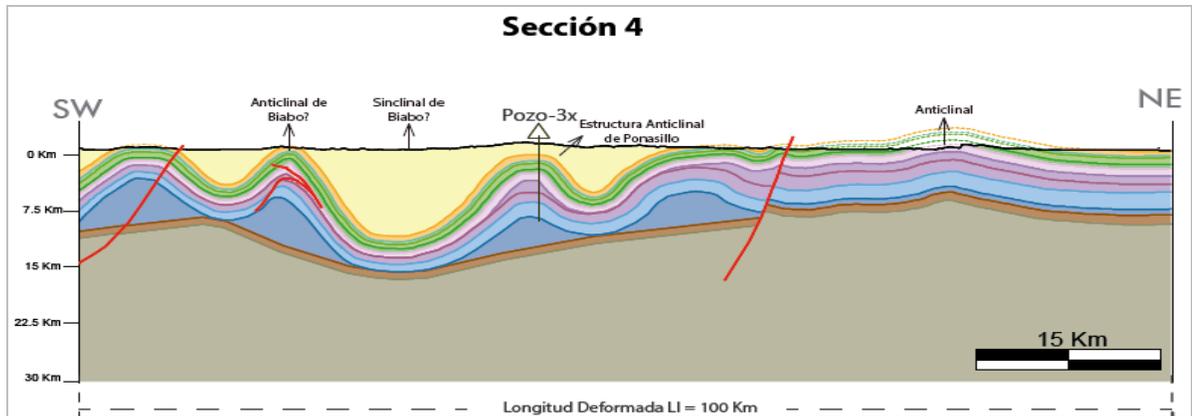
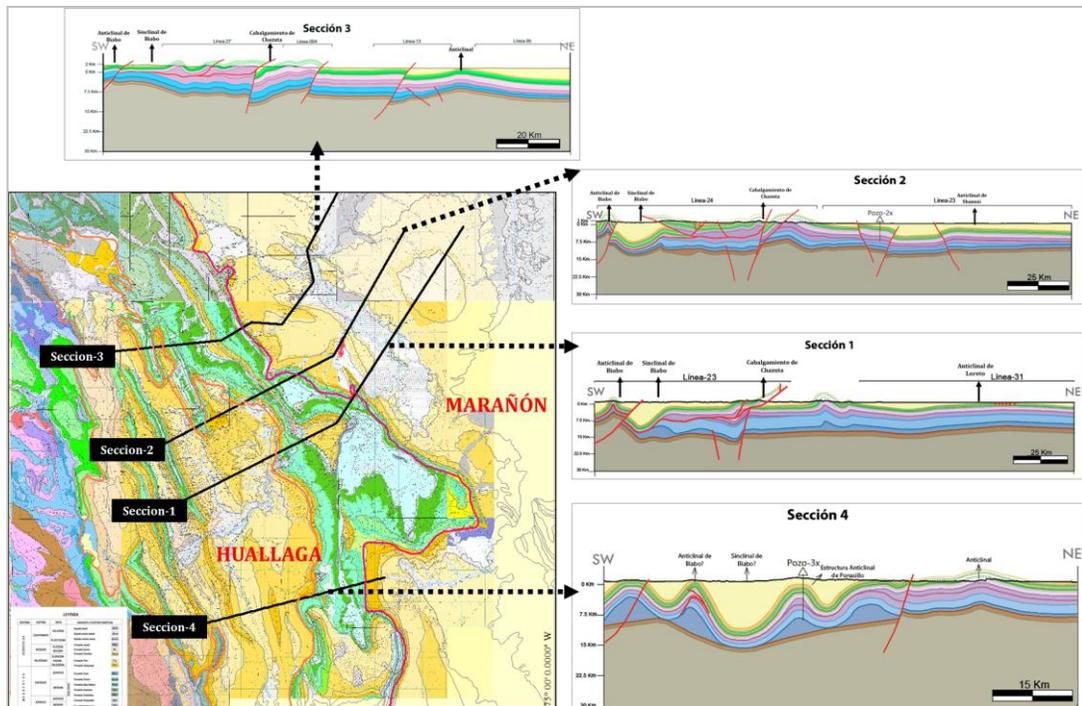


Figura 66. Localización 4 secciones estructurales construidas. Estado presente 0 ma.



4.4 RETRODEFORMACIÓN DE SECCIONES ESTRUCTURALES PARA LA CUENCA HUALLAGA – MARAÑÓN

El proceso de restauración de secciones estructurales al estado no deformado, es un trabajo iterativo que permiten la reconstrucción de la geometría de las Cuencas Huallaga y Marañón, partiendo de un estado deformado final, hasta llevarla a un estado inicial del orógeno; que permite conocer la amplitud de las cuenca precedentes a la deformación, antes de ser afectado por diversos mecanismos tectónicos.

De igual modo, permite validar las interpretaciones estructurales, de manera que sean geológicamente viables y consistentes, comprendiendo la evolución de la deformación para cada horizonte interpretado.

Las etapas desarrolladas durante la restauración al estado no deformado, se encuentran sujetas a la deformación que sufre la cobertera sedimentaria. Para este trabajo de investigación se tiene como límite inferior de cobertera el tope de la Formación Copacabana de edad Carbonífero.

Según el estilo estructural definido (parágrafo 40 y 41), se conoce que la deformación en la estructuración, se conserva para las 4 secciones (Figuras 65, 62, 63 y 64), variando en general en el grado de afectación, que permiten la evolución desde un estado menor, en donde predomina la deformación dúctil ejemplificada en la exposición de estructuras anticlinales apretadas (estructura de Ponasillo, sección-4), llegando a un estado de deformación mayor de tipo frágil, dada por la evolución del frente de cabalgamiento (Chazuta) y de estructuras tipo *back thrust*, que aprovechan el despegue regional, caracterizado por tener una unidad litológicamente dúctil al nivel de las evaporitas del Grupo Pucará (sección-2), que condicionan su geometría.

Figura 68. Restauración secuencial seccion-2.

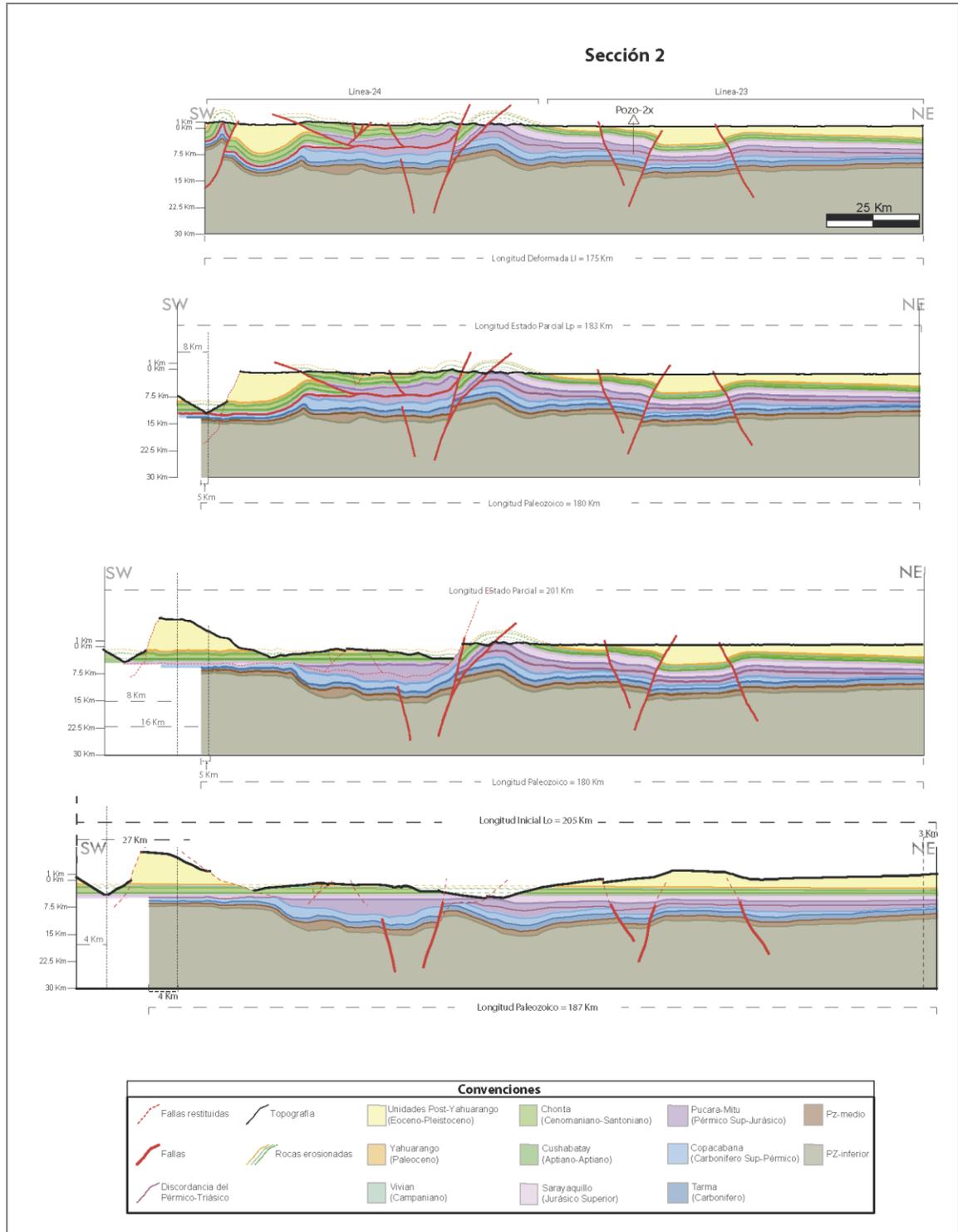


Figura 69. Restauración secuencial seccion-3.

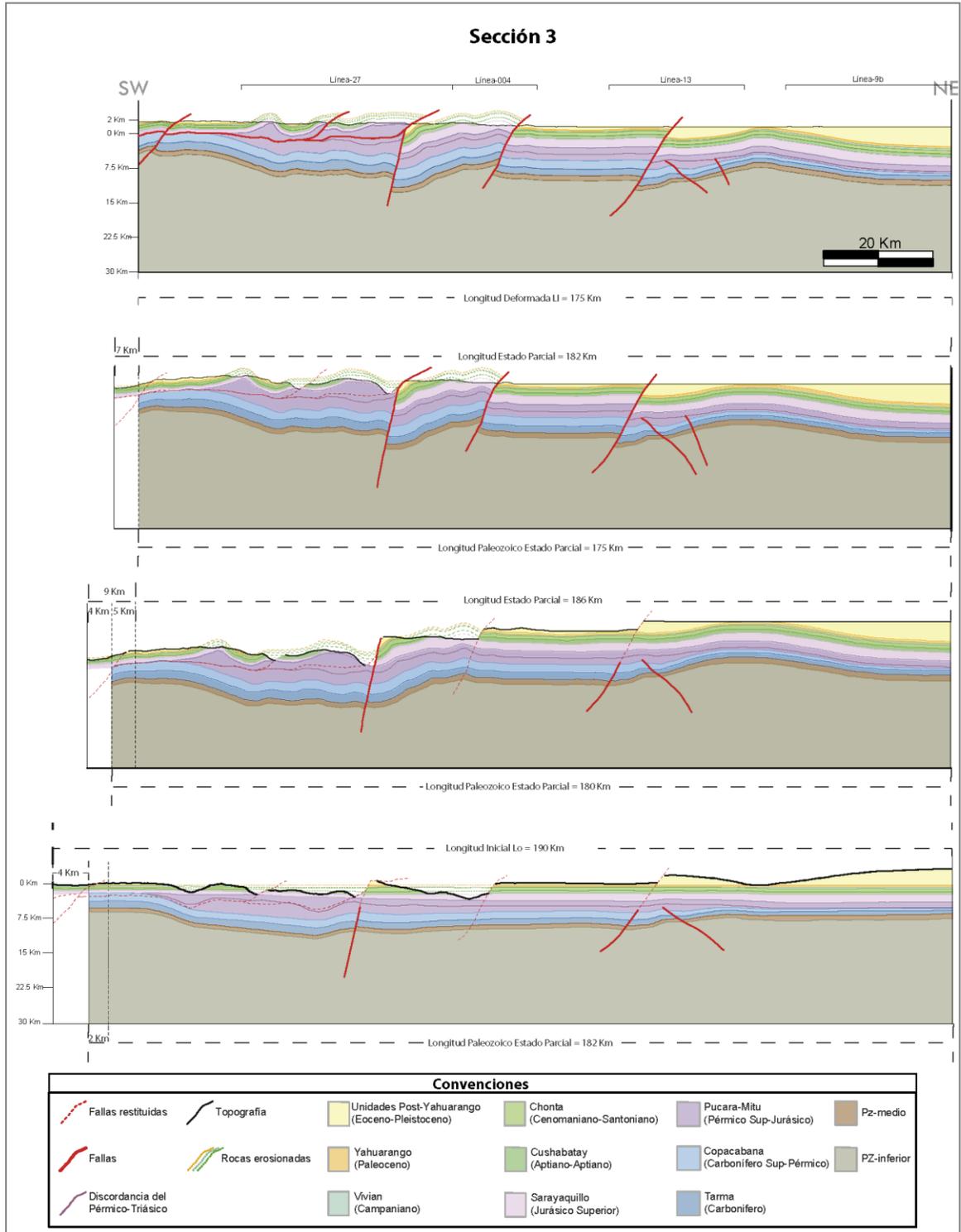
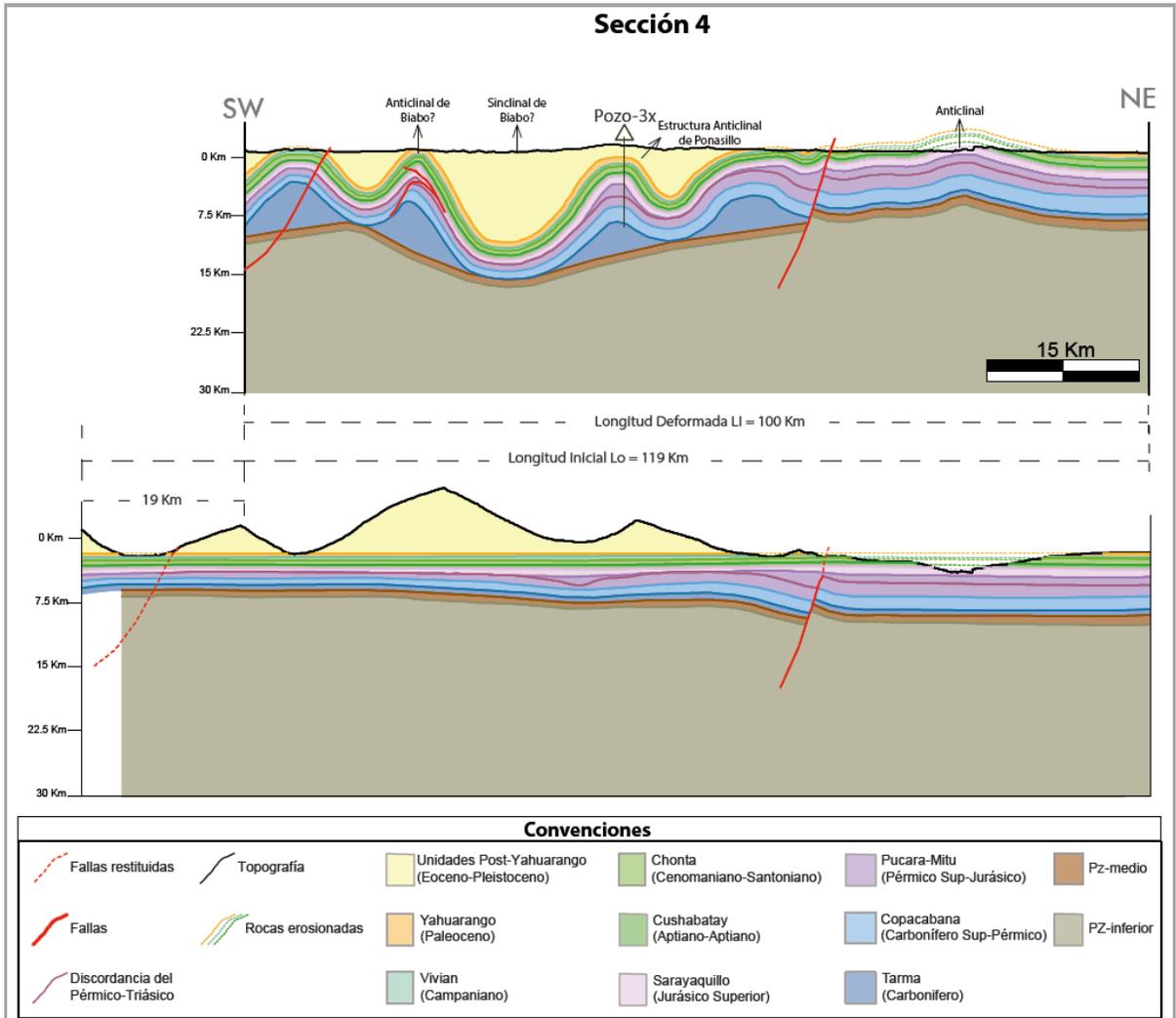


Figura 70. Restauración secuencial sección-4.



Con respecto a la herramienta empleada en el proceso de restitución secuencial para las 4 secciones estructurales construidas, se manejaron dos algoritmos disponibles en el software 2D move; *Fault Parallel Flow* y *Flexural Slip Unfolding*, los cuales se relacionan con movimientos laminares a lo largo del trazo de falla que permiten modelar la deformación frágil y dúctil respectivamente.

Es importante resaltar, que aunque estos algoritmos computacionales favorecen la metodología de trabajo, deben tenerse en cuenta parámetros geométricos que mantengan consistentes; tanto el proceso de balanceo de secciones como el de retrodeformación. Por ejemplo, si la deformación de una capa está afectada por deformación dúctil y frágil, el volumen y el área debe conservarse así como su longitud¹¹⁹

En este trabajo de investigación, es claro que los niveles salinos del Grupo Pucará y la sal de edad Paleozoico, reflejan cambios significativos de espesor en algunos sectores, debido a su movimiento y transporte durante la deformación. Sin embargo, es indispensable, hacer un ajuste de áreas entre el estado deformado y el estado restaurado de manera consistente. Por tal razón, para algunos niveles salinos se realizó una restitución por balanceo de áreas, ya que existía migración lateral de material que los otros algoritmos no pueden tener en cuenta.

4.5 VALORES DE ACORTAMIENTO

Durante el proceso de retrodeformación, se definen varios estados secuenciales en donde es posible medir un valor de acortamiento, según la diferencia entre la longitud horizontal de la sección deformada y la no deformada.

En función de la variación de la longitud de la misma capa o superficie (tope de la Formación Cushabatay), manteniendo líneas de referencia inmóviles en los extremos de cada una de las secciones estructurales, se calculó la magnitud del acortamiento empleando la siguiente fórmula:

¹¹⁹ DAHLSTROM, Op. Cit.

$$S = (L_0 - L_I)$$

Donde:
S = Acortamiento
L_I = Longitud deformada
L₀ = Longitud inicial

Ecuación 2

Para determinar el porcentaje (%) de acortamiento:

$$\% (S) = \frac{(L_0 - L_I)}{L_0} * 100$$

Donde:
S = Acortamiento
L_I = Longitud deformada
L₀ = Longitud inicial

Ecuación 3

Por otro lado, el estilo estructural en la Cuenca Huallaga y el margen Occidental de Marañón, está condicionado por una tectónica de tipo *thick skinned* incipiente, la cual tiene influencia durante la etapa extensiva que posteriormente cambia su régimen tectónico a tipo *thin skinned*, afectando la cobertera sedimentaria durante la inversión de fallas normales profundas de basamento y la evolución de cabalgamientos asociados a despegues salinos.

Para ejemplificar esto, se determinaron dos valores acortamiento diferentes, el principal que está relacionado con la diferencia de longitudes horizontales para la cobertera sedimentaria (Mesozoico y Cenozoico), y uno complementario que evidencia la magnitud de la deformación dominante durante el periodo de extensión (Paleozoico). En esta diferenciación el valor de acortamiento que se tiene en cuenta en el análisis corresponde al de la cobertera sedimentaria; como se muestra a continuación para cada sección.

4.5.1 Seccion-1. El valor de acortamiento calculado, a partir del de la seccion-1 construida (Figura 69), corresponde a 40 Km, equivalentes al 15%.

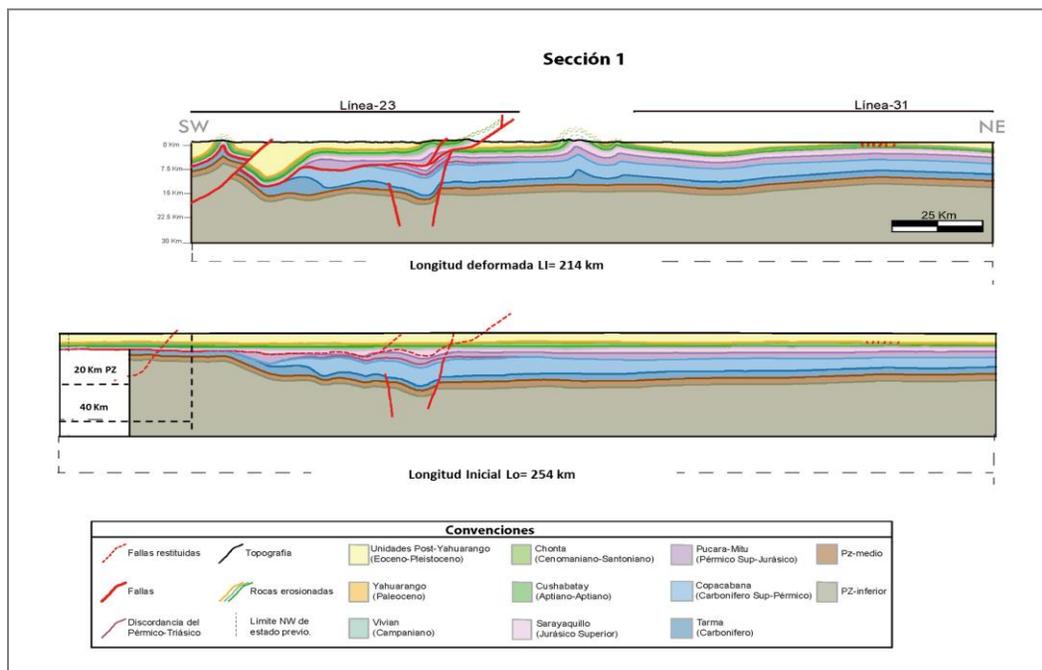
Figura 71. Acortamiento calculado para la seccion-1 de 40 km equivalentes al 15%. Longitud inicial 254 km y longitud final 214 km. Acortamiento para el Paleozoico= 20 km.

$$S = (L0 - LI)$$

$$S = (254 - 214) = 40 \text{ km}$$

$$\% S = \frac{(L0 - LI)}{L0} * 100$$

$$\% S = \frac{(254 - 214)}{254} * 100 = 15\%$$



4.5.2 Sección-2. El valor de acortamiento calculado, a partir del de la sección-2 construida (Figura 70), corresponde a 30 Km, equivalentes al 14%.

Figura 72. Acortamiento calculado para la sección-2 de 30 km equivalentes al 14%. Longitud inicial 205 km y longitud final 175 km. Acortamiento para el Paleozoico= 12 km.

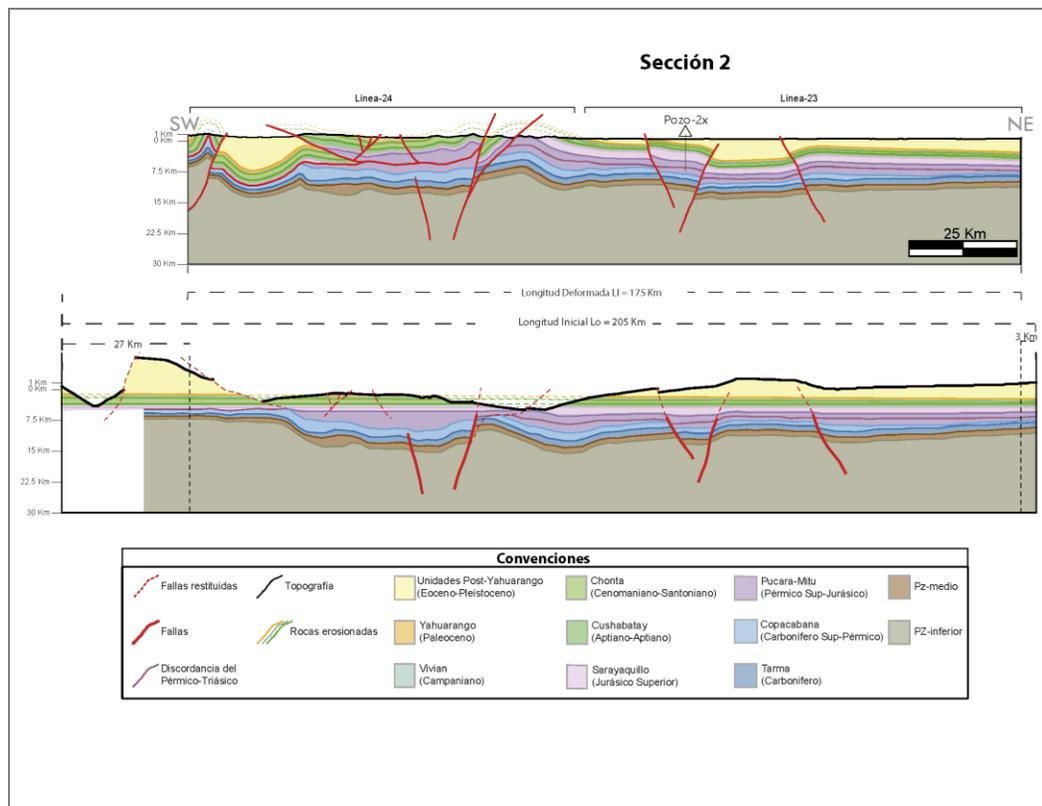
$$S = (L_0 - L_I)$$

$$S = (205 - 175) = 30 \text{ km}$$

↓

$$\% S = \frac{(L_0 - L_I)}{L_0} * 100$$

$$\% S = \frac{(205 - 175)}{205} * 100 = 14\%$$



4.5.3 Seccion-3. El valor de acortamiento calculado, a partir del de la seccion-3 construida (Figura 71), corresponde a 15 Km, equivalentes al 8%.

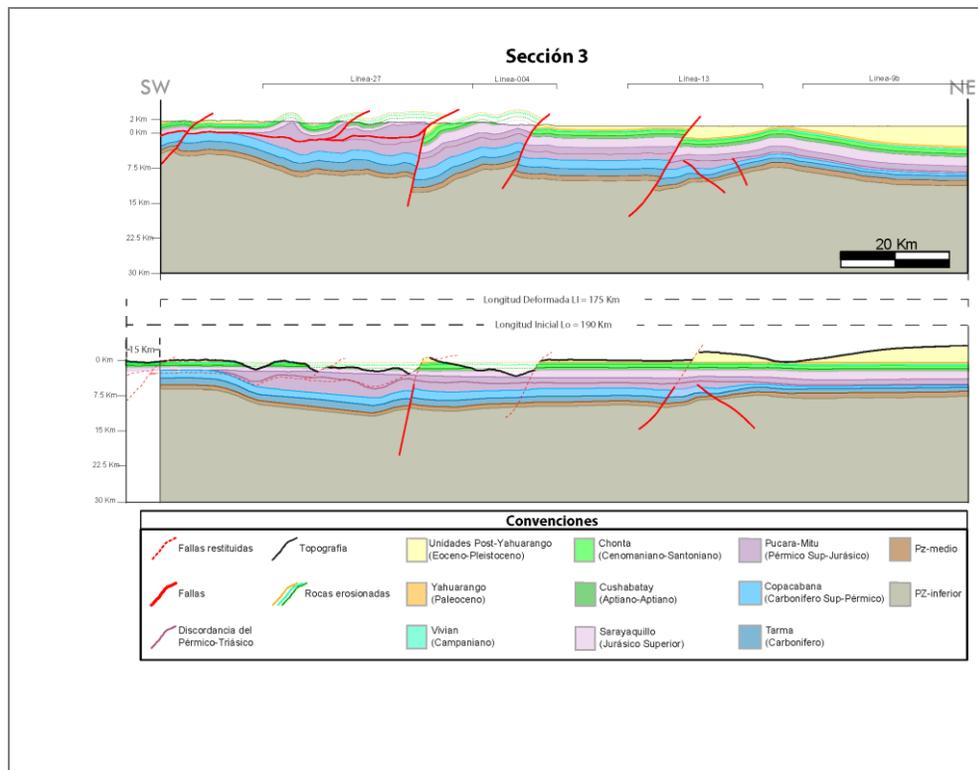
Figura 73. Acortamiento calculado para la seccion-3 de 15 km equivalentes al 8%. Longitud inicial 190 km y longitud final 175 km. Acortamiento para el Paleozoico= 7km.

$$S = (L_0 - L_I)$$

$$S = (190 - 175) = 15 \text{ km}$$

$$\% S = \frac{(L_0 - L_I)}{L_0} * 100$$

$$\% S = \frac{(190 - 175)}{190} * 100 = 8\%$$



4.5.4 Sección-4. El valor de acortamiento calculado, a partir del de la sección-4 construida (Figura 72), corresponde a 19 Km, equivalentes al 16%.

Figura 74. Acortamiento calculado para la sección-4 de 19 km equivalentes al 16%. Longitud inicial 119 km y longitud final 100 km. Acortamiento para el Paleozoico= 19 km.

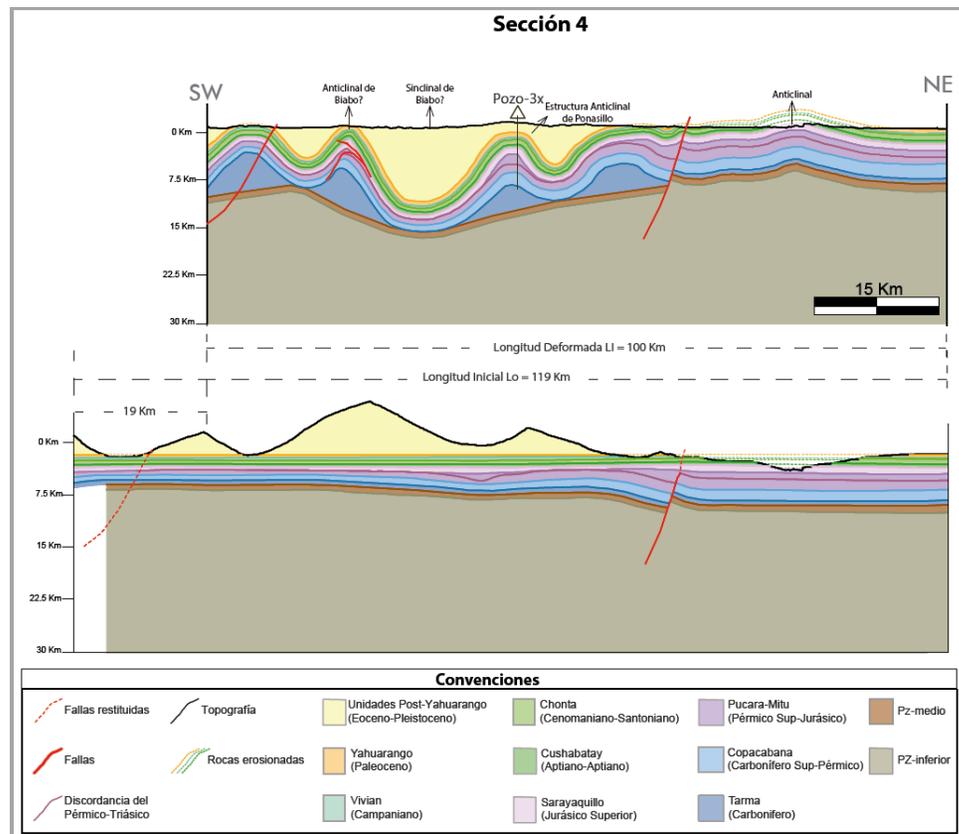
$$S = (L_0 - L_I)$$

$$S = (119 - 100) = 19 \text{ km}$$

↓

$$\% S = \frac{(L_0 - L_I)}{L_0} * 100$$

$$\% S = \frac{(119 - 100)}{119} * 100 = 16\%$$



En la seccion-4, es posible determinar que la deformación que prima es de tipo dúctil, asociada a pliegues anticlinales y sinclinales, desarrollados por la evolución de un despegue que aprovecha posibles niveles salinos de edad Paleozoico (interpretación realizada dada la moderada calidad de información sísmica, hacia la parte baja de la sección. Se asumen grandes volúmenes de cuerpos salinos en la Formación Tarma, sin tener evidencias en datos sísmicos y/o pozo). El valor de acortamiento para la seccion-4 es igual a 19 km, equivalentes al 16%.

En la siguiente tabla se muestra la diferencia en los valores de acortamiento que se reflejan en la tectónica tipo *thick skinned*, afectando rocas de edad Paleozoico y pre-Cretácico, mientras que la tectónica *thin skinned* se refleja en la afectación de rocas de edad Cretácico-Cenozoico.

Figura 75. Acortamientos calculados y diferenciados por afectación de rocas de edad Paleozoico, pre-Cretácico y Cretácico-Cenozoico.

	Valores de acortamiento (km)		% acortamiento total
	Afectacion de rocas edad Paleozoico y pre-Cretacico	Afectacion de rocas edad Cretacico - Cenozoico	
SECCIÓN-1	20	40	15
SECCIÓN-2	12	30	14
SECCIÓN-3	7	15	8
SECCIÓN-4	19		16

4.6 CRONOLOGÍA DE LA DEFORMACIÓN

La cronología de la deformación en la Cuenca Huallaga y margen Occidental de Marañón, se define para la seccion-1, tomando como base, información de trazas de fisión en apatito, AHe y análisis de R_o , a partir de estudios previos realizados (Eude et al, 2015 y Kennan L, Ingepet. 2008) y ajustados con la interpretación estructural de la línea sísmica 23.

Se construyeron 4 estados de restitución cinemática secuencial para la seccion-1 (Figura 4.36), con el fin de entender la evolución estructural del cabalgamiento de Chazuta y la implicación en la reactivación de la antigua falla normal Permo-Triásica, que muestra una repercusión más prominente en la Cuenca Huallaga que en el margen Occidental de la Cuenca Marañón.

Figura 76. Restitución cinemática para la sección-1, ajustada con los datos de AFT de Eude et al. 2015.

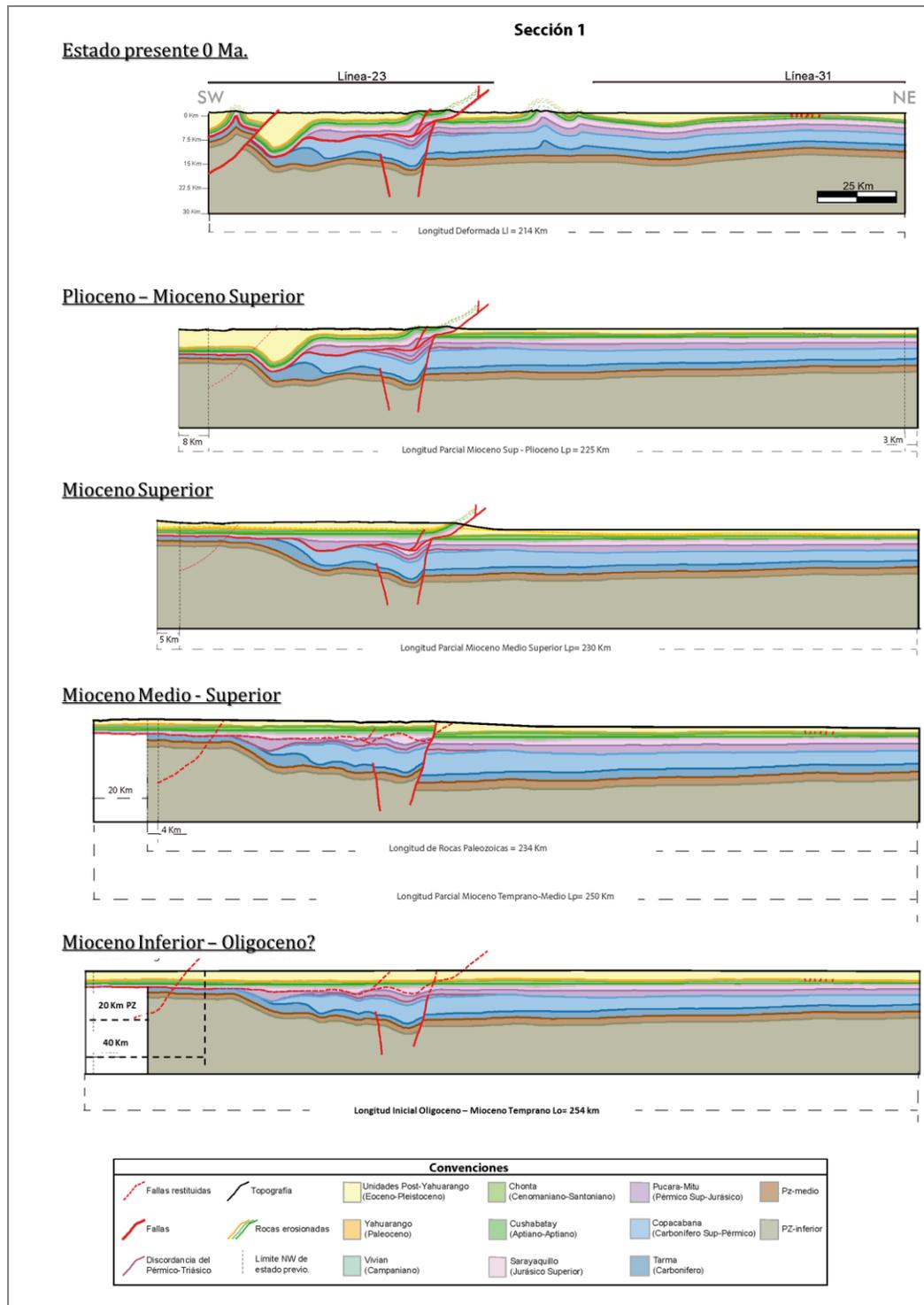
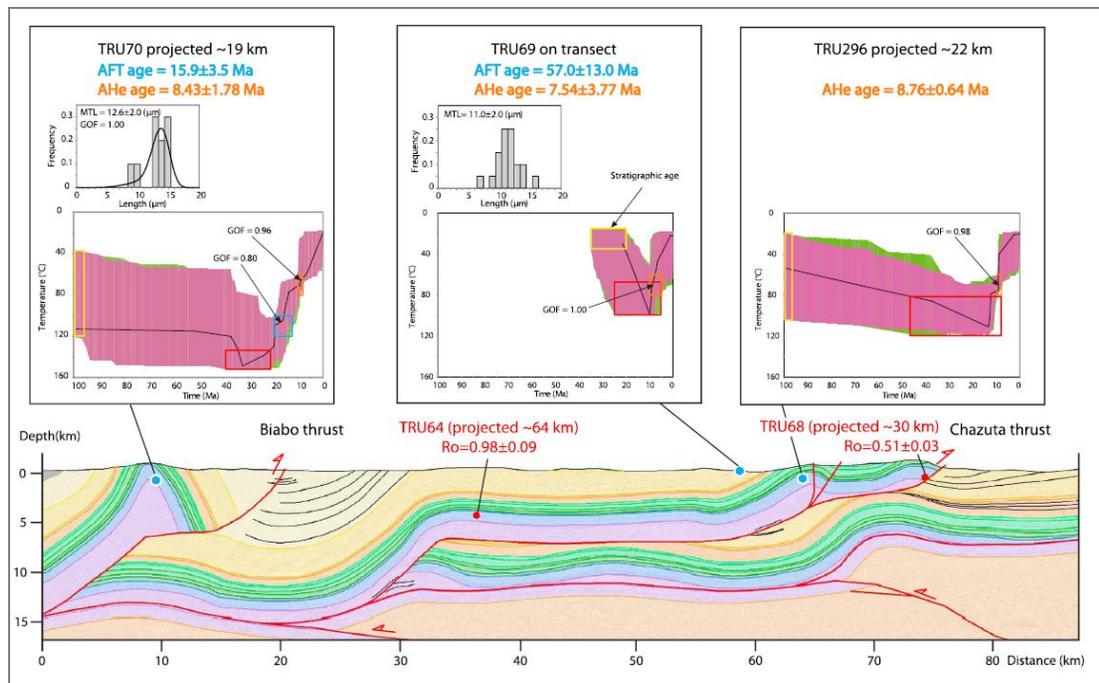


Figura 77. AFT *central age* (Ma), AHe age (Ma) e histogramas de distribución para las diferentes muestras analizadas por Eude et al, 2015. Los recuadros amarillos indican la edad de depositación. Los recuadros rojos indican la cantidad de enterramiento Cenozoico calculado a partir de datos de Ro. Los recuadros azules y naranjas indican la localización de AFT y AHe.



Fuente: Tomado de Eude et al, 2015.

Dentro de la secuencia de eventos tectónicos que hacen referencia a la evolución de la Cuenca Huallaga, se inicia con un evento extensivo condicionado por tectónica tipo *thick skinned*, enmarcada dentro de la etapa *syn-rift* que se asocia a la depositación de la secuencia de edad Paleozoico, dentro de los cuales se localiza el Grupo Mitú (Permo-Triásico). La reactivación de fallas normales, influenciadas por el inicio del proceso de inversión tectónica positiva, está vinculado con la depositación del Grupo Pucará (Triásico – Jurásico) y la Formación Sarayaquillo (Jurásico), dadas las relaciones estratigráficas tipo *toplap*, que marcan el límite entre la secuencia *syn-rift* y la *post-rift*.

La edad de este evento de inversión tectónica, reflejado en las 4 secciones estructurales construidas, y manifestado a partir de la reactivación de la falla normal de edad Triásico–Jurásico, afecta series sedimentarias terciarias como son la Formación Yahuarango (Paleoceno) y Pozo (Eoceno), lo cual indica que este evento de inversión podría tener una edad post Eoceno. También, ajustada con la evidencia de estratos de crecimiento en la Formación Yahuarango, indicando una deformación sinsedimentaria durante el Paleógeno.

La muestra TRU69 AFT en relación con el cabalgamiento de Chazuta, indica una edad de 17 Ma, correlacionada con un valor de R_0 entre 0.51 ± 0.03 , indicando un máximo enterramiento de 3.2 ± 0.2 km para el bloque colgante del cabalgamiento de Chazuta¹²⁰. Estos datos enmarcan que la discordancia reactivada como despegue regional a partir de las evaporitas de la Formación Pucará, corresponden a la época entre el Mioceno Medio – Superior.

Otros estudios realizados a partir del análisis de trazas de fisión en apatito para determinar la edad del cabalgamiento de Chazuta, sugieren que tiene una estructuración con edad de 15Ma¹²¹, entre 10-15Ma.

Durante el Mioceno Superior –Plioceno, la deformación del anticlinal de Biabo, es soportada por los análisis a la muestra TRU70, asociada a los análisis de AHe, con edades de enfriamiento dentro del rango aproximado a los 8Ma (Eude et al.2015). También, se correlaciona con la afectación que se observa a los depósitos de gran espesor (Neógeno) que componen el sinclinal de Biabo. De igual forma, el anticlinal de Biabo fue definido como una estructura fuera de secuencia. Sin embargo, los análisis de AFT muestran que tiene una edad contemporánea con el cabalgamiento de Chazuta, lo cual indica que el pliegue evoluciono primero y finalmente la falla rompió toda la secuencia.

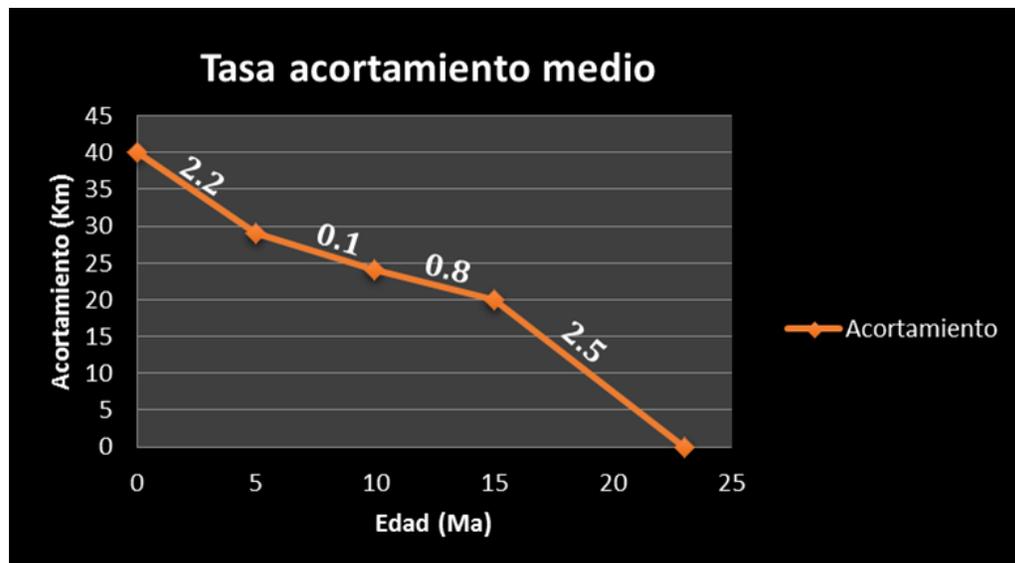
¹²⁰ EUDE et al. Op. Cit.

¹²¹ Mobil. Op. Cit.

El estudio realizado por Eude et al en el 2015, a partir de análisis de AFT, AHe, y Ro a diferentes muestras localizadas en la Cuenca Huallaga, sustenta que la propagación del frente de deformación, asociado con el cabalgamiento de Chazuta, está enmarcado entre los 23 y 17Ma.

Finalmente, calculando la tasa de acortamiento medio acumulado para la seccion-1 con estos datos, se puede deducir que tiene una tasa de deformación creciente (Figura 4.38), en donde se observa que para el inicio de la deformación relacionada con la tectónica tipo *thin skinned* durante el Oligoceno? – Mioceno Medio, la tasa de acortamiento es de 2.5 mm/año. Para el Mioceno Medio a Mioceno Superior 0.8 mm/año. Durante el Mioceno Superior – Plioceno es de 1 mm/año y para el periodo actual evidencia una tasa de deformación media en aumento con un valor de 2.2 mm/año, Ver restitución secuencial en la Figura 74.

Figura 78. Gráfico de tasa de acortamiento medio acumulado para la seccion-1.



4.7 MODELAMIENTO 3D

El proceso de modelamiento tridimensional, permite tener una mejor visualización en la estructuración que enmarca la deformación en el estado actual y retrodeformado para la Cuenca Huallaga y margen Occidental de Marañón.

Este modelamiento, se realizó en el software 3D move, gracias a la licencia académica suministrada por la Universidad Industrial de Santander.

Las cuatro secciones estructurales construidas se importaron en el software de modelamiento, en los dos estados, con la finalidad de poder crear superficies en base a los horizontes construidos para cada uno de los topes que representan las diferentes formaciones estratigráficas, así como para las fallas.

De igual forma, se generaron secciones en profundidad controladas únicamente con información de superficie, con el fin de controlar mejor la estructuración de la Cuenca Huallaga, basado en la interpretación de la geometría de las 4 secciones principales, ajustadas con datos sísmicos y de superficie.

Figura 79. Visualización de las secciones empleadas en el modelamiento 3D, se incluyen las 4 secciones principales y 6 secciones de control, generadas a partir de la interpretación de geometría de las 4 secciones base y ajustadas con superficie.

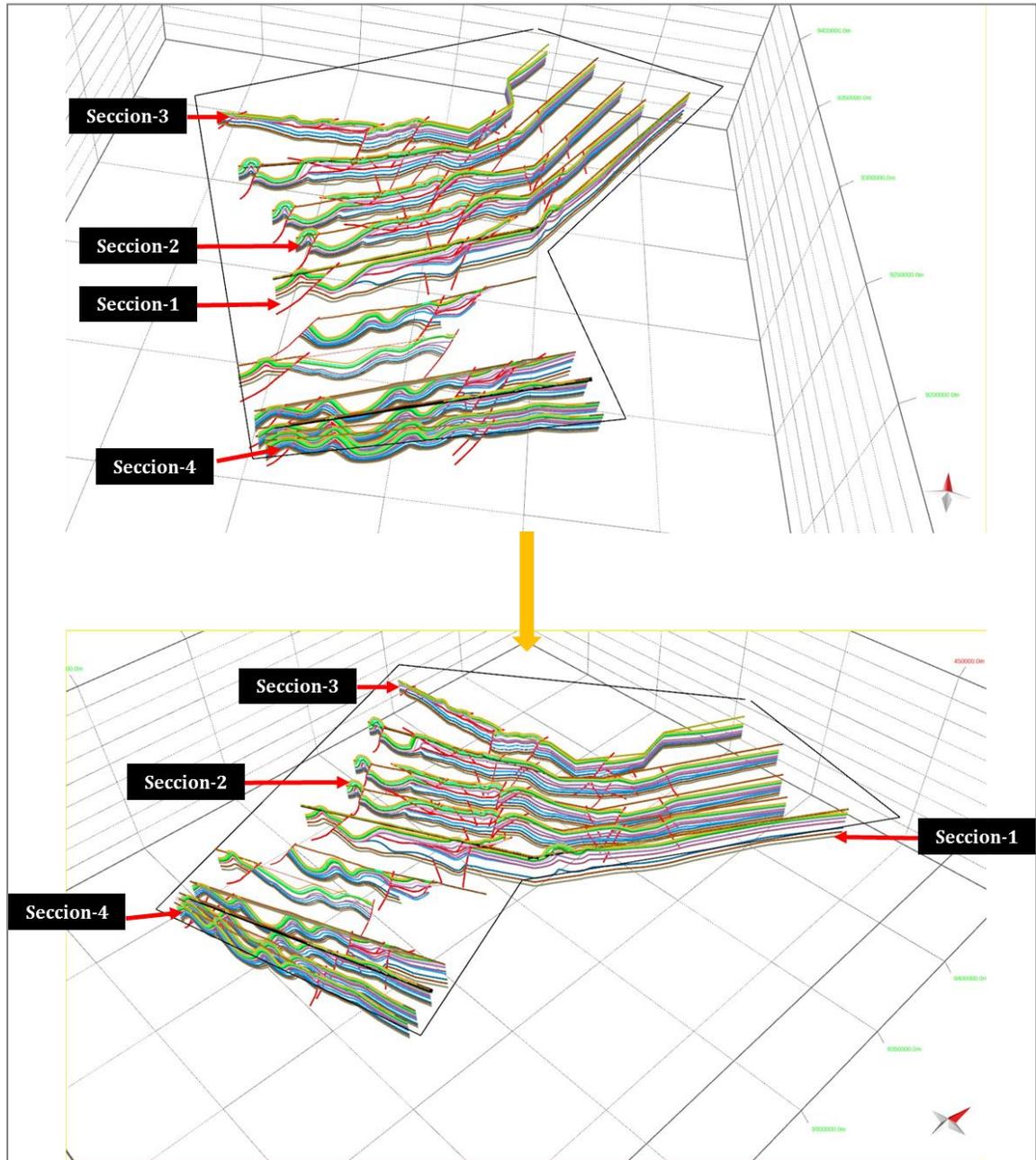
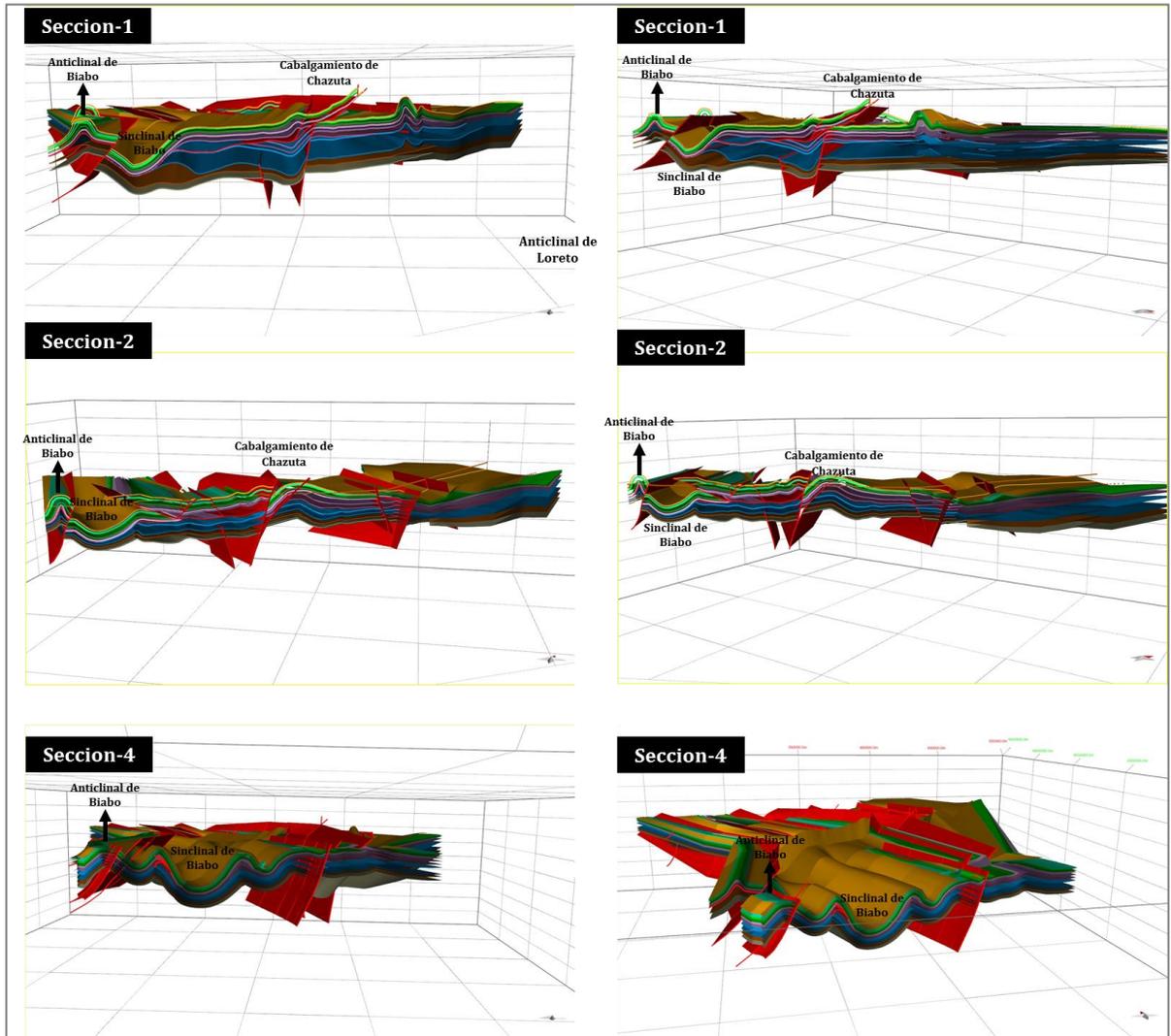


Figura 80. Modelamiento 3D, empleando las 4 secciones principales y las 6 secciones adicionales generadas con base en datos de superficie. Se observan las estructuras del anticlinal y sinclinal de Biabo y el cabalgamiento de Chazuta.



5. DISCUSIÓN

5.1 COMPARACIÓN DE MODELOS Y ESTILO ESTRUCTURAL

En los últimos 30 años, se han realizado diversas interpretaciones estructurales que permiten definir la evolución de la zona Subandina Peruana. Teniendo en cuenta parámetros fundamentales que condicionan el estilo estructural de la Cuenca Huallaga y el margen Occidental de la Cuenca Marañón.

La Cuenca Huallaga, se encuentra influenciada por tectónica salífera, asociada a los niveles evaporíticos del Grupo Pucará; de edad Triásico – Jurásico, característica puesta en manifiesto en todos los modelos construidos desde los años 1980 (Ver párrafo 2.1) .

Estos niveles salinos, han sido aprovechados por la mayoría de los intérpretes, dada la buena calidad sísmica de la línea-23, con la cual se han construido la mayoría de modelos y secciones estructurales. Estos modelos coinciden en representar un despegue regional que evoluciona en dirección del frente orogénico y que es conocido como el cabalgamiento de Chazuta.

Considerando, el estilo estructural para la Cuenca Santiago al Norte del Perú, es importante resaltar que se conservan los condicionantes salinos; en los cuales se desarrolla una tectónica mixta tipo *thick skinned* y *thin skinned*.

Por el contrario, para la Cuenca Huallaga, se han evidenciado variaciones en la interpretación del estilo estructural, condicionado por la mayoría de modelos construidos; por una tectónica dominante tipo *thin skinned*, influenciada por los mismos niveles salinos asociados al Grupo Pucará, que de la misma forma

intervienen durante la estructuración de las dos Cuencas (Santiago y Huallaga). Esta sal puede constituir un excelente nivel de despegue que originan importantes sistemas de corrimientos con vergencia al Este, deformados en profundidad por probables inversiones tectónicas transpresivas, que aún se hacen sentir en estas latitudes de las Cuencas Subandinas¹²².

Contrastando el modelo estructural de la Cuenca Santiago y la Cuenca Huallaga, es claro que el modelo actual es complejo. Se encuentra bordeado por un cinturón de cabalgamientos marginal, que parece evolucionar lateralmente; a partir de valores grandes de acortamiento a valores pequeños de Sur a Norte, estableciendo de esta manera; un cambio drástico en el estilo estructural que no ha sido justificado.

La zona Sur, que coincide con la Cuenca de *wedge top*¹²³ de Huallaga, presenta valores de acortamiento entre 70 y 142km^{124, 125, 126} y hacia el Norte, en la zona de la Cuenca Santiago, los valores de acortamiento son mucho más moderados, del orden de 10 km^{127, 128, 129}. Estas diferencias en los valores de acortamiento muestran variaciones en el estilo estructural de la zona Subandina entre la latitud de Santiago (4°S) y la de Huallaga (6°S).

¹²² Gil Rodríguez, 2001. Op. Cit.

¹²³ DECELLES, GILES, Op. Cit.

¹²⁴ Gil Rodríguez, 2001. Op. Cit.

¹²⁵ HERMOZA, W et al., Op. Cit.

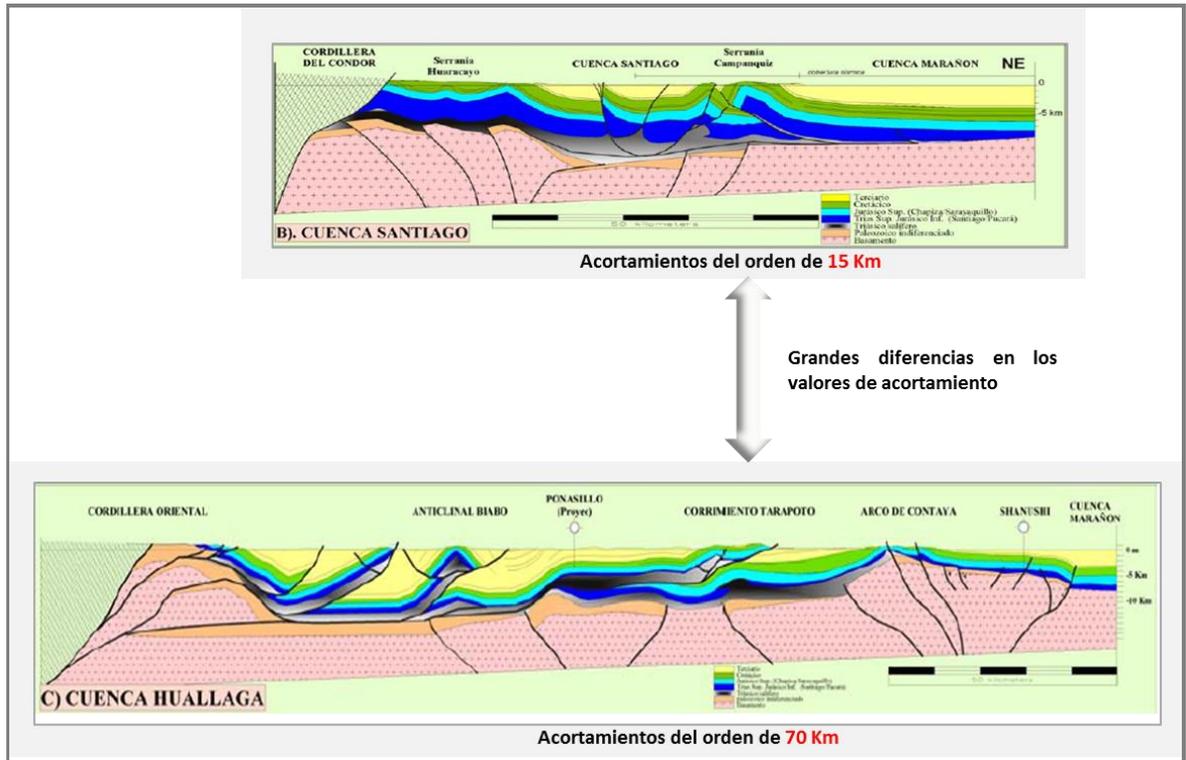
¹²⁶ Eude Op. Cit.

¹²⁷ Gil Rodríguez, 2001. Op. Cit.

¹²⁸ HERMOZA, W et al., Op. Cit.

¹²⁹ Antenor. Op. Cit.

Figura 81. Secciones estructurales equiparables a lo largo del rumbo. Superior, corresponde a la interpretación estructural para la Cuenca Santiago, latitud (4°S). Inferior, sección para la Cuenca Huallaga, latitud (6°S). (Modificado de Gil Rodríguez, 2001). Nótese la diferencia sustancial en los valores de acortamiento calculados para cada una de las cuencas, del orden de 15km y 70km respectivamente.



Consecuentemente, la explicación para estas diferencias sustanciales de acortamiento entre la Cuenca Santiago y la Cuenca Huallaga, implican posibles hipótesis que podrían llegar a complicar la evolución del frente orogénico de la zona Subandina (Parágrafo 5.1.1 y 5.1.2). Lo que en este trabajo se propone como solución, es simplificar y establecer de manera coherente la no existencia de variaciones laterales drásticas en los valores de acortamiento, por ende en el estilo estructural (Parágrafo 5.1.3), planteando un nuevo modelo que limita

sustancialmente la magnitud del acortamiento, basado en evidencias claras que no han sido expuestas hasta el momento.

5.1.1 Emplazamiento de mantos cabalgantes con rotación de eje vertical en sentido anti horario. Suponiendo que el modelo actual planteado sea válido¹³⁰,¹³¹,¹³² y que definitivamente existan diferencias en los valores de acortamiento a lo largo del rumbo, reflejado en un estilo estructural de la Cuenca Huallaga complejo, solo podría explicarse en primera instancia; a partir del emplazamiento de escamas cabalgantes con rotación de eje vertical en sentido anti-horario (Figura 5.2). Lo cual implica que el frente de deformación tenga un diacronismo, sea oblicuo con respecto a la dirección del *backstop* (Región localizada dentro del *forearc* que tiene significativamente mayor resistencia y que puede interpretarse como un “bulldozer” ubicado detrás de la cuña de acreción. Byrne et al., 1993) y exista un punto pivote¹³³. Asimismo, este tipo de rotaciones verticales estarían acompañadas del desarrollo de numerosas rampas oblicuas, con el fin de dar lugar a las diferencias estructurales reflejadas en valores de acortamiento. De igual forma, se tendría evidencia de rotación individual en cada uno de los *thrust sheets* desarrollados, variando significativamente su movimiento y diferenciados de manera; que para los *thrust sheets* más antiguos se mostrarían altos niveles de rotación en su eje vertical mientras que en los jóvenes no.¹³⁴

Cabe resaltar que en este trabajo, no se observó ninguna evidencia que implique o justifique características relacionadas con esta hipótesis, por lo tanto se descarta que exista algún tipo de emplazamiento de mantos cabalgantes por emplazamiento con rotación de eje vertical en sentido anti-horario.

¹³⁰ Gil Rodríguez, 2001. Op. Cit.

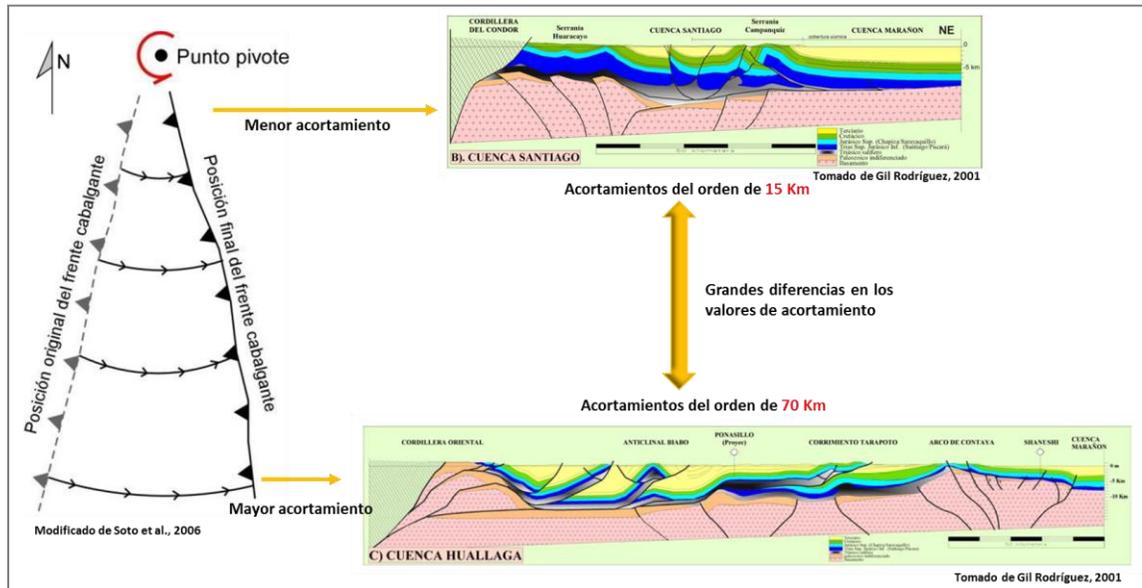
¹³¹ HERMOZA, W et al., Op. Cit.

¹³² Eude et al Op. Cit.

¹³³ SOTO, R et al., Along-strike variation of orogenic wedges associated with vertical axis rotations. Journal of Geophysical Research, VOL. 111, pp. 1-22. 2006.

¹³⁴ Ibid

Figura 82. Variaciones en los valores de acortamiento soportadas por un modelo estructural complejo para la Cuenca Huallaga (Gil Rodríguez, 2001. Hermoza, 2005 y Eude et al, 2015), a partir del emplazamiento de escamas cabalgantes con rotación de eje vertical en sentido anti horario planteado por (Soto et al., 2006).

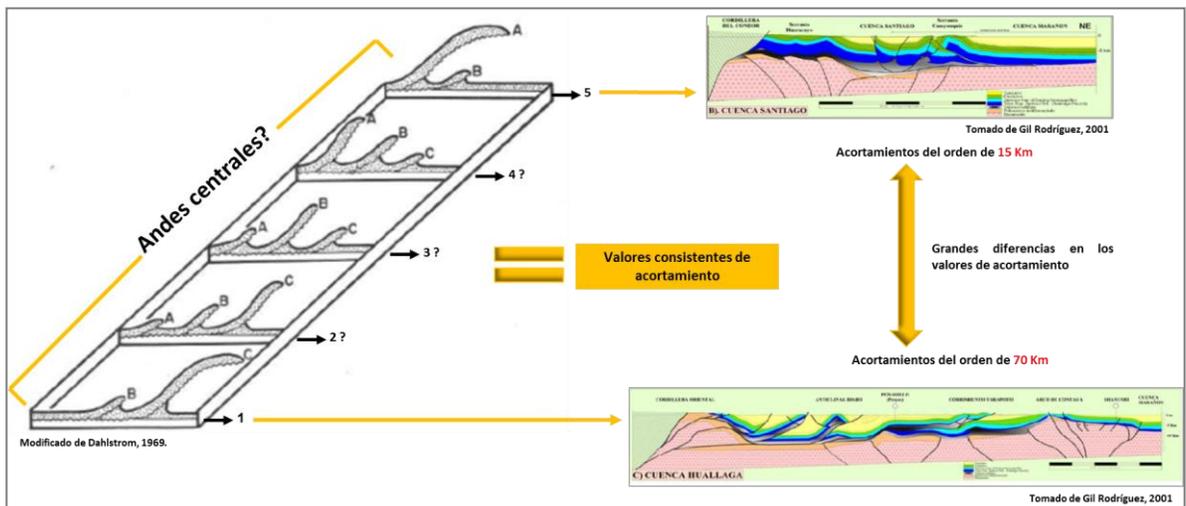


No obstante, este tipo de modelos tienen limitaciones que se relacionan con el comportamiento natural durante el desarrollo de los sistemas de cabalgamiento, (1) el *backstop* es generalmente no uniforme a lo largo del rumbo. (2) la localización del punto pivote dentro del sistema, representa casos teóricos y particulares que no necesariamente ocurren en la naturaleza. (3) no se han realizado modelos teóricos donde se involucre sedimentación syn-tectónica y erosión, lo cual influencia el desarrollo de las estructuras en el sistema. Tampoco se ha tenido en cuenta el movimiento flexural de la corteza y la compensación isostática que este proceso conlleva.¹³⁵

¹³⁵ Ibid

5.1.2 Presencia de zonas de transferencia. En segunda instancia, otra posible hipótesis que permitiría explicar las diferencias sustanciales en los valores de acortamiento (si las hay), evidenciados en la zona Subandina Peruana, estaría relacionada con la presencia de zonas de transferencia. Las cuales pueden ser observadas a través de la construcción de varias secciones estructurales seriadas a lo largo del rumbo, permitiendo definir variaciones graduales en los frentes de cabalgamiento; que son compensados o “transferidos” por mecanismos en los desplazamientos de las fallas desde una estructura a otra.¹³⁶

Figura 83. Variaciones en los valores de acortamiento soportadas por la existencia de una posible zona transferencia. Los valores de acortamiento calculado para cada uno de los 5 cortes estructurales deben ser similares, si se evidencian diferencias en dichos valores, estará asociado a falta de información o deficiencia en la limitación de la zona de transferencia.



¹³⁶ DAHLSTROM, Op. Cit.

El reconocimiento de estas zonas de transferencia permite hacer correlaciones entre fallas inversas provenientes de un mismo sistema cabalgante, ya que cuando una falla desaparece, esta es relevada por otra, permitiendo que el proceso de deformación cabalgante persista (Dahlstrom, 1969). De igual forma, los valores de acortamiento general a lo largo del frente de deformación deben ser consistentes, a no ser que no se tenga identificada muy bien la zona, lo que conlleva a tener variaciones en los valores de acortamiento (Figura 80). En este trabajo, no se observaron evidencias de la existencia de zonas de transferencia, por lo tanto, se descarta esta hipótesis como explicación de las diferencias sustanciales en los valores de acortamiento a lo largo del rumbo para la Cuenca Huallaga.

5.1.3 Propuesta modelo de moderado aloctonismo para la Cuenca Huallaga.

Finalmente, con el desarrollo de este trabajo de investigación, se plantea que simplemente no existen diferencias sustanciales en los valores de acortamiento; a lo largo de la zona Subandina Peruana central. Lo cual implica, que en los modelos estructurales actuales; se han venido sobrestimando dichos valores, a partir de la construcción de modelos que no tienen en cuenta un contexto geológico consistente, además de la deficiencia en la explicación de dicha complejidad estructural acrecentada en la Cuenca Santiago y la Cuenca Huallaga.

El primer modelo realizado para el área¹³⁷, es valorado y retomado en este trabajo de investigación, ya que cuenta con una característica que es coherente con la tectónica evidenciada al Norte en la Cuenca Santiago. En donde los niveles salinos condicionan la deformación mostrando moderado aloctonismo para las estructuras desarrolladas (Parágrafo 2.1.1).

¹³⁷ Mobil. Op. Cit

El modelo propuesto en este trabajo de investigación (Figura 81), establece la presencia de una discordancia localizada a la base del Cretácico, que es aprovechada y levemente reactivada como falla; por los niveles evaporíticos del Grupo Pucará, interpretada en modelos previos como un cabalgamiento de gran salto¹³⁸,¹³⁹,¹⁴⁰

Sin duda alguna, este trabajo representa una idea de contraposición a la tendencia interpretativa de proponer grandes cabalgamientos en los frentes de deformación de las Cuencas Subandinas, desarrolladas en la década de los 90 y los años 2000. Así como son los trabajos de Gil Rodríguez¹⁴¹, Hermoza¹⁴², Eude¹⁴³ entre otros (Figura 82).

Las evidencias que soportan el modelo propuesto para este trabajo de investigación, radican en el entendimiento del estilo estructural de la zona Subandina Peruana central, involucrando estudios de interpretación sísmica para las Cuencas Huallaga y margen Occidental de la Cuenca Marañón, en donde se evidencian estructuraciones con menor reactivación (Figura 83), como se muestra a continuación.

¹³⁸ GIL RODRÍGUEZ, 2001. Op. Cit.

¹³⁹ HERMOZA, W et al Op. Cit.

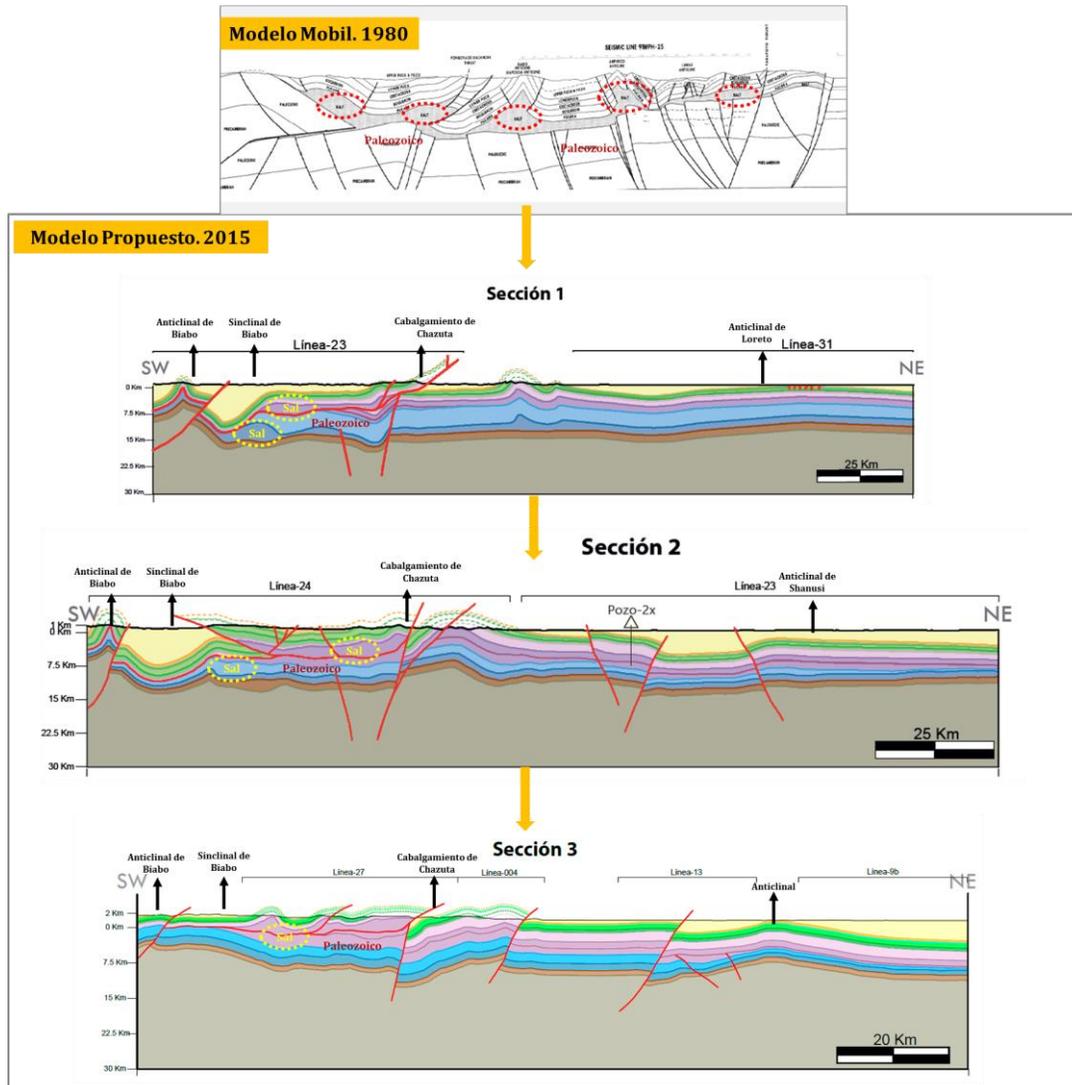
¹⁴⁰ EUDE et al. Op. Cit.

¹⁴¹ GIL RODRÍGUEZ, 2001. Op. Cit.

¹⁴² HERMOZA, W et al Op. Cit.

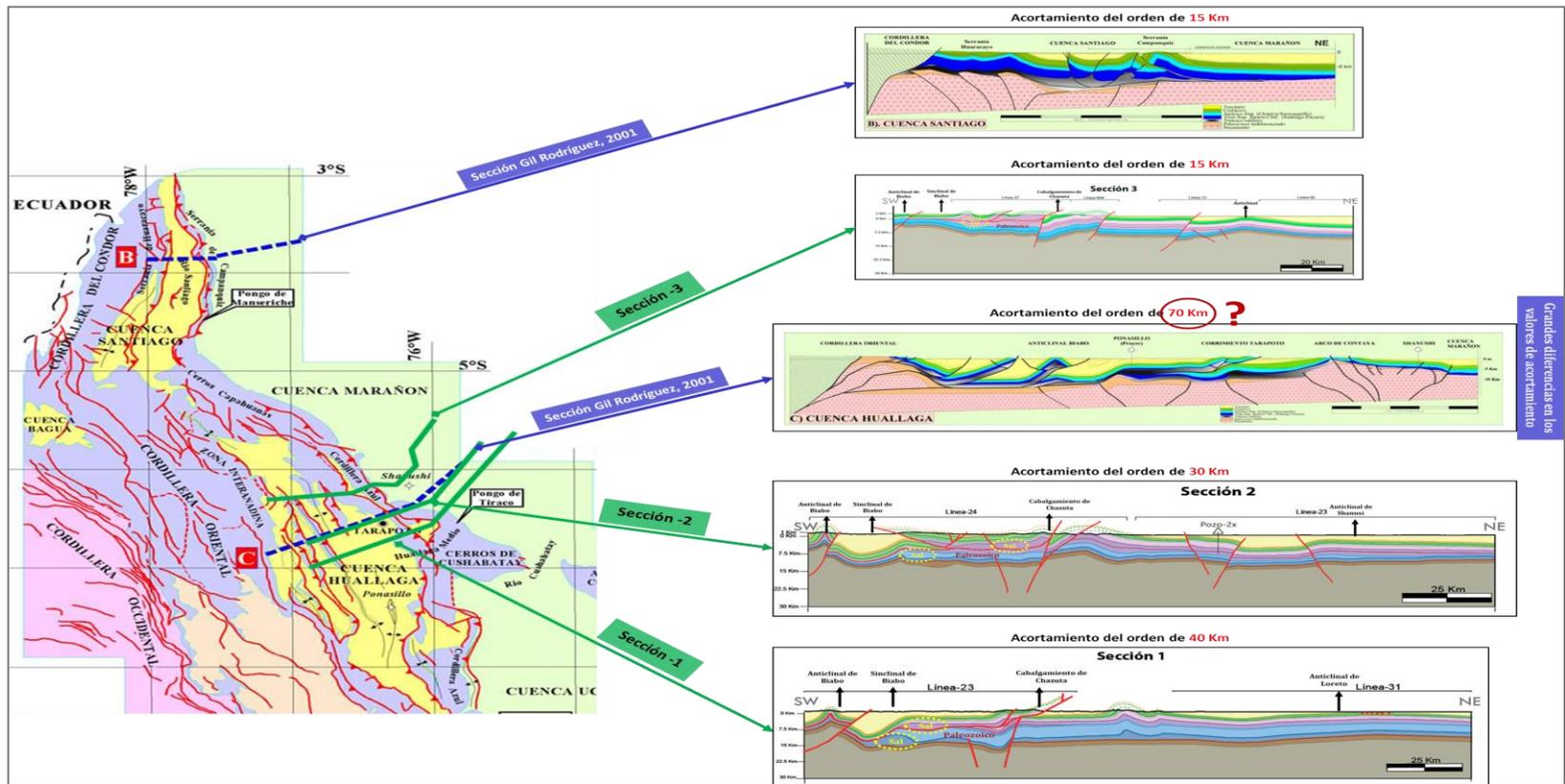
¹⁴³ Eude et al. Op. Cit

Figura 84. Comparación modelo Mobil (1980) (Superior en escala de grises) y modelo propuesto (imagen en color). Se evidencia la influencia de los niveles salinos del Grupo Pucará, dentro del despegue regional y la superposición Mesozoico versus Paleozoico.



Así, como la implicación que poseen los niveles salinos, condicionantes dentro de la tectónica tipo *thin skinned* dominante y la presencia de cuerpos de sal de posible edad Paleozoico, evidenciadas en las características sísmicas del área de estudio (Parágrafo 5.2).

Figura 85. Comparación modelo Gil Rodríguez (2001) (Indicadas con flechas en azul) y modelo propuesto (indicada con flechas en verde). Se muestra la diferencia en los valores de acortamiento para el modelo actual y el modelo propuesto, en la Cuenca Huallaga. Asimismo, la coherencia de los valores de acortamiento con la sección de la Cuenca Santiago al Norte tomada de .Gil Rodríguez (2001).



▬ **Ejemplos estructuras similares con menor reactivación en la Cuenca Marañón**

Particularmente, se manifiesta una semejanza en el estilo estructural evidenciado en el margen Occidental de la Cuenca Marañón, en donde se encontraron estructuraciones que muestran una menor reactivación (Figura 5.6) comparado con el estilo estructural de la Cuenca Huallaga (Figura 84), manteniendo estructuras representadas por la reactivación de antiguas fallas normales que ratifican el proceso de inversión tectónica positiva desarrollado en el foreland. Esta similitud y el hecho de localizar a las Cuencas Marañón como el *foredeep* y la Cuenca Huallaga como el *wedge top*, es razonable, enmarcado dentro del contexto de la evolución del cinturón orogénico que representa mayores estadios de deformación en cercanía a la cordillera oriental como tal.

Figura 86. Estilo estructural del margen Occidental de la Cuenca Marañón, asociado a la inversión tectónica positiva de fallamiento Permo-Triásico.

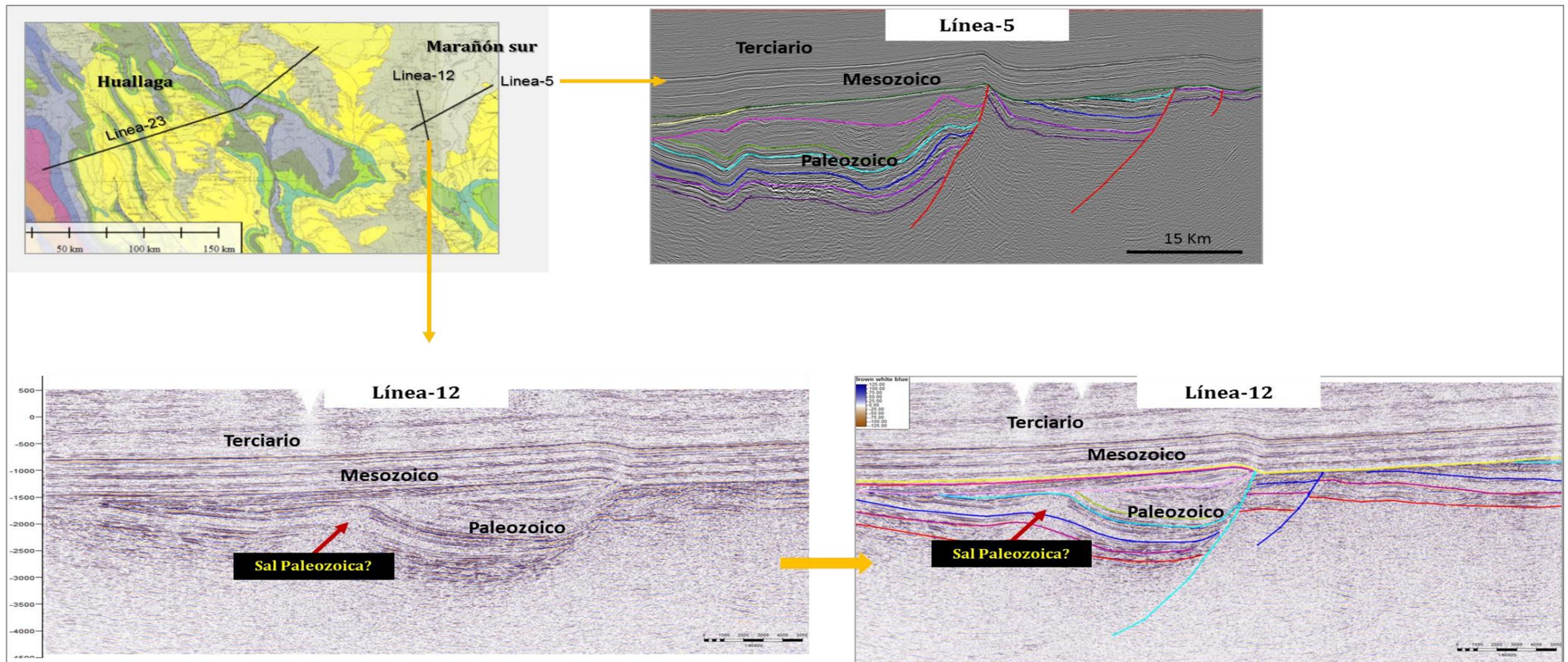


Figura 87. Semejanza entre el estilo estructural de la Cuenca Huallaga y el margen Occidental Sur de la Cuenca Marañón. Nótese como se evidencia estructuración con menor reactivación en el *foredeep* (Marañón) y mayor influencia de la deformación en el *wedge top* (Huallaga), conservando un estilo estructural coherente de moderado aloctonismo.

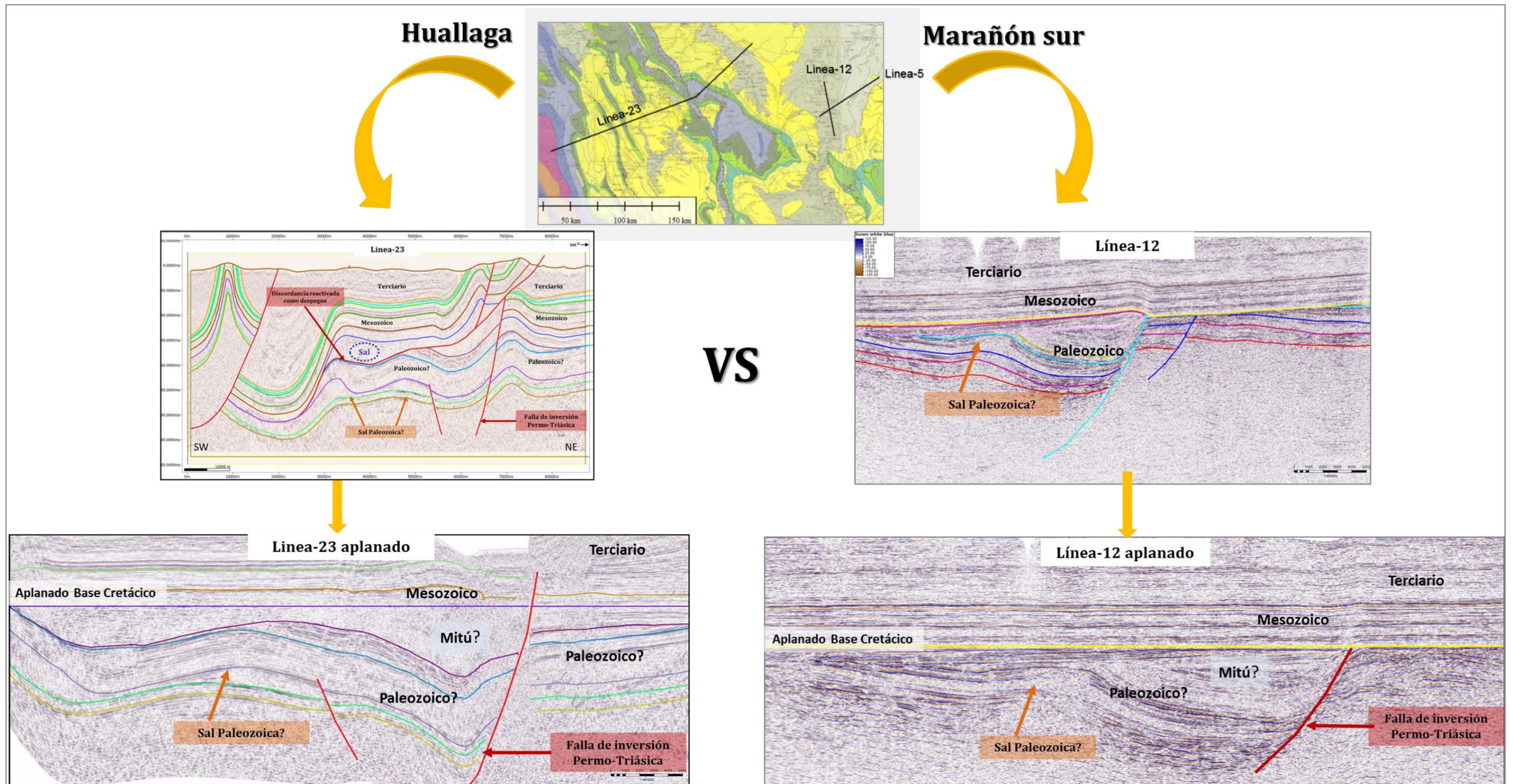
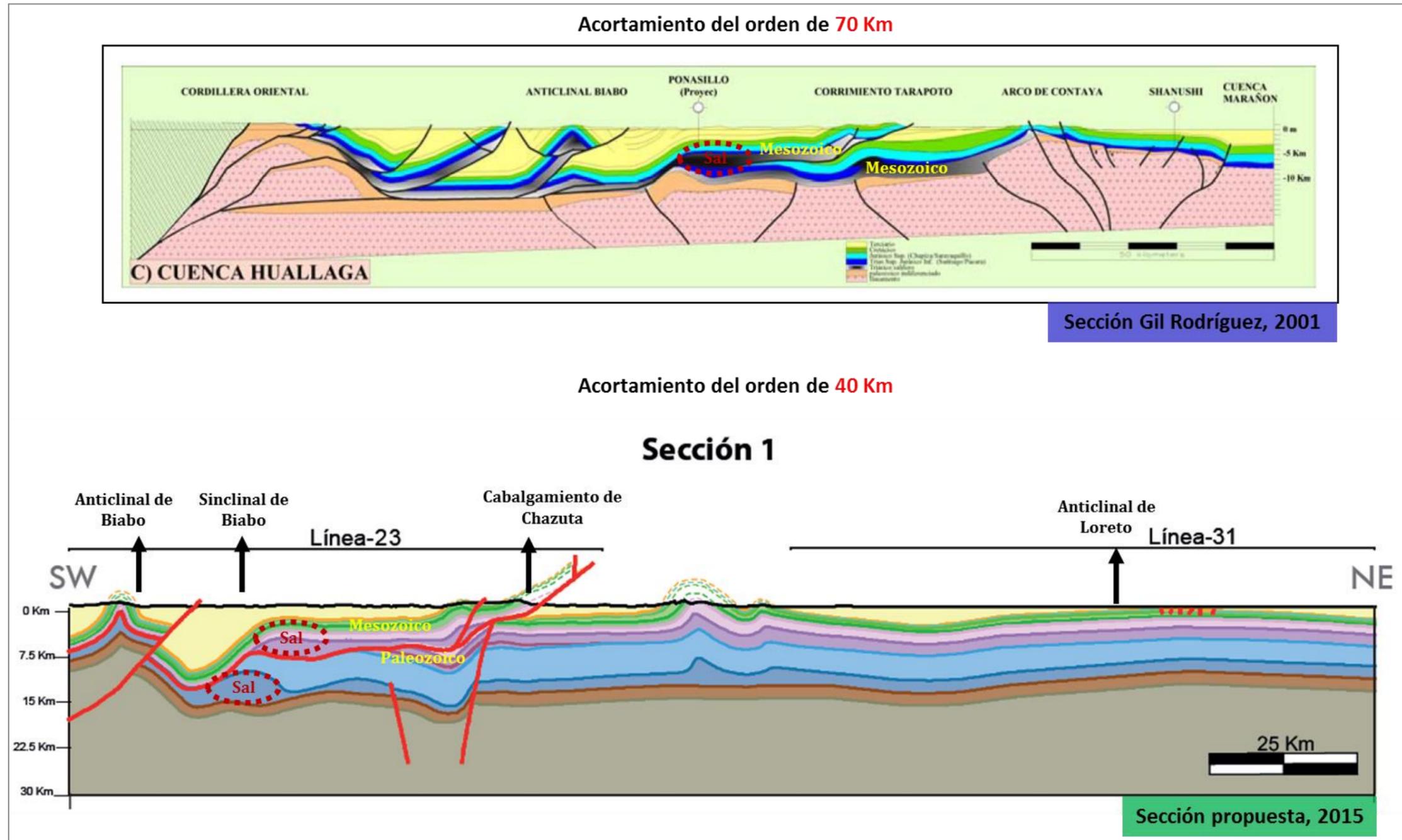


Figura 88. Relación modelo actual (Gil Rodríguez, 2001) y modelo propuesto. Nótese la diferencia en el estilo estructural. Superior, superposición de unidades de edad Mesozoico y cabalgamiento de gran salto. Inferior, superposición de unidades de edad Mesozoico y Paleozoico, a partir de una discordancia reactivada como falla, condicionada por los niveles salinos del Grupo Pucará.



5.2 INFLUENCIA DE NIVELES SALINOS EN LA TECTÓNICA DE LA CUENCA HUALLAGA Y MARGEN OCCIDENTAL DE MARAÑÓN

En la imagen sísmica se lograron identificar anomalías irregulares, o en forma de *turtle anticlines* (Figura 86 a 87), las cuales se generan durante el estadio del movimiento y crecimiento de la sal desde la geometría inicial *de salt pillows*.¹⁴⁴

Analizando el contexto del estilo estructural evidenciado; tanto para el margen Occidental de la Cuenca Marañón, como para la Cuenca Huallaga en el Paleozoico, es posible que se manifieste un diapirismo reactivo, dadas las condiciones requeridas para que este evolucione y el cual no ha sido propuesto en trabajos anteriores, dada la relación que se atribuye a niveles salinos relacionados con el Grupo Pucará únicamente. Este diapirismo reactivo podría depender de singularidades como, alargamiento por extensión de la cobertera a escala regional, ya que las fallas normales crean el espacio necesario para el ascenso de la sal dentro de la estructura del graben.

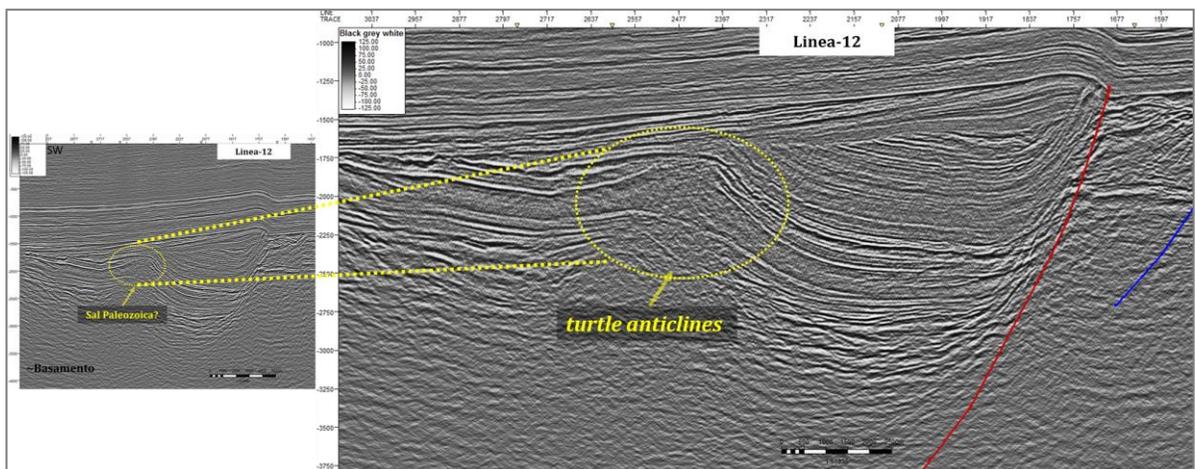
Asimismo, dentro de una tectónica compresiva, uno de los procesos que propician el tipo de estructura salina *pillowlike*, está relacionado con el acortamiento a nivel regional, condicionado por tectónica *thin skinned*, generando anticlinales que se elevan por encima del *datum* regional y sinclinales adyacentes que acumulan sedimentos más gruesos en su centro. El acortamiento originado por la formación de estas estructuras, explica porque la sal deja de crecer y permanece en el estado inicial de *salt pillow*, ya que cuando el acortamiento regional cesa, los niveles salinos no tienen el espacio suficiente para crecer y empiezan a migrar lateralmente.¹⁴⁵

¹⁴⁴ TRUSHEIM, F. Mechanism of salt migration in Northern Germany. AAPG Bulletin, 44, pp.1519-1540. 1960.

¹⁴⁵ VENDEVILLE, B. C. A new interpretation of Trusheim's classic model of salt diapir growth. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, Volume 52, pp. 943-952. 2002.

De igual forma, la migración progresiva de cuerpo salino, puede ser interpretada entendiendo las relaciones estructurales y estratigráficas presentes en el registro sedimentario que rodean el cuerpo como tal. Estas secuencias asociadas a los cuerpos diapíricos de sal se denominan; secuencias halogénicas, y se caracterizan generalmente por evidenciar niveles discordantes que marcan la estructuración y crecimiento del cuerpo en las variaciones temporales del relieve de las rocas que lo suprayacen^{146, 147}.

Figura 89. Sección sísmica de la línea-12 localizada en el margen Occidental de la Cuenca Marañón. Se muestra la geometría típica de un cuerpo salino en forma de *turtle anticline*, condicionada por tectónica de extensión regional.



¹⁴⁶ GILES, K. Tracking the Migration of Salt Diapirs Using Halokinetic Sequence Stratigraphy. Search and Discovery Article #50260 (2010). AAPG Datapages, pp. 1-3, 8-10. 2010.

¹⁴⁷ GILES, K., LAWTON T. Halokinetic sequence stratigraphy adjacent to the El Papalote diapir, northeastern Mexico. AAPG Bulletin, v. 86, pp. 823-840. 2010.

Figura 90. Sección sísmica de la línea-23 localizada en la Cuenca Huallaga. Se muestra la geometría típica de un cuerpo salino en evolución, como diapirismo en la etapa temprana según estructura de *pillowlike*, conservando la forma de *turtle anticline* y condicionada por tectónica de extensión regional.

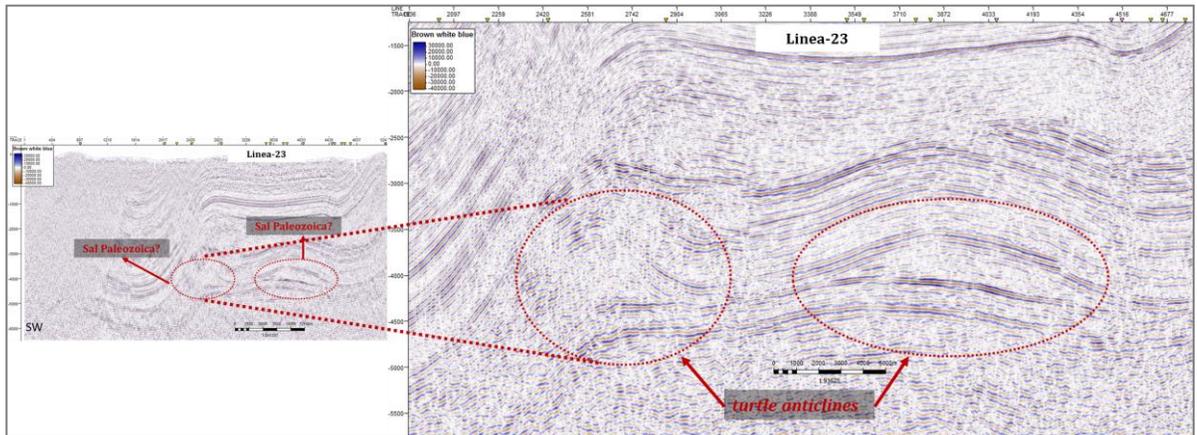


Figura 91. Sección sísmica de la línea-27 localizada en la Cuenca Huallaga. Se muestra la geometría típica en forma de *turtle anticline* y condicionada por tectónica de extensión regional.

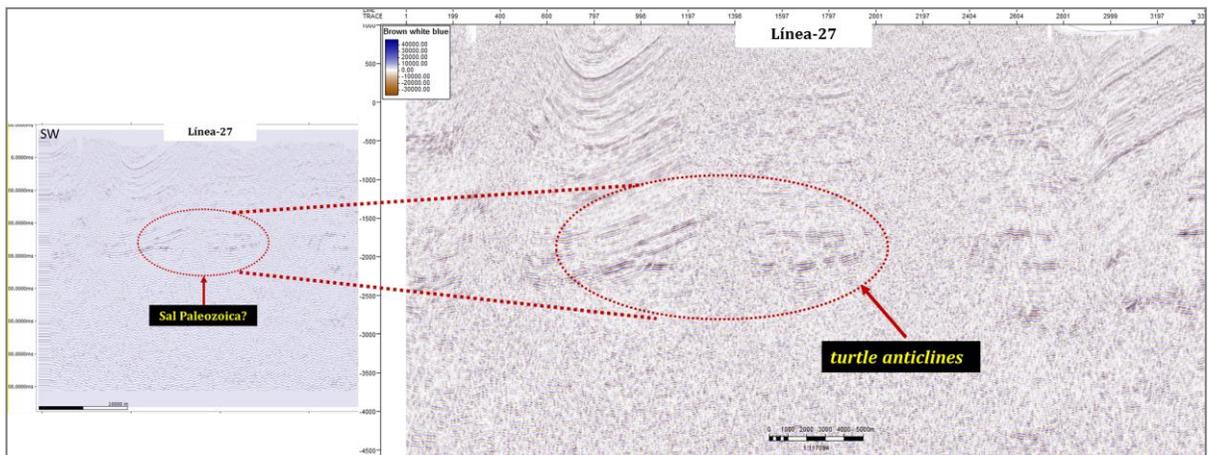
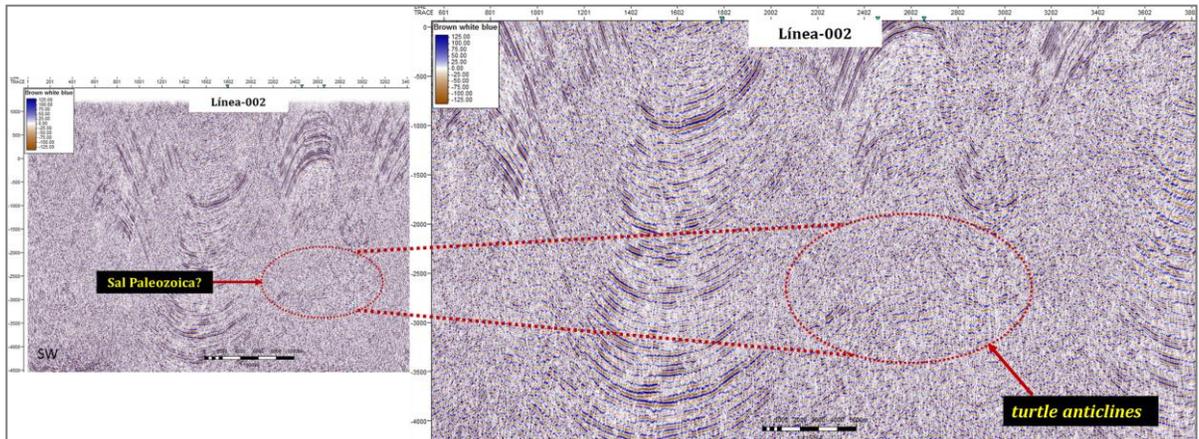


Figura 92. Sección sísmica de la línea-002 localizada en la Cuenca Huallaga. Se muestra la geometría típica de un cuerpo salino en evolución, como diapirismo en la etapa temprana según estructura de *pillowlike*, conservando la forma de *turtle anticline* y condicionada por tectónica de extensión regional.



5.3 IMPLICACIÓN EN LA EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS

En contraste con la discusión realizada en el parágrafo 5.1, es claro que el modelo propuesto en este trabajo de investigación puede llegar a transformar los objetivos exploratorios en la Cuenca Huallaga, haciéndolos menos prospectivos (teniendo en cuenta el modelo actual), a causa de la disminución en la magnitud del acortamiento al cabalgamiento de gran salto asociado al *Thrust* de Chazuta, el cual se caracterizaba por superponer rocas de edad Cretácico, considerablemente atractivas en la industria petrolera.

Adaptando la nueva interpretación, en donde los valores de acortamiento son consistentes con la tectónica evidenciada al Norte en la Cuenca Santiago y en el margen Occidental de la Cuenca Marañón, es significativo el hecho de contar con

nuevas oportunidades prospectivas con *target* de edad Pre-Cretácico o Paleozoico.

Sin embargo, esto se ve representado en que el *play* Cretácico- Cretácico del modelo actual, pierde extensión y que el *play* Paleozoico tiene un enorme riesgo, relacionado con la erosión de final del Paleozoico que ha podido exponer los reservorios.

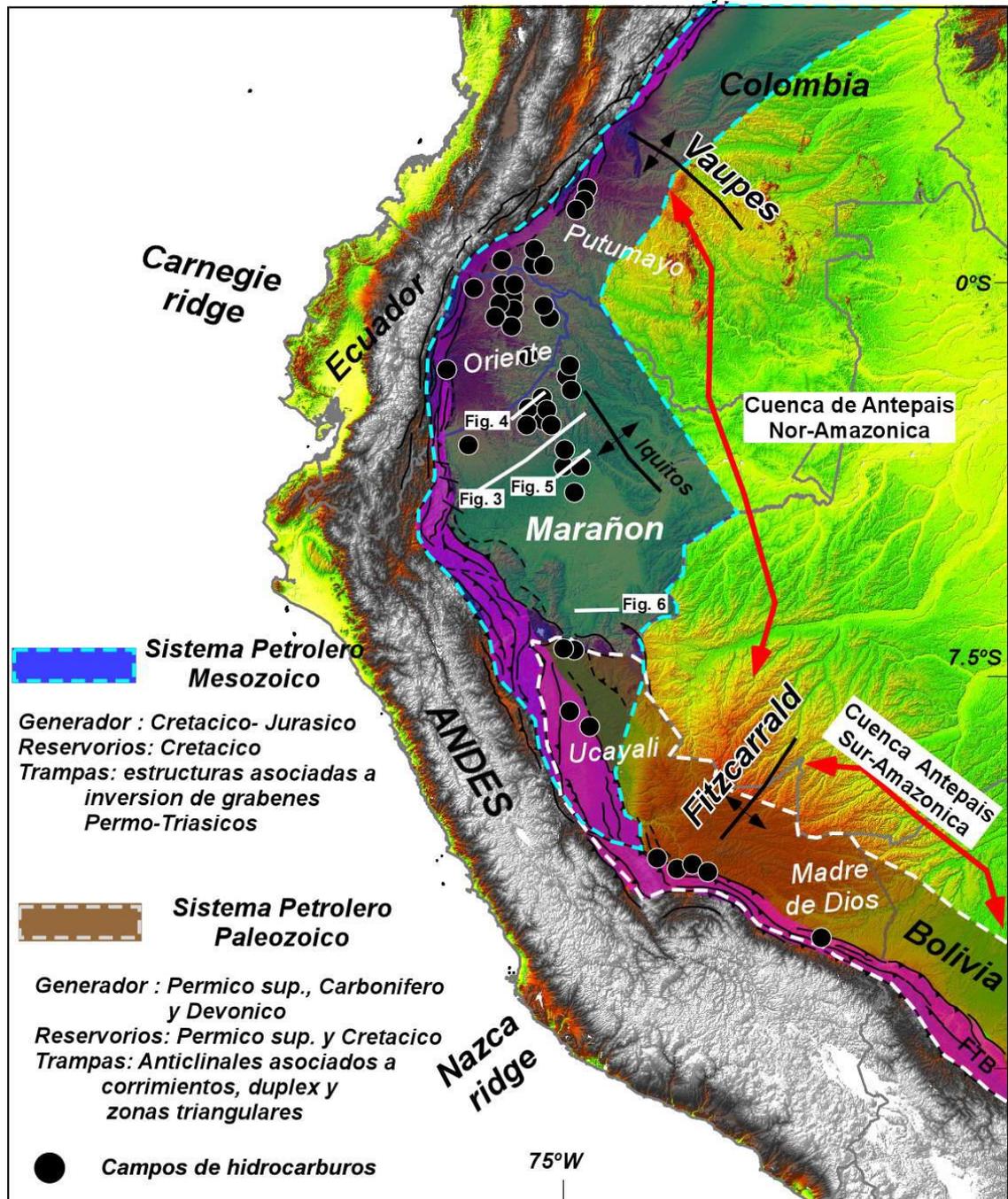
De igual forma, podría existir una semejanza con el sistema petrolífero de la Cuenca Marañón, que dependería de múltiples condicionantes geoquímicos que en este trabajo de investigación no fueron tratados.

El sistema petrolífero para la Cuenca Marañón Pre-Cretácico (Figura 90), está enmarcado dentro de las siguientes características geológicas¹⁴⁸: Se encuentran relacionados con rocas generadoras del Paleozoico (Formación Cabanillas, Ambo y Ene), los reservorios corresponden a series del Pérmico Superior (Formación. Ene) y localmente secuencias del Cretácico (campo Camisea). Las principales trampas estructurales corresponden a anticlinales por propagación y flexión de falla (campos Camisea, San Martín, Cashiriari y Kinteroni), así como anticlinales asociados a duplex localizados en las zonas triangulares internas (campo Candamo). Con respecto a nuevas oportunidades relacionadas con la zona Subandina asociada a la Cuenca Huallaga, no se ha producido ningún descubrimiento importante de hidrocarburos.¹⁴⁹

¹⁴⁸ HERMOZA. Impacto de la estructuras Pre-Cretácicas en el entrapamiento de hidrocarburos de la Cuenca Marañón. ACGGP, pp. 1-7. 2009.

¹⁴⁹ Ibid

Figura 93. Localización de la Cuenca Marañón, dentro del sistema de cuencas antepaís, mostrando generalidades del sistema petrolífero.



Fuente: Tomado de .Hermeza et al., 2009.

Así como la Cuenca Santiago, la Cuenca Huallaga hace parte del sistema de antepaís al que pertenece la Cuenca Marañón en el Perú, denominada como el *wedge top depozone*¹⁵⁰ según la clasificación de este tipo de configuraciones.¹⁵¹

Manteniendo las características del modelo actual^{152, 153, 154}, las estructuras predominantes y atractivas en la exploración de hidrocarburos en la Cuenca Huallaga¹⁵⁵, están dadas por la existencia de sistemas de cabalgamiento que generan una enorme cocina *subthrust* de rocas de edad Cretácico bajo el manto cabalgante, así como pliegues por flexión y propagación de fallas asociadas a sedimentación sin-tectónica.¹⁵⁶

Para la Cuenca Huallaga, no se han probado *plays* hasta el momento. Sin embargo, las areniscas de las Formaciones Cushabatay, Agua caliente y Vivian podrían ser atractivas como rocas reservorio (IHS, Huallaga Basin).

Dentro de la roca generadora, se han evidenciado rezumaderos a lo largo del margen Este de la cuenca, y pueden estar asociados a las rocas del Grupo Pucará (Triásico -Jurásico) y Formación Chonta (Cretácico Superior). Para la roca sello, se tienen en cuenta los shales de la Formación Esperanza (Cretácico Medio), formaciones Chonta y Cachiyacu (Cretácico Superior), las cuales componen un excelente sello regional en la cuenca (IHS, Huallaga Basin).

Finalmente, para las estructuraciones de la trampa, podrían estar asociadas con grabens producto del rifting durante el Triásico – Jurásico. Así como el aprovechamiento de los *pillows salt* formados durante el Paleozoico? y fallamiento

¹⁵⁰ BABY, P. et al., Op. Cit.

¹⁵¹ DECELLES, GILES, Op. Cit

¹⁵² Gil Rodríguez, 2001. Op. Cit.

¹⁵³ HERMOZA, W et al., Op. Cit.

¹⁵⁴ Eude et al. Op. Cit.

¹⁵⁵ VARGAS, J.M., Potencial petrolífero de la Cuenca Huallaga, Oriente Peruano en III Simposio Bolivariano, Exploración petrolero de las Cuencas Subandinas, Caracas. 1988.

¹⁵⁶ HERMOZA, W et al., Op. Cit.

inverso, producto de la inversión tectónica de antiguas fallas normales durante el Terciario.

6. CONCLUSIONES

La Cuenca Huallaga y la Cuenca Santiago, conservan un vínculo geológico durante la evolución tectónica de la zona Subandina Peruana. Lo cual implica que dentro del contexto geológico interpretado en los últimos 30 años, se mantenga un estilo estructural coherente, para las dos cuencas, reflejado a partir del desarrollo de estructuraciones condicionadas por los niveles evaporíticos del Grupo Pucará.

El modelo retomado y ajustado en este trabajo de investigación, consolida el estilo estructural de la Cuenca Huallaga a lo largo del rumbo, reflejado a través del cálculo de valores de acortamiento que son consistentes con el estilo estructural de la Cuenca Santiago al Norte.

Estos valores de acortamiento, evidencian variaciones que son coherentes dada la evolución del frente de cabalgamiento, que se desarrolla dentro de la cuenca, manteniendo una mayor propagación en el centro, y menor en los extremos Norte y Sur.

La seccion-4, localizada al Sur (estructura Ponasillo) y la seccion-3 localizada en el extremo Norte (cercana a los límites de la Cuenca Huallaga-Santiago), muestran valores de acortamiento menores, de 19 y 15 km respectivamente.

Mientras que para la seccion-1 y seccion-2, localizadas en la parte media; donde la propagación del frente de cabalgamiento es más intensa, se muestran valores de acortamiento de 40 y 30 km respectivamente.

Manteniendo una relación coherente con el estilo estructural definido, el cabalgamiento de Chazuta debe tener menos desplazamiento del que previamente se ha interpretado, si se ajusta el modelo como una discordancia

ligeramente reactivada como cabalgamiento, condicionada por los niveles salinos asociados al Grupo Pucará, e involucrando cuerpos de sal de posible edad Paleozoico?, claramente observados en la información sísmica. Así como la influencia de la inversión de una falla normal de edad Permo-Triásico.

La manifestación de esta nueva propuesta, para el estilo estructural de la Cuenca Huallaga, tiene grandes implicaciones de índole prospectivo, puesto que ya no se tienen en cuenta la superposición de rocas de edad Cretácico, altamente atractivas en la industria petrolera. Además de exhibir que el acortamiento tectónico se reduce en magnitud, siendo equiparable con la evolución tectónica de la zona subandina Peruana central.

En otras palabras, se propone un modelo simplificado que podría tener objetivos exploratorios de edad Pre-Cretácico o Paleozoico. Desarrollado a partir de estructuraciones de trampa que podrían estar asociadas con grabens producto del rifting durante el Triásico – Jurásico. Así como el aprovechamiento de los *pillows salt* formados durante el Paleozoico? y fallamiento inverso, producto de la inversión tectónica de antiguas fallas normales durante el Terciario.

7. RECOMENDACIONES

1. Adaptando las condiciones del modelo estructural propuesto para la Cuenca Huallaga, es vital obtener nuevos datos que permitan desarrollar o ratificar lo aquí expuesto. Solo un pozo ha sido perforado al Sur de la cuenca y la información sísmica se encuentra dispersa, con pocas líneas de rumbo que permitan desarrollar un óptimo ajuste.
2. Teniendo en cuenta, que este modelo tiene grandes implicaciones de índole prospectivo, es importante acrecentar la poca relevancia que se ha dado a la cuenca hasta el momento, ya que es un sistema que no ha sido lo suficientemente explorado y que es relativamente inmaduro en prospección de hidrocarburos.

BIBLIOGRAFÍA

ANTENOR, M. MARKSTEINER, R. Structural styles in the Santiago fold and thrust belt, Peru: a salt related orogenic belt. Amoco Production Co. Houston Texas, pp. 147-153. 1993.

ALLEN, P.A., HOMEWOOD, P., WILLIAM, G.D., Foreland basins: an introduction. Special Publication, IAS, 8, pp. 3-12. 1986.

BABY, P. et al., Petroleum Systems Logic in Peruvian Subandean Basins. Perupetro, Lima, Peru. Ingemmet. 2009.

BACON, M. SIMM, R. REDSHAW, T. 3D seismic interpretation. Cambridge University Press pp. 57-66. 2003.

CÁRDENAS, P., LÓPEZ, G., Definición de un modelo estructural de una transecta retrodeformada en el sector Suroccidental del Piedemonte de la Cuenca de Marañón en Perú. Ecopetrol S.A. 2009.

DAHLSTROM, C.D.A., Balanced cross sections. Canadian Journal of Earth Sciences. 6, pp. 743–757. 1969.

DECELLES, P. G., GILES, K. A., Foreland Basin Systems. Basin Research, 8, pp. 105-123. 1996.

EUDE et al. Controls on timing of exhumation and deformation in the northern Peruvian eastern Andean wedge as inferred from low-temperature thermochronology and balanced cross section. AGU Publications. Tectonics, 34, doi:10.1002/2014TC003641, pp. 1-16. 2015.

GIL RODRÍGUEZ et al., Structure et contrôle paléogéographique de la zone subandine péruvienne. *Sciences de la Terre et des planètes / Earth and Planetary Sciences* 333, pp. 741–748. 2001.

GIL RODRÍGUEZ, W., Evolución lateral de la deformación de un frente orogénico: ejemplo de las Cuencas Subandinas entre 0° Y 16°S. Tesis, Universidad Paul Sabatier, Toulouse, p. 150. 2001.

GIL RODRÍGUEZ, W., BABY P., PAZ M., The continuum tectonic during the Cretaceous-Paleocene times in the Andean North-Peruvian foreland basin (Marañón Basin). *Third International Symposium of Andean Geodynamics*, pp. 363-366. 1996.

GILES, K. Tracking the Migration of Salt Diapirs Using Halokinetic Sequence Stratigraphy. *Search and Discovery Article #50260* (2010). *AAPG Datapages*, pp. 1-3, 8-10. 2010.

GILES, K., LAWTON T. Halokinetic sequence stratigraphy adjacent to the El Papalote diapir, northeastern Mexico. *AAPG Bulletin*, v. 86, pp. 823-840. 2010.

HERMOZA, W., Dinámica tectono-sedimentaria y restauración secuencial de la cuenca de antepaís de los Andes centrales. Tesis, Universidad Paul Sabatier, Toulouse, p. 258. 2001.

HERMOZA, W et al., The Huallaga foreland basin evolution: Thrust propagation in a deltaic environment, northern Peruvian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 19, pp. 21-34. 2005.

------. Impacto de la estructuras Pre-Cretácicas en el entrapamiento de hidrocarburos de la Cuenca Marañón. ACGGP, pp. 1-7. 2009.

HORTON, C., DeCelles, P., The modern foreland basin system adjacent to the Central Andes. *Geology*, 25-10, pp. 895-898. 1997.

IHS Inc Database. The source for critical information and insight. Huallaga Basin, pp. 4-6. 2015.

Ingemmet. Carta geológica nacional. Serie A. Lima Perú. 1999.

Ingemmet. Geología de los cuadrángulos de Moyobamba, Saposoa y Juanjuí. Holas 13-j, 14-j y 15j. Boletín No 122. Serie A: Carta Geológica Nacional. Lima Perú, Capítulo IV. 1999.

MCCLAY, K. R. Tectonic regimes and fault systems: Structural geology for petroleum exploration. Volume I. University of London, pp. 173-182. 2000.

Midland valley overview. Algorithm advice. 2015. Disponible En: www.mve.com.

Mobil. Final Report: Huallaga Basin, Peru Blocks 28, 29, 30 and 53. Mobil Expl. and Prod. Peru Inc. 1980.

NEMCOK, M. SCHAMEL, S. GAYER, R. Thrustbelts. Structural Architecture, Thermal Regimes and Petroleum Systems. Cambridge University Press, pp. 58-109. 2005.

PARSEP. The Huallaga basin and adjacent area. The Hydrocarbon Potential of NE Peru: Huallaga, Santiago and Marañón Basins Study. Final Report PeruPetro S.A, pp. 10-41. 2000.

----- . Oil generation in Subandean basins of Peru. Final Report PeruPetro S.A, pp. 3-8. 2000.

----- . The Huallaga basin and adjacent area. The Hydrocarbon Potential of NE Peru: Huallaga, Santiago and Marañon Basins Study. Final Report PeruPetro S.A, pp. 15-27. 2001.

POBLET, J. Geometría y cinemática de pliegues relacionados con cabalgamientos. Departamento de geología, Universidad de Oviedo, pp. 127-135. 2004.

RODDAZ, M., BABY, P., BRUSSET, S., HERMOZA, W., DARROZES, J.M., Forebulge dynamics and environmental control in Western Amazonia: the case study of the Arch of Iquitos (Peru). Tectonophysics, pp. 529-532. 2004.

ROSAS, S et al., Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucara Basin, central Peru. Journal of South American Earth Sciences 24, pp. 1-24. 2007.

SOTO, R et al., Role of lateral thickness variations on the development of oblique structures at the Western end of the South Pyrenean Central Unit. Tectonophysics 350, pp. 215-235. 2002.

SOTO, R et al., Along-strike variation of orogenic wedges associated with vertical axis rotations. Journal of Geophysical Research, VOL. 111, pp. 1-22. 2006.

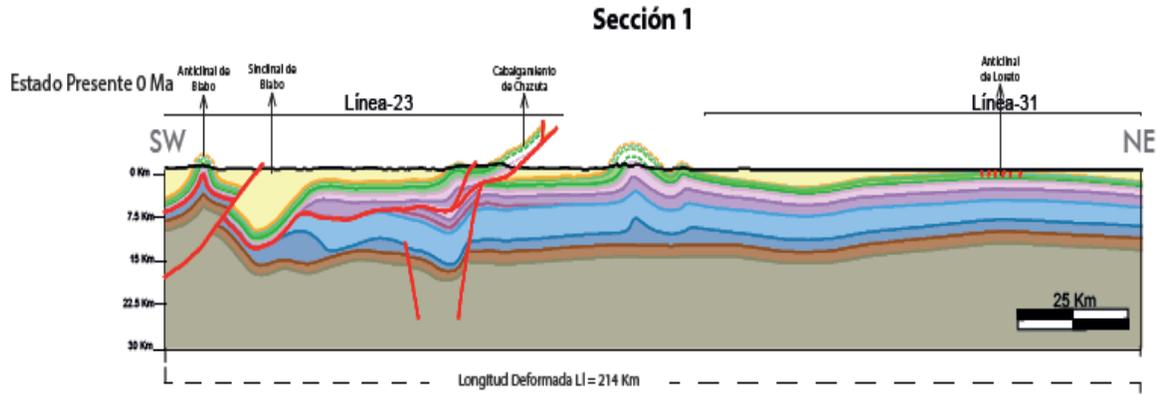
TRUSHEIM, F. Mechanism of salt migration in Northern Germany. AAPG Bulletin, 44, pp.1519-1540. 1960.

VARGAS, J.M., Potencial petrolífero de la Cuenca Huallaga, Oriente Peruano en III Simposio Bolivariano, Exploración petrolero de las Cuencas Subandinas, Caracas. 1988.

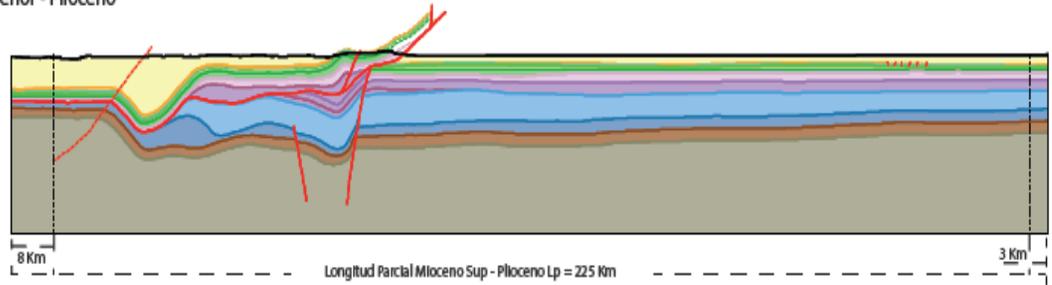
VENDEVILLE, B. C. A new interpretation of Trusheim's classic model of salt diapir growth. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, Volume 52, pp. 943-952. 2002.

ANEXOS

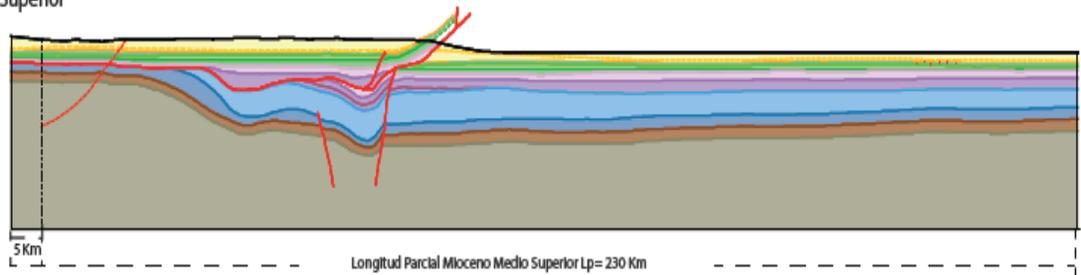
ANEXO A. Sección-1 estado deformado y no deformado



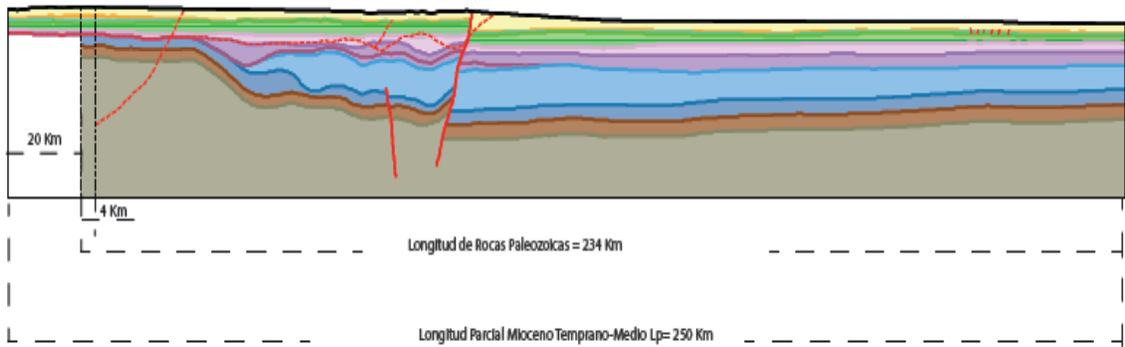
Mioceno Superior - Plioceno



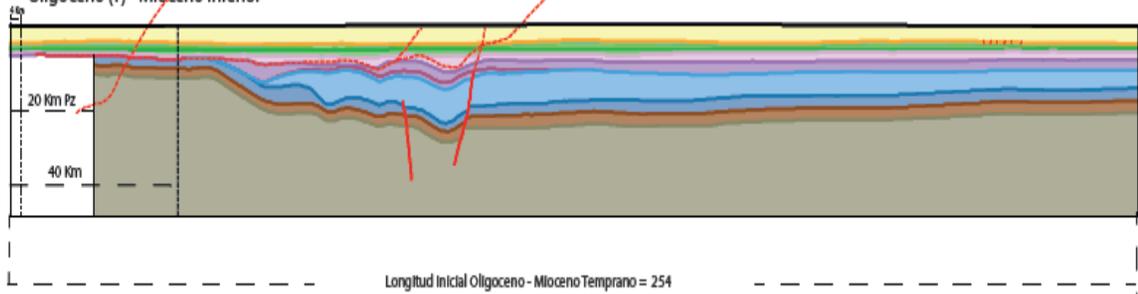
Mioceno Superior



Mioceno Medio - Superior

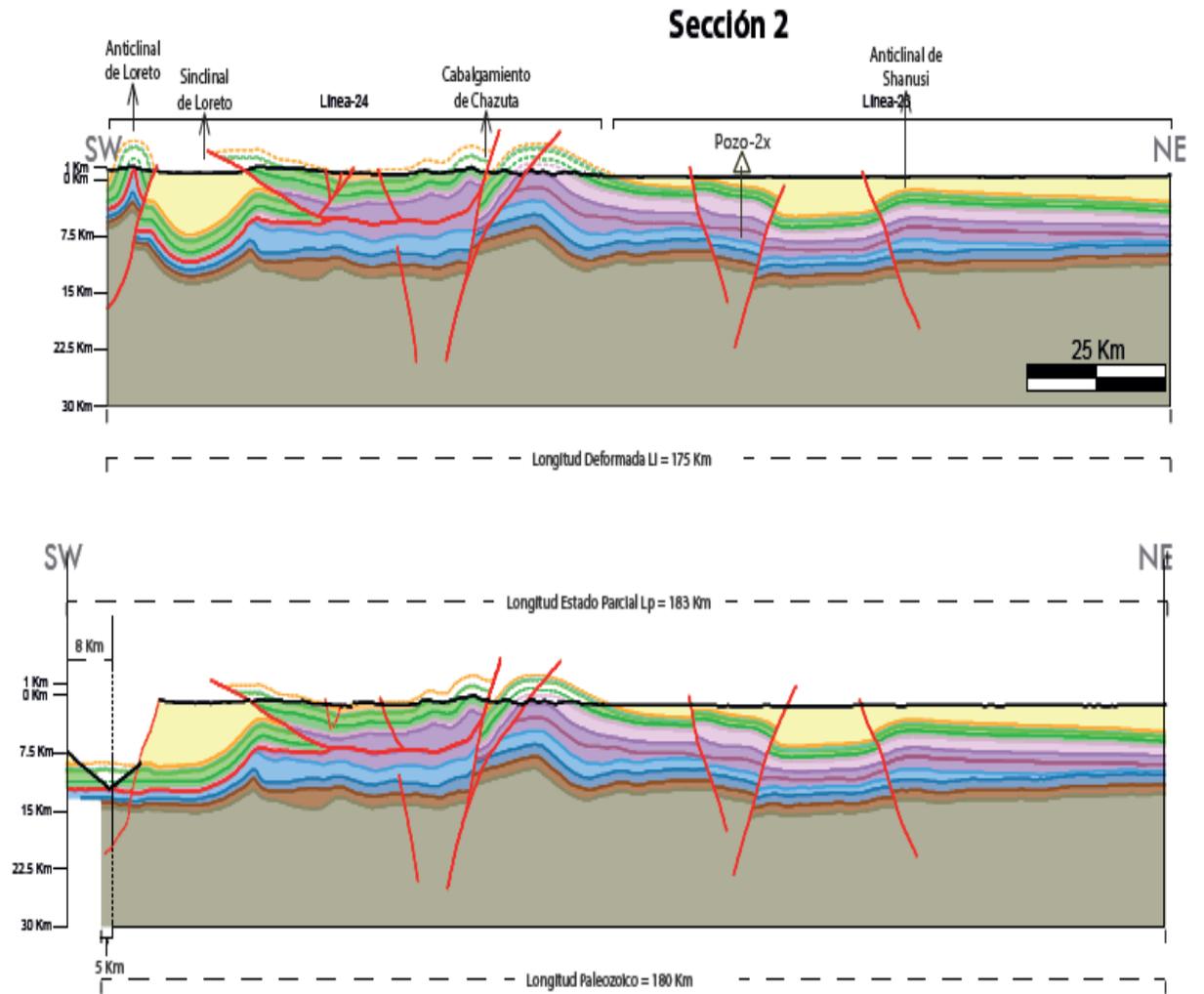


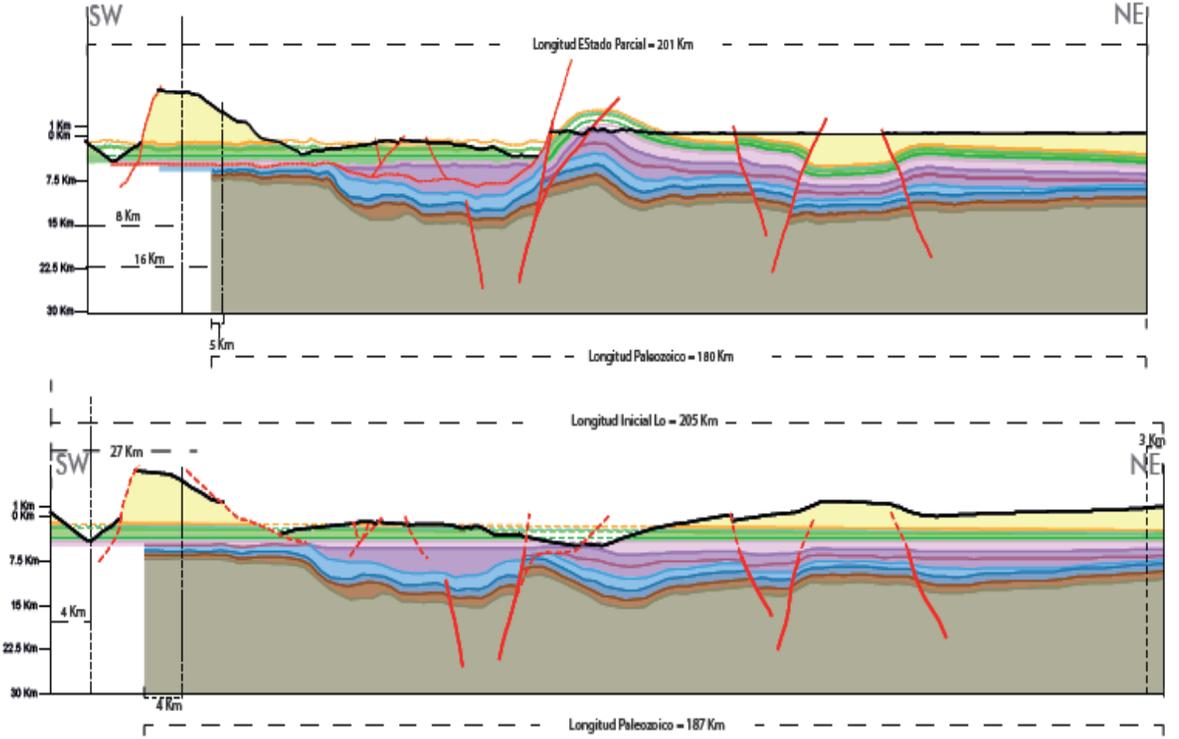
Oligoceno (?) - Mioceno Inferior



Convenciones					
Fallas resituadas	Topografía	Unidades Post-Yahuarango (Eoceno-Pleistoceno)	Chonta (Cenomaniano-Santoniano)	Pucara-Mitu (Pérmico Sup-Jurásico)	Pz-medio
Fallas	Rocas erosionadas	Yahuarango (Paleoceno)	Cushabalay (Aptiano-Aptiano)	Copacabana (Carbonífero Sup-Pérmico)	Pz-Inferior
Discordancia del Pérmico-Trifásico	Vivian (Campaniano)	Sarayaquillo (Jurásico Superior)	Tarma (Carbonífero)		

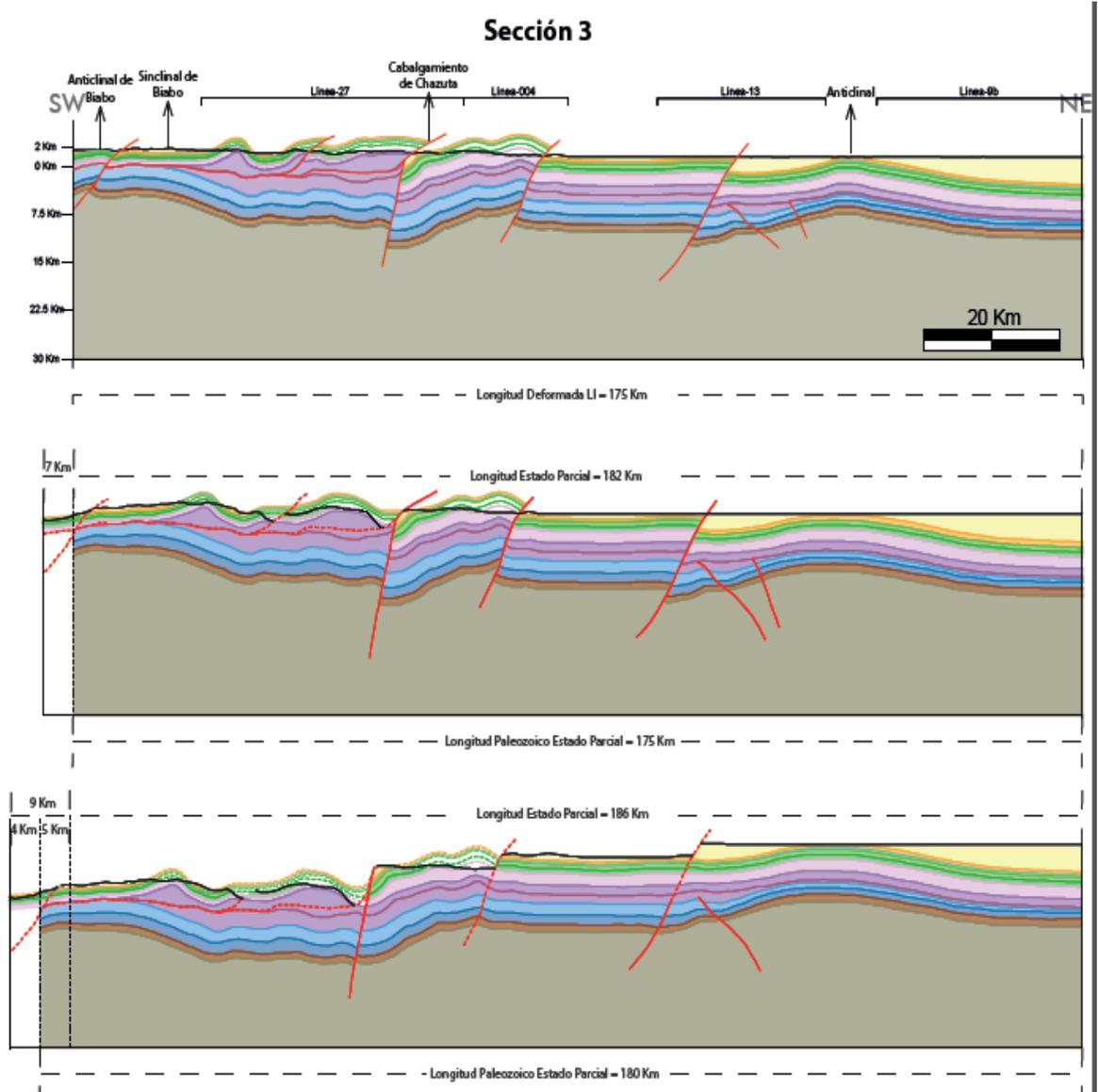
ANEXO B. Sección-2 estado deformado y no deformado.

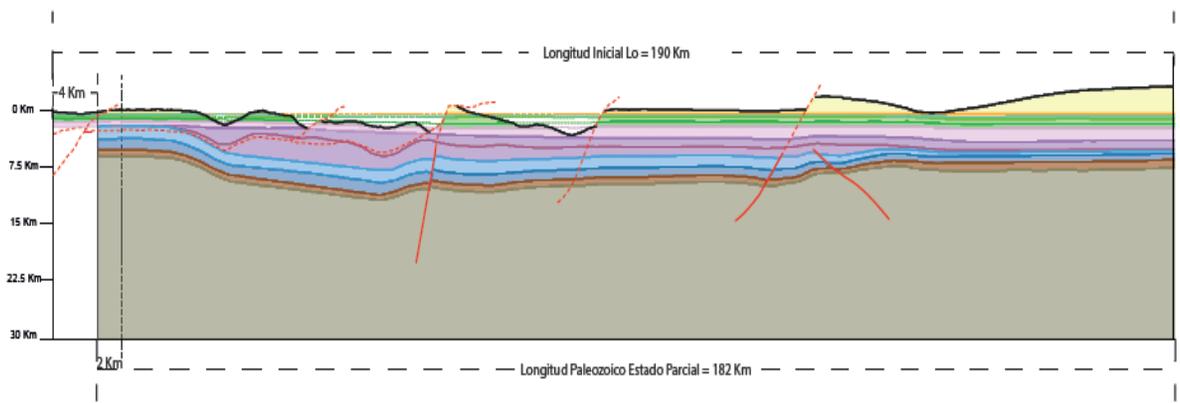




Convenciones					
Fallas resituidas	Topografía	Unidades Post-Yahuarango (Eoceno-Pleistoceno)	Chonta (Cenomaniano-Santoniano)	Pucara-Mitu (Pérmico Sup-Jurásico)	Pz-medio
Fallas	Rocas erosionadas	Yahuarango (Paleoceno)	Cushabalay (Aptiano-Aptiano)	Copacabana (Carbonífero Sup-Pérmico)	Pz-Inferior
Discordancia del Pérmico-Triásico	Vivian (Campaniano)	Sarayaquillo (Jurásico Superior)	Tarma (Carbonífero)		

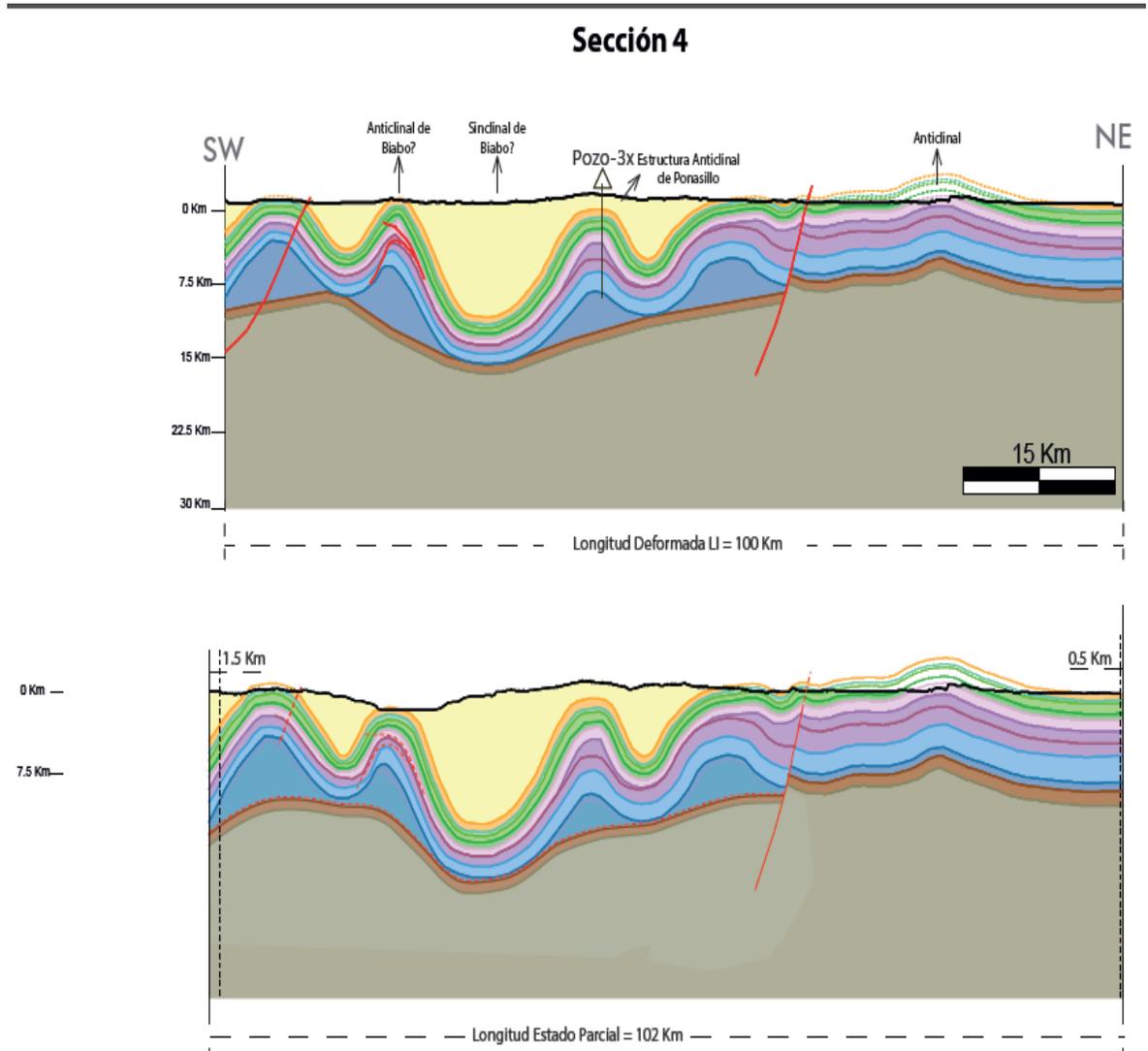
ANEXO C. Sección-3 estado deformado y no deformado.

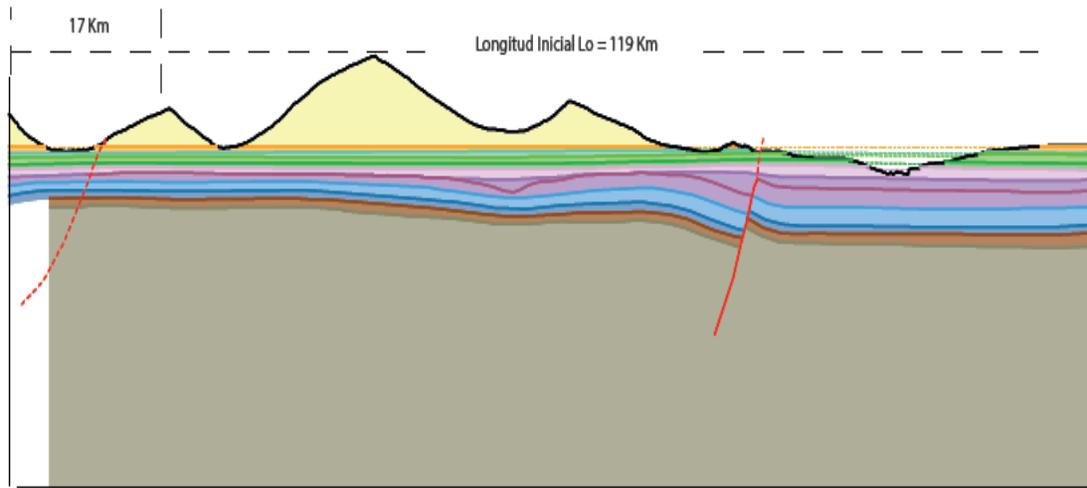




Convenciones					
Fallas restituidas	Topografía	Unidades Post-Yahuarango (Eoceno-Pleistoceno)	Chonta (Cenomaniano-Santoniano)	Pucara-Mitu (Pérmico Sup-Jurásico)	Pz-medio
Fallas	Rocas erosionadas	Yahuarango (Paleoceno)	Cushabatay (Aptiano-Aptiano)	Copacabana (Carbonífero Sup-Pérmico)	Pz-inferior
Discordancia del Pérmico-Triásico	Vivian (Campaniano)	Sarayaquillo (Jurásico Superior)	Tarma (Carbonífero)		

ANEXO D. Sección-4 estado deformado y no deformado.





Convenciones					
	Fallas restituidas		Topografía		Unidades Post-Yahuarango (Eoceno-Pleistoceno)
	Fallas		Rocas erosionadas		Chonta (Cenomaniano-Santoniano)
	Discordancia del Pérmico-Triásico		Yahuarango (Paleoceno)		Pucara-Mitu (Pérmico Sup-Jurásico)
			Vivian (Campaniano)		Cushabatay (Aptiano-Aptiano)
			Sarayaquillo (Jurásico Superior)		Copacabana (Carbonífero Sup-Pérmico)
			Tarma (Carbonífero)		Pz-medio
			PZ-inferior		