



FACULTAD DE  
**CIENCIAS**  
UDELAR | [fcien.edu.uy](http://fcien.edu.uy)



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

Universidad de la República  
Facultad de Ciencias  
Instituto de Ciencias Geológicas

# **CARACTERIZACIÓN DE LOS REFLECTORES BUZANTES HACIA EL MAR (*SDRs*) EN EL MARGEN CONTINENTAL URUGUAYO**

Alumno: Rubens Merlino  
Tutora: Dra. Ethel Morales  
Co-tutor: Dr. Matías Soto

Trabajo Final para la Licenciatura en Geología  
Año 2025

**POEMA DE LA CREACIÓN  
RIG VEDA**

*No existía algo, ni existía nada; el resplandeciente cielo no existía; ni la  
inmensa bóveda celeste se extendía en lo alto.*

*¿Qué cubría todo? ¿Qué lo cobijaba? ¿Qué lo ocultaba? ¿Era el abismo  
insondable de las aguas? No existía la muerte; pero nada había inmortal.*

*No existían límites entre el día y la noche, Sólo el uno respiraba inanimado  
y por sí, pues ningún otro que él jamás ha habido, reinaban las tinieblas y  
todo el principio estaba velado.*

*En oscuridad profunda; un océano sin luz; el germen, hasta entonces  
oculto en la envoltura, hace brotar una naturaleza del férvido calor.*

*¿Quién conoce el secreto? ¿Quién lo ha revelado? ¿De dónde ha surgido  
esta multiforme creación?*

*Los Dioses mismos vinieron más tarde a la existencia.*

*¿Quién sabe de dónde vino esta gran creación? Aquello de donde toda  
esta creación inmensa ha procedido, bien que su voluntad haya creado,  
bien fuera muda,*

*El más elevado vidente, en los más altos cielos, lo conoce, o quizás  
tampoco él lo sepa.*

*Contemplando la eternidad... Antes que fuesen echados los cimientos de  
la tierra, Tú eras.*

*Y cuando la llama subterránea rompa su prisión y devore la forma, todavía  
serás tú, como eras antes, sin sufrir cambio alguno cuando el tiempo no  
exista.*

*¡Oh, inteligencia infinita, Oh divina Eternidad!*

**Rig Veda**  
**Uno de los textos filosóficos más antiguos del mundo**

## AGRADECIMIENTOS

Es mi intención agradecer en primer término a mi tutora Dra. Ethel Morales quién confió en mí para formar parte de este proyecto y a mi co-tutor Dr. Matías Soto, ambos fueron una guía muy valiosa en este proceso de aprendizaje y desarrollo tanto profesional como humano.

De igual modo, extendiendo mi agradecimiento a todos los docentes de la carrera, de quienes guardo sus conocimientos como perlas del collar de la ciencia geológica, collar hilado junto con mis compañeros de estudio a través de clases, reuniones y las maravillosas, y en ocasiones extenuantes salidas de campo.

Asimismo, quiero agradecer a mi compañera de la vida Cecilia, quien soportó mis noches de desvelo estudiando, y compartió mis alegrías y frustraciones. Y a nuestras mascotas *Humboldt*, *Lana* y *Mina* quienes con sus ronroneos siempre me arrancaban una sonrisa por las noches.

También agradezco al Dr. Gerardo Veroslavsky, quien, sin saberlo, inspiró mi ingreso a la carrera a través de su artículo "*De la deriva continental a la tectónica de placas*" del 30 de setiembre de 1999, el cual me abrió las puertas a esta maravillosa ciencia, así como a mi amigo Michel Helal quién me inspiró a anotarme y a adentrarme en el mundo de la ciencia de datos.

A la Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP) por ceder los datos para los estudios realizados.

Y por supuesto a mis compañeros de Proyecto, Josefina Marmisolle, Facundo Plenc y Bruno Conti, por su apoyo y enseñanzas recibidas y especialmente a Bruno por ayudarme cuando las conexiones al servidor caían.

Agradezco al destino la oportunidad de haber aprendido a "leer" en estas líneas sísmicas los procesos exógenos de la Tierra, pudiendo apreciar el paso del Tiempo, fragmentos de esa «*imagen móvil de la eternidad*» como diría Platón en su Timeo.

Por último, agradezco a la eterna filosofía, que, de la mano de la Asociación Cultural Nueva Acrópolis, me dio el valor para aprender a conocer y perseguir mis sueños.

*Caracterización de los reflectores buzantes hacia el  
mar (SDRs) en el Margen Continental Uruguayo  
Rubens Merlino*

*Contemplando el tiempo a través de una roca, veo el pasado, el presente y el futuro, y  
en un momento de inspiración siento a la tierra, el agua, el aire y el fuego impactar  
sobre el mundo mineral, mudo conocedor de una historia infinita...*

*Rubens Merlino*

## RESUMEN

El presente trabajo final de grado realiza la caracterización morfológica y estructural de los reflectores buzantes hacia el mar (SDRs) en el Margen Continental Uruguayo (MCU). El MCU se define como un margen pasivo de tipo volcánico, resultado de la fragmentación de Gondwana y la apertura del Atlántico Sur durante el Cretácico Inferior, donde se encuentran SDRs que representan cuñas de flujos volcánicos extruidos en entornos subaéreos a submarinos. El área de estudio abarca aproximadamente 65.000 km<sup>2</sup> en las porciones distales de las cuencas Pelotas y Punta del Este.

La metodología integró técnicas tradicionales de sismoestratigrafía con métodos avanzados de procesamiento digital de imágenes e Inteligencia Artificial, particularmente algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo a través redes neuronales convolucionales (RNC). Se identificaron y mapearon dos grandes bloques: los SDRs Pelotas al noreste del MCU, con una extensión aproximada de 17.730 km<sup>2</sup>, y los SDRs Punta del Este al suroeste del MCU, con más de 4.000 km<sup>2</sup> identificados, cuya terminación distal no es visible por limitaciones en la base de datos. La clasificación de estas estructuras se basó en los modelos de McDermott *et al.* (2018) y Chauvet *et al.* (2021), permitiendo diferenciar subtipos proximales (asociados a ruptura tectónica) y distales (asociados a ruptura magmática).

Los resultados demuestran que la implementación de RNC permite predecir con alta precisión las áreas de SDRs, identificando incluso relictos en zonas donde los rasgos morfológicos son difusos debido al tectonismo. Asimismo, el uso del algoritmo de agrupamiento DBSCAN en conjunto con el algoritmo de regresión lineal por mínimos cuadrados facilitó el cálculo automático de los rumbos de las fallas con una precisión comparable al mapeo manual. Finalmente, se concluye que en la denominada interrupción de los SDRs en el sector central del MCU se pueden observar relictos de SDRs que responden a un intenso fallamiento y adelgazamiento cortical extremo, lo que sugiere una evolución tectónica compleja durante la fase rift.

**Palabras clave:** Margen Continental Uruguayo, SDRs, Sismoestratigrafía, Inteligencia Artificial, Redes Neuronales Convolucionales.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS .....	3
RESUMEN.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	14
1 Introducción .....	15
2 Objetivos .....	17
2.1 Objetivo general .....	17
2.2 Objetivos específicos .....	17
3 Localización del área de estudio .....	18
4 Antecedentes geológicos .....	19
4.1 Contexto geológico.....	19
4.2 Margen continental uruguayo .....	22
4.3 Antecedentes en la descripción de SDRs .....	27
4.3.1 Los SDRs en el contexto de los márgenes pasivos.....	27
4.3.2 SDRs en el MCU.....	29
4.3.3 Clasificaciones y diferentes tipos de SDRs.....	30
5 Materiales y métodos.....	39
5.1 Base de datos.....	39
5.2 Softwares utilizados: .....	42
5.3 Metodología.....	42
5.3.1 Estratigrafía sísmica o sismoestratigrafía .....	42
5.3.2 Procesamiento computacional de imágenes digitales .....	46
5.3.3 Inteligencia artificial.....	48
5.3.4 Aprendizaje Automático ( <i>Machine Learning</i> ) .....	49
5.3.5 Aprendizaje Profundo ( <i>Deep Learning</i> ).....	50
5.3.6 Algoritmos utilizados .....	52
5.4 Actividades desarrolladas .....	57
6 Resultados .....	58
6.1 SDRs del MCU .....	58
6.2 Mapa de contorno estructural e Isópacas .....	61
6.3 Análisis computacional de imágenes sísmicas .....	67
6.4 Mapeo de los SDRs mediante redes neuronales convolucionales (RNC) ...	73
6.5 Tipos de SDRs .....	77

6.5.1 Tipos de SDRs según modelo de McDermott et al. (2018) .....	77
6.5.2 Tipos de SDRs según modelo de Chauvet et al. (2021).....	78
6.6 Fallamiento de los SDRs.....	87
6.6.1 Fallas antitéticas, “Cuñas” de SDRs.....	87
6.6.2 Otros fallamientos de los SDRs.....	93
6.6.3 Aproximación al análisis de fallas mediante algoritmos de aprendizaje automático .....	100
6.7 Sector central del MCU .....	102
6.8 Comparativa entre SDRs Pelotas y SDRs Punta del Este.....	107
7 Discusión.....	108
7.1 Extensión de los SDRs en el MCU .....	108
7.2 Implicancias de los distintos modelos de tipos de SDRs .....	108
7.3 Evolución del emplazamiento de los SDRs en la fase Rift .....	110
8 Conclusiones .....	111
8.1 Recomendaciones y futuros trabajos .....	112
9 Referencias bibliográficas .....	114
10 Anexos .....	121
10.1 Algoritmos de procesamiento digital de imágenes utilizados.....	121

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Mapa del MCU incluyendo el área de estudio en recuadro rojo, las cuencas sedimentarias presentes y el alto del Polonio. ....	18
Figura 4.1 Mapa de la placa tectónica Sudamericana y sus dominios oceánicos sensu de Milani & Thomaz Filho (2000). Modificado de Milani & Thomaz Filho (2000). ....	20
Figura 4.2 Mapa estructural del Océano Atlántico Sur (FAFZ: Zona de fractura de Falkland-Agulhas; RGFZ: Zona de fractura de Río Grande; AFZ: Zona de fractura de Ascensión; MFZ: Zona de fractura de Marathon). Modificado de Moulin et al. (2005). 22	
Figura 4.3 Mapa geológico del MCU exhibiendo las cuencas offshore y onshore, los altos estructurales, el Sistema de Transferencia del Río de la Plata y los pozos exploratorios (1: Lobo x-1, 2: Gaviotín x-1 y 3: Raya x-1) (Modificado de Morales <i>et al.</i> 2020).....	23
Figura 4.4 Mapa estructural del margen continental argentino y uruguayo (Modificado de Franke <i>et al.</i> 2007) .....	25
Figura 4.5 Distintos modelos de rifting con los distintos tipos de márgenes SPM y VPM (Modificado de Geoffroy, 2005).....	27
Figura 4.6 Márgenes volcánicos (polígonos rojos) y no volcánicos (polígonos verdes) para los márgenes del océano atlántico. Las trazas rectas rojas y azules representan los centros oceánicos de expansión para los márgenes volcánicos y no volcánicos respectivamente. ....	28
Figura 4.7: Modelo conceptual de 4 etapas del desarrollo de un Rift en un VPM (Modificado de Reuber et al., 2019).....	29
Figura 4.8: Ubicación de los tipos de SDRs según Planke et al. (2000) (Modificado de Planke et al., 2000).....	31
Figura 4.9: Ubicación de los tipos de SDRs según Paton et al. (2017) (Modificado de Paton et al., 2017) .....	31
Figura 4.10: Distribución de los diferentes tipos de SDRs en el margen sudamericano. (Modificado de McDermott <i>et al.</i> , 2018).....	34
Figura 4.11: Esquema general con las características de los distintos tipos de SDRs. (Modificado de Chauvet <i>et al.</i> , 2021) .....	37
Figura 5.1: Ubicación de las bases de datos utilizadas en el presente trabajo. ....	41
Figura 5.2: Modelo general de adquisición de datos sísmicos. ....	43
Figura 5.3: Modelo general de la representación de impedancia acústica según columna litológica. (Modificado de Sukmono, 2020).....	44

Figura 5.4: Valor de impedancia acústica según la interfase litológica. (Modificado de Cross & Lessenger, 1988).....	44
Figura 5.5: Diferentes áreas de la Inteligencia Artificial. ....	48
Figura 5.6: Modelo esquemático de redes neuronales, modificado de Narayan et al. 2020.....	51
Figura 5.7: Figura que muestra el comportamiento del algoritmo DBSCAN en comparación con el algoritmo K-Means. Nótese como para patrones circulares o cóncavo convexos, donde la densidad es más preponderante que la cercanía, el algoritmo DBSCAN presenta un mejor de .....	52
Figura 5.8: Figura que muestra los diferentes tipos de puntos del algoritmo DBSCAN. ....	53
Figura 5.9. <b>A.</b> Sección sísmica utilizada para el desarrollo de la red neuronal convolucional. <b>B.</b> Representación del sector donde se desarrollan los SDRs. <b>C.</b> Combinación de las dos imágenes anteriores.....	55
Figura 5.10: Sección sísmica utilizada para el desarrollo de la RNC. En verde la sección utilizada para la selección de 2.000 fragmentos para la fase de validación y en anaranjado la sección utilizada para la selección de 10.000 fragmentos para la fase de entrenamiento.....	56
Figura 6.1: Emplazamiento de los SDRs en el MCU.....	58
Figura 6.2: Imagen conspicua de un SDRs del MCU con las terminaciones de sus reflectores. ....	60
Figura 6.3: Mapas de contorno estructural del tope de los SDRs del MCU. <b>A:</b> Tope de los SDRs con datos en profundidad (m) (bloques 3D BG12 y TO12). <b>B:</b> Tope de los SDRs con datos en tiempo (TWT (s)). El contorno en rojo indica la extensión completa de los SDRs.....	61
Figura 6.4: Mapa de contorno estructural de la superficie conformada por el tope del basamento y el tope de los SDRs del MCU según conversión de datos en profundidad de los bloques 2D. Exageración vertical x 8. El cono indica el Norte. En punteado blanco puede observarse la extensión de los SDRs. Para una observación interactiva del mapa 3D puede dirigirse al siguiente enlace.....	62
Figura 6.5: Mapa de contorno estructural del tope de los SDRs del MCU según los datos en profundidad de los bloques 3D. Exageración vertical x 3. El cono indica el Norte. Para una observación interactiva del mapa 3D puede dirigirse al siguiente enlace. ....	63
Figura 6.6: Mapas de contorno estructural de la base de los SDRs del MCU. <b>A.</b> Base de los SDRs con datos en profundidad (m) (bloques 3D BG12 y TO12). <b>B:</b> Base de los SDRs con datos en tiempo (TWT (s)). El contorno en rojo indica la extensión completa de los SDRs.....	64

Figura 6.7: Mapa de contorno estructural de la base de los SDRs del MCU según los datos en profundidad de los bloques 3D. Exageración vertical x 3. El cono indica el Norte. Para una observación interactiva del mapa 3D puede dirigirse al siguiente enlace. ....	65
Figura 6.8: Mapa de isópacas de los SDRs del MCU. A. Datos en profundidad (m) (bloques 3D BG12 y TO12). B: Datos en tiempo (TWT (s)). El contorno en rojo indica la extensión completa de los SDRs. ....	66
Figura 6.9: <b>A y B.</b> Vista 3D en perspectiva del contorno estructural de la base y el tope de los SDRs según los datos en profundidad de los bloques 3D. Aquí se puede observar el mayor espesor de las cuñas de los SDRs Punta del Este. Nótese asimismo como los SDRs pierden espesor distalmente. Exageración vertical x 3. El cono indica el Norte. Para una observación interactiva del mapa 3D puede dirigirse al siguiente enlace. ....	67
Figura 6.10: A: Vista general de la línea dip 6400 del bloque BG12. B. Valores de impedancia acústica y un rango de reflectores asociados para la intersección marcada en negro en C. C. Detalle de la línea donde se observan reflectores asociados a SDRs. D. Ubicación de la línea en el MCU. ....	68
Figura 6.11: A: Imagen sísmica de la línea dip 6400 del bloque BG12 con el mapa de color seismic. B Misma sección en escala de grises.....	69
Figura 6.12: Aplicación de los filtros <b>A.</b> “ <i>Blur</i> ”, <b>B.</b> “ <i>Thresholding</i> ” y <b>C.</b> “ <i>Thresholding x 3</i> ” .....	70
Figura 6.13: Aplicación de los filtros A. “ <i>Opening</i> ”, B. “ <i>Closing</i> ” y C. “ <i>Gradient</i> ” .....	71
Figura 6.14: Aplicación de los filtros <b>A.</b> “ <i>Tophat</i> ”, <b>B.</b> “ <i>Blackhat</i> ” y <b>C.</b> una combinación de “ <i>Opening</i> ” sobre “ <i>Thresholding</i> ”.....	72
Figura 6.15: Resultados de la aplicación de los distintos modelos sobre la sección sísmica <i>dip</i> 6000 del bloque 3D BG12, fragmentos A1 a F1 muestran la resolución de las imágenes utilizadas por los modelos. ....	73
Figura 6.16: Detalles donde el algoritmo de la RNC predice erróneamente zonas donde habría relictos de SDRs para la sección sísmica <i>dip</i> 6000 del bloque 3D BG12. ....	74
Figura 6.17: Resultados de la aplicación del modelo son secciones de 256x256 píxeles sobre la sección sísmica <i>dip</i> 13300 del bloque 3D BG12.....	75
Figura 6.18: Resultados de la aplicación del modelo son secciones de 256x256 píxeles sobre la sección sísmica <i>strike</i> 8600 del bloque 3D BG12 donde tradicionalmente no se consideraba la presencia de SDRs.....	76
Figura 6.19: Mapa de ubicación de las líneas precedentes. ....	76
Figura 6.20: Tipos de SDRs según modelos de McDermott <i>et al.</i> (2018) y Chauvet <i>et al.</i> (2021) para la sección sísmica 2D UR07-030.....	80

Figura 6.21: Tipos de SDRs según modelos de McDermott <i>et al.</i> (2018) y Chauvet <i>et al.</i> (2021) para la sección sísmica 3D TO12 6200. ....	81
Figura 6.22: Tipos de SDRs según modelos de McDermott <i>et al.</i> (2018) y Chauvet <i>et al.</i> (2021) para la sección sísmica 3D BG12 6600. ....	82
Figura 6.23: Tipos de SDRs según modelos de McDermott <i>et al.</i> (2018) y Chauvet <i>et al.</i> (2021) para la sección sísmica 2D UR07-004. ....	83
Figura 6.24: Contorno estructural de los diferentes tipos de SDRs según modelo de Chauvet <i>et al.</i> (2021). ....	84
Figura 6.25: Contorno estructural del tope de los diferentes tipos de SDRs según modelo de McDermott <i>et al.</i> (2018). ....	85
Figura 6.26: Extensión de los tipos de SDRs y su contexto de formación según modelos <b>A.</b> McDermott <i>et al.</i> (2018) y <b>B.</b> Chauvet <i>et al.</i> (2021) ....	86
Figura 6.27: Ubicación de las líneas de las Fig. 6.28 a Fig. 6.31. ....	88
Figura 6.28: Cuñas en los SDRs Pelotas en secciones sísmicas completas. ....	89
Figura 6.29: Detalle de las cuñas en los SDRs Pelotas. ....	90
Figura 6.30: Cuñas en los SDRs Punta del Este en secciones sísmicas completas. ...	91
Figura 6.31: Detalle de las cuñas en los SDRs Punta del Este. ....	92
Figura 6.32: Histogramas de frecuencias y, proyección estereográfica de fallas y diagrama de densidad de polos para las fallas de los SDRs Punta del Este y Pelotas. Datos obtenidos con el software IHS Kingdom. ....	93
Figura 6.33: Fallas en los SDRs. <b>A.</b> Rumbos de fallas según datos extraídos. <b>B.</b> Rumbos calculados en base a mínimos cuadrados de las líneas de <b>A.</b> <b>C.</b> Representación 3D de las fallas en los SDRs. <b>D.</b> Rosas de los vientos de las fallas. .	94
Figura 6.34: Proyección estereográfica de fallas y diagrama de densidad de polos para las fallas de los SDRs Pelotas. ....	95
Figura 6.35: Rosas de los vientos de los distintos grupos de fallas en los SDRs Pelotas y su ubicación espacial. ....	96
Figura 6.36: Secciones sísmicas 3D en direcciones <i>Strike</i> y <i>Dip</i> del grupo n°1 de fallas en los SDRs Pelotas. ....	97
Figura 6.37: Rosas de los vientos de las fallas de los SDRs Punta del Este. ....	98
Figura 6.38: Secciones sísmicas 3D en direcciones <i>Strike</i> y <i>Dip</i> de las fallas en los SDRs Punta del Este. ....	99
Figura 6.39: Ubicación de las rosas de los vientos de las fallas de los SDRs en la vista 3D de los bloques con datos 3D del MCU. ....	100

Figura 6.40: Ubicación de las rosas de los vientos de las fallas del G1 de los SDRs Pelotas y los SDRs Punta del Este, mapeados mediante el uso combinado del algoritmo DBSCAN con regresión lineal por mínimos cuadrados..... 101

Figura 6.41: Comparación de los resultados del uso combinado del algoritmo DBSCAN con regresión lineal por mínimos cuadrados (**A.1, B.1**) y el mapeo a través del software IHS Kingdom (**A.2, B.2**)..... 102

Figura 6.42: Sección sísmica arbitraria del sector central del MCU con distintas visualizaciones de SDRs..... 103

Figura 6.43: Histogramas de frecuencias y, proyección estereográfica de fallas y diagrama de densidad de polos para las fallas del MCU donde no se observan los SDRS conspicuos. Datos obtenidos con el software IHS Kingdom..... 104

Figura 6.44: Rosas de los vientos de los distintos grupos de del MCU, solo se expresan las fallas de mayor penetración (superior a 1 Km). ..... 105

Figura 6.45: Asociaciones de fallas. **A.** Líneas de fallas calculadas en base al percentil 88 de los datos extraídos del software IHS Kingdom. **B.** Rumbos calculados en base a mínimos cuadrados de las líneas de A. **C.** Rosas de los vientos calculadas en base a mapeos realizado en el software IHS Kingdom..... 106

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4:1 Comparativa de los diferentes tipos de SDRs según McDermott <i>et al</i> , (2018) y Chauvet <i>et al</i> , (2021) .....	38
Tabla 5:1 Comparación general de la base de datos. ....	41
Tabla 5:2 Tamaño de secciones e imágenes posibles generadas. ....	56
Tabla 6:1 Extensión de los tipos de SDRs <i>sensus</i> McDermott <i>et al</i> . 2018.....	78
Tabla 6:2 Extensión de los tipos de SDRs <i>sensus</i> modelo de Chauvet <i>et al</i> . 2021 .....	79
Tabla 6:3 Datos estadísticos de las fallas mapeadas. ....	105
Tabla 6:4 Principales características de los SDRs conspicuos del MCU. ....	107

## 1 Introducción

El Margen Continental Uruguayo (MCU) es de tipo divergente y volcánico, como lo revelan las llamadas cuñas de reflectores buzantes hacia el mar (*Seaward Dipping Reflectors* - SDRs). Estas se interpretan como flujos volcánicos extruidos en un entorno subaéreo a submarino, acomodados por fallas antitéticas de orientación general NE, y son el resultado de la fragmentación de Gondwana y la posterior apertura del Atlántico Sur durante el Cretácico Inferior (Franke *et al.* 2007, Soto *et al.* 2011). En el MCU se ubican tres cuencas sedimentarias: la Cuenca Punta del Este, la porción más austral de la Cuenca Pelotas y la Cuenca Oriental del Plata (Figura 3.1)

Los SDRs, ubicados en la zona de transición entre la corteza continental y la corteza oceánica, se presentan segmentados en dos grandes bloques, uno sur en los límites de la cuenca Punta del Este, y uno norte en los límites de la cuenca Pelotas. Entre ambos bloques se observa un sector donde los SDRs en principio no parecen ser visibles lo que ha llevado a diferentes propuestas: Soto *et al.* (2011) lo atribuyen a la actuación del denominado *Río de la Plata Transfer System* (RPTS), Marmisolle *et al.* (2025) al emplazamiento del depocentro Polonio y Maya & Mann (2025) al efecto de la rotación de la microplaca Salado.

En los últimos años, el MCU ha experimentado un aumento en su interés debido a la exploración de posibles reservorios de hidrocarburos y el reconocimiento de varios sistemas petroleros especulativos, lo cual ha atraído la atención de numerosos académicos así como de compañías petroleras, quienes han realizado exhaustivos estudios en la región. Como consecuencia, se ha ampliado y mejorado sustancialmente la base de datos disponible permitiendo un mayor entendimiento de la evolución tectónica, magmática y sedimentaria del MCU.

Los avances en el conocimiento del MCU abarcan tanto la caracterización de las secuencias depositacionales que constituyen su relleno sedimentario como su configuración estructural (Morales 2013, Hernández-Molina *et al.* 2016, Conti *et al.* 2017, Morales *et al.* 2017, Viera-Honegger *et al.* 2018, McDermott *et*

*al. 2018, Chauvet et al. 2021, Marmisolle et al. 2023, Sequeira et al. 2024, Marmisolle et al. 2025, Maya & Mann 2025).*

Este trabajo final de grado tiene como objetivo contribuir al conocimiento de la evolución del MCU a través de la caracterización morfológica y estructural de los SDRs mediante métodos tradicionales de análisis sismoestratigráficos, así como mediante métodos de análisis computacional de imágenes y modelos de inteligencia artificial (aprendizaje automático y redes neuronales convolucionales), buscando también determinar la utilidad de estos métodos para la interpretación de SDRs en imágenes sísmicas.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

- Caracterización morfológica y estructural de los SDRs del MCU.

### **2.2 Objetivos específicos**

1. Identificar terminaciones estratales que permitan limitar paquetes con atributos sísmicos característicos para los SDRs (configuración, continuidad, amplitud, geometría, etc.)
2. Caracterizar elementos estructurales presentes (sistemas de fallas sintéticas, antitéticas, etc.)
3. Elaborar mapas de contorno estructural sísmico y de isópacas para el intervalo analizado.
4. Caracterizar similitudes y diferencias entre los SDRs de los sectores sur y norte.
5. Realizar análisis cuantitativos y cualitativos con modelos de inteligencia artificial, particularmente algoritmos de aprendizaje automático y redes neuronales convolucionales.

### 3 Localización del área de estudio

El área de estudio comprende el sector del MCU ubicado aproximadamente entre las latitudes  $34,6^{\circ}$  S y  $37,8^{\circ}$  S y las longitudes  $51,3^{\circ}$  W y  $53,5^{\circ}$  W, en ella se encuentra el área más distal de la Cuenca Punta del Este, así como la porción sur del de la Cuenca Pelotas (Figura 3.1). El área de estudio comprende la porción distal de la plataforma continental, el talud y el inicio de la llanura abisal, siendo esta área caracterizada por la transición entre la corteza continental y la corteza oceánica. El área total es de aproximadamente  $65.000 \text{ km}^2$ .

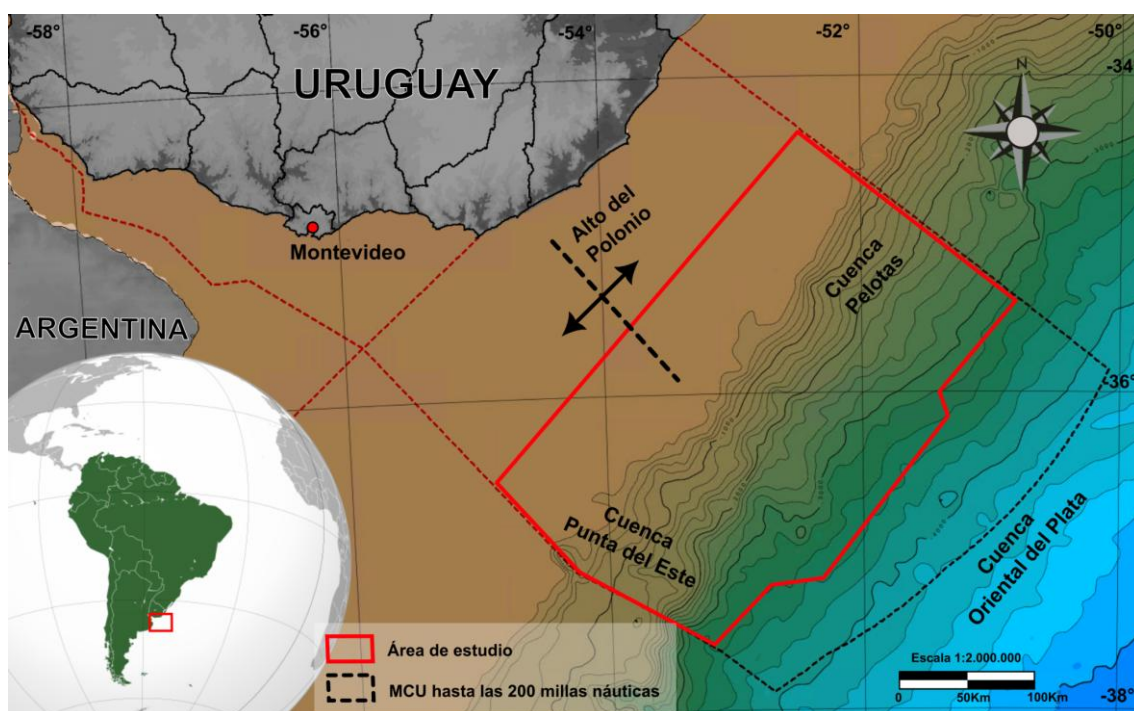


Figura 3.1 Mapa del MCU incluyendo el área de estudio en recuadro rojo, las cuencas sedimentarias presentes y el alto del Polonio.

## 4 Antecedentes geológicos

### 4.1 Contexto geológico

Desde la fragmentación del segmento occidental del supercontinente Gondwana y la posterior apertura del océano Atlántico, ocurrida hace aproximadamente 130–140 Ma, las costas de Sudamérica y África comenzaron a desplazarse en direcciones opuestas, dando origen a márgenes pasivos en ambos continentes. A lo largo de su evolución, estos márgenes han estado sujetos a diversos procesos geodinámicos que han modelado la geometría de sus cuencas sedimentarias, influido en la configuración de sus secuencias de relleno y condicionado la morfología actual y pasada de sus plataformas, taludes y elevaciones (Heine *et al.* 2013, Will & Frimmel, 2018).

A escala regional, la apertura del océano Atlántico se produjo a través de un modelo tipo “cremallera”, comenzando su apertura desde el sur hacia el norte, mediante zonas de rifts controladas por discontinuidades preexistentes, siendo la orogenia Pan-Africana la principal estructura heredada que facilitó el inicio de la fragmentación continental (Jackson *et al.*, 2000; Mohriak *et al.*, 2002; Moulin *et al.*, 2010).

En este contexto, el margen atlántico ha sido subdividido por distintos autores en función de criterios estructurales y geotectónicos. Milani y Thomaz Filho (2000), propusieron una división en tres segmentos de acuerdo a la orientación de los esfuerzos durante el Rift (Figura 4.1): i) Segmento extensional del Atlántico Sur, dominado por fallas normales paralelas a la costa y zonas de transferencia con fallas de alto ángulo; ii) Segmento transformante del Atlántico Ecuatorial, caracterizado por cizallamiento dextral y fallas oblicuas subverticales que evolucionaron a zonas de fractura oceánica; y iii) Segmento extensional del Atlántico Central.

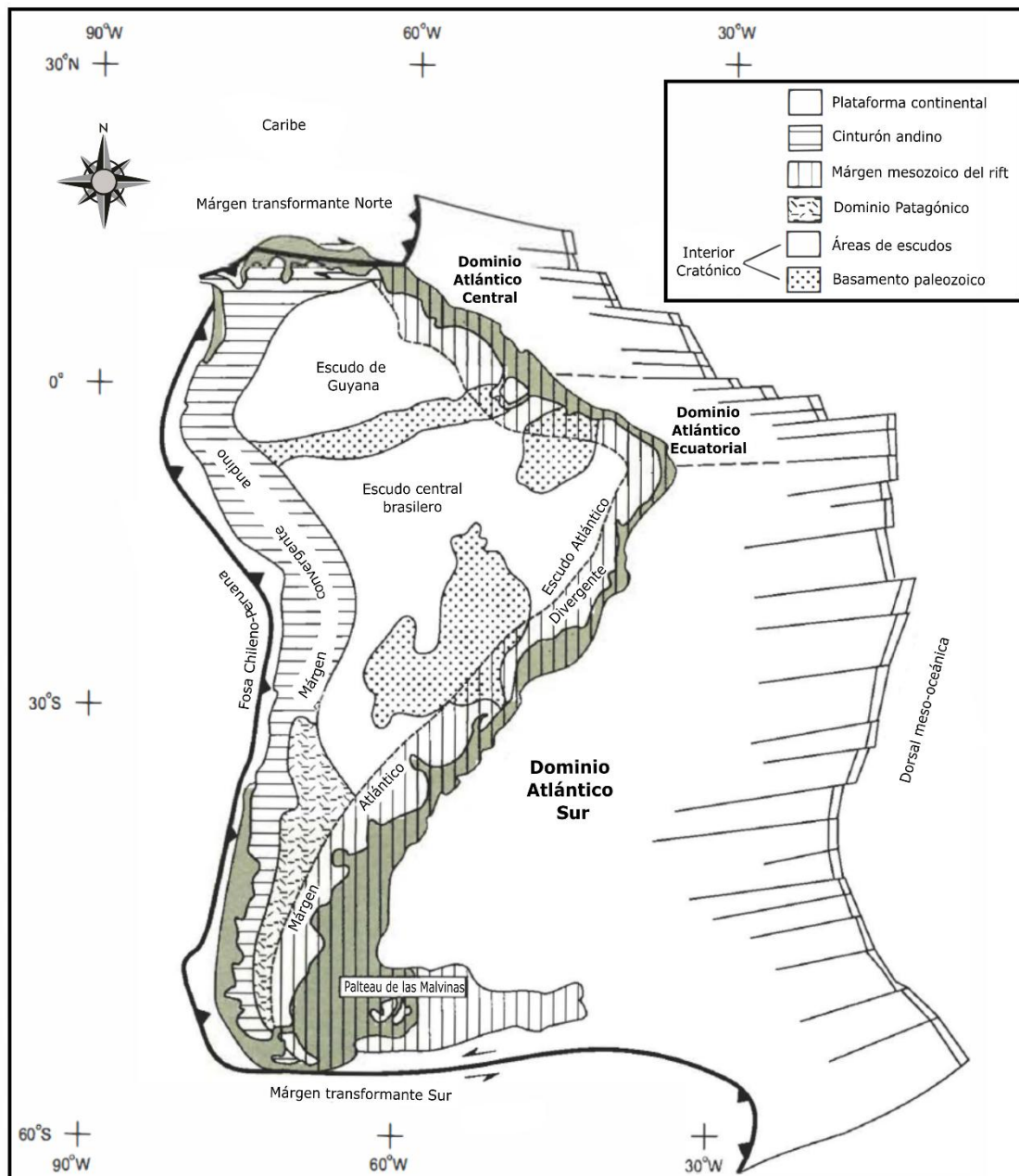


Figura 4.1 Mapa de la placa tectónica Sudamericana y sus dominios oceánicos sensu de Milani & Thomaz Filho (2000). Modificado de Milani & Thomaz Filho (2000).

Por otro lado, Moulin *et al.* (2005, 2010), basándose en datos gravimétricos, propusieron una subdivisión del océano Atlántico en cuatro segmentos tectónicos principales, delimitados por grandes zonas de fractura (Figura 4.2), denominados de sur a norte de la siguiente manera: i) Segmento Malvinas

(Falkland), ubicado al sur y sureste de la Zona de Fractura Falkland-Agulhas (FAFZ); ii) Segmento Austral, comprendido entre la FAFZ y la Zona de Fractura de Río Grande (RGFZ); iii) Segmento Central, que se extiende entre la RGFZ y la Zona de Fractura de Ascensión (AFZ); y iv) Segmento Ecuatorial, situado entre la AFZ y la Zona de Fractura Marathon (MFZ).

En el **segmento Malvinas**, la expansión del fondo oceánico se habría iniciado en torno a los 134 Ma, en asociación con el desplazamiento de la placa Antártica, según evidencias derivadas de anomalías magnéticas registradas en Natal Valley, al sureste de Sudáfrica (Moulin *et al.*, 2010).

Por su parte, el **segmento Austral** muestra una formación de corteza oceánica estimada entre los 134 y 130 Ma, durante el Cretácico temprano, en correspondencia con las anomalías magnéticas M9 y M7 (Moulin *et al.*, 2010) Este sector se caracteriza por la presencia de SDRs, considerados indicadores de un vulcanismo activo durante la génesis del margen.

En el **segmento Central**, uno de los principales rasgos es la presencia de extensos y potentes depósitos evaporíticos en ambos márgenes. La ausencia de anomalías magnéticas definidas en este tramo sugiere que la expansión del fondo oceánico se inició durante el intervalo de quietud magnética del Cretácico temprano (Moulin *et al.*, 2005, 2010). Esta diferencia con el segmento Austral refleja una evolución paleogeográfica diferencial, hacia el sur predominaban condiciones marinas abiertas, hacia el norte se desarrollaron ambientes restringidos, con ingresiones marinas episódicas con importantes intervalos evaporación (Jackson *et al.*, 2000).

Finalmente, el **segmento Ecuatorial** se distingue por una dorsal oceánica altamente segmentada y por la escasa expresión de lineamientos magnéticos, atribuida a su proximidad al ecuador. La apertura oceánica en este sector se inició en torno a los 113 Ma, según lo evidenciado por diversos estudios geofísicos y paleomagnéticos (Moulin *et al.*, 2005, 2010).

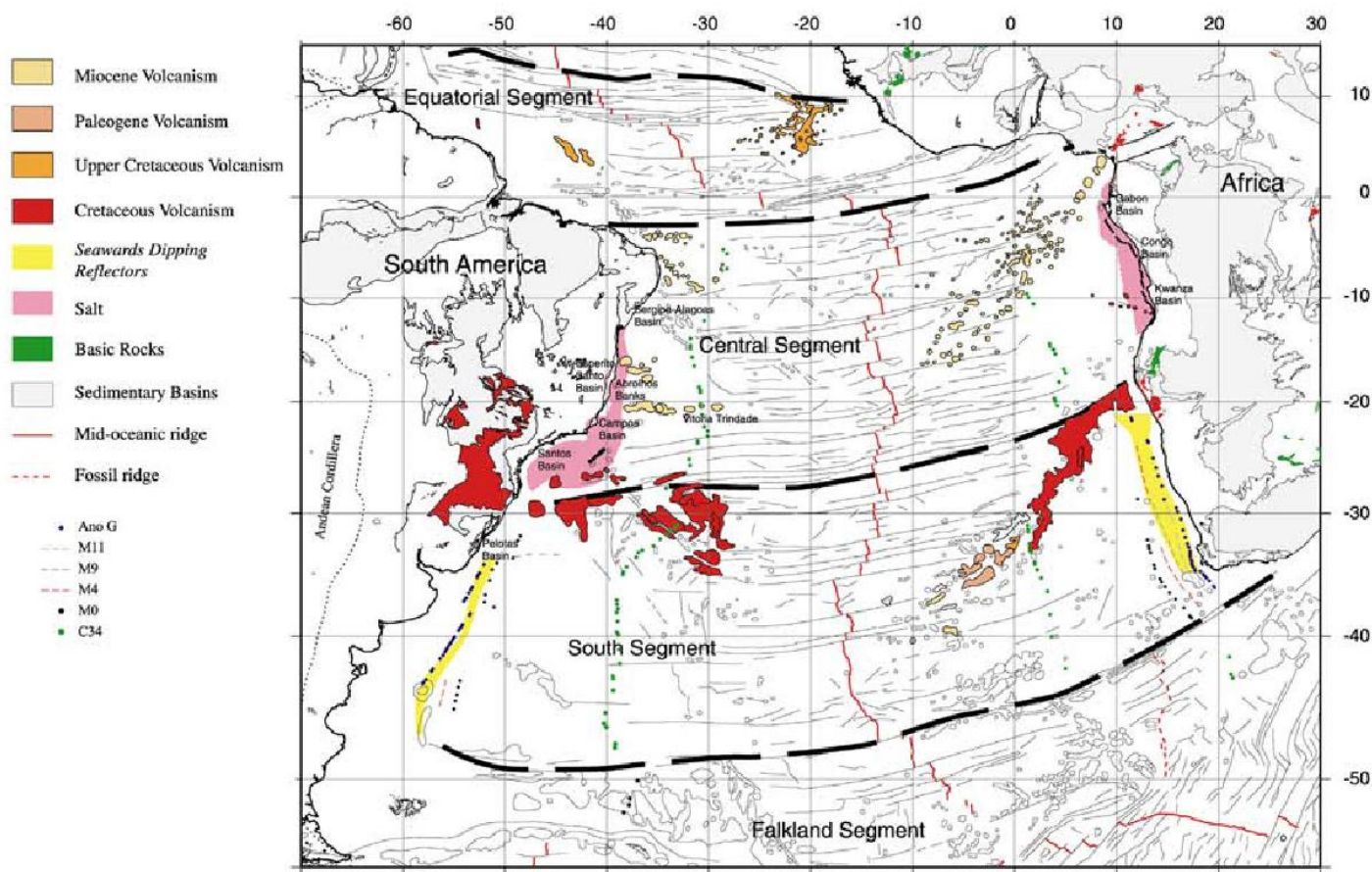


Figura 4.2 Mapa estructural del Océano Atlántico Sur (FAFZ: Zona de fractura de Falkland-Agulhas; RGFZ: Zona de fractura de Río Grande; AFZ: Zona de fractura de Ascensión; MFZ: Zona de fractura de Marathon). Modificado de Moulin et al. (2005).

## 4.2 Margen continental uruguayo

El margen continental uruguayo (MCU), ubicado en el sector austral de acuerdo a la clasificación de Moulin *et al.* (2005, 2010) o en el segmento extensional del Atlántico Sur según Milani & Thomaz Filho (2000) (Figura 4.1), está localizado entre los 34°S y 38°S y los 50°W y 56°W, se extiende sobre un área aproximada de 130.000 km<sup>2</sup> hasta las 200 millas náuticas, cuenta con batimetrías que oscilan entre los 20 y los 4.000 m de profundidad y presenta características típicas de un margen pasivo de tipo volcánico (Soto *et al.*, 2011; Morales *et al.* 2017). Su segmentación está controlada por el sistema de transferencia Río de la Plata (RPTS), y se caracteriza por la presencia de

espesas cuñas de reflectores buzantes hacia el mar (SDRs - *Seaward Dipping Reflectors*) y depocentros volcano-sedimentarios, con espesores que en algunos sectores superan los 7 km (Franke *et al.*, 2007, Soto *et al.* 2011, Morales *et al.* 2017, Chauvet *et al.* 2021).

En su porción central se destacan rasgos estructurales complejos como reactivaciones tectónicas, levantamientos de altos internos, interrupciones de cuñas de SDRs, fallamiento y alteración de los mismos, desplazamiento de rasgos geofísicos y una notable atenuación de la corteza (<3 km), acompañada por la presencia de una corteza de transición de carácter volcánico. Además, esta región concentra el mayor espesor sedimentario de edad Cretácica (Soto *et al.*, 2011; Rowlands *et al.*, 2016; Morales *et al.*, 2017; Marmisolle *et al.*, 2023, 2025), lo que la posiciona como un sector clave para comprender los procesos de rifting y evolución temprana de la formación del océano Atlántico Sur.

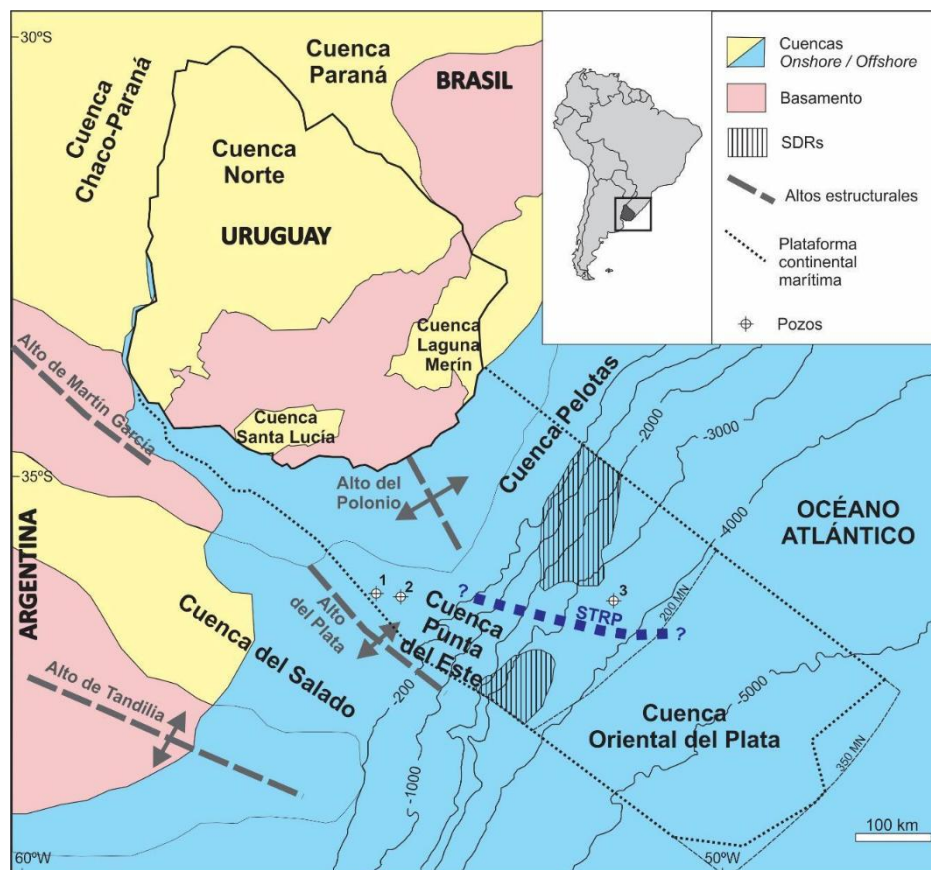


Figura 4.3 Mapa geológico del MCU exhibiendo las cuencas offshore y onshore, los altos estructurales, el Sistema de Transferencia del Río de la Plata y los pozos exploratorios (1: Lobo x-1, 2: Gaviotín x-1 y 3: Raya x-1) (Modificado de Morales *et al.* 2020)

Los estudios pioneros sobre la configuración regional del Margen Continental Uruguayo (MCU) identificaron cinco grandes discordancias basadas en datos sísmicos y definieron cuatro zonas estructurales a escala regional para el margen atlántico argentino, abarcando también el sector uruguayo (Hinz *et al.* 1999). Posteriormente se propuso la subdivisión del margen argentino-uruguayo en cuatro segmentos delimitados por zonas de transferencia, situando al MCU en el Segmento IV, cuya frontera sur está marcada por el Sistema de Transferencia del Salado, con orientación NW y extensión hasta el Alto de Martín García (Franke *et al.* 2007) (Figura 4.4). Años más tarde, se realiza una caracterización detallada de la arquitectura interna y la segmentación del MCU, en la que definen el Sistema de Transferencia del Río de la Plata (RPTS), de orientación NW-SE (Soto *et al.* 2011) (Figura 4.3).

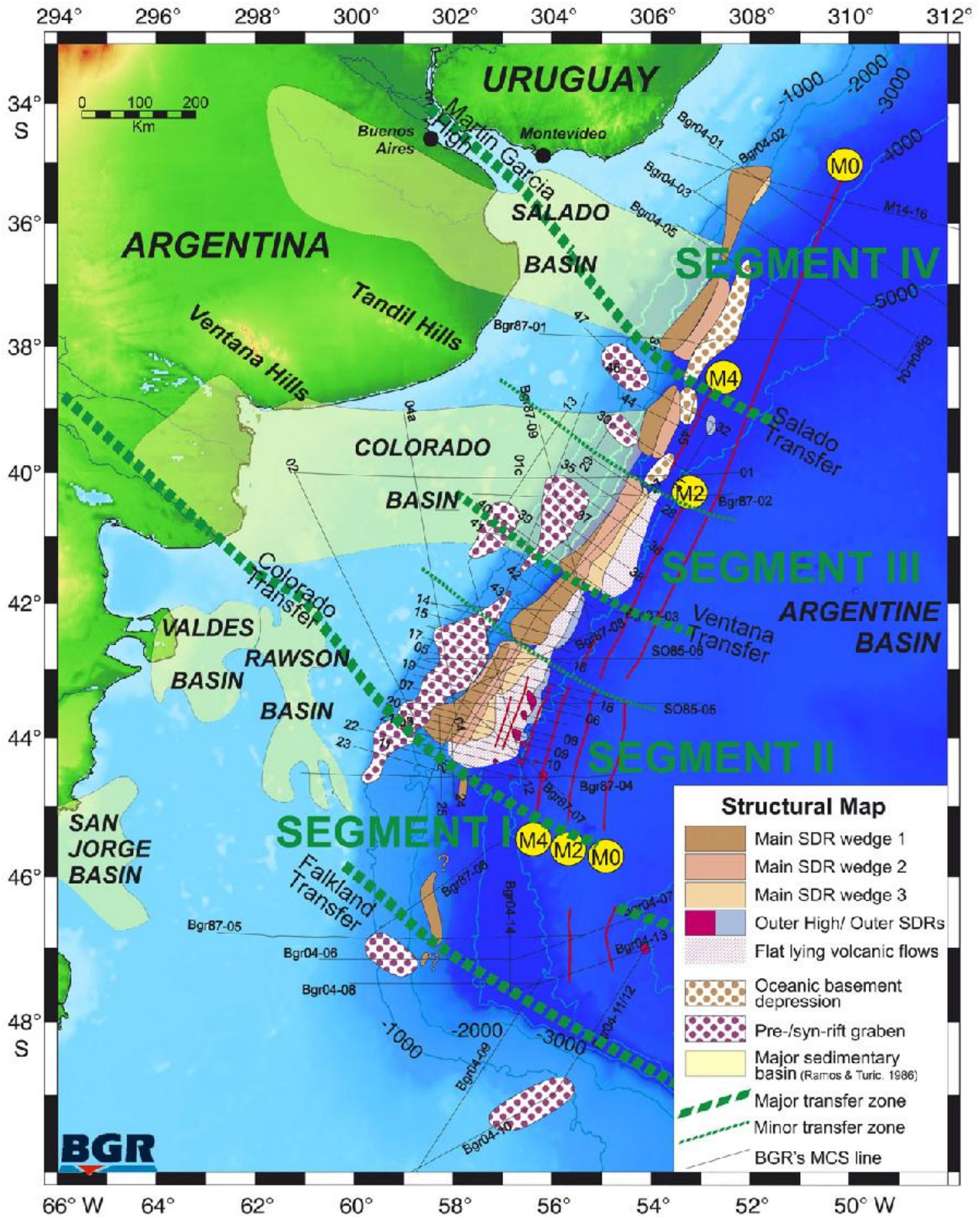


Figura 4.4 Mapa estructural del margen continental argentino y uruguayo (Modificado de Franke et al. 2007)

En el MCU se ubican tres cuencas sedimentarias: la Cuenca Punta del Este (CPE), la porción austral de la Cuenca Pelotas (CP), y la Cuenca Oriental del Plata (COP). Estas cuencas comparten una evolución tectonosedimentaria común con otras del margen atlántico sur representada por: i) una etapa prerift de edad paleozoica; ii) una fase sinrift correspondiente al Jurásico–Cretácico Inferior; iii) un intervalo transicional entre el Barremiano y el Aptiano; y iv) una etapa postrift desde el Aptiano hasta la actualidad (Conti *et al.*, 2017; Morales *et al.*, 2017).

La CPE se ubica en la porción suroeste del MCU (Figura 4.3) y se caracteriza por su forma de embudo alargado en dirección NW–SE, perpendicular al margen continental. Limita hacia el SW con la Cuenca del Salado a través del Alto de Martín García, y hacia el NE con la CP mediante el Alto del Polonio (Stoakes *et al.*, 1991; Ucha *et al.*, 2004; Franke *et al.*, 2007; Morales *et al.*, 2017a). Su origen ha sido interpretado de distintas maneras: como un rift abortado o aulacógeno (Stoakes *et al.*, 1991); o como el resultado de múltiples eventos de rifting superpuestos (Lovecchio *et al.*, 2020).

Por su parte, el extremo sur de la CP se extiende en el sector norte del MCU, con una orientación predominante NE paralela al margen continental. Esta cuenca limita al suroeste con la CPE a través del Alto del Polonio, y se prolonga hacia el noreste hasta el Alto de Florianópolis. Se interpreta como un margen pasivo típico, caracterizado por fallas antitéticas que siguen la orientación del borde continental (Conti *et al.*, 2017; Morales *et al.*, 2017).

Finalmente, la COP se sitúa en el extremo sureste del MCU, en un contexto de aguas ultraprofundas, con profundidades superiores a los 4.000 metros. Esta cuenca se emplaza sobre corteza transicional a oceánica y se vincula al margen mediante los SDRs que marcan su límite con la CPE (Soto *et al.*, 2011).

### 4.3 Antecedentes en la descripción de SDRs

#### 4.3.1 Los SDRs en el contexto de los márgenes pasivos

En el desarrollo de una ruptura continental (*breakup*) es común la aparición de magmatismo, el cual puede dar lugar a rupturas pobres o ricas en magma (Franke, 2012). A consecuencia de ello se clasifican los márgenes continentales en dos tipos, los márgenes pobres en magma o pasivos sedimentarios (*sedimentary passive margins - SPM*) y los márgenes ricos en magma o pasivos volcánicos (*volcanic passive margins - VPM*) (Figura 4.5), siendo estos últimos los más comunes en el planeta y estando ampliamente extendidos en ambos márgenes del océano atlántico. (Geoffroy, 2005; Franke 2012; Rotzien *et al.*, 2022) (Figura 4.6).

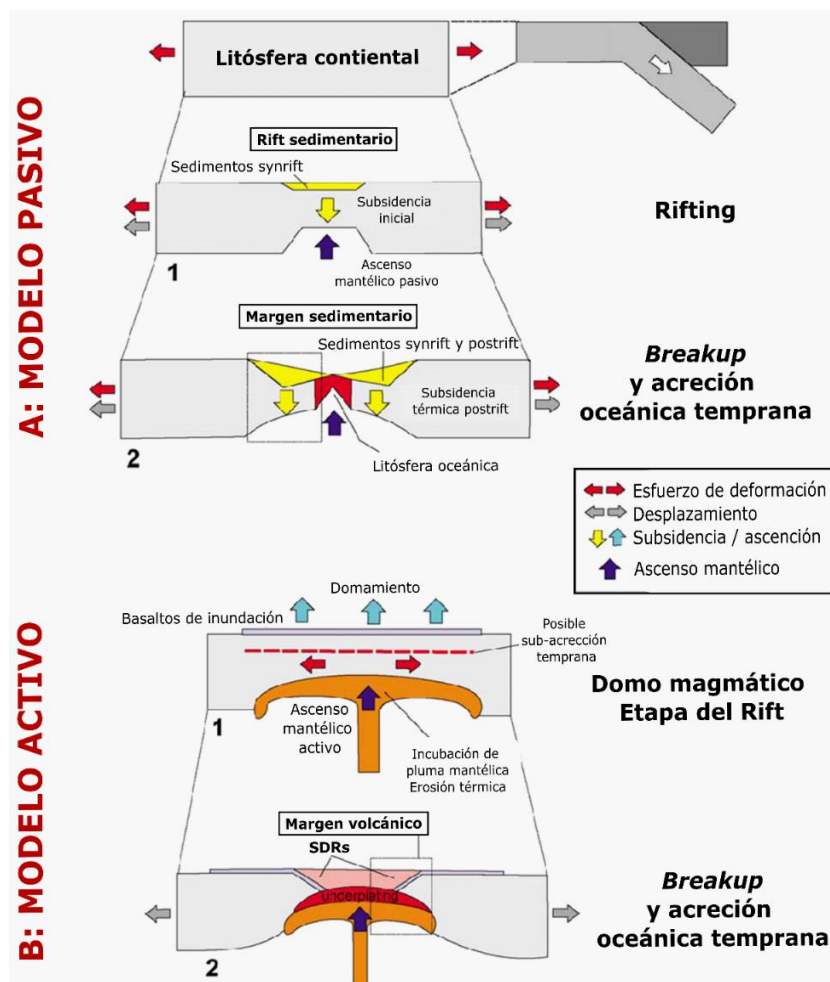


Figura 4.5 Distintos modelos de *rifting* con los distintos tipos de márgenes SPM y VPM (Modificado de Geoffroy, 2005)

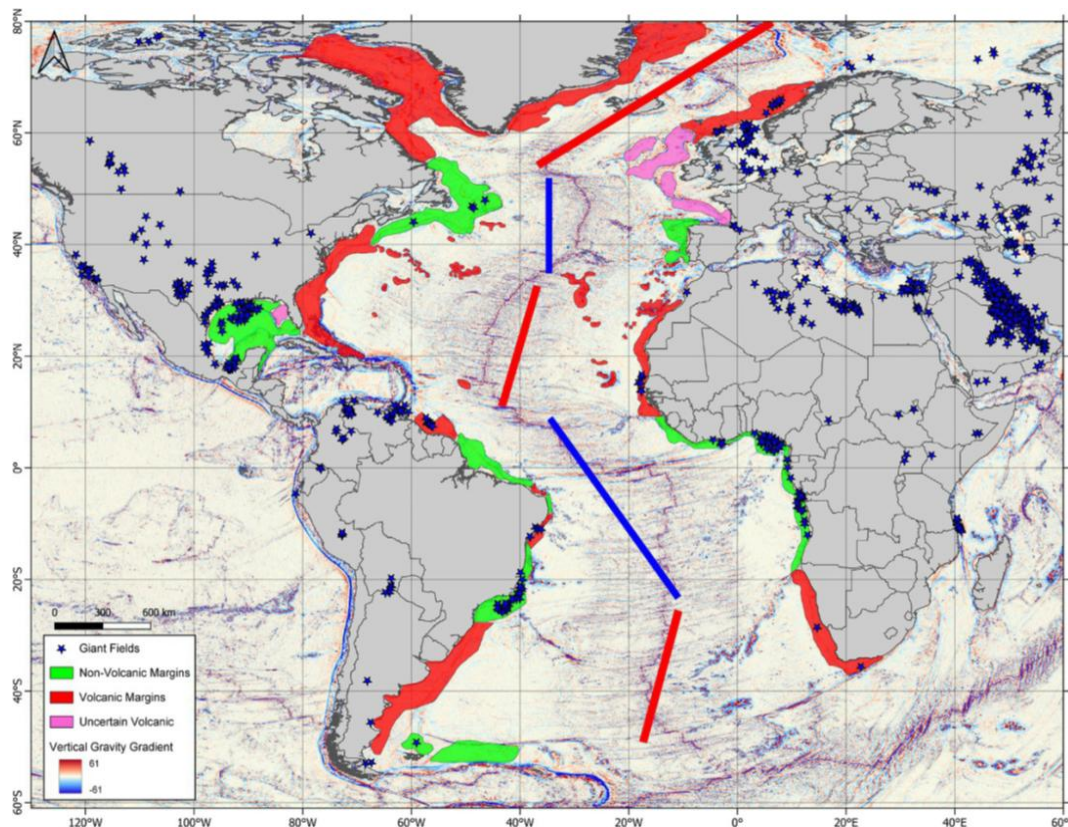


Figura 4.6 Márgenes volcánicos (polígonos rojos) y no volcánicos (polígonos verdes) para los márgenes del océano atlántico. Las trazas rectas rojas y azules representan los centros oceánicos de expansión para los márgenes volcánicos y no volcánicos respectivamente.

El desarrollo de un VPM, como es el caso del MCU, es evidenciado por la presencia de los SDRs. Estas estructuras son frecuentemente interpretadas como flujos basálticos producto del vulcanismo presente durante la primera etapa de desarrollo del margen continental (Hinz *et al.*, 1999; Geoffroy 2005, Franke, 2012). En el caso del MCU, los SDRs podrían haberse originado por flujos subaéreos en zonas próximas al nivel del mar (Hinz *et al.*, 1999; Jackson *et al.*, 2000; McDermott *et al.* 2018), o bien bajo condiciones mixtas de vulcanismo subaéreo y subacuático (Franke *et al.*, 2007; Chauvet *et al.*, 2021). La identificación de estas estructuras ha sido clave para definir el límite entre corteza continental y oceánica, así como para subdividir el segmento Austral en bloques tectónicos delimitados por importantes discontinuidades estructurales (Franke *et al.*, 2007; Soto *et al.*, 2011). (Figura 4.7)

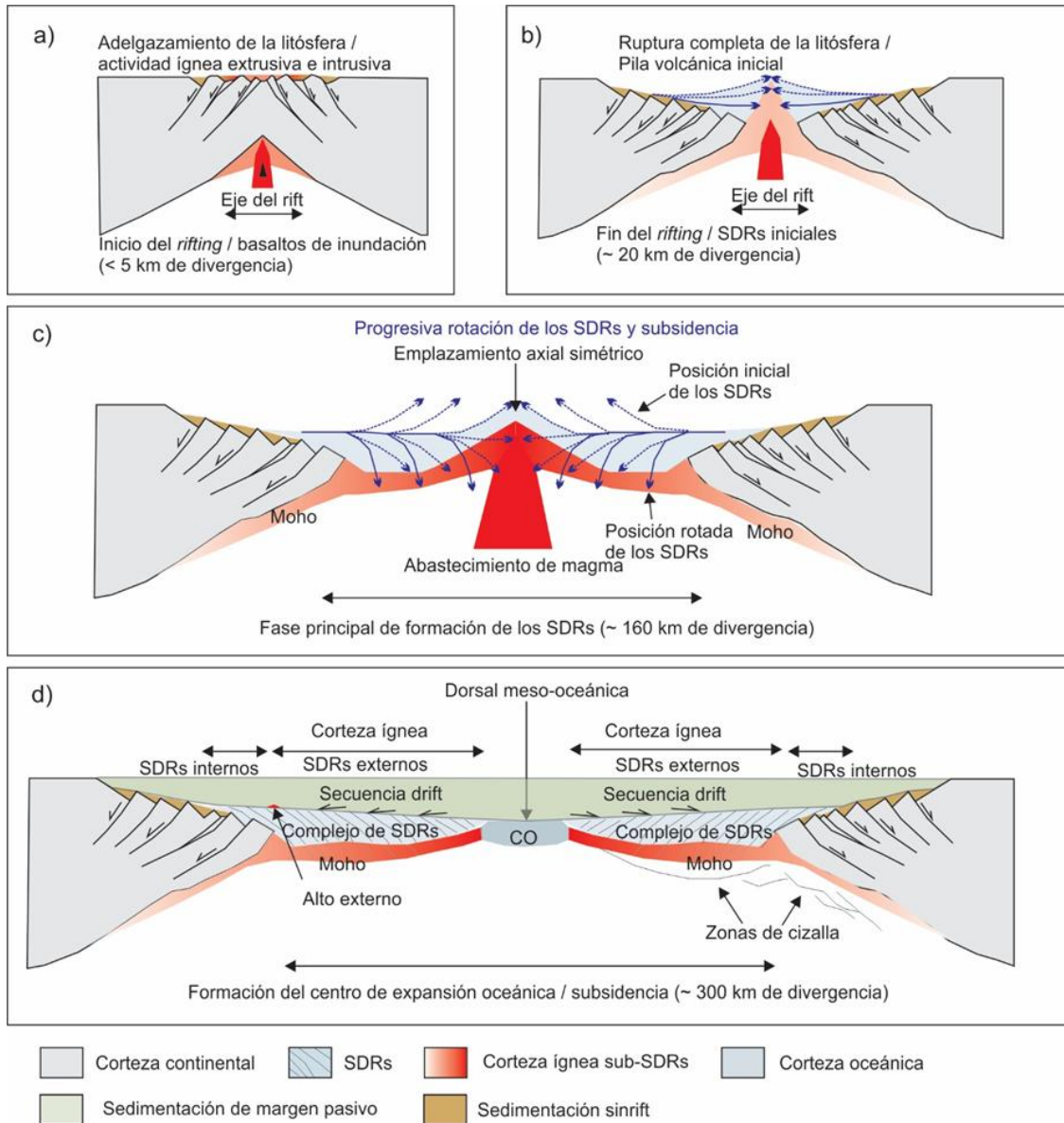


Figura 4.7: Modelo conceptual de 4 etapas del desarrollo de un Rift en un VPM (Modificado de Reuber et al., 2019)

### 4.3.2 SDRs en el MCU

Los primeros estudios que indican la presencia de SDRs en Uruguay (Hinz *et al.*, 1999; Franke *et al.*, 2007), estuvieron limitados por la baja calidad de los datos sísmicos disponibles. Posteriormente, de acuerdo al desarrollo de nuevos y más extensos estudios sísmicos 2D en el MCU, Soto *et al.* (2011) mejoraron la cartografía de los SDRs, destacando como hallazgo principal la identificación de

un sistema de transferencia (STRP) con orientación NW-SE, inferido a partir de la interrupción de las cuñas de SDRs y del análisis de anomalías magnéticas.

Estudios más recientes, sustentados en datos sísmicos de mayor resolución, han permitido reconocer y re-clasificar los diferentes tipos de SDRs según su morfología y características estructurales, evidenciando una continuidad entre los tipos más proximales y los más distales, emplazados en la corteza transicional y oceánica (McDermott *et al.*, 2018; Chauvet *et al.*, 2021).

Marmisolle *et al.* (2025) refieren a la interrupción de los SDRs en el sector central del MCU como un rasgo estructural clave que define una región de corteza magmática hiperextendida, donde el Moho se localiza a profundidades menores a los 3 km, siendo esta interrupción controlada por el STRP, el cual, mediante un régimen transtensional sinistral, reactivó lineamientos del basamento y segmentó el margen volcánico, permitiendo la formación de un depocentro denominado “Polonio”.

En última instancia, Maya & Mann (2025) realizaron una nueva interpretación sobre el fallamiento y la discontinuidad de los SDRs del MCU. Estos autores interpretan que originalmente los SDRs del MCU presentaban una continuidad lateral antes de la formación del Río de la Plata Rift (RPTS en Soto *et al.*, (2011)), el cual sería el límite transformante de un bloque tectónico denominado “microplaca Salado”, el cual habría tenido una rotación de 15° en sentido horario, siendo este movimiento el causante de la discontinuidad de SDRs presente en el MCU.

### 4.3.3 Clasificaciones y diferentes tipos de SDRs

Las primeras clasificaciones morfológicas de los SDRs aparecen en Planke *et al.* (2000) quienes clasifican a los SDRs como i) internos (*Inner SDRs*) (proximales) y ii) externos (*Outer SDRs*) (distales) los cuales estarían separados por un “alto externo” (*Outer High*) (Figura 4.8). Esta clasificación se basó fundamentalmente en datos sísmicos del Atlántico Norte. Los SDRs internos estarían caracterizados por reflexiones internas más fuertes y cuñas más pronunciadas. Sugirieron que este tipo de SDRs habrían sido emplazados en un

ambiente subaéreo. Por otro lado, los SDRs externos estarían caracterizados por un emplazamiento distal al alto externo, suelen ser más pequeños, con menor buzamiento, vinculados a flujos laminares y reflexiones internas más débiles. Corresponderían a secuencias volcánicas emplazadas en ambiente subacuático.

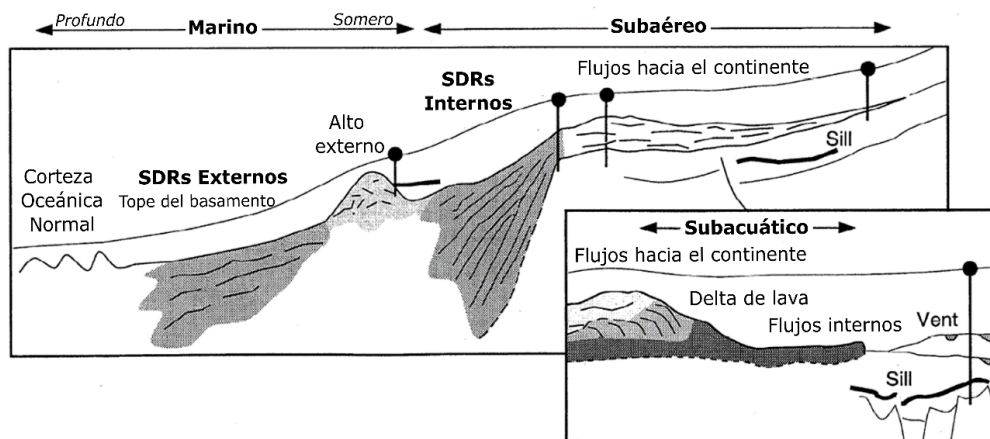


Figura 4.8: Ubicación de los tipos de SDRs según Planke et al. (2000) (Modificado de Planke et al., 2000)

Continuando con la clasificación entre SDRs internos y externos, Paton *et al.* (2017), propusieron desarrollarla en función de la naturaleza de la corteza subyacente (Figura 4.9). En este sentido, caracterizan a los SDRs internos como emplazados sobre corteza continental o transicional adelgazada. Mientras que los SDRs externos estarían emplazados sobre corteza oceánica, y se formarían como parte de la corteza oceánica recién creada. Su rotación sería impulsada por la subsidencia isostática en el centro del depocentro de los SDRs, que se habrían depositado en un ambiente subaéreo.

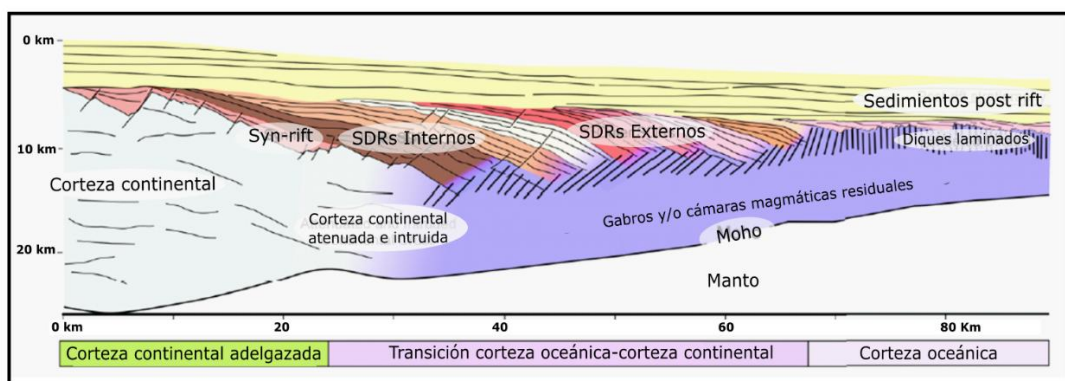


Figura 4.9: Ubicación de los tipos de SDRs según Paton et al. (2017) (Modificado de Paton et al., 2017)

McDermott *et al.* (2018), basándose en nuevos datos sísmicos de alta calidad del margen del Atlántico Sur, propusieron una nueva clasificación en función de las facies sísmicas de los SDRs, definiendo dos tipos principales i) Tipo I y ii) Tipo II, subdivido en Tipo IIa y Tipo IIb (Tabla 4.1), dejando de lado la tradicional terminología de SDRs internos y externos, argumentando que la misma no es fácilmente transferible al Atlántico Sur por la escasa aparición de los “altos externos” y porque, a diferencia de Planke *et al.* (2000), sus interpretaciones sugieren que los SDRs más distales también se formaron en ambiente subaéreo.

Según McDermott *et al.* (2018), los SDRs Tipo I son los más proximales, están caracterizados por una geometría tabular y poseen una configuración en cuñas controladas por fallas normales. Se interpretan como lavas interstratificadas con sedimentos formadas durante el estiramiento tectónico de la corteza continental, siendo su emplazamiento subaéreo con baja interacción magma-agua. Por otro lado, los SDRs Tipo II se encuentran caracterizados por reflexiones que se vuelven más convexas hacia arriba en la dirección del buzamiento y terminan contra una base subhorizontal. Se asocian con la separación de placas y la formación de nueva corteza alimentada por diques subyacentes. Se interpretan como formados sobre corteza de tipo oceánica en un ambiente predominantemente subaéreo. De acuerdo a las características particulares de este tipo, McDermott *et al.* (2018) realizaron una subdivisión en SDRs Tipo IIa y Tipo IIb. Los SDRs Tipo IIa muestran longitudes más cortas, bajos ángulos de buzamiento, presentan una menor extensión y generalmente son más delgados. Su reflectividad interna suele volverse más caótica hacia el océano y no forman paquetes distintos separados por disconformidades. Se sugiere una mayor interacción magma-agua debido a un centro de expansión más cercano al nivel del mar. Mientras tanto, los SDRs Tipo IIb son los más largos y continuos, así como los más gruesos y extensos de los tres tipos. Este subtipo se encuentra predominantemente en el sector norte de su área de estudio (Cuenca Pelotas en Brasil) (Figura 4.10) y estaría asociado con la provincia ígnea Paraná-Etendeka. Sus características principales radican en que sus reflexiones individuales aumentan su buzamiento a lo largo de su longitud, volviéndose típicamente más convexas hacia arriba mar adentro, exhibiendo

paquetes individuales separados por disconformidades angulares. El ambiente de emplazamiento se interpreta como principalmente subaéreo, con interacción magma-agua baja a media. (Tabla 4.1)

La transición morfológica entre los diferentes tipos de SDRs, ha sido interpretada como un continuo evolutivo que marca el pasaje desde el estiramiento continental hasta la ruptura completa de la litosfera y la instauración de una nueva corteza oceánica, generada en condiciones predominantemente subaéreas (McDermott *et al.*, 2018). Los SDRs de Tipo I se asocian con lavas depositadas dentro de *grabens* formados durante la fase de rifting activo, mientras que los SDRs de Tipo II, tanto IIa como IIb, rellenan espacios creados por la flexión litosférica inducida por la intrusión y solidificación de diques alimentadores en profundidad, durante los estadios iniciales de dispersión de placas. (McDermott *et al.*, 2018)

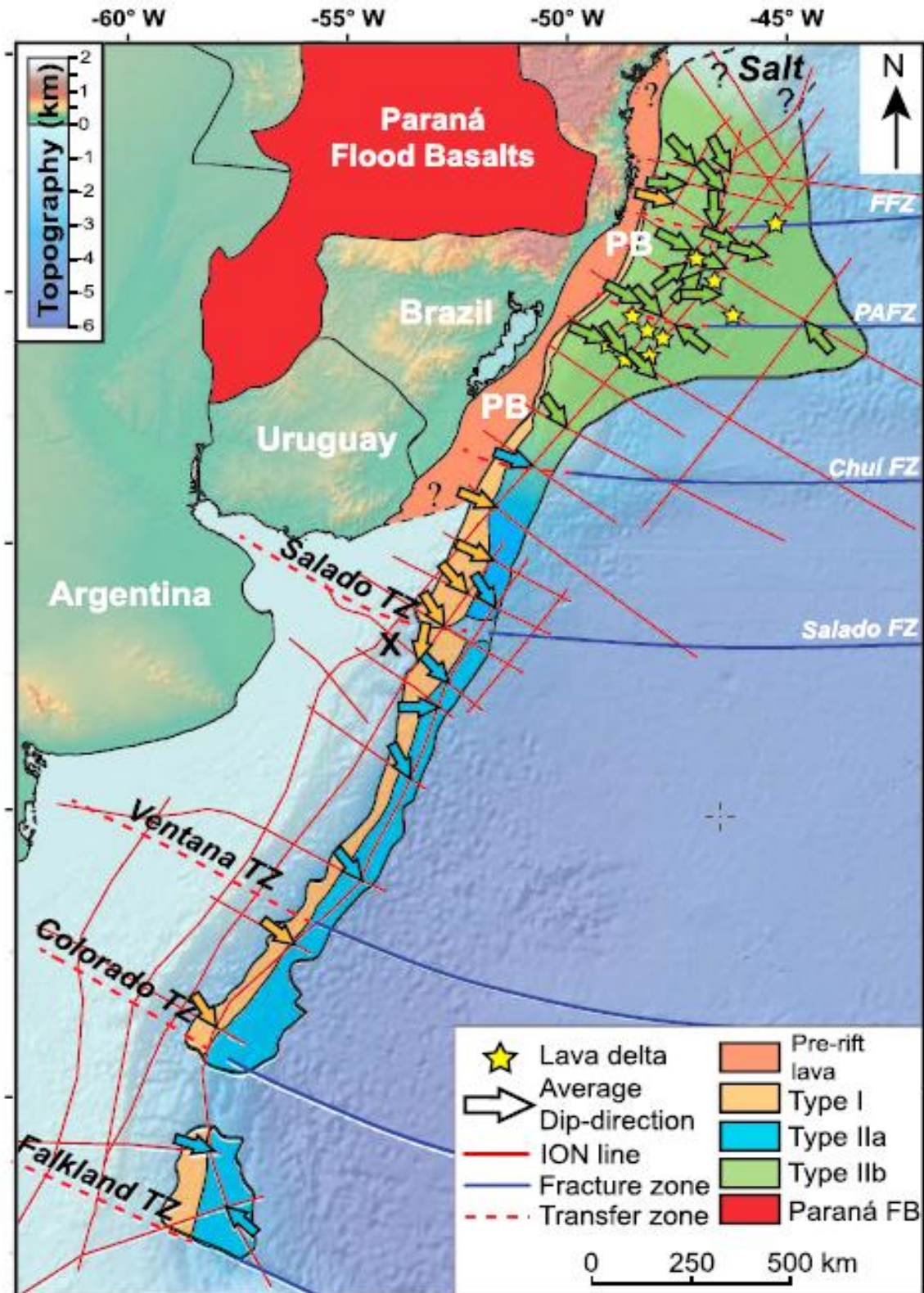


Figura 4.10: Distribución de los diferentes tipos de SDRs en el margen sudamericano. (Modificado de McDermott *et al.*, 2018)

En la Figura 4.10 puede observarse la variación de los SDRs Tipo II hacia el norte, los cuales en proximidad con la provincia magmática Paraná-Etendeka, alcanzan espesores de hasta 15 km, longitudes de decenas de kilómetros y anchos de margen que superan los 600 Km. En contraste, hacia el sur del margen, los SDRs del tipo Ila son más estrechos, con flujos volcánicos de extensión inferior a los 10 km. Esta variabilidad espacial ha sido atribuida a diferencias térmicas y tectónicas en el contexto del ascenso del manto, mientras que en el sector norte los SDRs se habrían originado a partir de un centro de expansión subaéreo asociado a la pluma mantélica de Tristán da Cunha, las extrusiones más reducidas del sector sur reflejarían un régimen de expansión en condiciones subaéreo-submarinas, coherente con un manto más frío alejado del eje de la pluma. (McDermott *et al.*, 2018)

Por otro lado, Chauvet *et al.*, (2021), utilizando datos sísmicos de alta calidad, toman la clasificación de las cuñas de SDRs presentada anteriormente por Planke *et al.* (2000) como SDRs internos y SDRs externos, y la redefinen en tres grandes tipos de SDRs: internos, intermedios y externos (*inner*, *intermediate* y *outer*, este último subdividido en dos subtipos), de acuerdo a los atributos geométricos y estructura interna que presentan (Figura 4.11). (Tabla 4.1)

Los SDRs internos (*inner SDRs*) (Figura 4.11.a), corresponden a los SDRs más proximales y más antiguos. Muestran un patrón sísmico repetitivo y coherente caracterizado por una cuña que se engrosa hacia el mar con reflexiones planares-divergentes. Las reflexiones internas de estas cuñas convergen en un único punto en dirección al continente. La longitud de las reflexiones corresponde aproximadamente a la longitud de la cuña, la cual puede variar considerablemente, desde 10 km hasta 80 km. El grosor típico de estas cuñas oscila entre 2 y 4 km. Su carácter geométrico, un paquete en abanico asociado a un único punto de rotación, sugiere que se desarrollan como bloques inclinados delimitados por una falla normal con buzamiento hacia el continente.

Los SDRs intermedios (*intermediate SDRs*) (Figura 4.11.b) se observan como cuñas arqueadas divergentes y se caracterizan por reflexiones internas más arqueadas con terminaciones descendentes que buzanan de 10 a 20° mar adentro. El extremo terrestre de este tipo de SDRs suele estar muy cerca del

punto de convergencia de los SDRs internos, asimismo se organizan en secuencias sucesivas en cuña, con el extremo convergente de cada cuña migrando hacia el mar (Figura 4.11.b1). En conjunto, forman cuñas volcánicas sistemáticamente más grandes y gruesas que las de tipo interno. Su longitud oscila entre 50 y 200 km. Su espesor alcanza hasta 18 km, pero suele oscilar entre 6 y 10 km. La base de estos paquetes de SDR no es clara, es probable que estos paquetes estén controlados por un conjunto de fallas normales de bajo ángulo fuertemente intruidas.

Los SDRs externos (*Outer SDRs*) (Figura 4.11.c) se encuentran en la parte más distal del margen y se asocia a la transición del adelgazamiento cortical hacia la corteza más delgada y oceánica. En general sus reflexiones presentan una configuración caótica o consisten en cuñas cortas y delgadas. En general los SDRs externos están poco o nada definidos en la literatura, principalmente debido a la baja resolución y la escasez de imágenes sísmicas disponibles de estas secuencias más distales. Dentro del tipo externo, Chauvet *et al.*, (2021), definieron dos subtipos a) Tipo externo 1 (*Outer SDRs type 1*) (Figura 4.11.c1) los cuales se caracterizan por presentar cuñas fuertemente arqueadas y divergentes, con un buzamiento máximo aparente que oscila entre 20° y 30° hacia el mar. La terminación en buzamiento de los reflectores se atenúa en una superficie basal sísmicamente mal definida, generalmente subhorizontal o con un leve buzamiento, lo que corresponde a una discontinuidad irregular. Según estos autores se encuentran confinados en el área norte (cerca de la cordillera de Walvis / Alto de Rio Grande). b) Tipo externo 2 (*Outer SDRs type 2*) (Figura 4.11.c2) presentan cuñas planas a ligeramente arqueadas y poco divergentes. Los atributos más distintivos del tipo externo 2 son su ubicación en la parte más externa del margen y una muy baja producción magmática. Este tipo forma secuencias de espesor generalmente inferior a 2 km. Con frecuencia se superponen a las cuñas de tipo externo 1 o tipo intermedio previamente emplazadas, lo cual indicaría que el material volcánico tiende a rellenar un relieve residual. Suelen fusionarse con los basaltos planos de la corteza oceánica, generando ambigüedad en la identificación del límite distal de los SDRs. Se desarrollan al sur del tipo externo 1.

De acuerdo con las interpretaciones de Planke *et al.* (2000) y Franke *et al.* (2007), Chauvet *et al.*, (2021) infieren que estas cuñas externas se han emplazado en condiciones subacuáticas debido a la subsidencia progresiva de una corteza volcanomagmática.

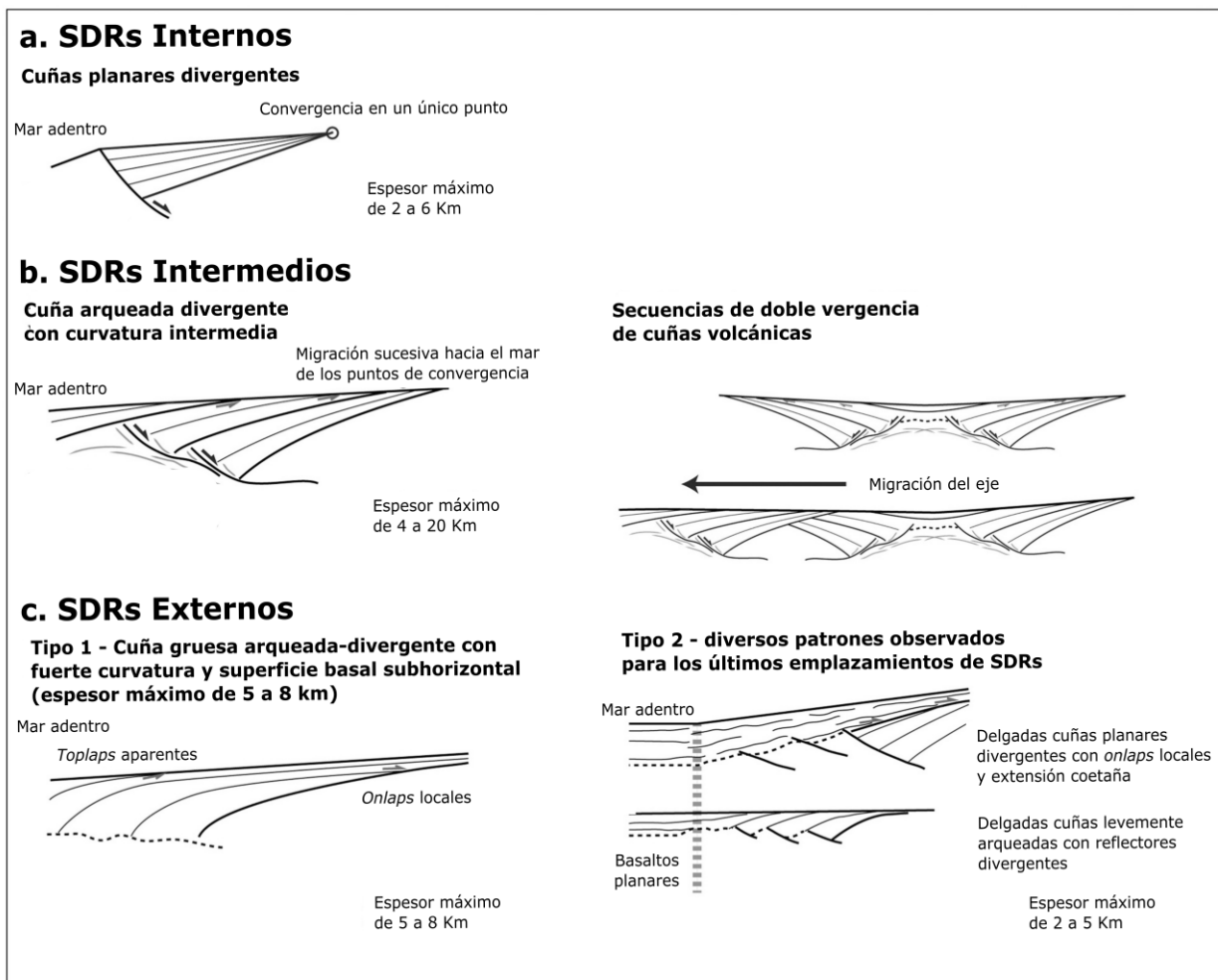


Figura 4.11: Esquema general con las características de los distintos tipos de SDRs. (Modificado de Chauvet *et al.*, 2021)

	Tipo SDR	Forma	Reflectividad	Extensión y Potencia	Formación
Modelo McDermott et al., 2018	<b>Tipo I</b>	SDR proximal Exhibe paquetes en forma de cuña	<b>Parte superior:</b> de gran amplitud y lisa <b>Parte interna:</b> de inclinación constante y divergente con solapamientos sistemáticos <b>Base:</b> límite inclinado con corteza opaca	<b>Extensión:</b> 70-100 Km <b>Potencia:</b> <10 Km	<b>Breakup:</b> Tectónico. <b>Ambiente de emplazamiento</b> subaéreo. Baja interacción magma-agua
	<b>Tipo Ila</b>	Sin paquetes definidos Transiciones al tipo IIb hacia el norte de la zona de fractura Chui	<b>Parte superior:</b> de gran amplitud y lisa o irregular <b>Parte interna:</b> convexa hacia arriba y se vuelve más caótica hacia el océano <b>Base:</b> límite subhorizontal con corteza opaca	<b>Extensión:</b> 30-100 Km <b>Potencia:</b> <3 Km	<b>Breakup:</b> magmático <b>Ambiente de emplazamiento:</b> subaéreo. Alta interacción magma-agua
	<b>Tipo IIb</b>	Presenta paquetes definidos Transiciones al tipo Ila hacia el sur de la zona de fractura Chui El buzamiento aumenta hacia la base	<b>Parte superior:</b> de gran amplitud y lisa o irregular y con fallas <b>Parte interna:</b> convexa hacia arriba y divergente con solapamientos sistemáticos <b>Base:</b> límite subhorizontal con corteza opaca	<b>Extensión:</b> 100-600 Km <b>Potencia:</b> <15 Km	<b>Breakup:</b> magmático <b>Ambiente de emplazamiento:</b> subaéreo. Baja-media interacción magma-agua
Modelo Chauvet et al., 2021	<b>Internos</b>	SDR proximal Paquete en forma de cuña con reflexiones planares divergentes que convergen en un único punto.	<b>Parte superior:</b> de gran amplitud y lisa <b>Parte interna:</b> de inclinación constante y divergente con un único punto de convergencia <b>Base:</b> límite inclinado con corteza opaca	<b>Extensión:</b> 80-100 Km <b>Potencia:</b> <4 Km	<b>Contexto cortical:</b> Asociados al cuello proximal. Comportamiento frágil de la corteza genera bloques basculados.
	<b>Intermedios</b>	Paquetes en forma de cuña divergente con arqueamientos. Se solapan sobre los SDRs Internos.	<b>Parte superior:</b> de gran amplitud y lisa <b>Parte interna:</b> de inclinación arqueada y divergente, con solapamiento interno <b>Base:</b> límite difuso inclinado con corteza opaca	<b>Extensión:</b> 50-200 Km <b>Potencia:</b> <20 Km	<b>Contexto cortical:</b> Asociados a la corteza transicional y al cuello distal. Comportamiento frágil-dúctil asociado a la pérdida de resistencia flexural.
	<b>Externos tipo I</b>	Paquetes definidos fuertemente arqueados y divergentes. SDRs distales. Asociados a la cordillera de Walvis y alto de Rio Grande.	<b>Parte superior:</b> de gran amplitud y lisa o irregular <b>Parte interna:</b> convexa hacia arriba y se vuelve más caótica hacia el océano <b>Base:</b> límite subhorizontal con corteza opaca	<b>Extensión:</b> ¿? Km <b>Potencia:</b> <8 Km	<b>Contexto cortical:</b> Asociados a la transición del adelgazamiento cortical y la corteza oceánica. Comportamiento relativamente dúctil.
	<b>Externos tipo II</b>	Paquetes poco definidos, con reflexiones planas a ligeramente arqueadas. SDRs distales Suelen fusionarse con basaltos planos. Ubicación al sur de los SDRs Externos tipo I	<b>Parte superior:</b> de gran amplitud y lisa o irregular <b>Parte interna:</b> levemente convexa hacia arriba y se vuelve más caótica hacia el océano <b>Base:</b> límite subhorizontal con corteza opaca	<b>Extensión:</b> ¿? Km <b>Potencia:</b> <2 Km	<b>Contexto cortical:</b> Asociados a la transición del adelgazamiento cortical y la corteza oceánica. Comportamiento relativamente dúctil.

Tabla 4:1 Comparativa de los diferentes tipos de SDRs según McDermott et al, (2018) y Chauvet et al, (2021)

## **5 Materiales y métodos**

### **5.1 Base de datos**

La base de datos utilizada para el presente trabajo consta de: i) tres cubos sísmicos de reflexión 3D, denominados BG12, TO12 e YF13, los cuales cubren un área total aproximada de 22.000 Km<sup>2</sup> en el MCU (Figura 5.1); ii) 52 líneas sísmicas de reflexión multicanal 2D que recorren un total aproximado de 10 Km. Estos datos fueron brindados por la empresa ANCAP.

Los datos sísmicos de reflexión 3D del cubo BG12 fueron adquiridos por la empresa Polarcus entre los años 2012 y 2014, cubriendo un área de aproximadamente 13.300 Km<sup>2</sup>. Se utilizaron dos cañones de aire comprimido de doble fuente a 8 m de profundidad, con una presión nominal de aire de 2000 psi. El relevamiento utilizó un intervalo de puntos de disparo de 25 m y diez cables sísmicos de 6 km, espaciados a intervalos de 125 m a una profundidad de 9 m. Los hidrófonos estaban separados por un intervalo de grupo de 12,5 m y registraron durante 10,050 (s) a una frecuencia de muestreo de 2 ms para obtener una resolución sísmica vertical de unos 25 m. El procesamiento de estos datos se realizó entre el 2013 y el 2014, estuvo a cargo de la empresa PGS Geophysical. Los datos fueron procesados utilizando la migración en tiempo Pre-Stack anisotrópica de Kirchhoff (PSTM), completando posteriormente la conversión tiempo-profundidad utilizando un modelo de construcción de velocidad VTI HyperBeam (VMB) y la migración en profundidad Pre-Stack de Kirchhoff.

Los datos sísmicos correspondientes al cubo TO12 fueron adquiridos por la empresa WesternGeco entre los años 2012 y 2014, cubriendo un área de aproximadamente 7.100 Km<sup>2</sup>. Se utilizaron dos cañones de aire comprimido de doble fuente a 6 m de profundidad, con una presión nominal de aire de 2000 psi. El relevamiento utilizó un intervalo de puntos de disparo de 25 m y doce cables sísmicos de 8 km, espaciados a intervalos de 100 m y a una profundidad de 9 m. Los hidrófonos estaban separados por un intervalo de grupo de 3,125 m y registraron durante 10,240 (s) a una frecuencia de muestreo de 2 ms para

obtener una resolución sísmica vertical de unos 25 m. Estos datos sísmicos fueron procesados entre los años 2013 y 2014 por las empresas Schlumberger Geosolutions y TOTAL, mediante el método de migración en profundidad Pre-Stack de Kirchhoff TTI.

Los datos sísmicos correspondientes al cubo YF13 fueron adquiridos por la empresa WesternGeco en 2013, cubriendo un área de aproximadamente 2.082 Km<sup>2</sup>. Se utilizaron dos cañones de aire comprimido de doble fuente a 6 m de profundidad, con una presión nominal de aire de 2000 psi. El relevamiento utilizó un intervalo de puntos de disparo de 25 m y diez cables sísmicos de 7 km, espaciados a intervalos de 120 m y a una profundidad de 9 m. Los hidrófonos estaban separados por un intervalo de grupo de 12,5 m y registraron durante 9,728 segundos a una frecuencia de muestreo de 2 ms para obtener una resolución sísmica vertical de unos 25 m. Estos datos sísmicos fueron procesados entre los años 2013 y 2014 por la empresa WesternGeco, mediante el método de migración en tiempo Pre-Stack de Kirchhoff.

Los datos sísmicos de reflexión multicanal 2D UR07 fueron adquiridos por la empresa Wavefield Inseis en 2007, recorriendo un total de 6.991 km. Se utilizó un cañón de aire comprimido a 6 m de profundidad, con una presión nominal de aire de 2000 psi. El relevamiento utilizó un intervalo de puntos de disparo de 25 m y 37,5 m y un cable sísmico de 8 km a una profundidad de 8 m. Los hidrófonos estaban separados por un intervalo de grupo de 12,5 m y registraron durante 10,0 segundos a una frecuencia de muestreo de 2 ms. El procesamiento de estos datos estuvo a cargo de la empresa Geotrace. Los datos fueron procesados utilizando la migración en tiempo Pre-Stack de Kirchhoff.

Los datos sísmicos de reflexión multicanal 2D UR08 fueron adquiridos por la empresa Wavefield Inseis en 2007, recorriendo un total de 2.817 km. Se utilizó un cañón de aire comprimido a 6 m de profundidad, con una presión nominal de aire de 2000 psi. El relevamiento utilizó un intervalo de puntos de disparo de 25 m y un cable sísmico de 8 km a una profundidad de 8 m. Los hidrófonos estaban separados por un intervalo de grupo de 12,5 m y registraron durante 10,0 (s) a una frecuencia de muestreo de 2 ms. El procesamiento de estos datos estuvo a

cargo de la empresa Geotrace. Los datos fueron procesados utilizando la migración en tiempo Pre-Stack de Kirchhoff.

Fuete de Datos	UR07	UR08	BG12	TO12	YF13
Año de adquisición	2007	2008	2012-2014	2012-2014	2013
Empresa adquirente	Wavefield Inseis	Wavefield Inseis	Polarcus	WesternGeco	WesternGeco
Área / longitud comprendida	6.991 Km	2.817 Km	13.306 Km <sup>2</sup>	7.145 Km <sup>2</sup>	2.082 Km <sup>2</sup>
Tipo de dato	Tiempo	Tiempo	Profundidad	Profundidad	Tiempo

Tabla 5:1 Comparación general de la base de datos.

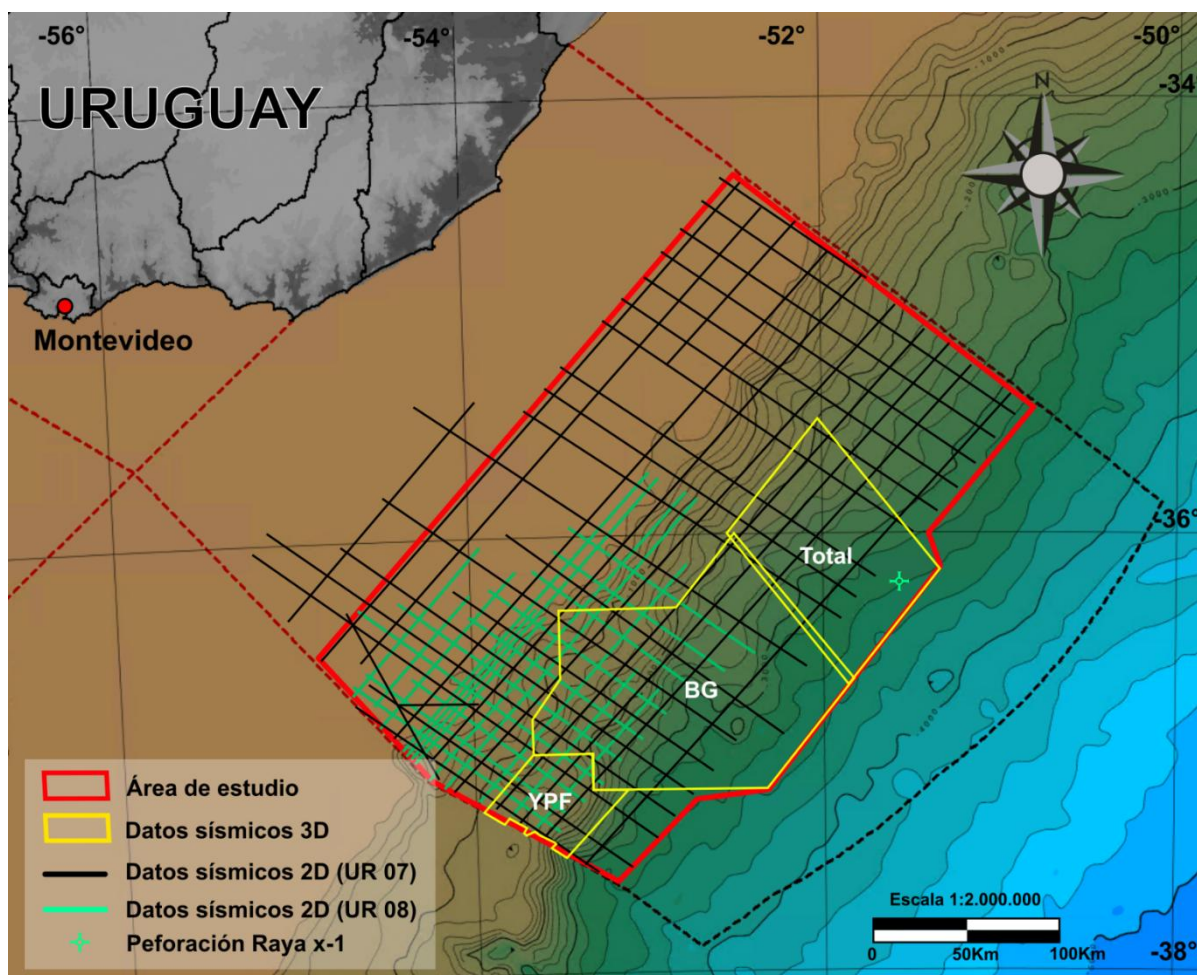


Figura 5.1: Ubicación de las bases de datos utilizadas en el presente trabajo.

## 5.2 Softwares utilizados:

A continuación, se detallan los diferentes softwares utilizados para la realización de este trabajo.

- IHS Kingdom 2021: Utilizado para el mapeo de superficies estratigráficas e interpretación de datos.
- Scripts de programación en lenguaje Python 3.12.7: Utilizado para el análisis computacional de secciones sísmicas, la implementación de algoritmos de aprendizaje automático (DBSCAN y regresión lineal por mínimos cuadrados), análisis de datos extraídos del software IHS Kingdom, implementación del modelo de red neuronal convolucional, ploteo de imágenes sísmicas en 2D, ploteo de superficies estratigráficas en 3D y ploteo de diagramas tipo rosa de los vientos para el análisis de fallas.

## 5.3 Metodología

En las siguientes subsecciones se desarrollan los fundamentos metodológicos de análisis utilizados en el presente trabajo de grado.

### 5.3.1 Estratigrafía sísmica o sismoestratigrafía

La Estratigrafía Sísmica, también conocida como Sismoestratigrafía, es una disciplina geológica que se enfoca en la interpretación o modelado de la estratigrafía, las facies sedimentarias y la historia geológica utilizando datos de reflexión sísmica (Sheriff, 1980, Cross & Lessenger, 1988) (Figura 5.2). El término se introdujo formalmente con la publicación de la Memoria de la AAPG en 1977 *Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*, y fue impulsado fundamentalmente por la industria petrolera. Esta disciplina ha sido clave en el estudio de las cuencas sedimentarias, iniciando una revolución en el análisis estratigráfico. Su desarrollo fue impulsado inicialmente por la

dependencia de la industria petrolera de los datos sísmicos para la exploración en regiones *offshore*, así como para para las zonas más profundas de las cuencas sedimentarias y para aquellas cuencas donde los datos directos de perforaciones eran limitados o inexistentes.

La sismoestratigrafía se basa en la premisa fundamental de que las reflexiones sísmicas se originan en discordancias y superficies de estratificación (Figura 5.3), lo que las hace cronológicamente significativas (Sheriff, 1980). Las reflexiones sísmicas se generan por contrastes significativos en la impedancia acústica de las rocas ( $I = \rho.v$ , en donde  $\rho$  es la densidad y  $v$  la velocidad de propagación de la onda en la capa), al atravesar diferentes capas de rocas, la diferencia litológica determina distintos valores de impedancia acústica, los cuales se procesan como “reflexiones” en una imagen sísmica. (Figura 5.4). Por lo tanto, las reflexiones sísmicas continuas indican superficies isócronas (estratificaciones o discordancias), que en algún momento conformaron la superficie sólida de la zona de estudio. (Sheriff, 1980; Cross & Lessenger, 1988).

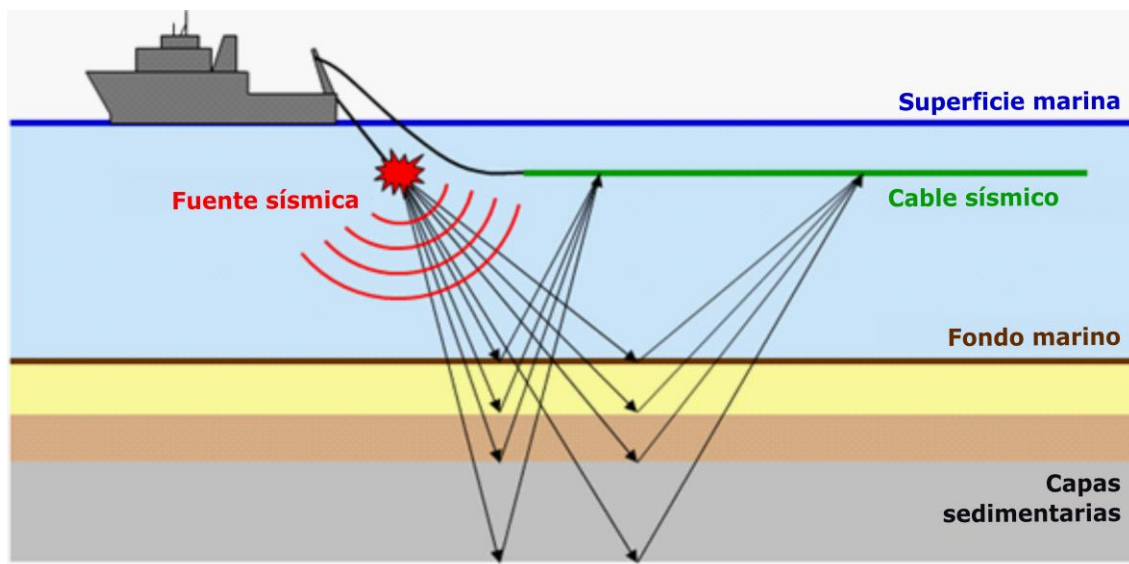


Figura 5.2: Modelo general de adquisición de datos sísmicos.

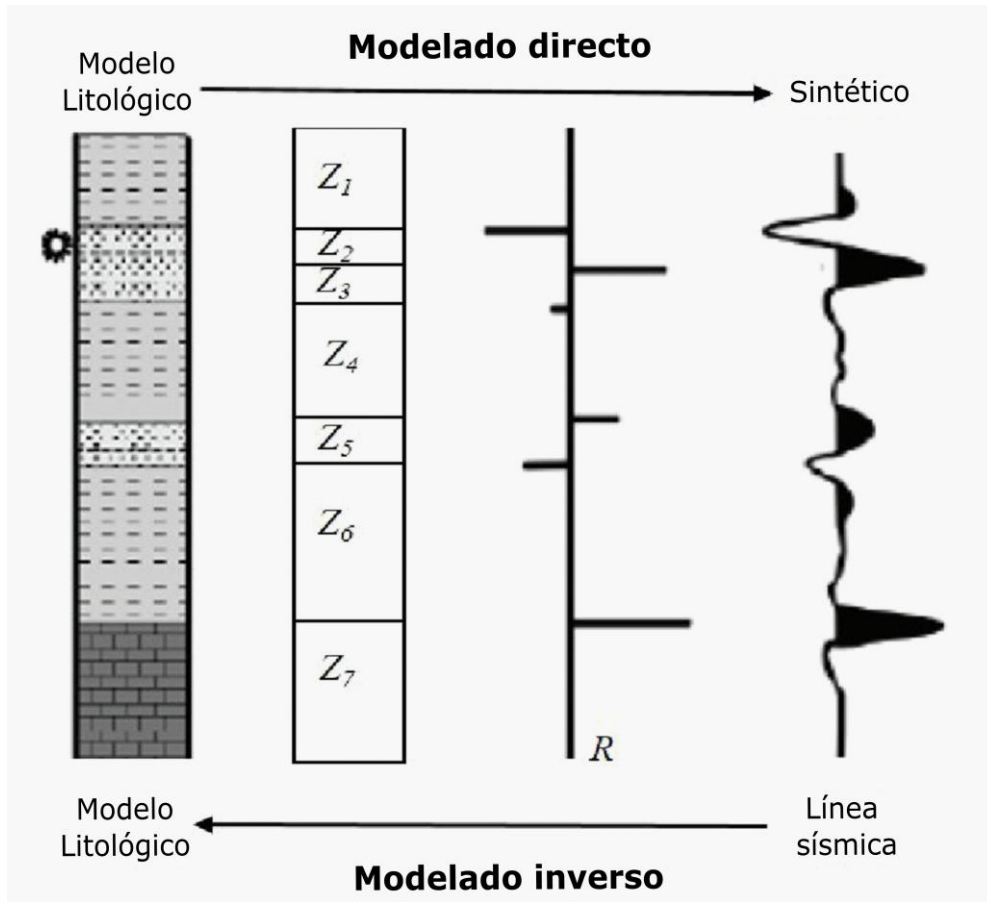


Figura 5.3: Modelo general de la representación de impedancia acústica según columna litológica. (Modificado de Sukmono, 2020)

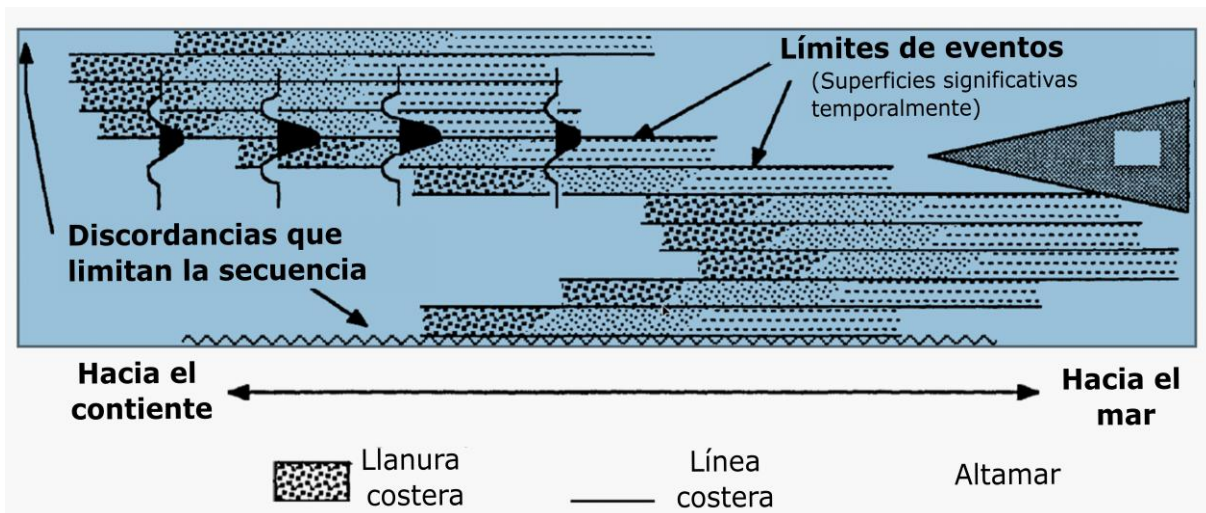


Figura 5.4: Valor de impedancia acústica según la interfase litológica. (Modificado de Cross & Lessenger, 1988)

Los conceptos más importantes de esta disciplina que se encuentran implicados en este trabajo se describen a continuación.

#### Atributos sismoestratigráficos

**Resolución sísmica vertical:** Es la distancia mínima entre dos superficies reflectantes que pueden distinguirse en los registros sísmicos. El límite detectable, es decir, el espesor mínimo para que una capa produzca una reflexión, es del orden de  $1/30$  de la longitud de onda<sup>1</sup>. (Cross & Lessenger, 1988; Sheriff, 1980)

**Amplitud sísmica:** Especifica la intensidad de la reflexión, este es el indicador principal de los contrastes de impedancia acústica en el subsuelo. La variación abrupta de amplitud es indicativa de un cambio litológico y/o en fluidos. (Sheriff, 1980, Cross & Lessenger, 1988)

**Velocidad sísmica:** La velocidad a la que viajan las ondas sísmicas a través de las rocas es un diagnóstico fundamental para determinar parámetros como: la porosidad, la presión de los fluidos intersticiales, la saturación de hidrocarburos y la litología. (Sheriff, 1980, Cross & Lessenger, 1988)

**Continuidad sísmica:** Determina cuán continuos son los reflectores, se utiliza para observar la continuidad de los eventos, es especialmente útil para precisar la ubicación de discontinuidades angulares y fallas. (Sheriff, 1980, Cross & Lessenger, 1988)

**Frecuencia sísmica:** Determina cuán frecuentes son los reflectores, es un atributo que permite observar variaciones estratigráficas caracterizando conjuntos de reflectores. (Sheriff, 1980, Cross & Lessenger, 1988)

Más allá de la resolución sísmica, la velocidad y la amplitud, una interpretación sísmica completa y precisa requiere la consideración y análisis de una variedad de otros parámetros y atributos de la señal sísmica. Ya que estos pueden proporcionar información clave sobre la litología, el contenido de fluidos

---

<sup>1</sup> Resoluciones de alta calidad determinan espesores del orden de los 10m.

y la arquitectura estratigráfica. Se mencionan algunos de los más importantes, aunque el desarrollo de los mismos excede los objetivos de este trabajo.

La sismoestratigrafía ha extendido sus aplicaciones desde la industria petrolera a los ámbitos académico y gubernamental, incluyendo estudios en ambientes marinos modernos. Ha proporcionado un marco conceptual para el desarrollo de modelos numéricos determinísticos de la arquitectura estratigráfica y la evolución de cuencas, transformando la geología de las rocas sedimentarias de un campo cualitativo a uno más predictivo y cuantitativo. (Sheriff, 1980, Cross & Lessenger, 1988)

Es importante destacar que estos datos también pueden ser correlacionados con datos de perforaciones, pero actualmente se carece de este tipo de datos para el intervalo estudiado.

### **5.3.2 Procesamiento computacional de imágenes digitales**

El procesamiento computacional de imágenes digitales es un campo crucial dentro de la ciencia de la computación y la inteligencia artificial, que se enfoca en permitir que las máquinas interpreten y comprendan la información visual. Esta área manipula imágenes digitales a través de diversos algoritmos siendo su objetivo principal el mejorar o extraer información de una imagen. Las imágenes en bruto, comúnmente pueden tener “ruido”, estar distorsionadas o carecer de la claridad necesaria para aplicaciones específicas, por lo tanto el procesamiento resulta particularmente útil para resaltar datos de interés. (Bueno García *et al.* 2015)

Históricamente, este campo de procesamiento computacional comenzó con técnicas básicas como la mejora y el filtrado de imágenes en la década de 1960. Con los avances tecnológicos, se ha expandido para incluir operaciones complejas que analizan e interpretan imágenes.

El análisis computacional de imágenes digitales se basa en el concepto de que el núcleo del procesamiento de imágenes se encuentra en los píxeles, la

unidad más pequeña de una imagen digital que contienen información sobre la intensidad del color que representa con valores que van del 0 al 255. Las imágenes a color se representan comúnmente con tres “canales” de color RGB (Red, Green, Blue). Por lo tanto, las imágenes computacionalmente se representan como matrices de  $n$  dimensiones siendo  $n$  el número de canales (comúnmente 3, RGB) con números entre 0 y 255.

De acuerdo al tratamiento de estas matrices, las técnicas modernas de procesamiento de imágenes se pueden clasificar en varias categorías:

**Mejora de la imagen:** Implica mejorar la apariencia visual de una imagen, incluyendo ajustes de contraste, corrección de brillo y reducción de ruido, para hacerlas más útiles para la interpretación humana o un procesamiento posterior.

**Restauración de la imagen:** Busca recuperar una imagen que ha sido degradada por factores como el desenfoque o el ruido.

**Análisis de la imagen:** Implica extraer información significativa de las imágenes, como la detección de objetos, la segmentación y la clasificación.

**Compresión de la imagen:** Reduce el tamaño de un archivo de imagen manteniendo la calidad para un almacenamiento y transmisión eficientes.

**Síntesis de la imagen:** Crea nuevas imágenes a partir de las existentes mediante técnicas como la mezcla de imágenes y renderización en 3D.

En este trabajo se utilizaron varios algoritmos de mejora de imágenes y de análisis de imágenes de la biblioteca de programación OpenCV<sup>2</sup> para intentar resaltar los patrones característicos de los SDRs (Ver Anexo 1: Algoritmos de procesamiento digital de imágenes utilizados)

---

<sup>2</sup> OpenCV (Open Source Computer Vision Library) es una de las bibliotecas más populares para la visión por computadora y el procesamiento de imágenes. Ofrece más de 2500 algoritmos optimizados y es gratuita tanto para uso escolar como empresarial. (Bueno García *et al.* 2015)

### 5.3.3 Inteligencia artificial

La Inteligencia Artificial (IA) es un campo de la informática que se centra en el desarrollo de sistemas capaces de realizar tareas que tradicionalmente requieren inteligencia humana. Estas tareas incluyen el reconocimiento de patrones, el procesamiento del lenguaje natural, el aprendizaje a partir de datos y la toma de decisiones a partir de todo lo anterior. La IA ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, impulsada por avances en los algoritmos, el aumento en la capacidad computacional y la disponibilidad masiva de datos. (Mitchell 1997, Narayan *et al.* 2020, Belyadi & Haghghat. 2021, Petrelli 2021)

En el contexto de las geociencias y la exploración geológica, la IA ha demostrado ser una herramienta poderosa para el análisis e interpretación de grandes volúmenes de información geofísica. (Narayan *et al.* 2020, Belyadi & Haghghat. 2021, Petrelli 2021)

Dentro del área de la IA, el *Machine Learning* (ML) (aprendizaje automático) y el *Deep Learning* (DL) (aprendizaje profundo) son subcampos que se distinguen por sus enfoques y niveles de abstracción. La relación entre estos conceptos puede representarse jerárquicamente como se ve en la Figura 5.5.

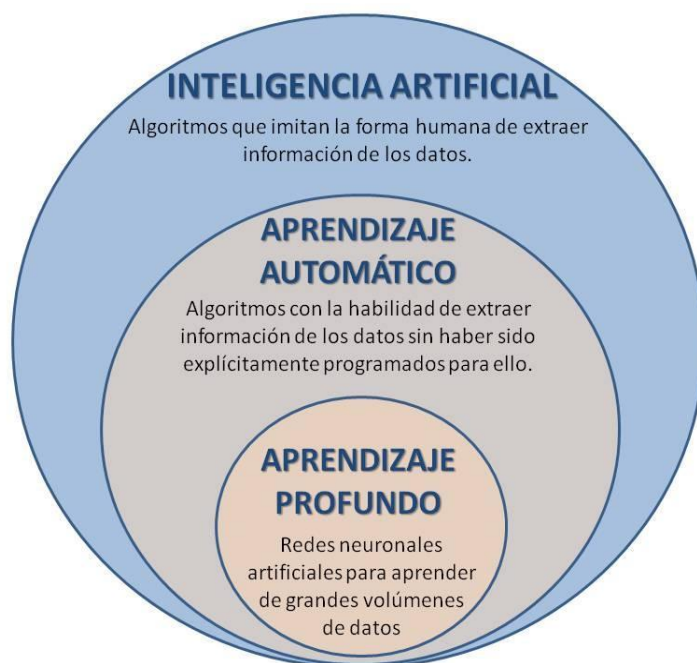


Figura 5.5: Diferentes áreas de la Inteligencia Artificial.

Así tenemos:

1. **Inteligencia Artificial (IA):** Es el campo general que busca desarrollar sistemas capaces de realizar tareas que habitualmente requieren inteligencia humana.
2. **Machine Learning (ML):** Es una subdisciplina de la IA que se centra en la creación de algoritmos capaces de aprender a partir de datos sin ser programados explícitamente para cada tarea.
3. **Deep Learning (DL):** Es una rama del ML que emplea redes neuronales profundas con múltiples capas para extraer patrones complejos de grandes volúmenes de datos.

### 5.3.4 Aprendizaje Automático (*Machine Learning*)

Los modelos de ML identifican relaciones en los datos y generan predicciones que pueden ser de utilidad tanto para observar relaciones no establecidas *a priori* como para cuantificar valores estadísticos que permitan caracterizar ciertos conjuntos de datos.

En ML, los algoritmos se pueden clasificar en tres categorías principales según la forma en que estos aprenden de los datos:

1. **Aprendizaje Supervisado:** En este enfoque, el modelo se entrena con un conjunto de datos etiquetado, es decir que cada dato de entrada tiene una salida esperada conocida. Su objetivo es aprender la relación intrínseca entre las variables de entrada y las variables de salida para, luego de determinada internamente la relación entre los datos, se ingresen nuevos datos de entrada para que se realice la respectiva predicción de los valores de salida. Los ejemplos de algoritmos más comunes para esta categoría son: la regresión lineal, la regresión logística, los árboles de decisión y las redes neuronales artificiales, entre otros.

**2. Aprendizaje No Supervisado:** En este enfoque, los datos no están etiquetados, y el modelo busca patrones o estructuras ocultas en la información sin una salida esperada definida. El ejemplo más paradigmático de este tipo de aprendizaje son los algoritmos de agrupamiento o *clustering*, los cuales agrupan los datos en relación a los patrones con que estos cuentan en las  $n$  dimensiones que representan todas las variables posibles de los datos.

**3. Aprendizaje por Refuerzo:** Este enfoque se basa en un agente que interactúa con un entorno y aprende a tomar decisiones mediante un sistema de recompensas y penalizaciones.

### 5.3.5 Aprendizaje Profundo (*Deep Learning*)

El DL es un modelo de aprendizaje supervisado que emplea redes neuronales artificiales (modelo matemático inspirado en el cerebro humano para encontrar patrones en datos) de varias capas para modelar los datos. Cada neurona artificial o “perceptrón”, se especializa en observar una característica particular tomando una o varias entradas y a través de cálculos matemáticos y ponderaciones determina un único valor de salida, que a su vez puede ingresar en una nueva neurona artificial, incrementándose los niveles de redes neuronales artificiales tanto como se desee. Cada capa oculta extrae y combina patrones cada vez más complejos. Finalmente, se obtiene una salida final que determina si el dato de entrada pertenece o no a la categoría previamente asignada en la fase de entrenamiento. (Figura 5.6)

Las redes neuronales convolucionales (RNC) son redes neuronales que aplican filtros matriciales convolucionales sobre imágenes para caracterizar rasgos específicos (como los mencionados en la sección 5.3.2 *procesamiento computacional de imágenes digitales*) y en base a ellos generar las entradas a las redes neuronales. Las RNC son altamente utilizadas para detectar elementos presentes en imágenes como determinados objetos, números y letras, animales, patrones de enfermedades, tipos de vegetación, entre otros, lo cual las hace particularmente eficaces para el análisis de imágenes sísmicas.

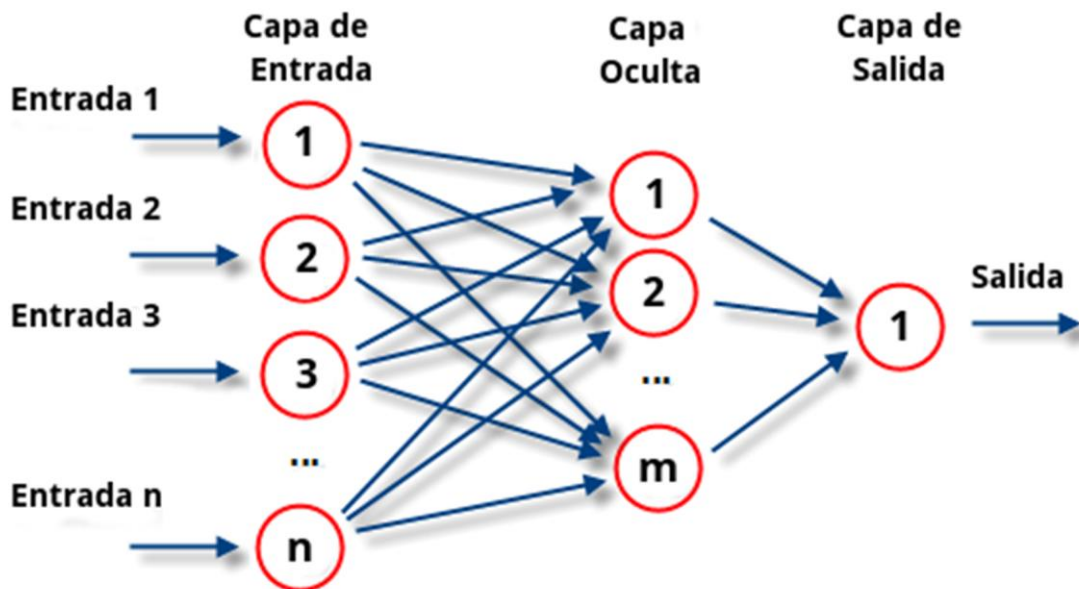


Figura 5.6: Modelo esquemático de redes neuronales, modificado de Narayan et al. 2020.

En el contexto de este trabajo, se diseñaron y utilizaron tanto algoritmos de aprendizaje supervisado como de aprendizaje no supervisado. Para el primer tipo se desarrolló un algoritmo de RNC para el procesamiento de imágenes sísmicas que pudiesen determinar si esta contenía un área caracterizada por los SDRs (ver sección 6.4 *Mapeo de SDRs mediante redes neuronales convolucionales (RNC)*). En cuanto al segundo tipo, se desarrolló una combinación de algoritmos de agrupamiento y regresión lineal para determinar el rumbo de las fallas presentes en los SDRs (ver sección *Aproximación al análisis de fallas mediante algoritmos de aprendizaje automático*).

### 5.3.6 Algoritmos utilizados

#### Algoritmo de agrupamiento: DBSCAN

El algoritmo DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) desarrollado por Ester *et al.* (1996), es un algoritmo de agrupamiento que identifica regiones de alta densidad de puntos en el espacio de datos. Este algoritmo está diseñado para descubrir grupos (*clusters*) y puntos de ruido en grandes bases de datos espaciales. Se basa en una noción de densidad para definir los *clusters*.

La particularidad de este tipo de algoritmo es que puede descubrir agrupamientos con formas arbitrarias, como: formas alargadas, lineales, circulares, convexas, cóncavas, etc. (Figura 5.7)

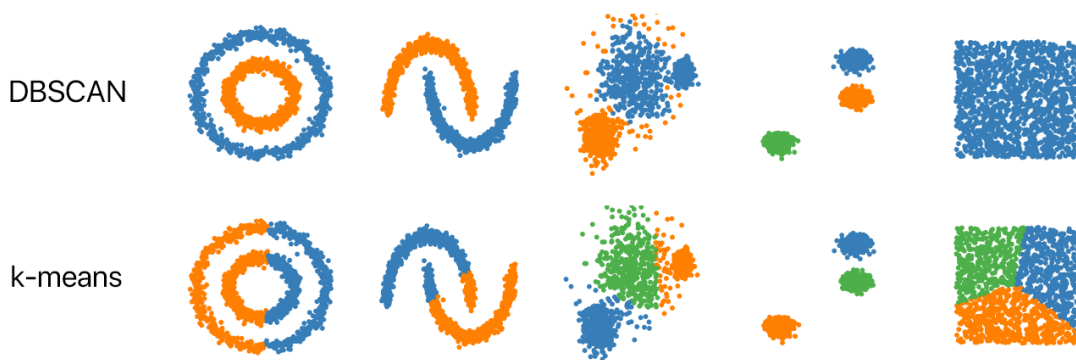


Figura 5.7: Figura que muestra el comportamiento del algoritmo DBSCAN en comparación con el algoritmo K-Means. Nótese como para patrones circulares o cóncavo convexos, donde la densidad es más preponderante que la cercanía, el algoritmo DBSCAN presenta un mejor de

DBSCAN utiliza dos parámetros:

i) *Eps* (radio de la vecindad) es la medida de distancia que se utiliza para especificar la vecindad de cualquier punto de los datos. Si la distancia entre dos puntos de datos es menor que “*Eps*”, entonces esos dos puntos se consideran “vecinos”;

ii) *MinPts* (número mínimo de puntos en una vecindad) es el número mínimo de puntos de datos requeridos para que una agrupación sea considerada una región densa. (Easter *et al.* 1996)

En base a estos dos parámetros, DBSCAN determina tres tipos de puntos (Figura 5.8):

i) “Puntos centrales” (*Core Points*): Un punto de datos se considera punto central si hay al menos *MinPts* puntos dentro del radio *Eps*;

ii) “Puntos frontera” (*Border Points*): Un punto de datos es un punto frontera si está en la vecindad de un punto central, pero tiene menos de *MinPts* dentro del radio *Eps*;

iii) “Puntos ruidosos o atípicos” (*Noise/Outlier Points*): Un punto de datos se considera ruido o atípico si no es un punto central ni está en la vecindad de un punto central. (Easter *et al.* 1996)

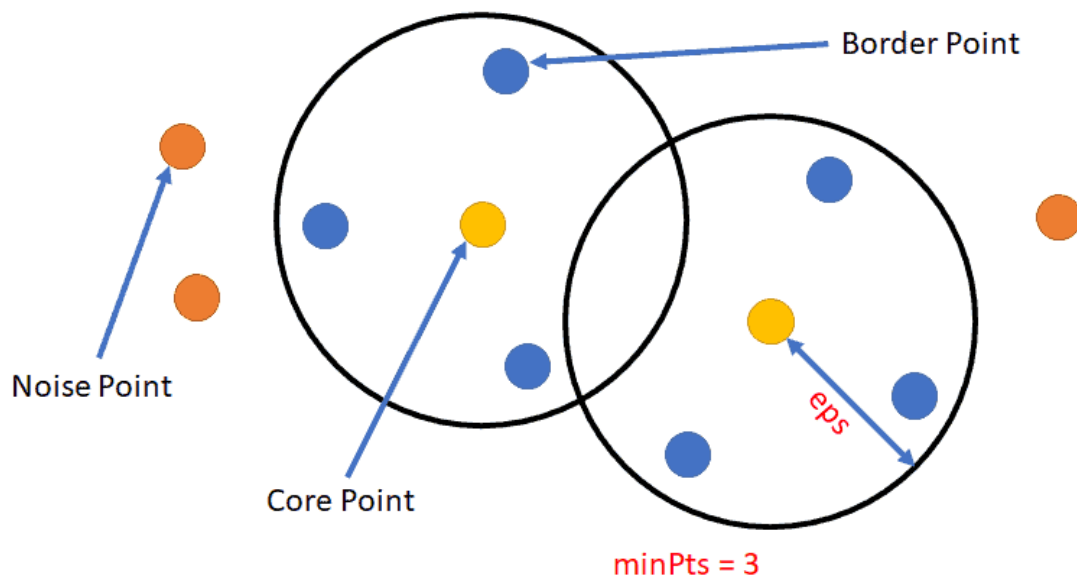


Figura 5.8: Figura que muestra los diferentes tipos de puntos del algoritmo DBSCAN.

Comportamiento sintético del algoritmo (Easter *et al.* 1996):

1. El usuario define los parámetros “*MinPts*” y “*Eps*”.
2. Se selecciona arbitrariamente un punto inicial del conjunto de datos. Se define su vecindad como los puntos dentro de una distancia “*Eps*” Si hay

al menos “*MinPts*” puntos en esa vecindad, el punto se clasifica como “punto central”.

3. El algoritmo repite este proceso para todos los puntos: busca los puntos vecinos dentro de “*Eps*” e identifica los puntos centrales. Si un punto central aún no ha sido asignado a un grupo, el algoritmo crea un nuevo grupo.
4. El algoritmo luego encuentra todos los puntos vecinos usando la métrica de distancia; si hay al menos “*MinPts*” puntos dentro del radio “*Eps*” para el punto considerado, todos estos puntos se asignan al mismo grupo.
5. El algoritmo recorre los puntos que aún no han sido revisados. Si no forman parte de ningún grupo, se marcan como “ruido”.
6. El algoritmo termina cuando todos los puntos han sido revisados.

Para el análisis de fallas, de acuerdo a los rechazos presentes en las mismas, se procesaron datos de contorno estructural en formato *grid* (X, Y, Z). Se aplicó un filtrado estadístico seleccionando únicamente los valores de Z que superan el percentil 88; este umbral se estableció para aislar las crestas topográficas y rasgos morfológicos más prominentes, eliminando el ruido de fondo y centrando el análisis en las anomalías elevadas que definen la traza de las estructuras principales.

Posteriormente, se implementó el algoritmo de agrupamiento espacial DBSCAN para identificar asociaciones de puntos por densidad. Se definieron parámetros de *Eps* 1200 y *MinPts* 5, seleccionados mediante un proceso de calibración empírica para garantizar la continuidad lateral de las alineaciones geológicas sin fusionar estructuras independientes. Finalmente, sobre cada clúster de puntos densos, se aplicó una regresión lineal por mínimos cuadrados para calcular la recta de mejor ajuste, permitiendo determinar con precisión matemática la dirección de rumbo de las fallas detectadas.

### **Red neuronal convolucional**

Como se detalló anteriormente, las RNC operan sobre imágenes para determinar una predicción en función de un entrenamiento previo. En este caso,

dadas las particulares características de una imagen sísmica, las cuales son de gran tamaño y donde los patrones de reflectores se repiten, se tomaron pequeñas secciones de la imagen sísmica para realizar las correspondientes fases de entrenamiento y validación. Se escogió una imagen sísmica conspicua del área de estudio donde estuvieran presentes SDRs (línea *dip* del bloque 3D BG12 Figura 5.9), la cual presenta una resolución de 2.500 píxeles de alto por 8.305 píxeles de largo, dando un total de 20.762.500 píxeles sobre los cuales operaron las redes neuronales para realizar la predicción.

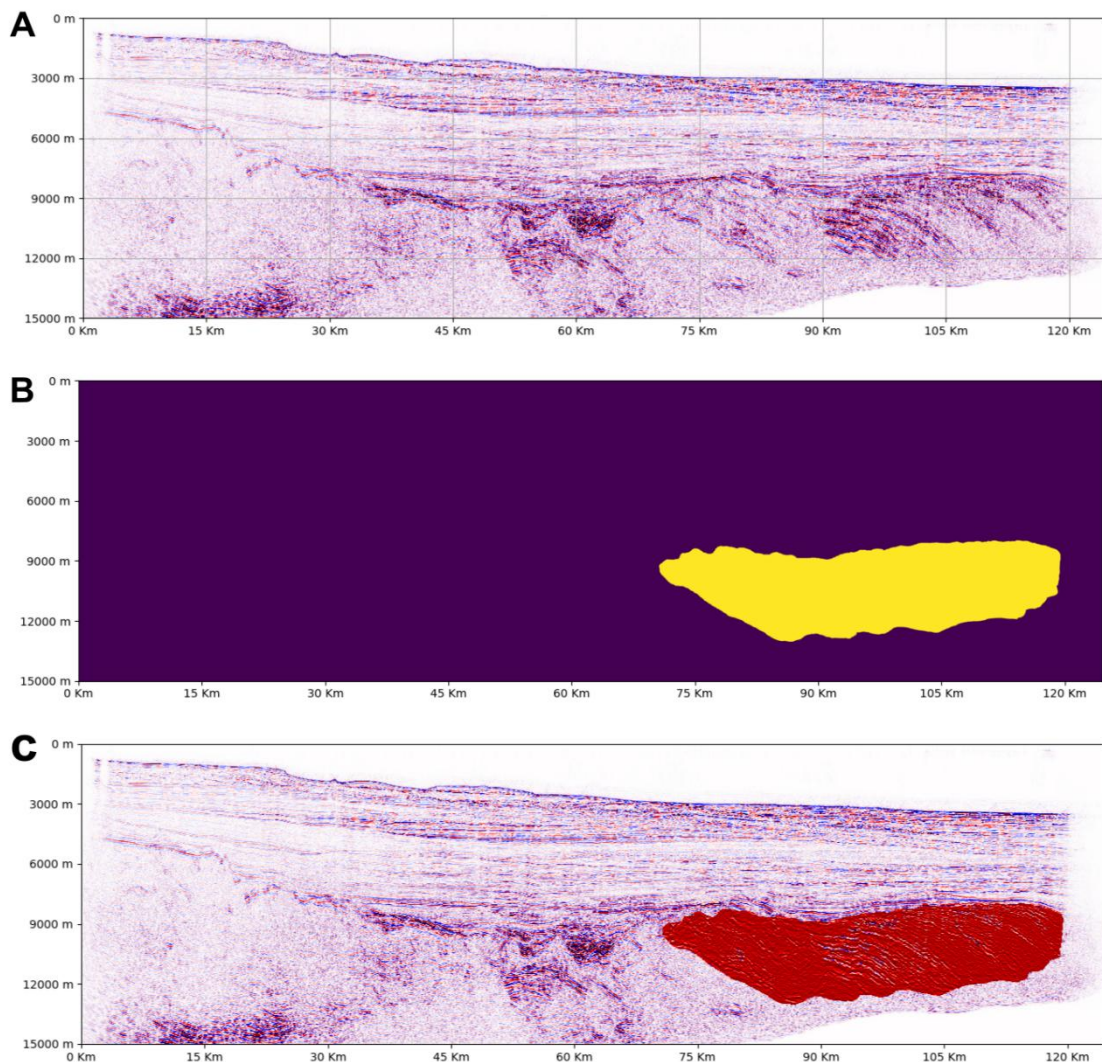


Figura 5.9. **A.** Sección sísmica utilizada para el desarrollo de la red neuronal convolucional. **B.** Representación del sector donde se desarrollan los SDRs. **C.** Combinación de las dos imágenes anteriores.

La RNC contó con 12 capas y un total de 514 neuronas artificiales. Para la fase de entrenamiento se escogieron aleatoriamente 10.000 secciones de la imagen para el entrenamiento y 2.000 secciones para la validación (Figura 5.10/Figura 3.1) sobre las cuales se realizó el procedimiento repetidamente en 100 ocasiones para que el algoritmo realizara las correcciones internas necesarias para mejorar la precisión. Cada sección estaba representada por fragmentos de la imagen de una determinada cantidad de píxeles cuadrados. Para evaluar la precisión en la predicción de las RNC, se realizaron varios modelos con distintos tamaños de secciones para observar su comportamiento. Para la misma imagen sísmica se probaron modelos con secciones de imagen de: **A.** 8x8 píxeles; **B.** 16x16 píxeles. **C.** 32x32 píxeles; **D.** 64x64 píxeles; **E.** 128x128 píxeles y **F.** 256x256 píxeles.

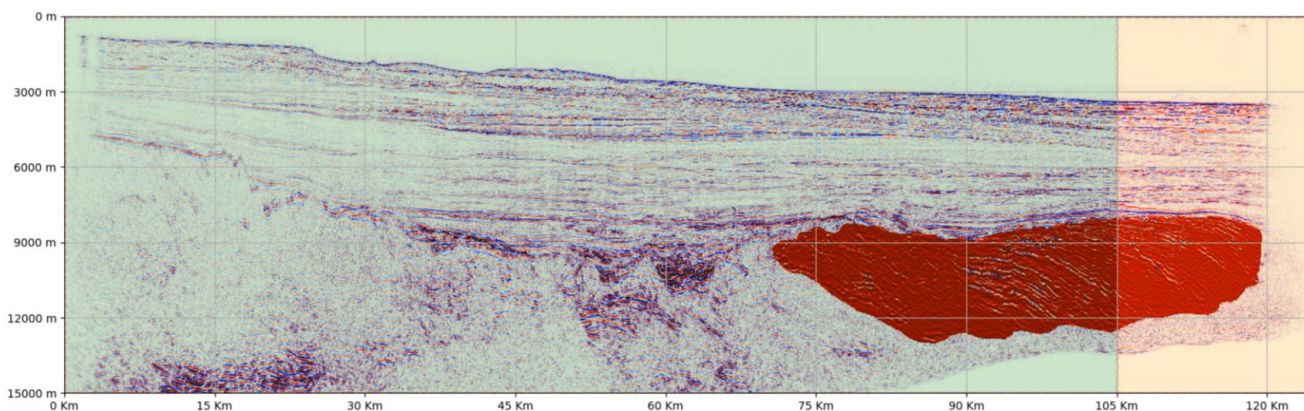


Figura 5.10: Sección sísmica utilizada para el desarrollo de la RNC. En verde la sección utilizada para la selección de 2.000 fragmentos para la fase de validación y en anaranjado la sección utilizada para la selección de 10.000 fragmentos para la fase de entrenamiento.

En la siguiente tabla se observan la cantidad de secciones de imágenes generadas de acuerdo al tamaño de sección:

Tamaño de sección	Imágenes posibles
8x8 píxeles	20.762.436
16x16 píxeles	20.762.244
32x32 píxeles	20.761.476
64x64 píxeles	20.758.404
128x128 píxeles	20.746.116
256x256 píxeles	20.696.964

Tabla 5:2 Tamaño de secciones e imágenes posibles generadas.

## 5.4 Actividades desarrolladas

A continuación, se presenta el orden de las actividades desarrolladas para la realización del presente trabajo

1. Revisión bibliográfica: se realizó una revisión de antecedentes bibliográficos exhaustiva, con énfasis en:
  - a. Trabajos que abordan la geología y la estratigrafía del MCU y áreas de similares características
  - b. Trabajos referentes al estudio de los SDRs en los MVP.
  - c. Bibliografía sobre inteligencia artificial y ciencia de datos vinculada a las geociencias y particularmente en aplicaciones sobre datos sísmicos.
2. Mapeo de horizontes vinculados a los intervalos donde se desarrollaron los SDRs en el MCU.
3. Identificación de diferentes tipos de SDRs según McDermott *et al.* (2018) y Chauvet *et al.* (2021).
4. Confección de mapas de contorno estructural del tope y base de los SDR's y de isópacas.
5. Identificación y mapeo de fallas que afectan a los SDRs.
6. Cálculo de rumbos y buzamientos en base a algoritmos de inteligencia artificial y comparación con los datos extraídos del software IHS Kingdom
7. Aplicación de redes neuronales para cuantificar parámetros característicos de los SDRs y determinar la idoneidad de estos algoritmos para realizar este tipo de predicción.
8. Confección de mapas 3D de los SDRs.
9. Interpretación de los resultados y discusión de los mismos.

## 6 Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos en relación a los objetivos del presente trabajo.

### 6.1 SDRs del MCU

De acuerdo a los mapeos de horizontes realizados, se identifica que los SDRs del MCU se presentan claramente definidos en dos sectores, los cuales pueden asociarse espacialmente con la ubicación de las cuencas de Pelotas y Punta del Este. En este sentido, y debido a las características diferentes que presentan los SDRs ubicados en el sector NE del MCU, con respecto a los SDRs ubicados en el SW del MCU, se propone para este trabajo la utilización de la nomenclatura de SDRs Pelotas y SDRs Punta de Este, respectivamente.

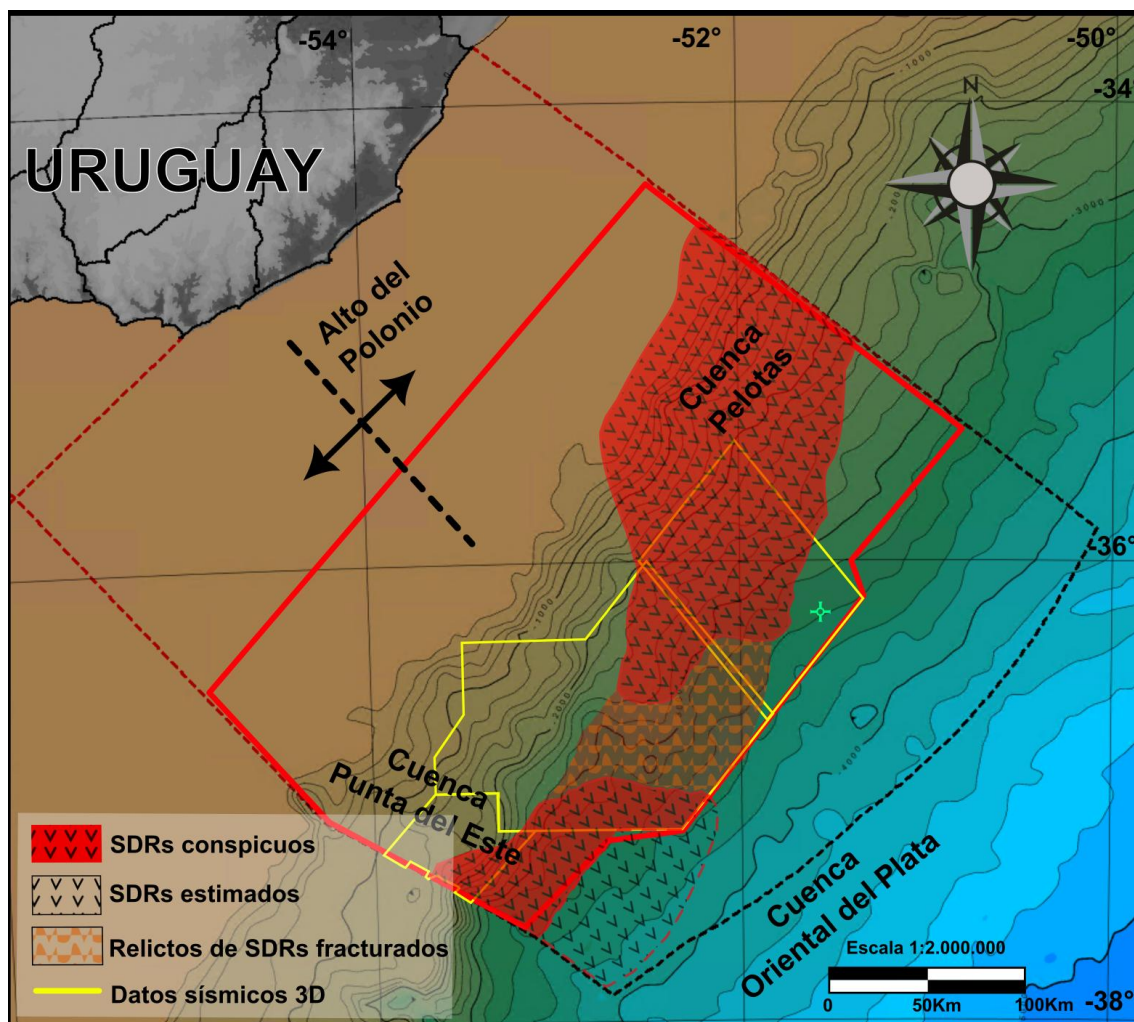


Figura 6.1: Emplazamiento de los SDRs en el MCU.

La extensión total de los SDRs es de aproximadamente 17.800 Km<sup>2</sup> para los SDRs Pelotas y 4.000 Km<sup>2</sup> para los SDRs Punta del Este, pudiendo ser observada la totalidad de la extensión de los SDRs Pelotas, pero no la extensión total de los SDRs Punta del Este, ya que se carece de datos sísmicos en el sector distal de los mismos (Figura 6.1), impidiendo ver sus terminaciones. (Ver tabla 6.3 para más datos comparativos)

La superficie estratigráfica que demarca el tope de los SDRs, tanto para los SDRs Pelotas como para los SDRs Punta del Este, presenta por encima reflexiones que finalizan en *onlap*, mientras que por debajo se observan reflectores con terminaciones tanto en *toplap* como en *truncamiento* (Figura 6.2), estando las primeras vinculadas fundamentalmente con el desarrollo de los SDRs proximales los cuales se expresan como las denominadas cuñas de SDRs y los diferentes tipos de SDRs como puede observarse en la sección *Tipos de SDRs*. Asimismo, las terminaciones en *truncamiento*, están asociadas al desarrollo de los SDRs en sectores distales o localmente relacionadas a eventos de erosión posteriores a su emplazamiento.

Por otro lado, la superficie estratigráfica que demarca la base de los SDRs presenta reflexiones inclinadas con la corteza opaca en los sectores proximales donde se observa el desarrollo de cuñas de SDRs (Figura 6.2). En cuanto a los sectores distales las reflexiones presentan terminaciones levemente inclinadas a subparalelas. Es importante hacer notar que en los sectores de los datos de los bloques 3D Total, las imágenes sísmicas no alcanzan la base de los SDRs impidiendo caracterizar la base en esas zonas.

Internamente, los reflectores presentan una gran variación en su expresión, observándose en los sectores proximales reflexiones de alta amplitud e impedancia acústica convergentes que divergen distalmente y en profundidad generando las denominadas cuñas de SDRs. Localmente en zonas de mayor ensanchamiento de las cuñas de SDRs presentan importantes arqueamientos en sus reflexiones pudiendo observarse terminaciones internas de tipo *onlap*. (Figura 6.2)

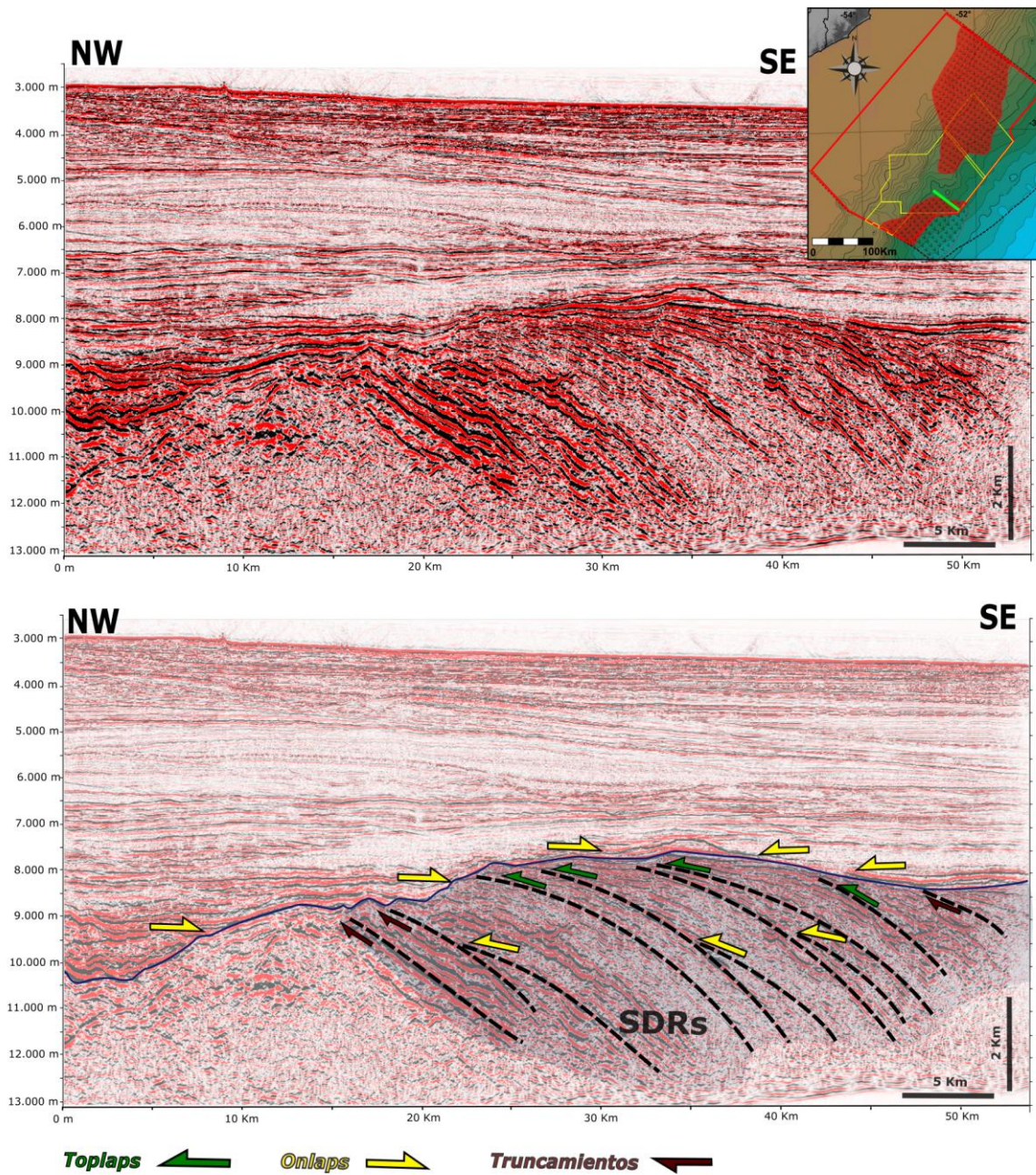


Figura 6.2: Imagen conspicua de un SDRs del MCU con las terminaciones de sus reflectores.

Hacia el sector central del MCU los SDRs se ven interrumpidos en sus rasgos más conspicuos y sus características se difuminan por un intenso fallamiento dificultando ampliamente su caracterización (ver sección Fallamiento de los SDRs), siendo su observación únicamente posible mediante la visualización de secciones sísmicas en 3D. Este fallamiento afecta fuertemente los SDRs Pelotas en su porción SW y a los SDRs Punta del Este en su porción NE.

El sector central donde los SDRs no son visibles, está caracterizado asimismo por grandes fallas, *grabens*, un importante adelgazamiento cortical y estructuras cónicas interpretadas como volcanes. Como pueden observarse en la sección Sector central del MCU.

## 6.2 Mapa de contorno estructural e Isópacas

Dada la diferencia en tipos de datos, resolución, continuidad espacial y extensión entre los bloques con datos 2D en tiempo (TWT (s)) y los bloques con datos 3D en profundidad (m) (ver Figura 5.1: Ubicación de las bases de datos utilizadas en el presente trabajo. y sección *Base de datos*), se confeccionaron mapas de contorno estructural para la base y tope de los SDRs tanto en profundidad (m) (Figura 6.3.A y Figura 6.6.A) y en tiempo (Figura 6.3.B, y Figura 6.6.B)

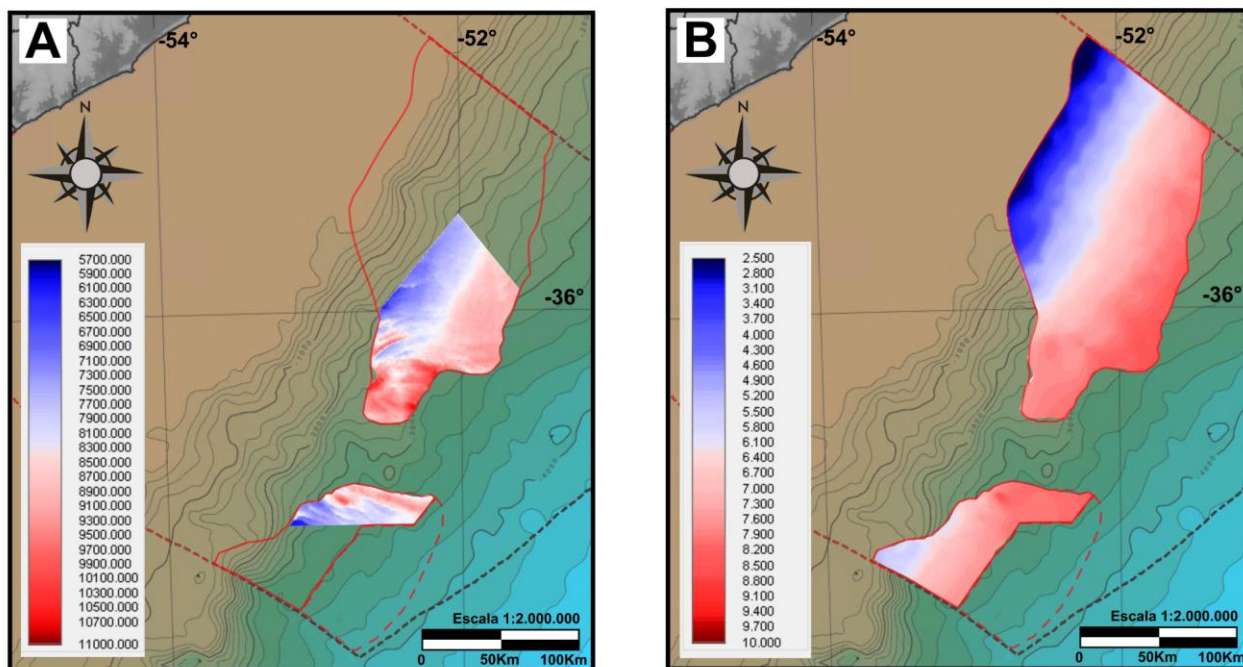


Figura 6.3: Mapas de contorno estructural del tope de los SDRs del MCU. **A:** Tope de los SDRs con datos en profundidad (m) (bloques 3D BG12 y TO12). **B:** Tope de los SDRs con datos en tiempo (TWT (s)). El contorno en rojo indica la extensión completa de los SDRs.

La Figura 6.3.B. que presenta la expresión completa del tope de los SDRs en el MCU, muestra claramente la mayor profundidad que presenta el tope de los SDRs Punta del Este con respecto a los SDRs Pelotas. Observados con mayor claridad en el ploteo 3D del *Breakup* del MCU (Figura 6.4).

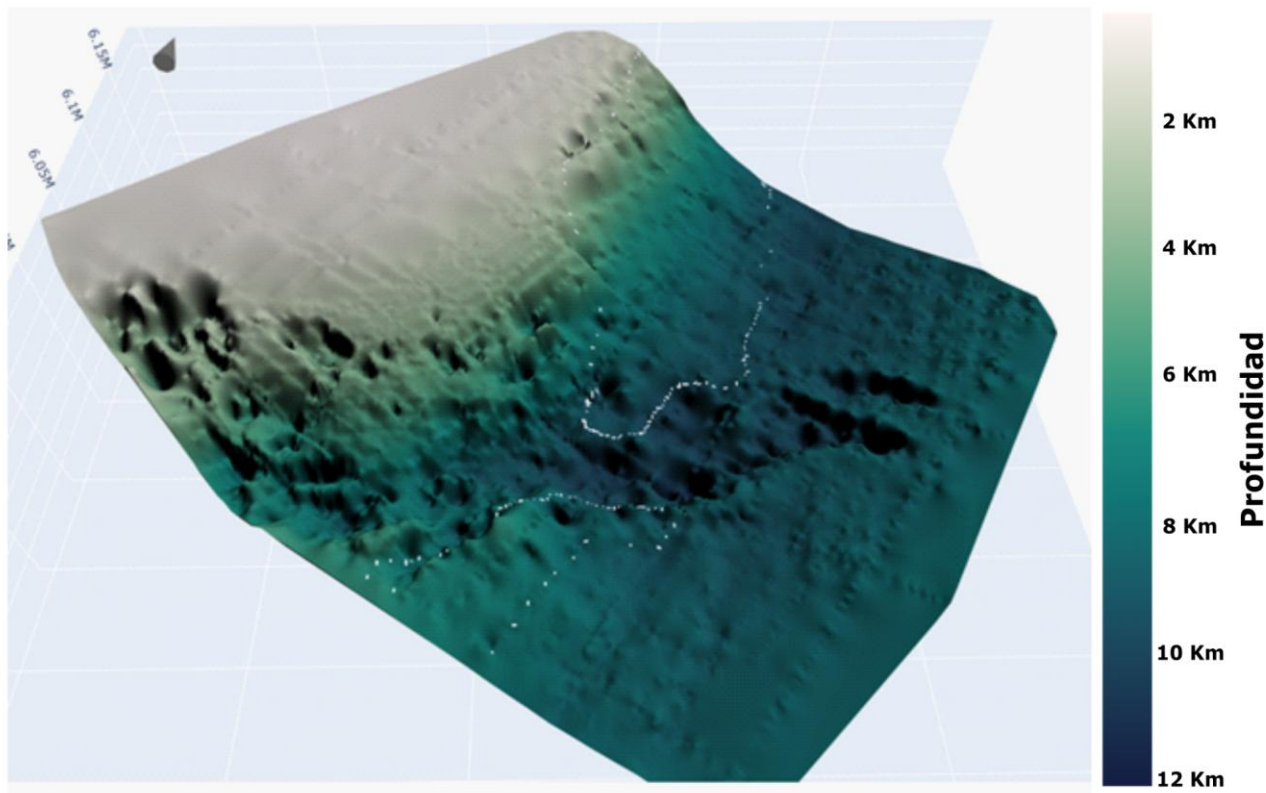


Figura 6.4: Mapa de contorno estructural de la superficie conformada por el tope del basamento y el tope de los SDRs del MCU según conversión de datos en profundidad de los bloques 2D. Exageración vertical x 8. El cono indica el Norte. En punteado blanco puede observarse la extensión de los SDRs. Para una observación interactiva del mapa 3D puede dirigirse al siguiente [enlace](#).

La Figura 6.3.A. al reducir los datos exclusivamente a los bloques 3D disponibles impide ver con claridad la diferencia de profundidad, aunque marca con mayor resolución la morfología del tope, observándose los fallamientos en diferentes direcciones E-SE y N-NE para los SDRs Pelotas y Punta del Este, respectivamente (ver sección Fallamiento de los SDRs), tal como se puede observar con mayor definición en el ploteo 3D del tope de los SDRs con dato en profundidad (Figura 6.5).

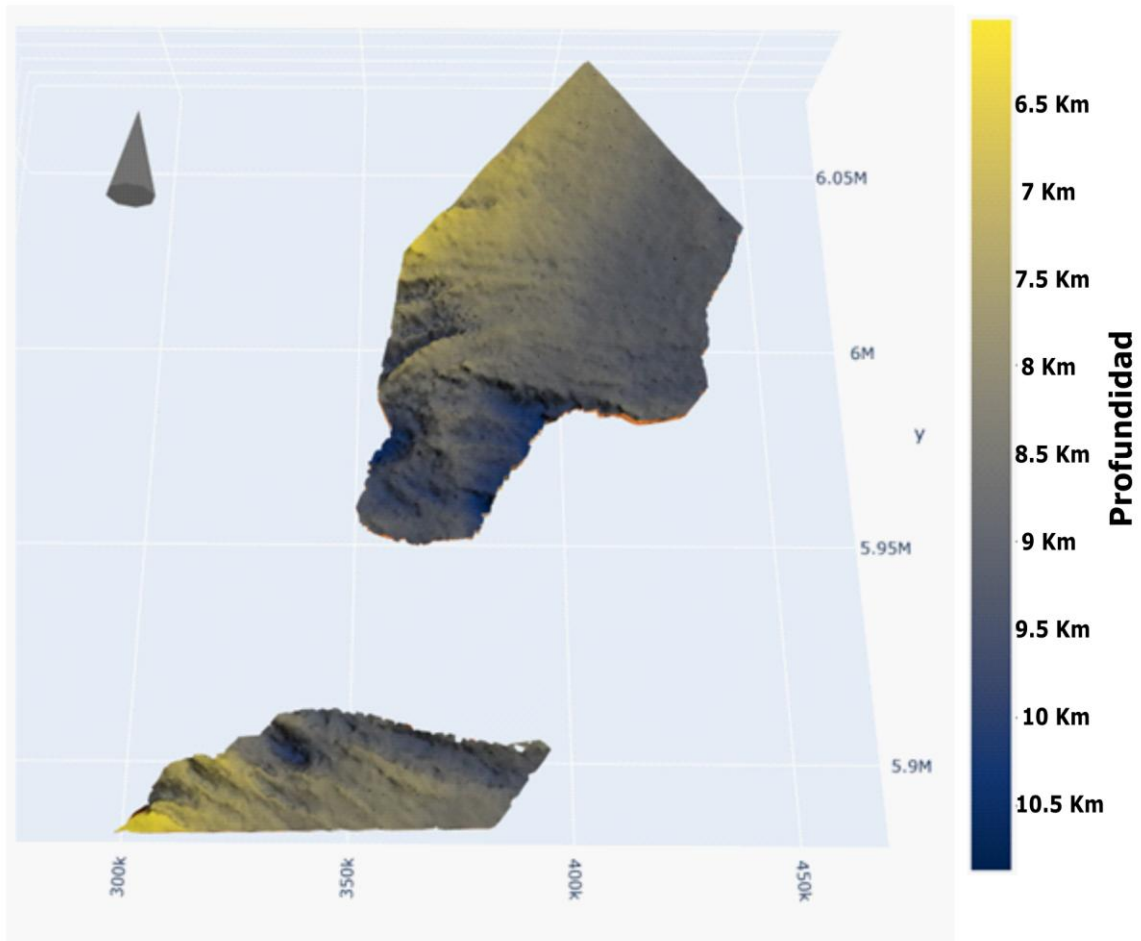


Figura 6.5: Mapa de contorno estructural del tope de los SDRs del MCU según los datos en profundidad de los bloques 3D. Exageración vertical x 3. El cono indica el Norte. Para una observación interactiva del mapa 3D puede dirigirse al siguiente [enlace](#).

Asimismo, la resolución de la Figura 6.5 muestra cómo la zona NE de los SDRs Pelotas presenta una morfología homogénea prácticamente sin fallamientos.

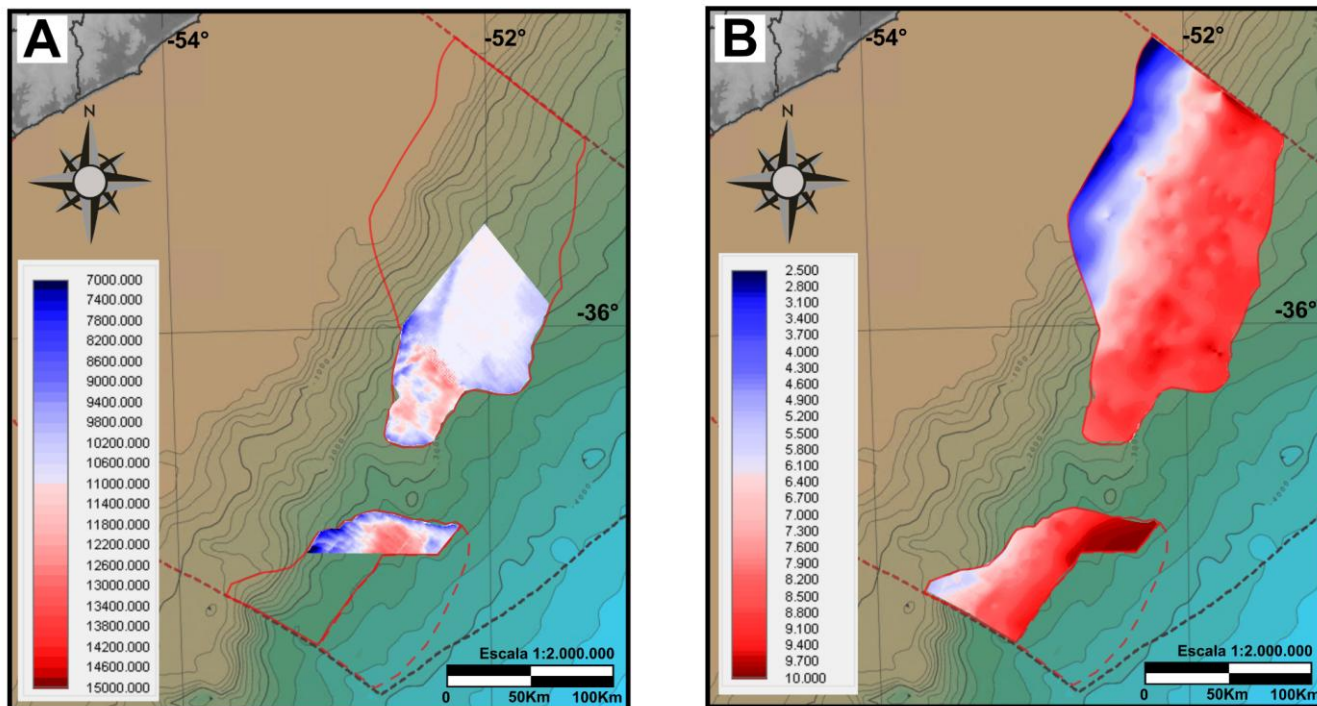


Figura 6.6: Mapas de contorno estructural de la base de los SDRs del MCU. A. Base de los SDRs con datos en profundidad (m) (bloques 3D BG12 y TO12). B: Base de los SDRs con datos en tiempo (TWT (s)). El contorno en rojo indica la extensión completa de los SDRs.

La Figura 6.6.B Al igual que en la Figura 6.6.B. muestra claramente una mayor profundidad en los SDRs Punta del Este con respecto a los SDRs Pelotas. Es importante notar que en la Figura 6.6.A la base no ha podido ser identificada en su completitud debido a que los datos sísmicos no la abarcan.

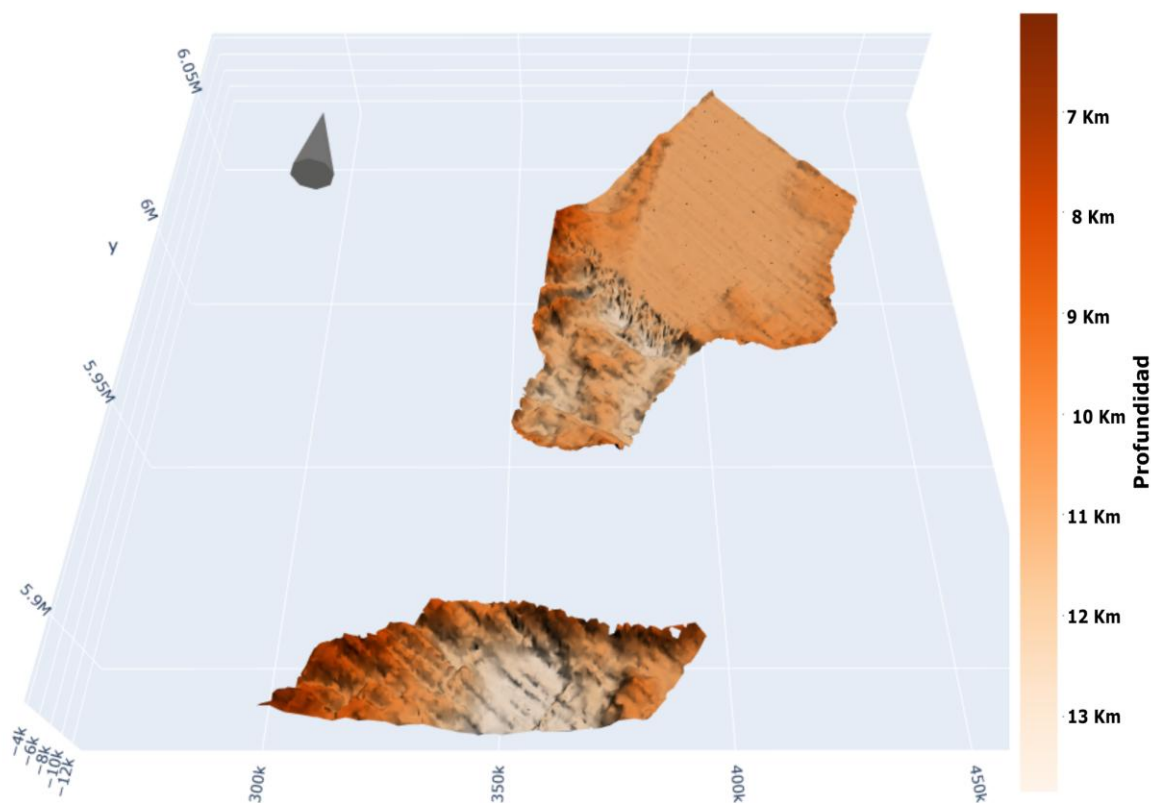
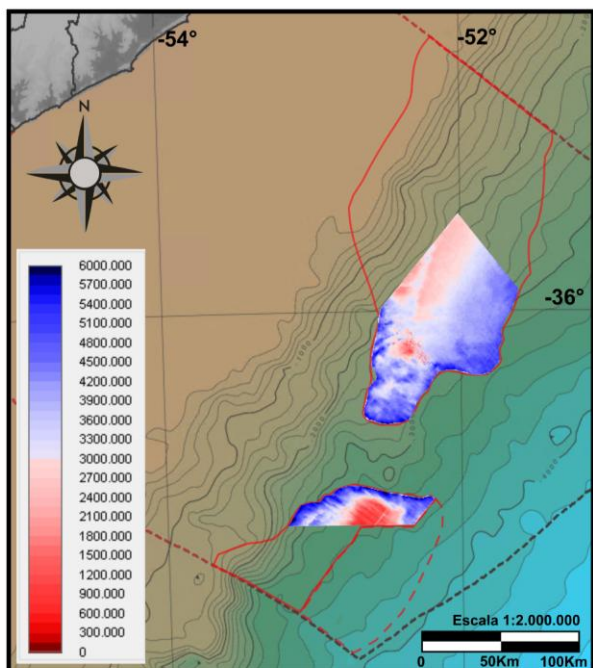


Figura 6.7: Mapa de contorno estructural de la base de los SDRs del MCU según los datos en profundidad de los bloques 3D. Exageración vertical x 3. El cono indica el Norte. Para una observación interactiva del mapa 3D puede dirigirse al siguiente [enlace](#).

Como puede observarse en el mapa de isópacas de la Figura 6.8, en rasgos generales, los SDRs Pelotas presentan espesores mayores en las zonas centrales, donde aparecen sus respectivas cuñas, siendo su progresión distal caracterizada por la reducción de los espesores coincidiendo esta zona con el desarrollo de los SDRs externos según la clasificación de Chauvet et al. (2021) o SDRs tipo II según McDemott et al. (2018). Ver sección Tipos de SDRs.

**A. Mapa de isópacas de los SDRs según datos 3D. Datos en profundidad.**



**B. Mapa de isópacas de los SDRs según datos 2D. Datos en tiempo.**

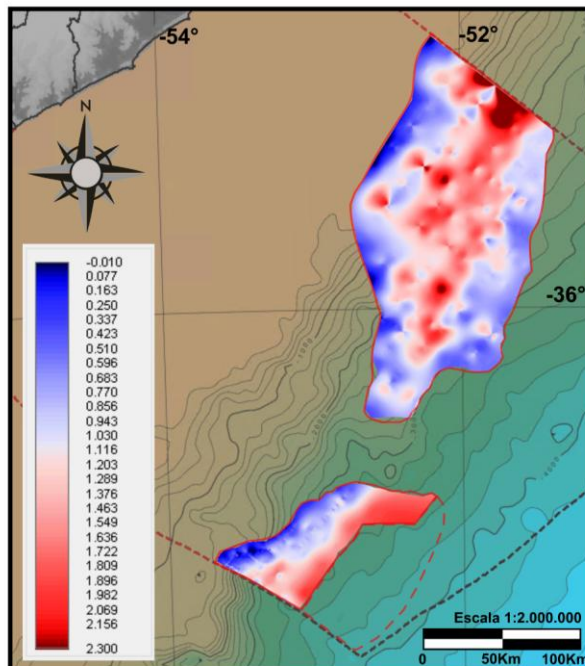


Figura 6.8: Mapa de isópacas de los SDRs del MCU. A. Datos en profundidad (m) (bloques 3D BG12 y TO12). B: Datos en tiempo (TWT (s)). El contorno en rojo indica la extensión completa de los SDRs.

Asimismo, la zona central coincide, además del desarrollo de cuñas de SDRs, con la zona de mayor fallamiento, donde se puede observar un mayor espesor en los SDRs Punta del Este (Figura 6.8 y Figura 6.9). No se cuenta con datos sísmicos que permitan caracterizar la expresión de los SDRs Punta del Este en su porción distal.

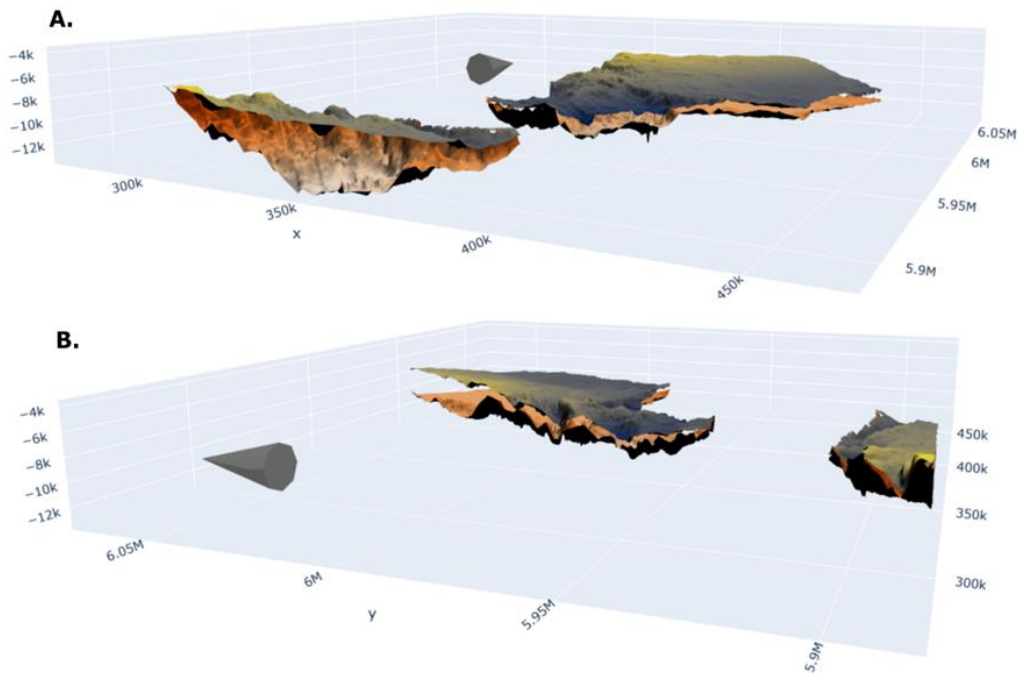


Figura 6.9: **A** y **B**. Vista 3D en perspectiva del contorno estructural de la base y el tope de los SDRs según los datos en profundidad de los bloques 3D. Aquí se puede observar el mayor espesor de las cuñas de los SDRs Punta del Este. Nótese asimismo como los SDRs pierden espesor distalmente. Exageración vertical x 3. El cono indica el Norte. Para una observación interactiva del mapa 3D puede dirigirse al siguiente [enlace](#).

### 6.3 Análisis computacional de imágenes sísmicas

Si bien las reflexiones características de los SDRs se encuentran fundamentalmente en sus cuñas, la extensión lateral de las mismas, así como su extensión en profundidad, en ocasiones resulta complejo su mapeo, ya que las reflexiones se tornan difusas. En esta sección se muestran los resultados de la aplicación de diversos filtros computacionales para imágenes, con el objetivo de determinar su utilidad para resaltar rasgos característicos de los reflectores que forman parte de los SDRs y facilitar su mapeo.

Como se puede observar en la Figura 6.10, el alto contraste entre los valores de impedancia en los paquetes de reflectores identificados como SDRs, se muestran muy característicos tanto por el buzamiento como por la curvatura de los mismos.

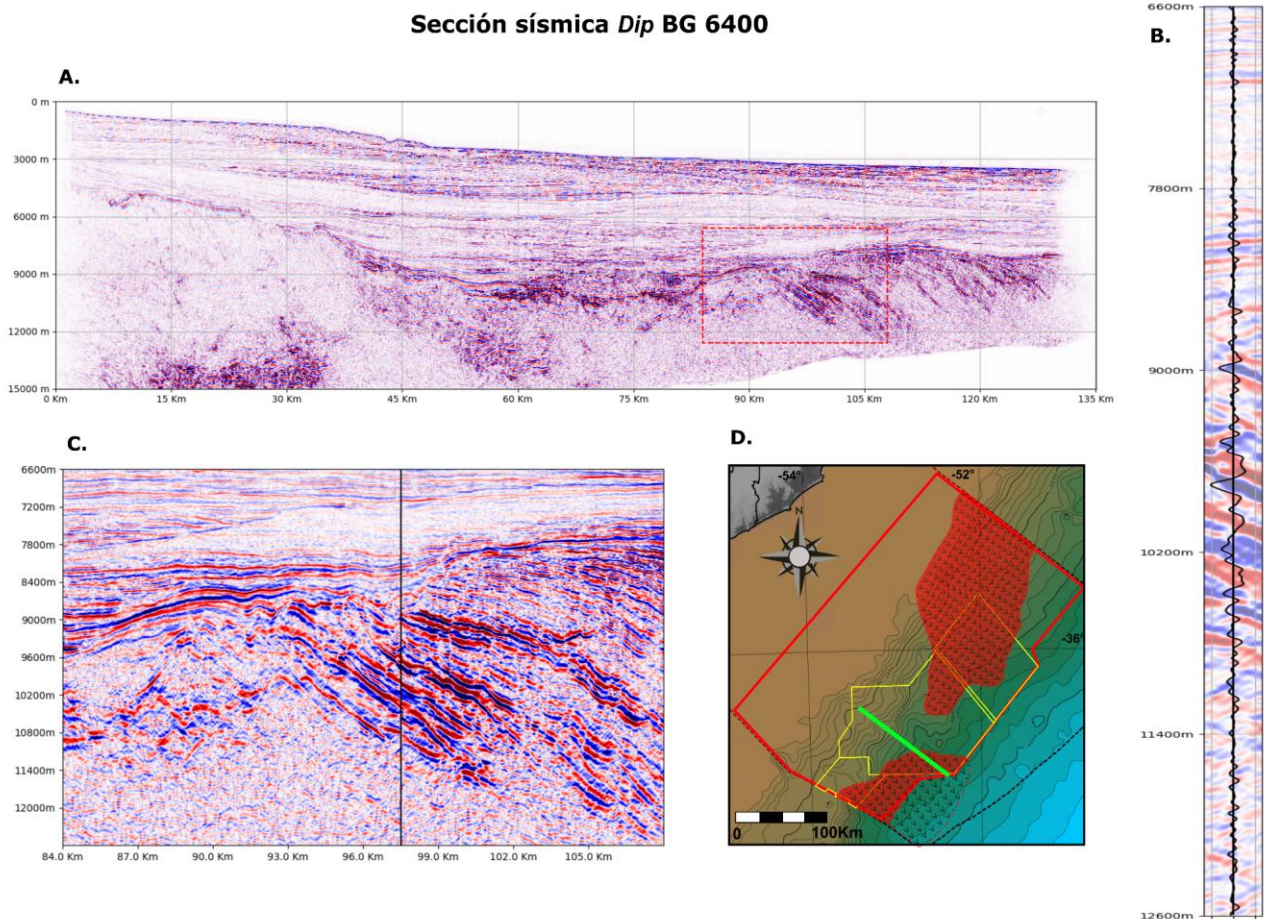


Figura 6.10: A: Vista general de la línea dip 6400 del bloque BG12. B. Valores de impedancia acústica y un rango de reflectores asociados para la intersección marcada en negro en C. C. Detalle de la línea donde se observan reflectores asociados a SDRs. D. Ubicación de la línea en el MCU.

A continuación, se muestra el resultado de la aplicación de diversos filtros computacionales para imágenes sísmicas:

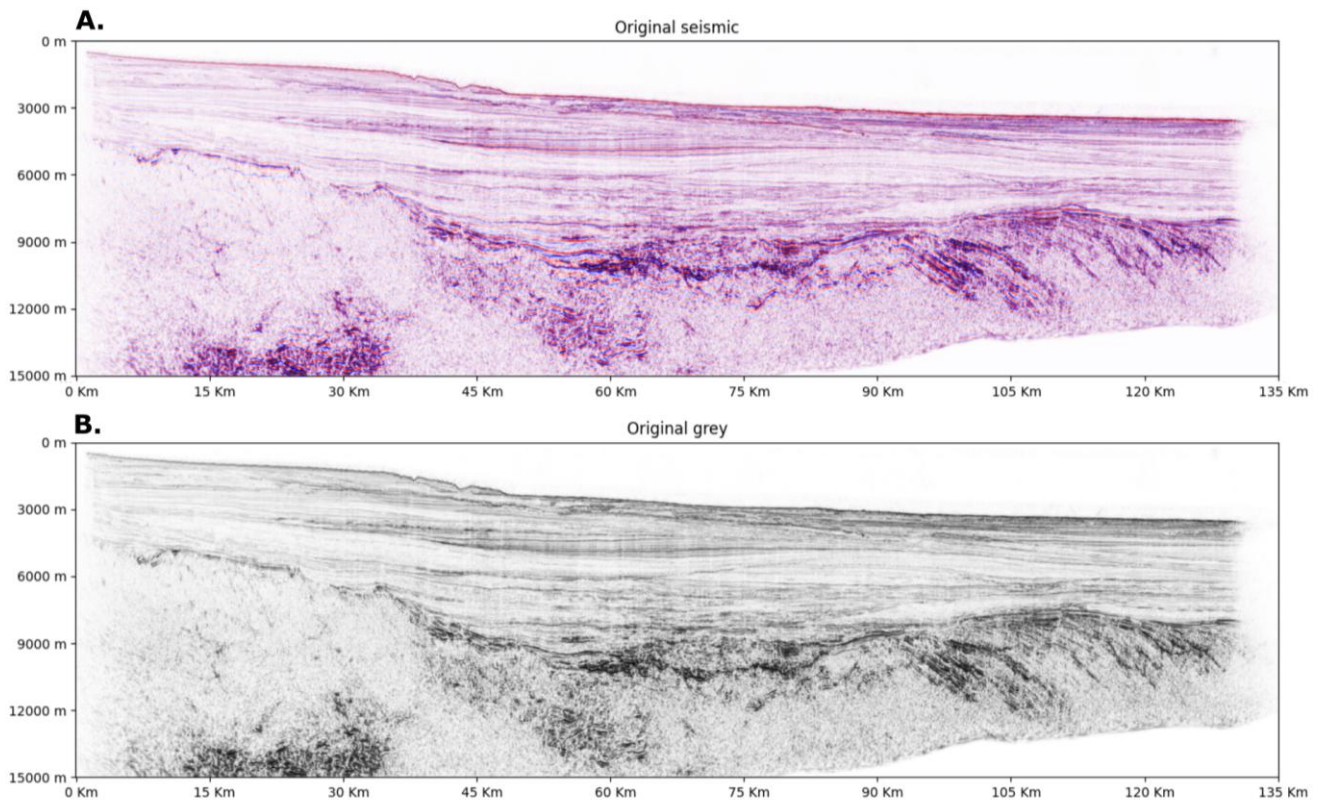


Figura 6.11: A: Imagen sísmica de la línea dip 6400 del bloque BG12 con el mapa de color seismic. B Misma sección en escala de grises.

Partiendo de la imagen original de la línea dip 6400 del bloque BG12 y la imagen representada en escala de grises, se aplicaron 9 filtros distintos<sup>3</sup> para determinar su idoneidad con el fin de resaltar los rasgos característicos de los reflectores que se identifican como SDRs.

<sup>3</sup> Los parámetros de los mismos pueden observarse en la sección 10.1

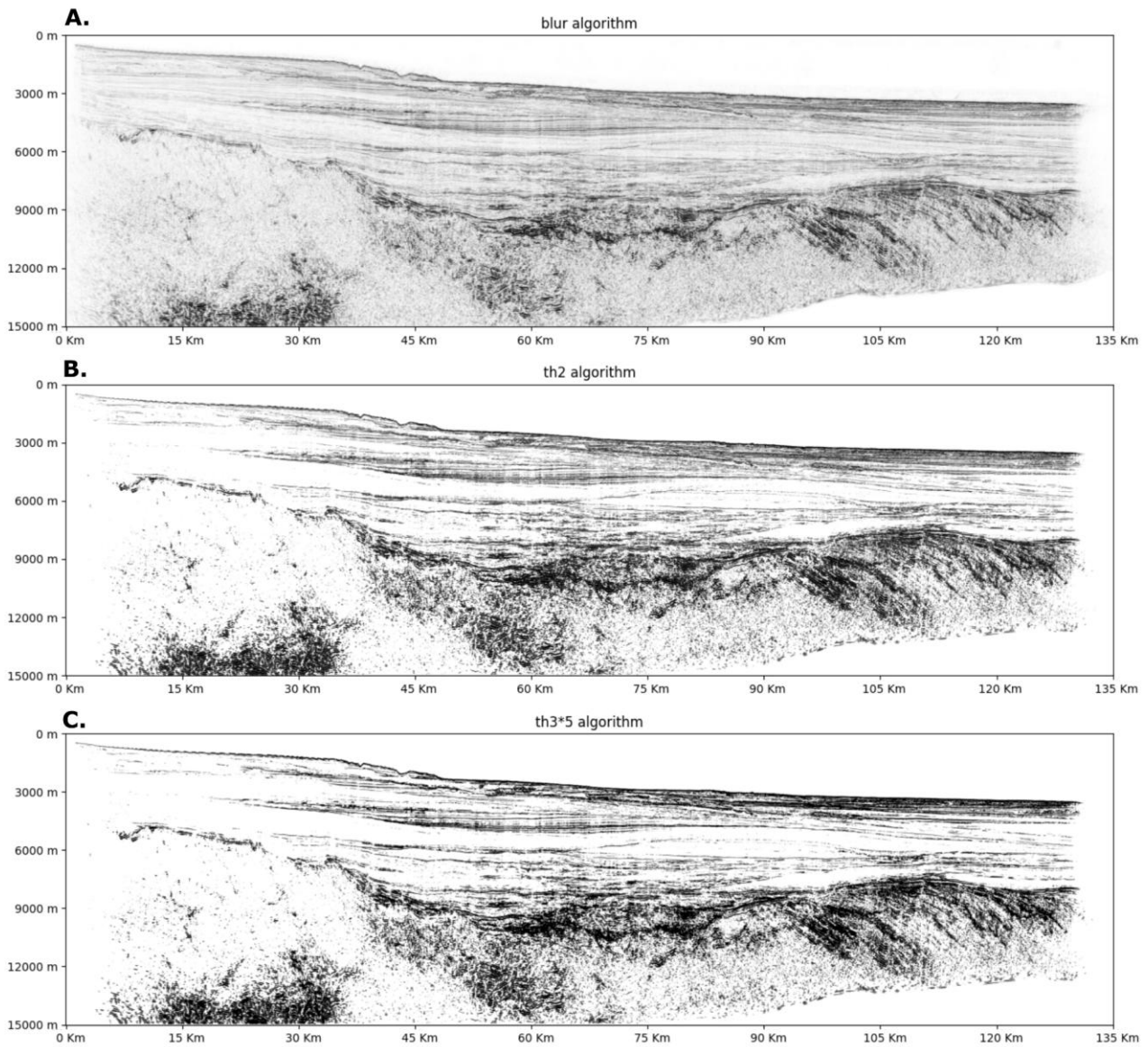


Figura 6.12: Aplicación de los filtros **A.** “Blur”, **B.** “Thresholding” y **C.** “Thresholding x 3”

Se puede observar como el filtro “Blur” no agrega información adicional ni resalta los rasgos característicos, en cuanto al filtro “Thresholding” en sus dos variantes Figura 6.12 B y C, se puede ver una mayor intensificación en los reflectores vinculados a los SDRs, aunque también resultan intensificados otras zonas con similares valores de contraste de impedancia.

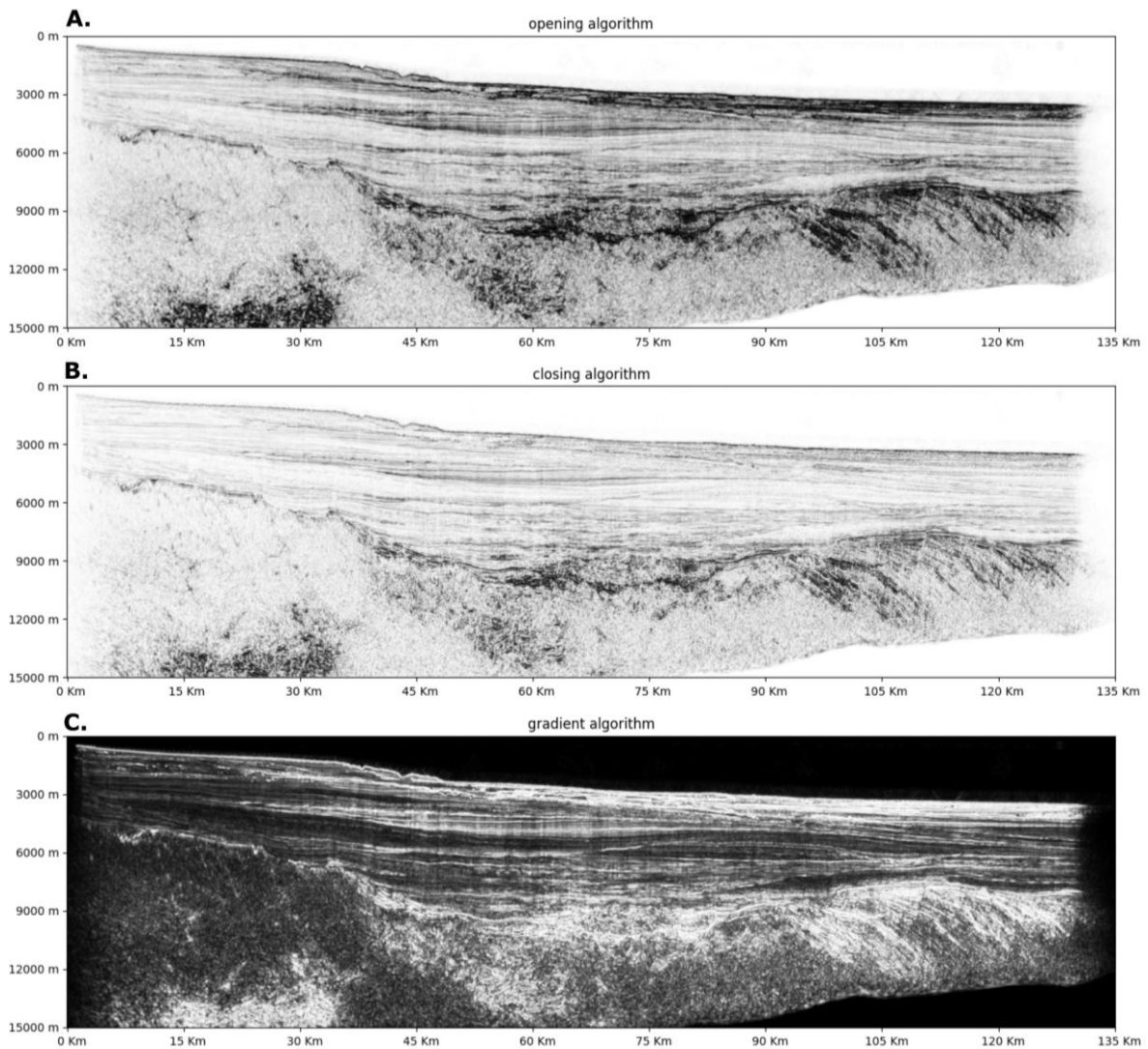


Figura 6.13: Aplicación de los filtros A. “Opening”, B. “Closing” y C. “Gradient”

En este caso se puede observar como el filtro “Opening” delimita más claramente los paquetes de reflectores con alto valor de contraste de impedancia, aunque aún el resto de los reflectores generan un ruido importante en la imagen. Por otro lado el filtro “Closing” tampoco agrega información adicional ni resalta los rasgos característicos, en cuanto al filtro “Gradient”, se puede observar que su aplicación presenta una importante intensificación en los reflectores vinculados a los SDRs, resaltando mayormente su buzamiento.

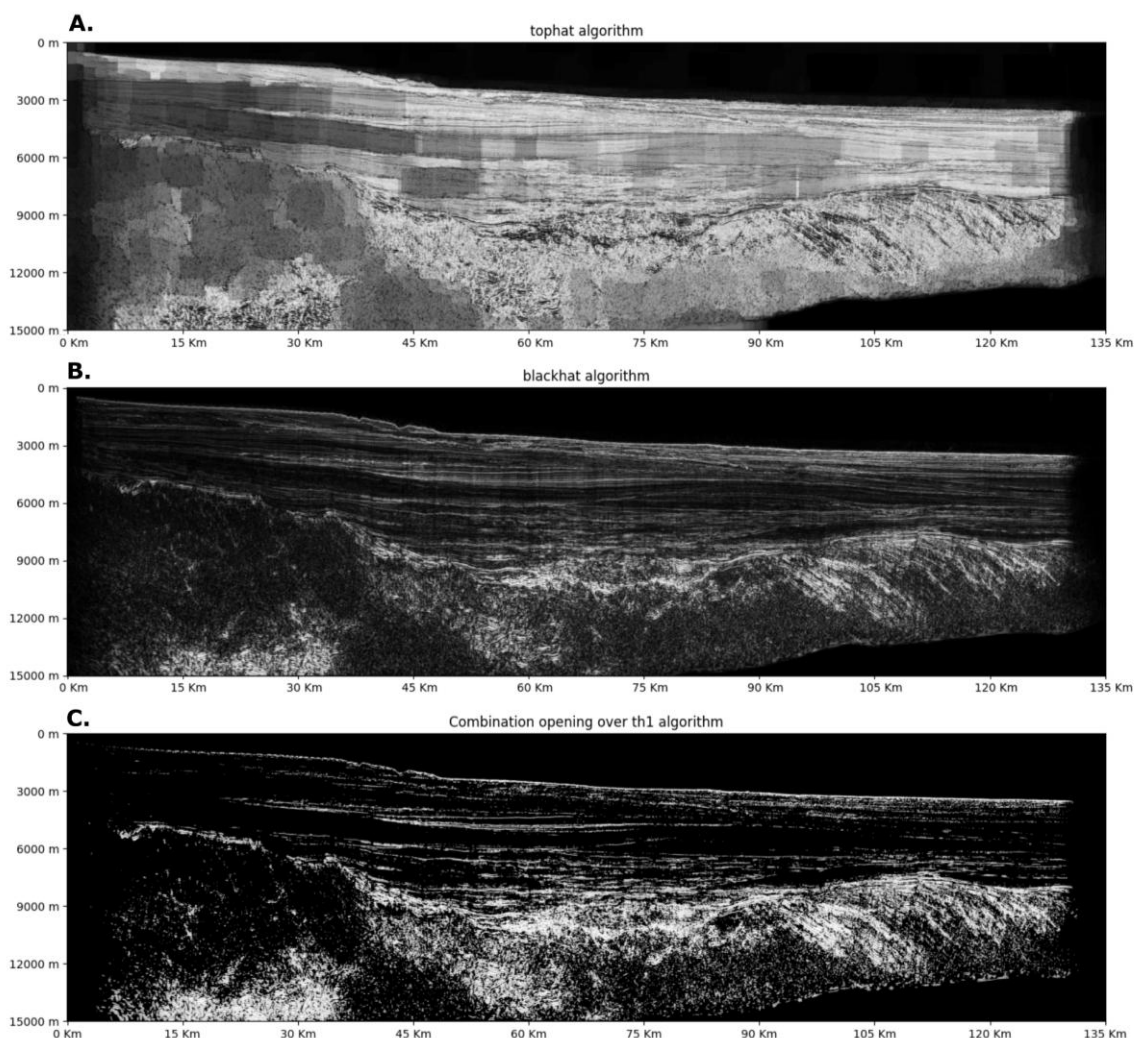


Figura 6.14: Aplicación de los filtros **A.** “*Tophat*”, **B.** “*Blackhat*” y **C.** una combinación de “*Opening*” sobre “*Thresholding*”.

El último set de filtros aplicados muestra para el filtro “*Tophat*” un realce de todos los patrones de alto contraste de impedancia, acompañado por un difuminado del resto de los valores que se presentan más acotados en torno a la media, lo cual permite identificar con mayor claridad la base de los SDRs. El filtro “*Blackhat*” si bien exhibe mejor los contornos de los estratos buzantes de los SDRs, pierde algo de intensidad en comparación con el filtro “*Gradient*”. Por último, la combinación del filtro “*Opening*” sobre “*Thresholding*” destaca con mayor intensidad todos los reflectores por debajo del tope del Rift, resaltando el carácter común de las estructuras geológicas presentes por debajo de ese nivel.

## 6.4 Mapeo de los SDRs mediante redes neuronales convolucionales (RNC)

La implementación de distintos modelos de RNC, generó diferentes predicciones, siendo el modelo **F** el que mejor predijo los SDRs de la imagen (Figura 6.15)

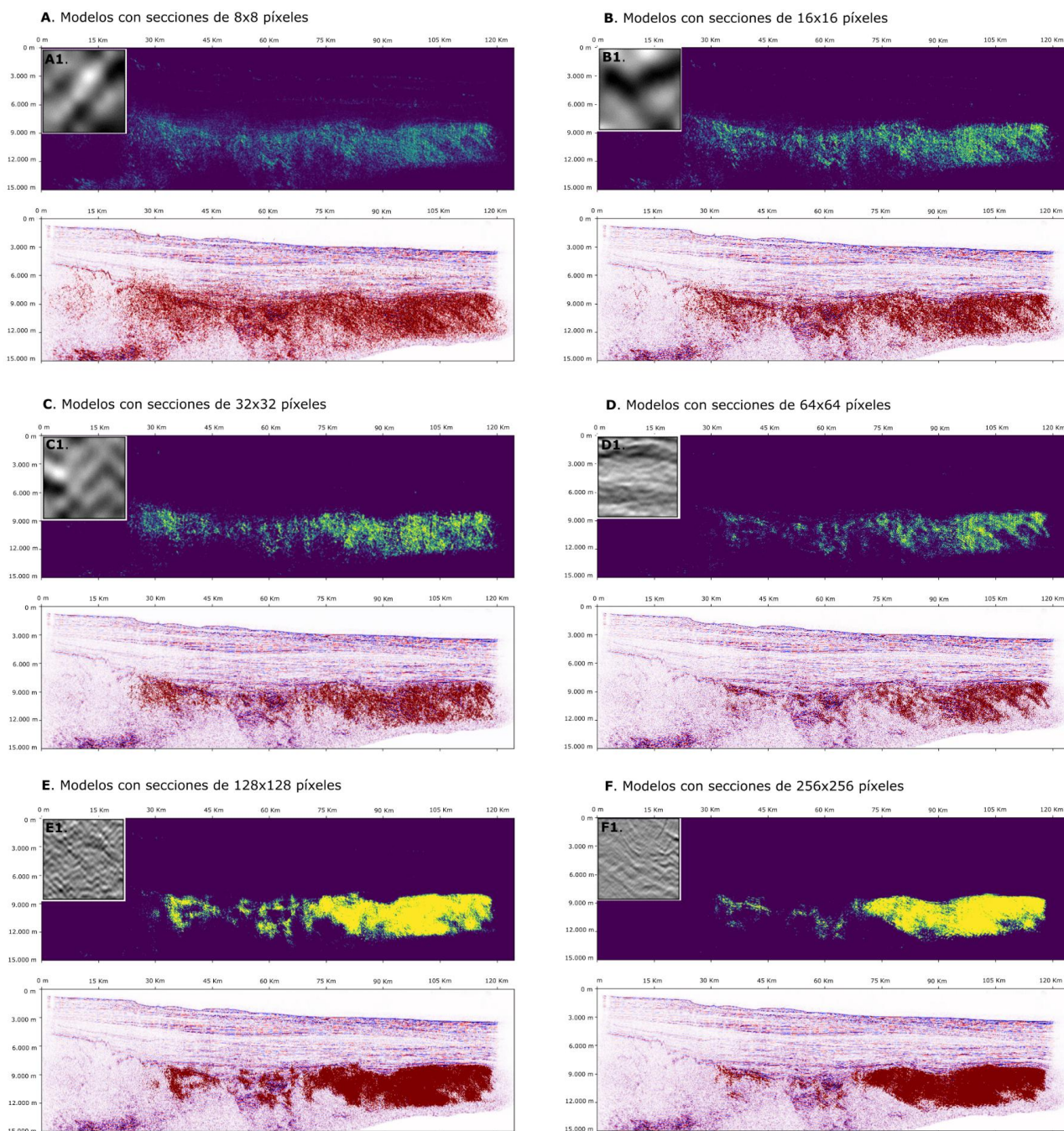


Figura 6.15: Resultados de la aplicación de los distintos modelos sobre la sección sísmica *dip* 6000 del bloque 3D BG12, fragmentos A1 a F1 muestran la resolución de las imágenes utilizadas por los modelos.

Como puede observarse en la Figura 6.16, la predicción de la RNC determinó zonas donde no se aprecian los característicos SDRs, aunque cabe considerar que el sector donde se ubica la sección sísmica forma parte del sector central del MCU el cual se encuentra intensamente fallado.

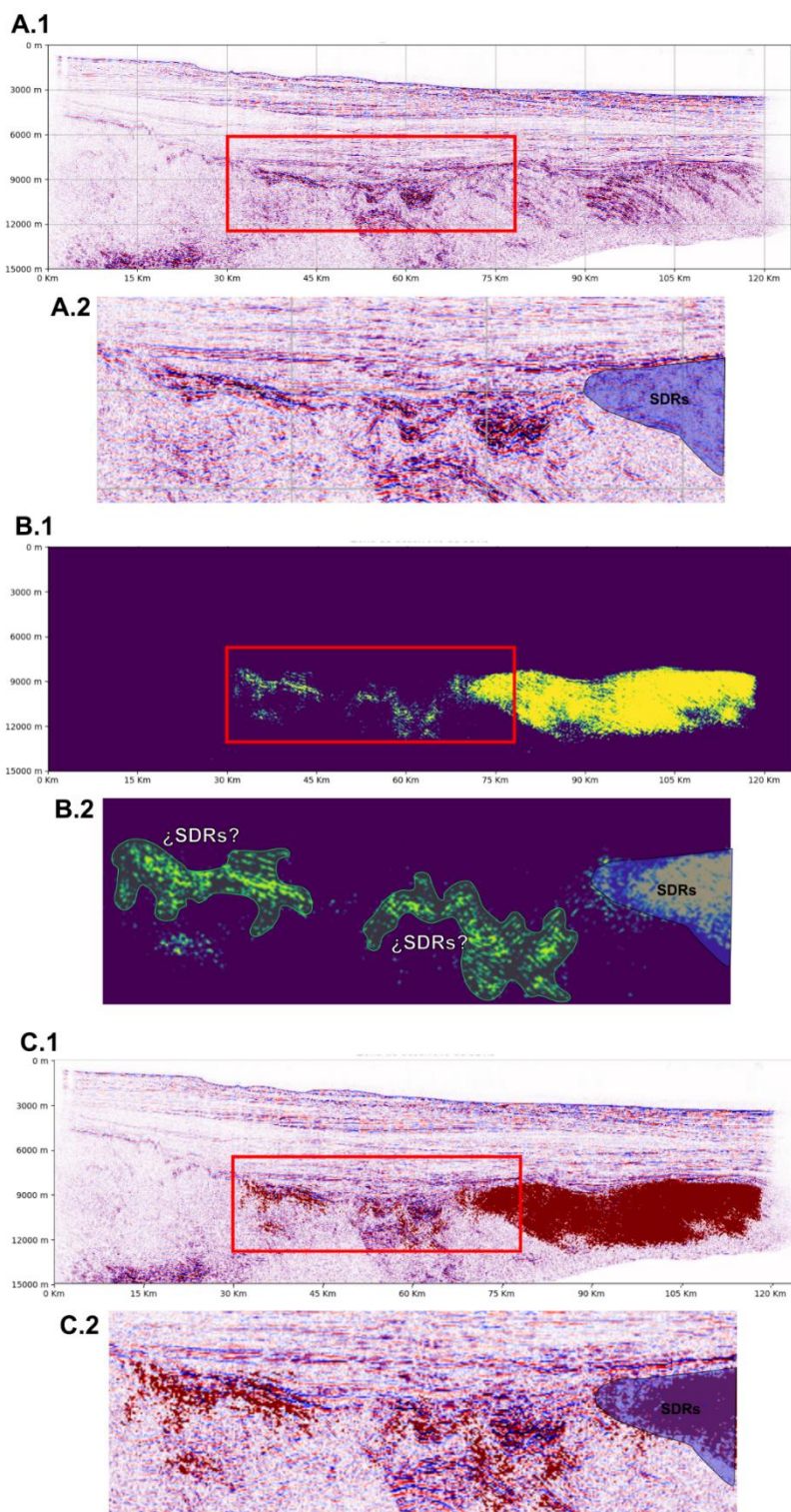


Figura 6.16: Detalles donde el algoritmo de la RNC predice erróneamente zonas donde habría relictos de SDRs para la sección sísmica *dip* 6000 del bloque 3D BG12.

En base a la precisión obtenida por el modelo de la RNC con secciones de 256x256 píxeles, se procesaron diferentes secciones sísmicas (Figura 6.17 y Figura 6.18). Obsérvese en la Figura 6.17 cómo el algoritmo separa convenientemente las zonas de desplazamiento de las fallas, así como la sección distal, que, dada su ambigüedad puede asumirse como una zona con SDRs de tipo externo II (Chauvet *et al.* 2021) o sin la presencia de los mismos

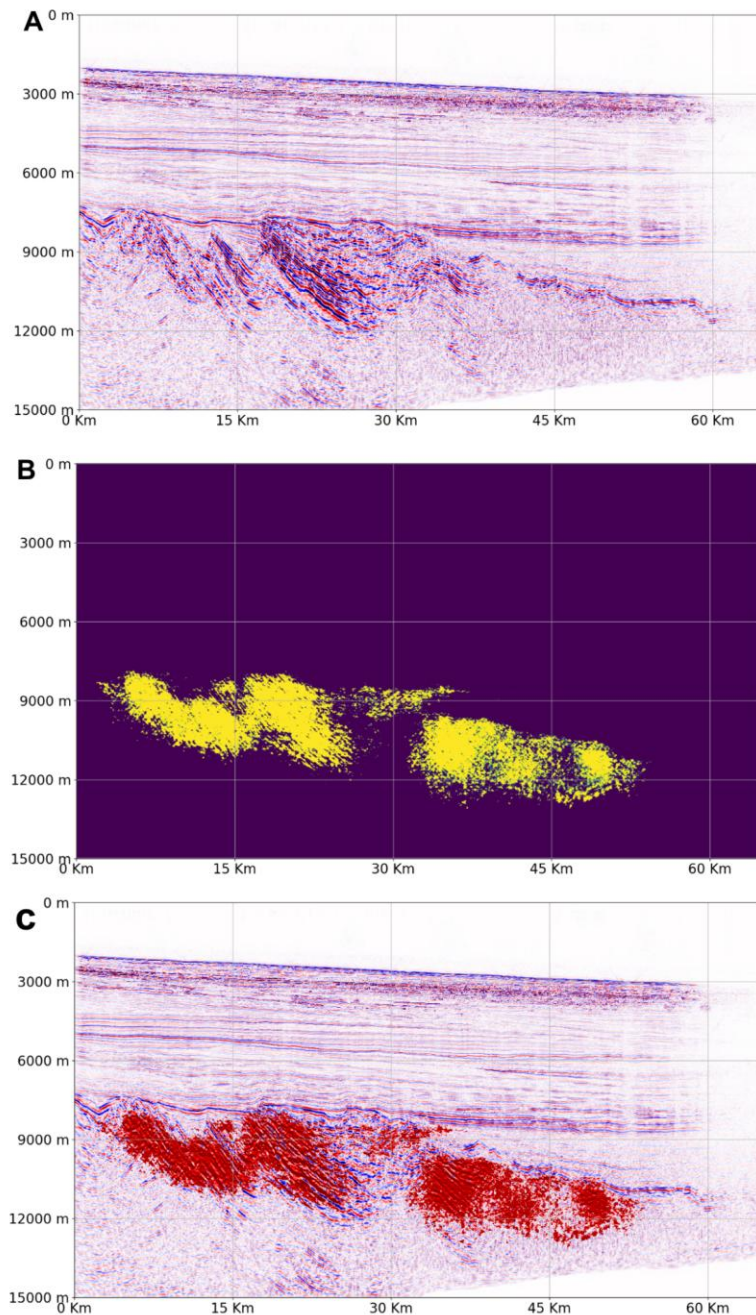


Figura 6.17: Resultados de la aplicación del modelo son secciones de 256x256 píxeles sobre la sección sísmica *dip* 13300 del bloque 3D BG12.

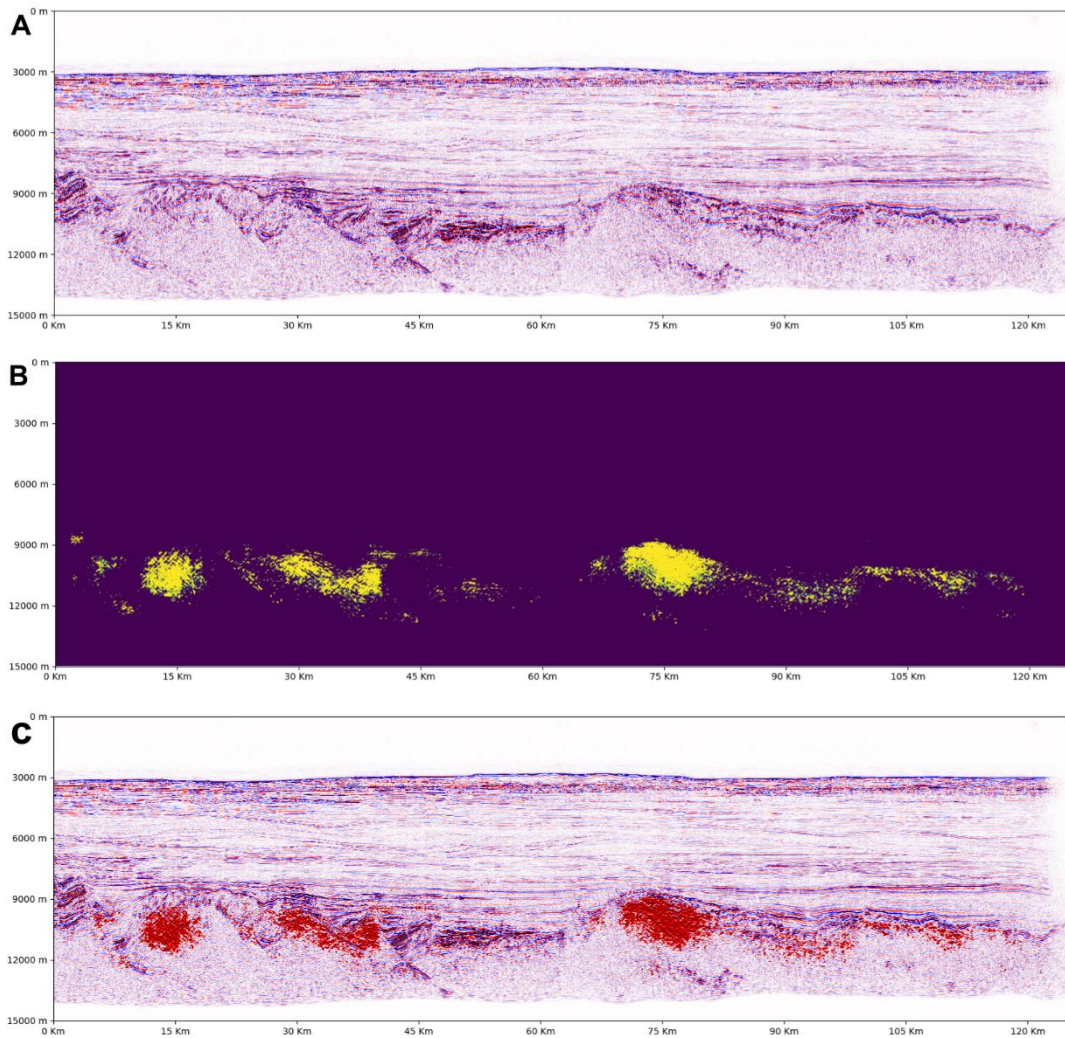


Figura 6.18: Resultados de la aplicación del modelo son secciones de 256x256 píxeles sobre la sección sísmica *strike* 8600 del bloque 3D BG12 donde tradicionalmente no se consideraba la presencia de SDRs.

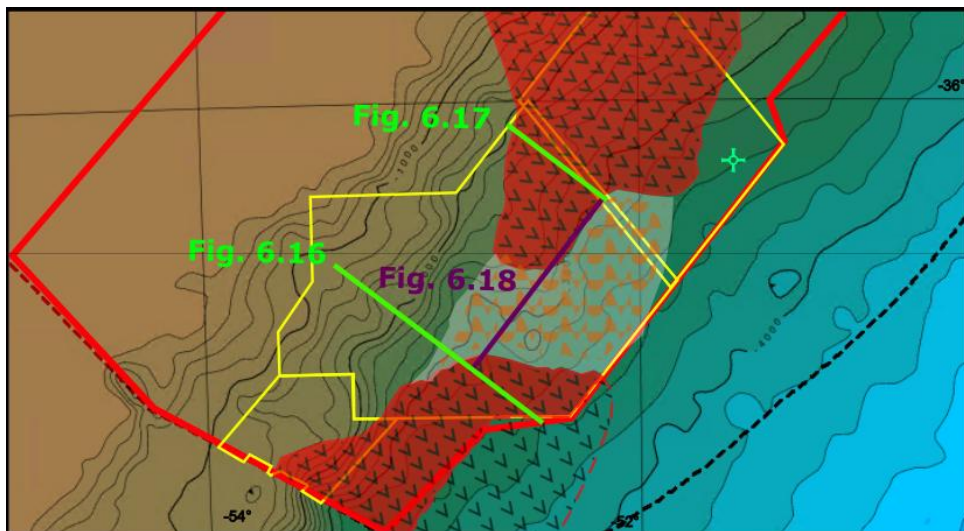


Figura 6.19: Mapa de ubicación de las líneas precedentes.

## 6.5 Tipos de SDRs

Siguiendo los criterios expuestos por McDermott *et al.* (2018) y Chauvet *et al.* (2021) se mapearon los diferentes tipos de SDRs tanto en secciones 2D como 3D. Como ya se mencionó, dada la limitación distal de los datos tanto 2D como 3D, sólo fue posible caracterizar parcialmente la extensión de los tipos de SDRs Punta del Este.

### 6.5.1 Tipos de SDRs según modelo de McDermott et al. (2018)

Como puede observarse en las figuras Figura 6.20 a Figura 6.23 el desarrollo de los SDRs correspondientes al tipo I es mucho más extenso en los SDRs Pelotas donde llega a tener una extensión de 80 Km, con una reducción paulatina hacia el centro del MCU donde se presenta la interrupción de los caracteres distintivos de los SDRs. Los reflectores que caracterizan a los SDRs tipo I en su base se encuentran delimitados por fallas que dan lugar a las cuñas de SDRs. Asimismo, presentan reflectores internos con altos contrastes de impedancia acústica que gradan de proximalmente planares a distalmente arqueados con terminaciones hacia el tope bien definidas en *toplap* y localmente en truncamientos vinculados a erosión (SDRs Punta del Este Figura 6.22). En muchos casos los reflectores internos presentan continuidades que superan los 20 Km de extensión, reduciendo su extensión distalmente.

El espesor característico de este tipo se encuentra en torno a los 5 Km en los SDRs Punta del Este, siendo en los SDRs Pelotas mayor a 5 Km, no pudiendo determinarse su espesor continuo por falta de datos.

Los correspondientes al tipo Ila presentan espesores entre 4 y 1 Km reduciéndose distalmente y manifiestan reflexiones internas más cortas de entre 4 y 1 Km. Estas reflexiones son arqueadas, convexas hacia arriba con terminaciones en *toplap* y truncamiento hacia el tope, perdiendo inclinación hacia la base y fusionándose con la corteza opaca.

Como puede observarse en la Figura 6.25 el desarrollo de los SDRs Pelotas tipo I se encuentra a una profundidad menor a los SDRs Punta del Este tipo I.

De igual modo, la observación de SDRs tipo Ila en los SDRs Punta del Este es muy escasa por falta de datos.

Modelo McDermott <i>et al.</i> 2018.	Extensión dentro de SDRs Pelotas	Extensión dentro de SDRs Punta del Este
Tipo I	12.830 Km <sup>2</sup>	> 4.000 Km <sup>2</sup>
Tipo Ila	6.180 Km <sup>2</sup>	-sin datos significativos-

Tabla 6:1 Extensión de los tipos de SDRs *sensus* McDermott *et al.* 2018.

### 6.5.2 Tipos de SDRs según modelo de Chauvet *et al.* (2021)

Como puede observarse en las figuras Figura 6.20 a Figura 6.23 el desarrollo de los tipos de SDRs internos según la clasificación de Chauvet *et al.* (2021) se caracterizan por estar delimitados por fallas que dan lugar a cuñas de SDRs. Los reflectores internos presentan altos contrastes de impedancia acústica con una configuración interna casi exclusivamente planar finalizando en un mismo punto o en una misma zona con terminaciones tipo *toplap*, continuidades que superan los 20 Km de extensión y espesores característicos en torno a los 5 Km.

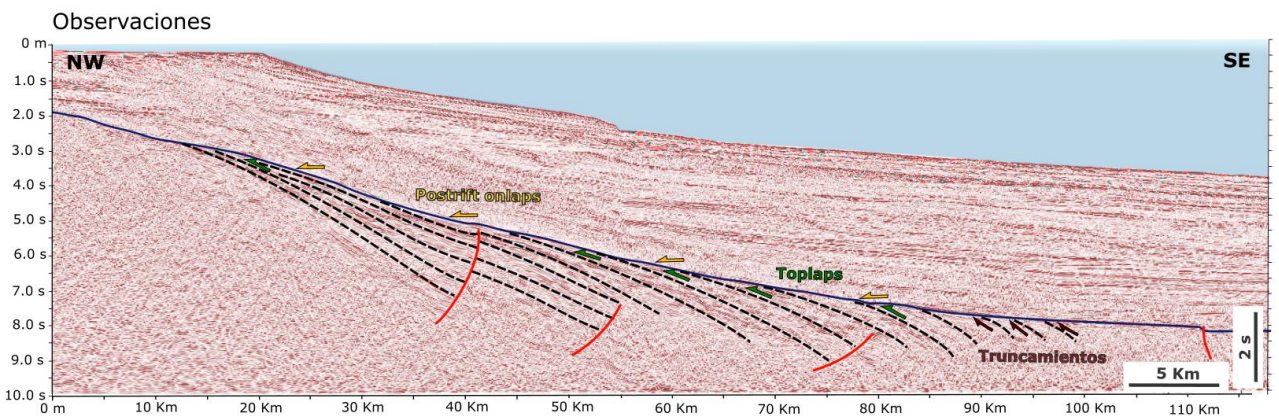
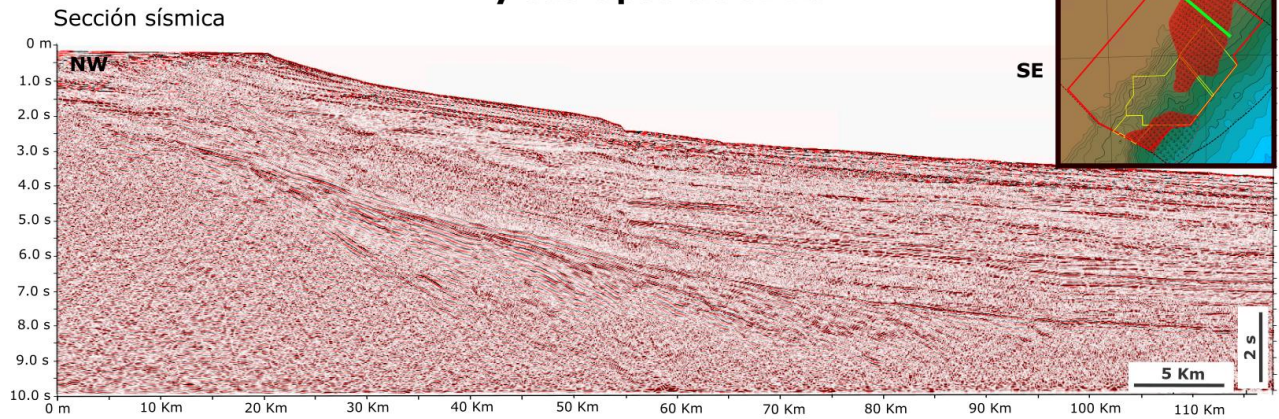
Los SDRs intermedio se caracterizan por reflectores internos arqueados con terminaciones hacia el tope bien definidas en *toplap*, siendo estos dos parámetros determinativos de este tipo de SDR. Las continuidades de sus reflectores superan los 20 Km y reducen su extensión distalmente. Al igual que los SDRs tipo internos, sus espesores característicos oscilan en torno a los 5 Km, presentándose fuertemente erosionados en los SDRs Punta del Este donde se observan terminaciones en truncamiento hacia el tope (Figura 6.22).

Los SDRs externos tipo II presentan espesores entre 4 y 1 Km reduciéndose distalmente y con reflexiones internas entre 4 y 1 Km. Estas reflexiones son arqueadas, convexas hacia arriba con terminaciones en *toplap* y truncamiento hacia el tope, perdiendo inclinación hacia la base y fusionándose con la corteza opaca.

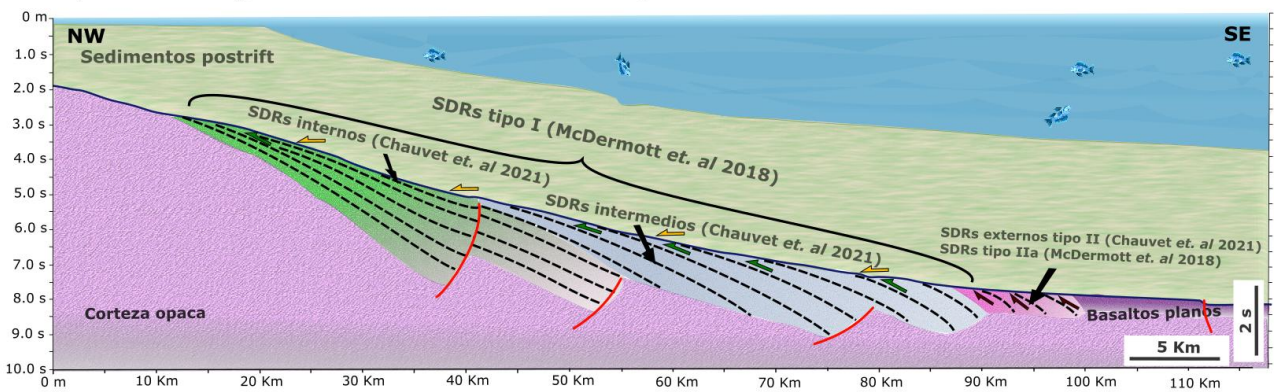
Modelo Chauvet <i>et al.</i> 2021.	Extensión dentro de SDRs Pelotas	Extensión dentro de SDRs Punta del Este
Tipo interno	6.680 Km <sup>2</sup>	> 3.330 Km <sup>2</sup>
Tipo intermedio	9.300 Km <sup>2</sup>	> 2.240 Km <sup>2</sup>
Tipo externo II	6.180 Km <sup>2</sup>	-sin datos significativos-

Tabla 6:2 Extensión de los tipos de SDRs *sensus* modelo de Chauvet *et al.* 2021

### Sección sísmica UR07-030 y sus tipos de SDRs



Tipos de SDR según modelos McDermott *et al.* 2018 y Chauvet *et al.* 2021



Modelo según McDermott *et al.* 2018, según control estructural del apilamiento

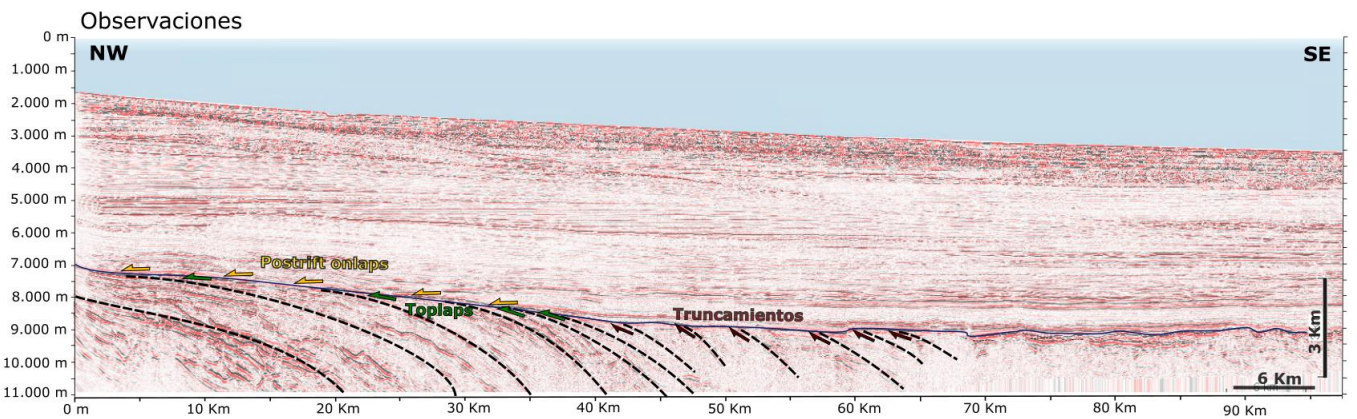
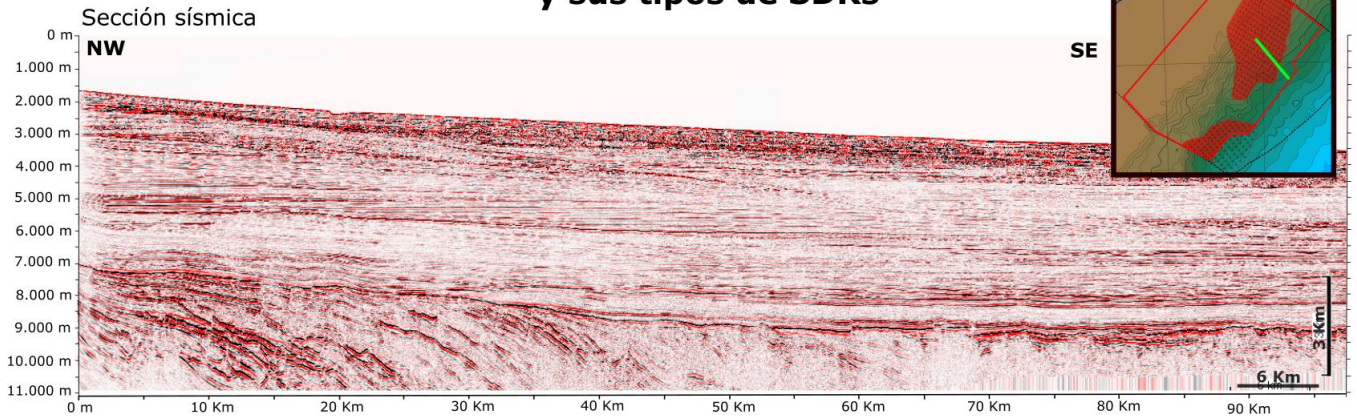
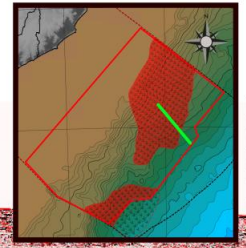


Modelo según Chauvet *et al.* 2021, según adelgazamiento de la corteza

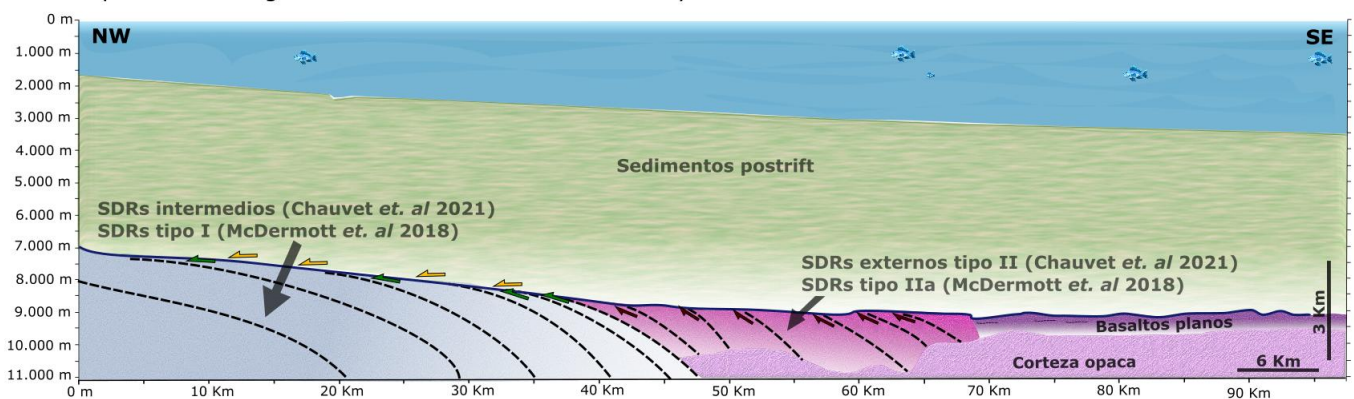


Figura 6.20: Tipos de SDRs según modelos de McDermott *et al.* (2018) y Chauvet *et al.* (2021) para la sección sísmica 2D UR07-030.

### Sección sísmica TO12 6200 y sus tipos de SDRs



Tipos de SDR según modelos McDermott *et al.* 2018 y Chauvet *et al.* 2021



Modelo según McDermott *et al.* 2018, según control estructural del apilamiento

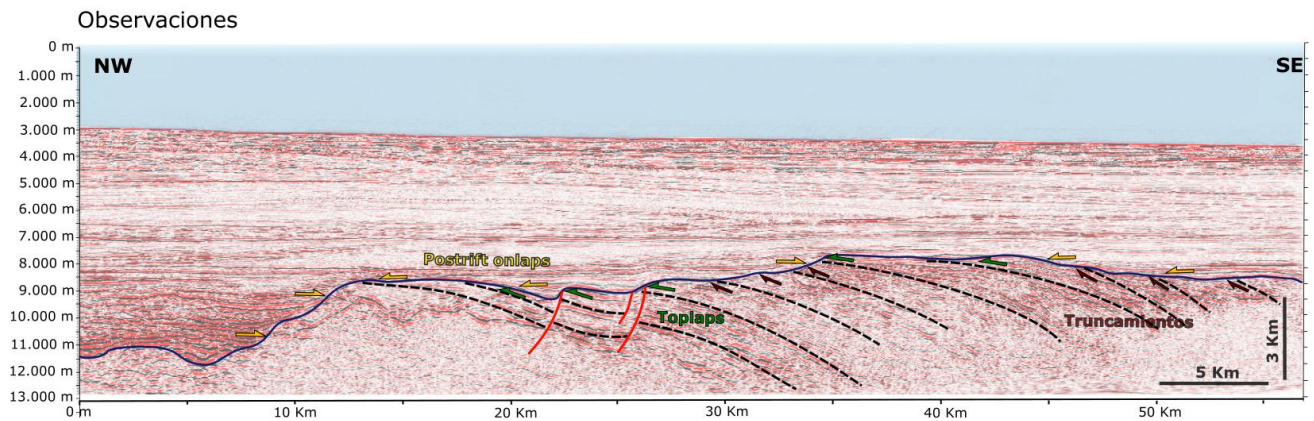
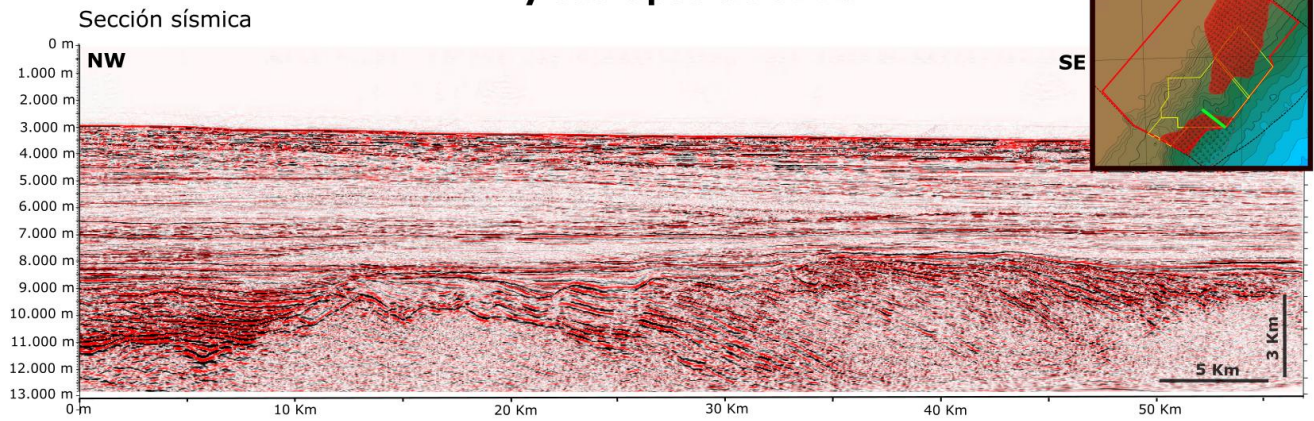


Modelo según Chauvet *et al.* 2021, según adelgazamiento de la corteza

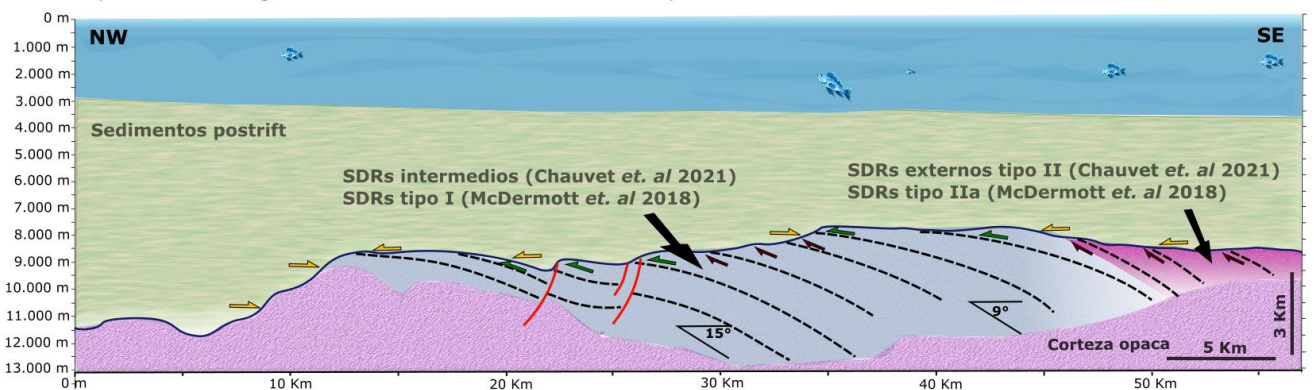


Figura 6.21: Tipos de SDRs según modelos de McDermott *et al.* (2018) y Chauvet *et al.* (2021) para la sección sísmica 3D TO12 6200.

### Sección sísmica BG12 6600 y sus tipos de SDRs



Tipos de SDR según modelos McDermott *et al.* 2018 y Chauvet *et al.* 2021



Modelo según McDermott *et al.* 2018, según control estructural del apilamiento

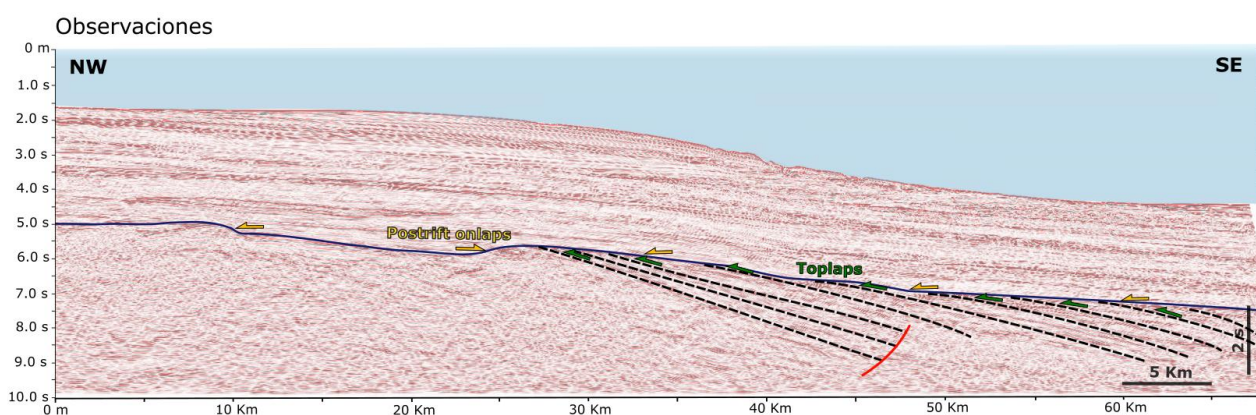
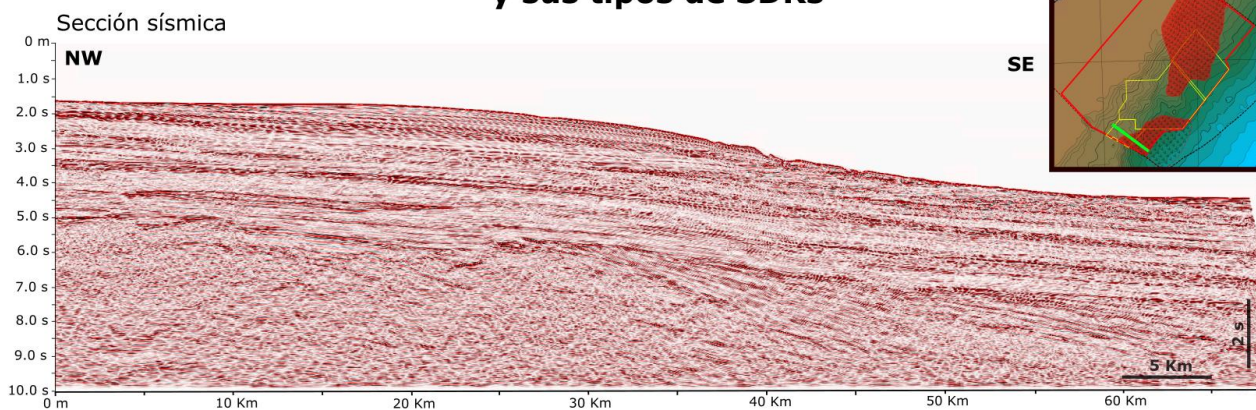


Modelo según Chauvet *et al.* 2021, según adelgazamiento de la corteza

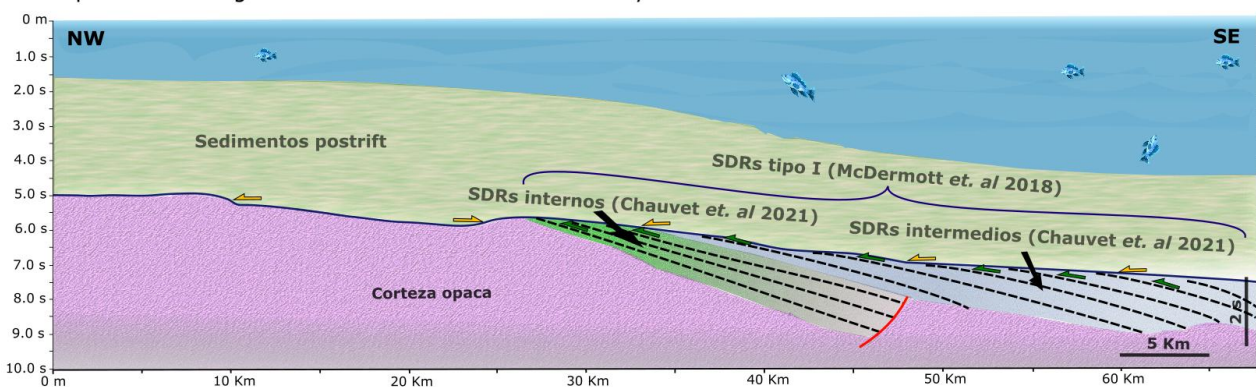


Figura 6.22: Tipos de SDRs según modelos de McDermott *et al.* (2018) y Chauvet *et al.* (2021) para la sección sísmica 3D BG12 6600.

### Sección sísmica UR07-004 y sus tipos de SDRs



Tipos de SDR según modelos McDermott *et al.* 2018 y Chauvet *et al.* 2021



Modelo según McDermott *et al.* 2018, según control estructural del apilamiento

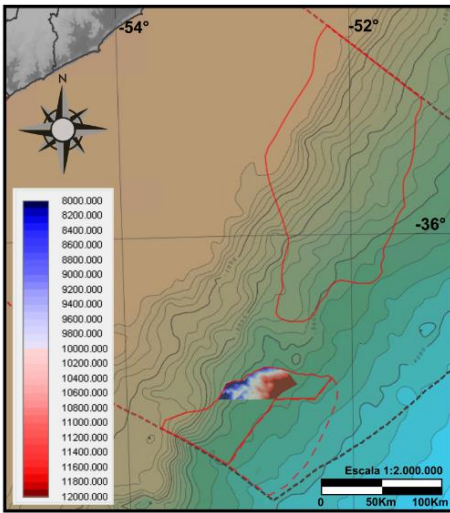
← SDRs Tipo I (>40 Km)  
Desarrollo por control tectónico con fallamiento litosférico. Fase inicial de la ruptura. Deposición subaérea.

Modelo según Chauvet *et al.* 2021, según adelgazamiento de la corteza

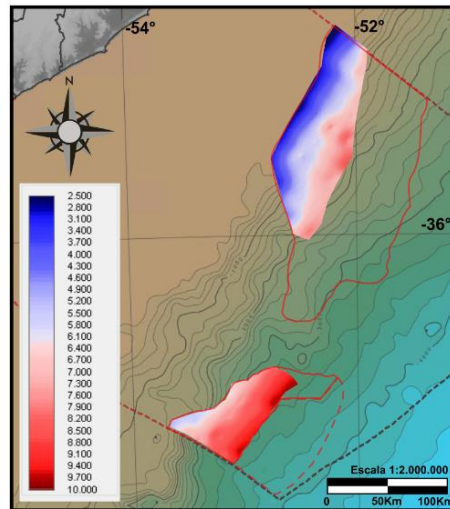
← SDRs Internos (20 Km)  
Desarrollo de cuñas prominentes.  
← SDRs Intermedios (>32 Km)  
Zona de adelgazamiento cortical, desarrollo del cuello distal.

Figura 6.23: Tipos de SDRs según modelos de McDermott *et al.* (2018) y Chauvet *et al.* (2021) para la sección sísmica 2D UR07-004.

**SDRs Tipo Interno: asociados al cuello proximal**

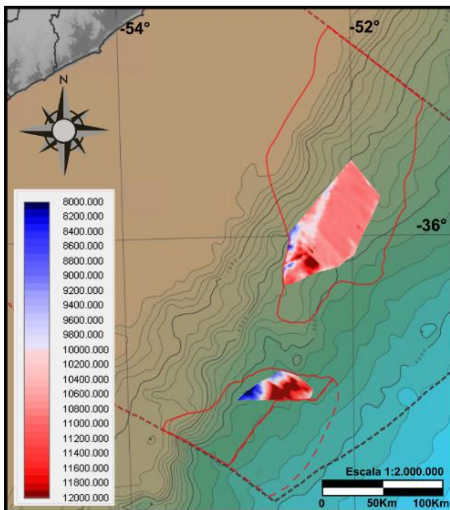


**A. Mapa de contorno estructural de la base de los SDRs Internos. Datos en profundidad.**

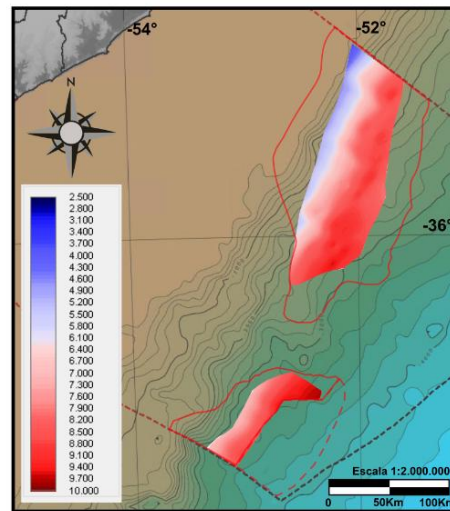


**B. Mapa de contorno estructural de la base de los SDRs Internos. Datos en tiempo.**

**SDRs Tipo Intermedio: comienza adelgazamiento de corteza, inicio del cuello distal**

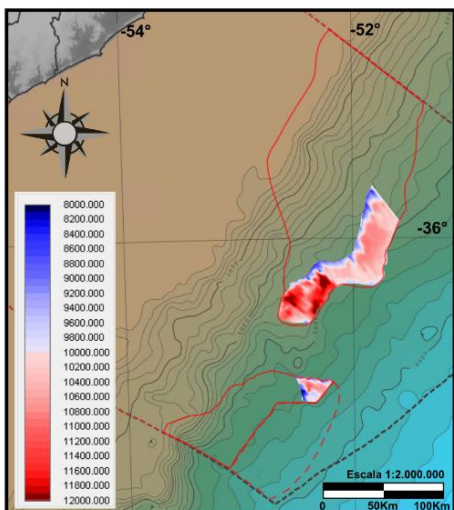


**C. Mapa de contorno estructural de la base de los SDRs intermedios. Datos en profundidad.**

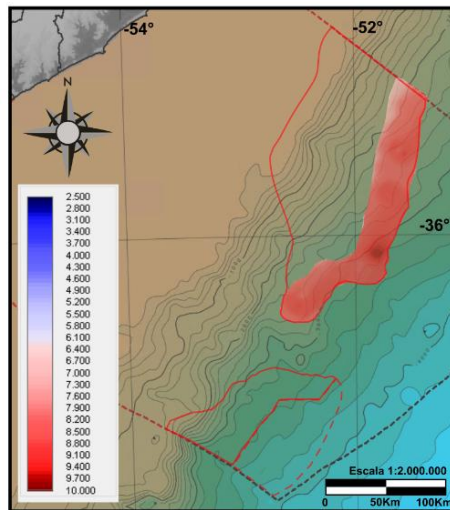


**D. Mapa de contorno estructural de la base de los SDRs intermedios. Datos en tiempo.**

**SDRs externos tipo II: máximo adelgazamiento cortical**



**E. Mapa de contorno estructural de la base de los SDRs externos tipo II. Datos en profundidad.**

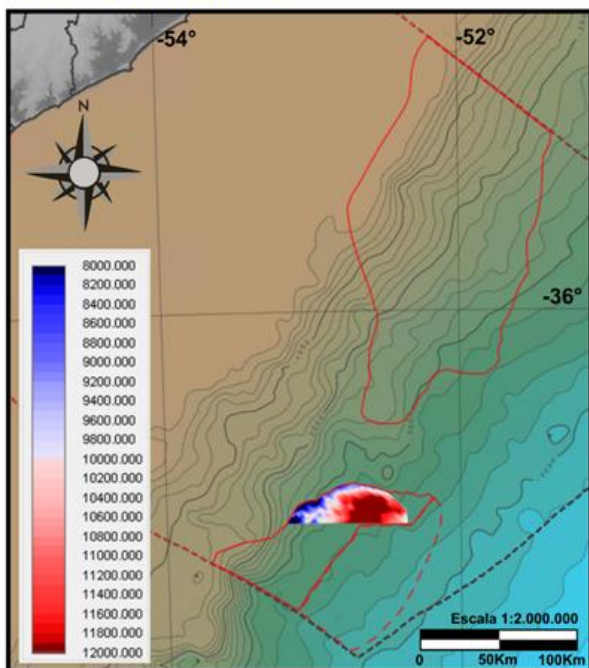


**F. Mapa de contorno estructural de la base de los SDRs externos tipo II. Datos en tiempo.**

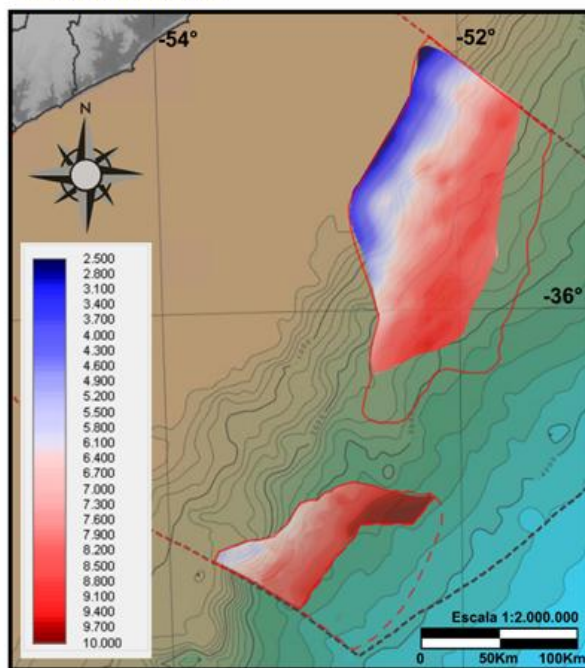
Figura 6.24: Contorno estructural de los diferentes tipos de SDRs según modelo de Chauvet et al. (2021).

**Tipo I: breakup tectónico, flexura cortical**

**A. Mapa de contorno estructural de la base de los SDRs Tipo I según según datos 3D. Datos en profundidad.**

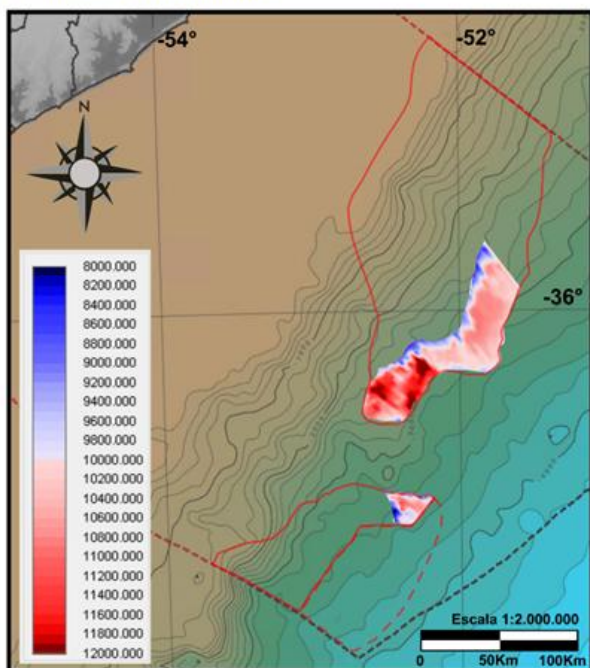


**B. Mapa de contorno estructural de la base de los SDRs Tipo I según datos 2D. Datos en tiempo.**



**Tipo IIa: breakup magmático, emplazamiento con influencia acuática**

**C. Mapa de contorno estructural de la base de los SDRs Tipo IIa según datos 3D. Datos en profundidad.**



**D. Mapa de contorno estructural de la base de los SDRs Tipo IIa según datos 2D. Datos en tiempo.**

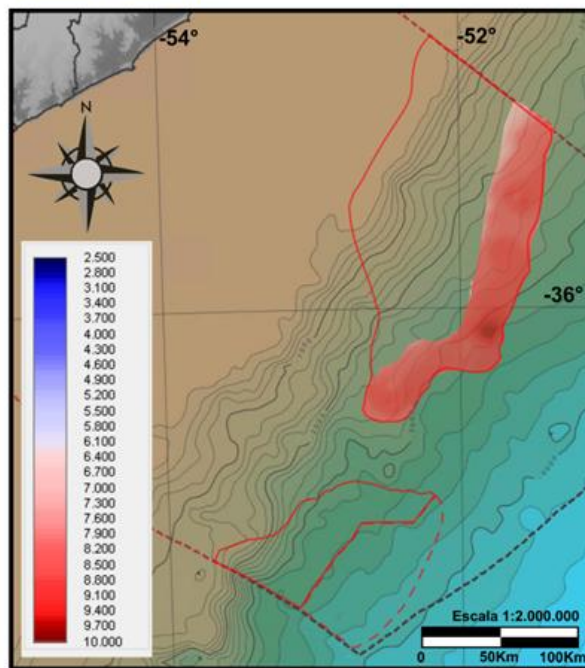
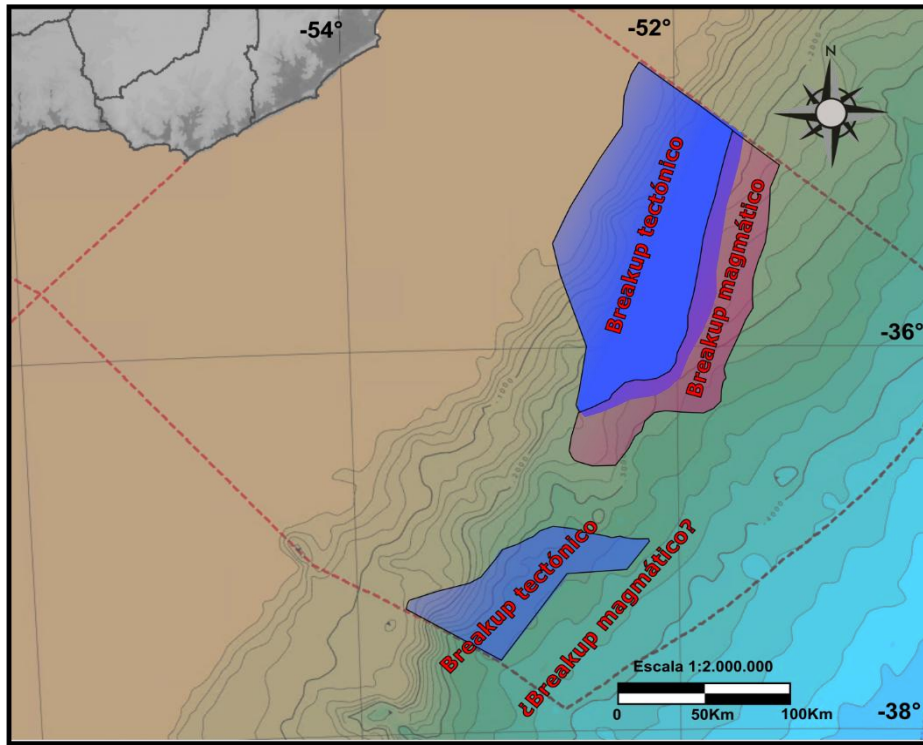


Figura 6.25: Contorno estructural del tope de los diferentes tipos de SDRs según modelo de McDeromott *et al.* (2018).

**A. Modelo de McDermott et al. 2018 según tipo de breakup**



**B. Modelo de Chauvet et al. 2021 según contexto crustal**

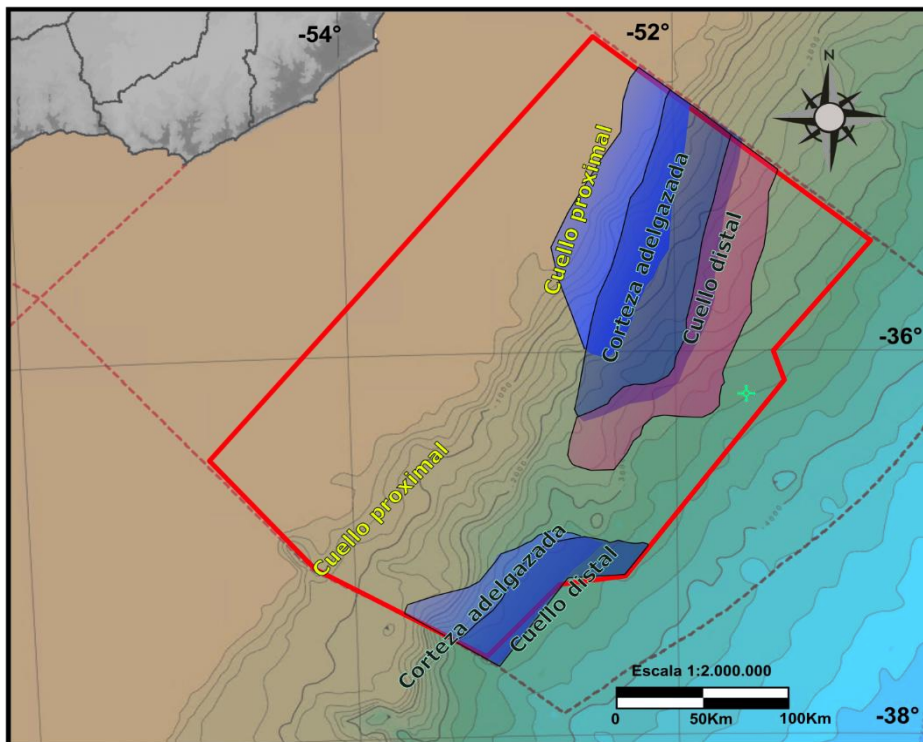


Figura 6.26: Extensión de los tipos de SDRs y su contexto de formación según modelos **A.** McDermott et al. (2018) y **B.** Chauvet et al. (2021)

## **6.6 Fallamiento de los SDRs**

En esta sección se detallan los resultados del estudio del fallamiento presente en los SDRs, tanto para los SDRs Pelotas como para los SDRs Punta del Este, así como un somero análisis de las fallas presentes en el MCU en la zona de interrupción de los SDRs.

### **6.6.1 Fallas antitéticas, “Cuñas” de SDRs**

Una de las características fundamentales de los SDRs es la presencia de fallas antitéticas que los afectan dándoles su forma de cuña. En los SDRs del MCU, tanto en los SDRs Pelotas como en los SDRs Punta del Este, se observan tres grandes fallas antitéticas que dislocan a los SDRs en sendas cuñas.

Como se observa en las figuras Figura 6.28 a Figura 6.31 las cuñas de SDRs, tanto en los SDRs Pelotas como en los SDRs Punta del Este, presentan una importante variación a medida que se acercan a la zona de interrupción de los rasgos característicos de los SDRs en el centro del MCU. Se puede apreciar una reducción en la extensión total de las cuñas de los SDRs y así como también se observa una progresiva variación distal en el emplazamiento, alejándose de la corteza continental y el cuello proximal, y emplazándose en una corteza de transición. Esto último es más evidente en las cuñas de los SDRs Pelotas, mientras que las cuñas de los SDRs Punta del Este se emplazan directamente en corteza transicional.

La cuña que presenta mayor variación en extensión y asimismo en buzamiento es la cuña n°1, la más proximal y por ende más antigua en cuanto a su emplazamiento.

Se pueden observar también grandes diferencias entre las cuñas de los SDRs Pelotas y las de los SDRs Punta del Este, abarcando las primeras una mayor extensión, siendo más potentes y presentando un mayor solapamiento con las cuñas n°2 y n°3. Por otro lado, la cuña n°3 de los SDRs Punta del Este, presenta significativamente una mayor potencia y extensión que la cuña n°3 de

los SDRs Pelotas, incluso cuando por falta de datos no puede observarse la totalidad de la extensión de la primera.

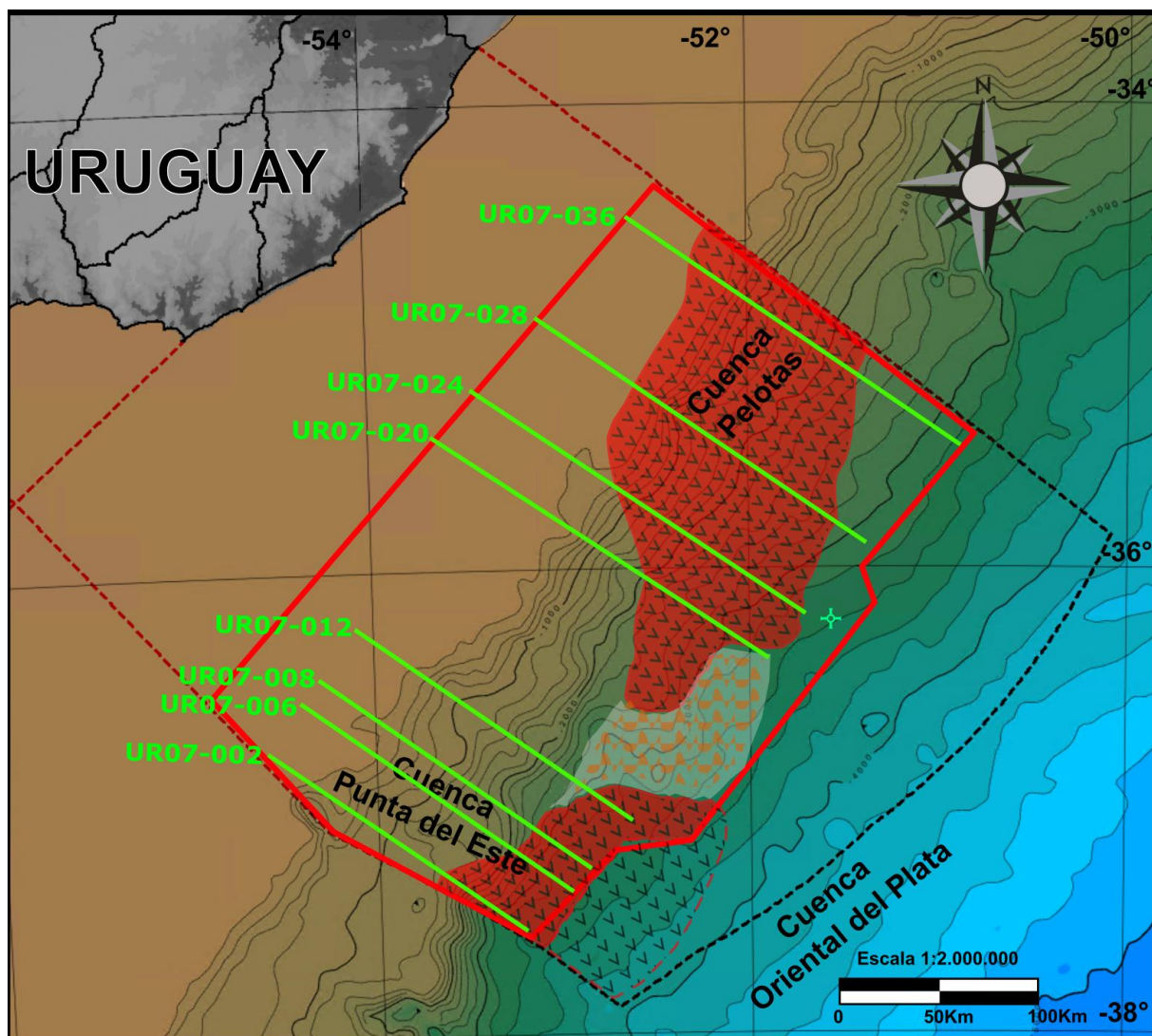
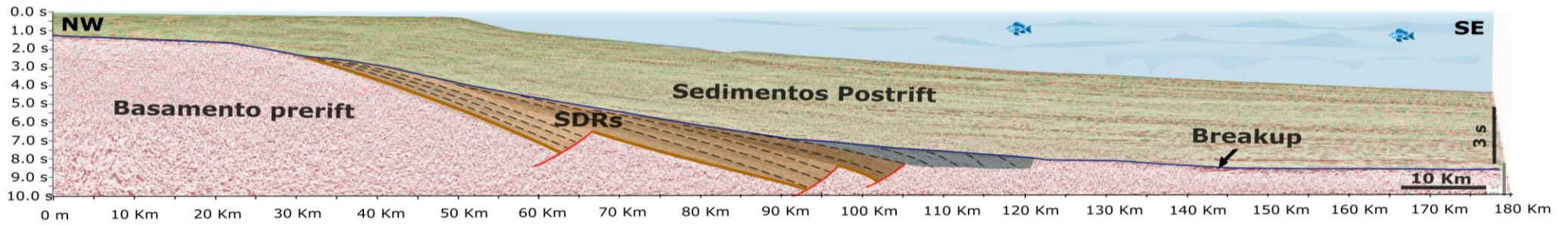
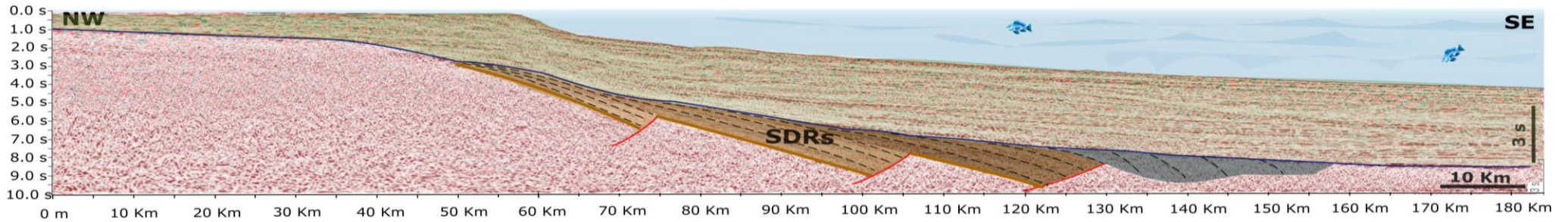


Figura 6.27: Ubicación de las líneas de las Fig. 6.28 a Fig. 6.31.

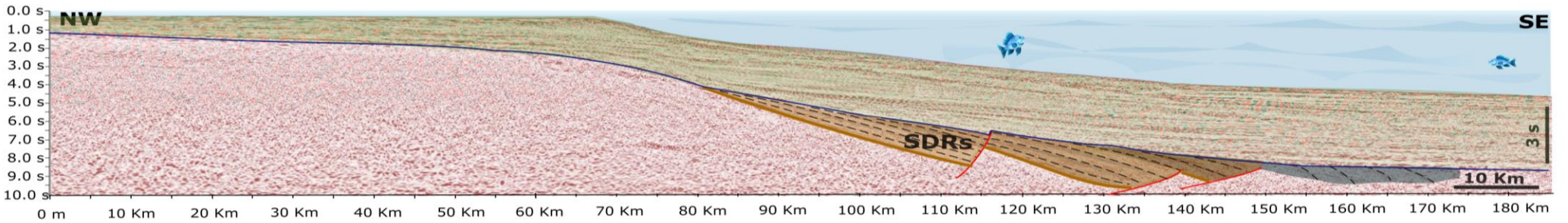
### A. Sección sísmica 2D UR07-036



### B. Sección sísmica 2D UR07-028



### C. Sección sísmica 2D UR07-024



### D. Sección sísmica 2D UR07-020

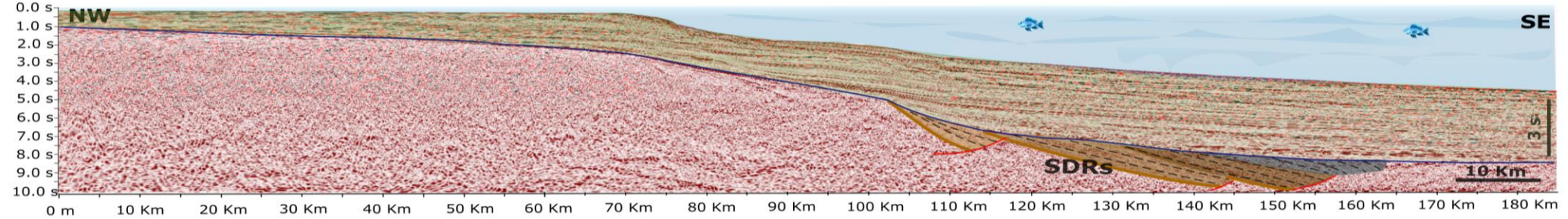
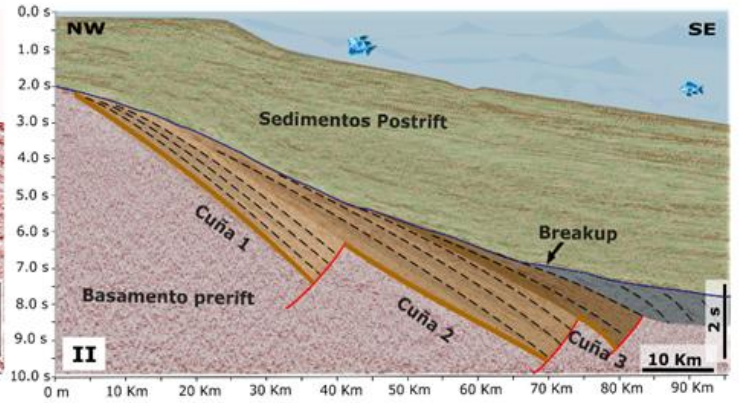
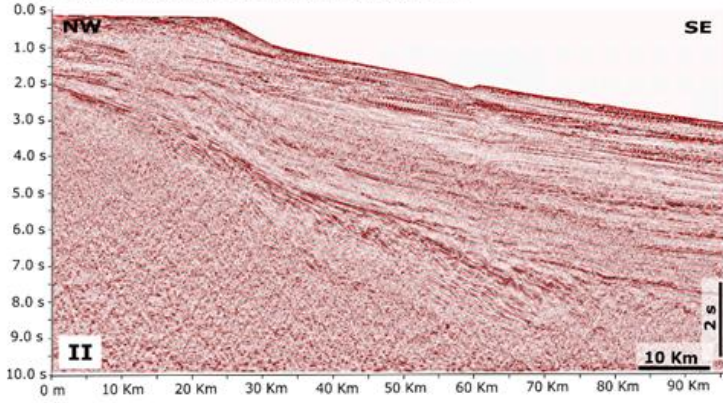
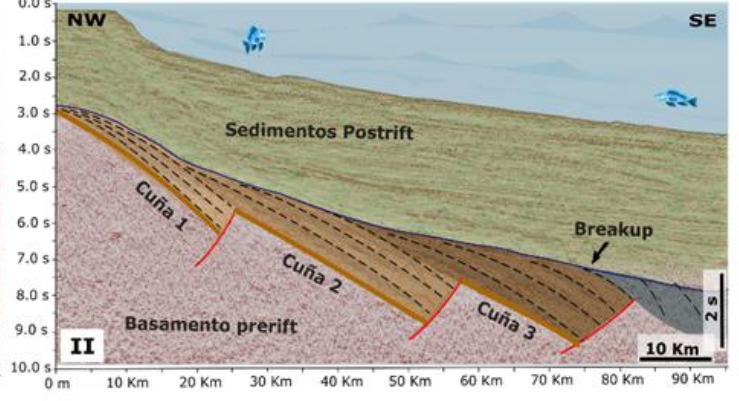
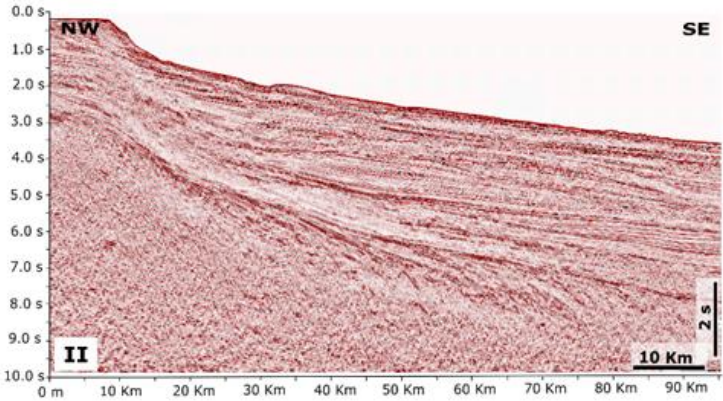


Figura 6.28: Cuñas en los SDRs Pelotas en secciones sísmicas completas.

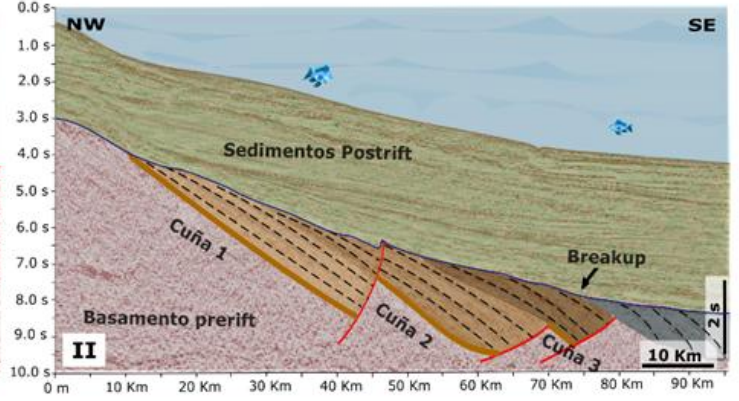
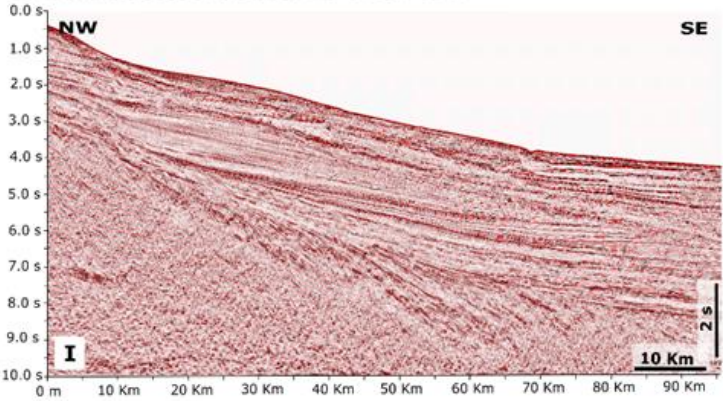
**A. Detalle sección sísmica 2D UR07-036**



**B. Detalle sección sísmica 2D UR07-028**



**C. Detalle sección sísmica 2D UR07-024**



**D. Detalle sección sísmica 2D UR07-020**

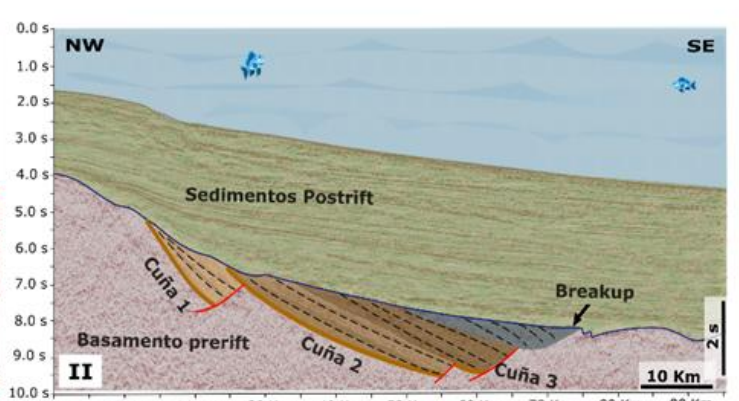
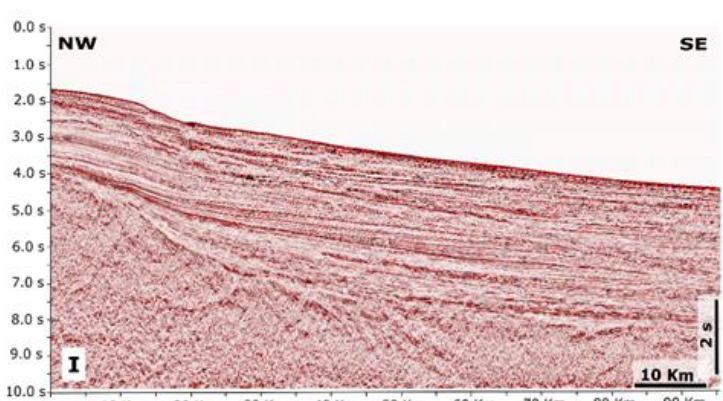
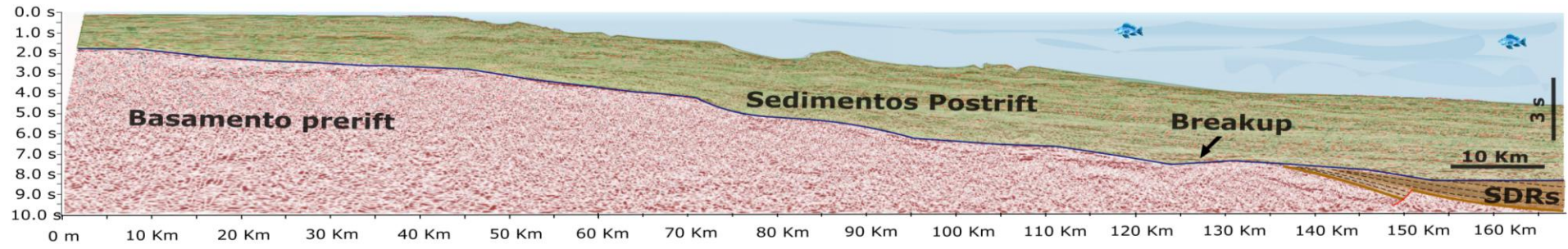
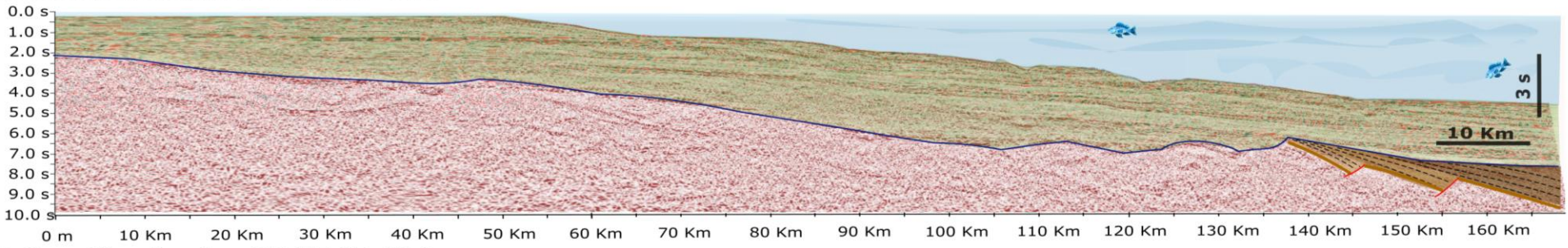


Figura 6.29: Detalle de las cuñas en los SDRs Pelotas.

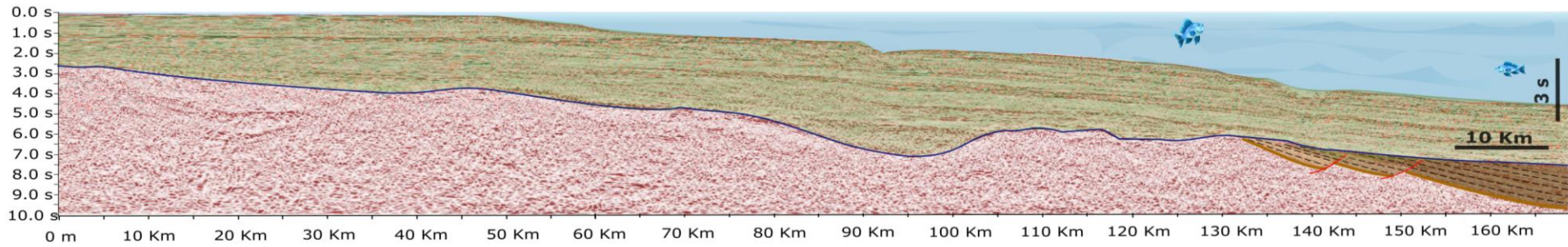
### A. Sección sísmica 2D UR07-012



### B. Sección sísmica 2D UR07-008



### C. Sección sísmica 2D UR07-006



### D. Sección sísmica 2D UR07-002

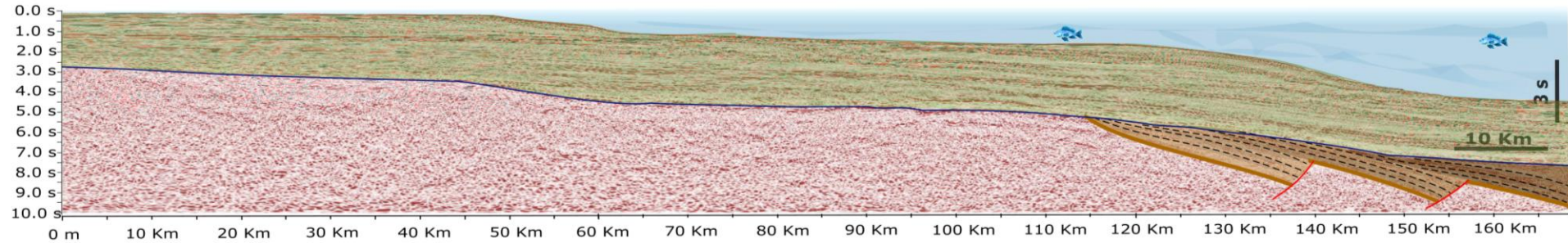
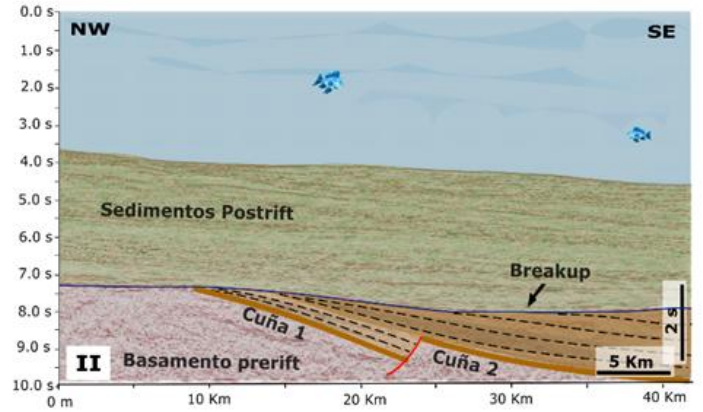
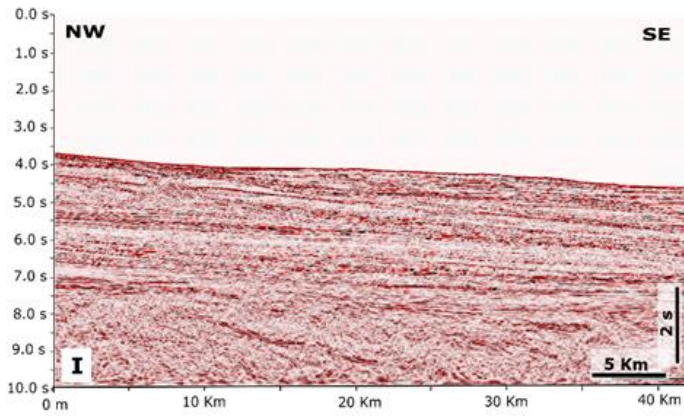
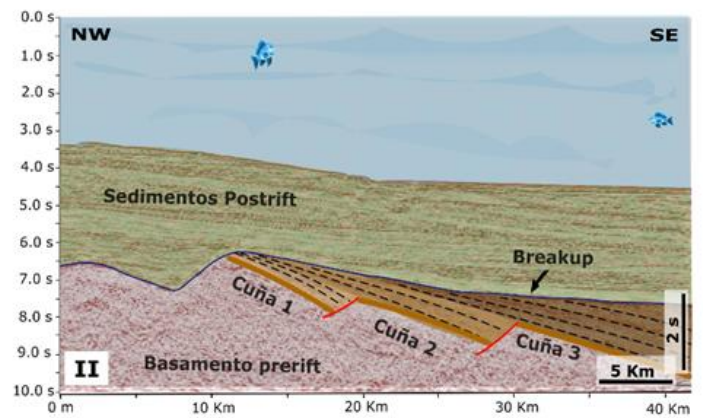
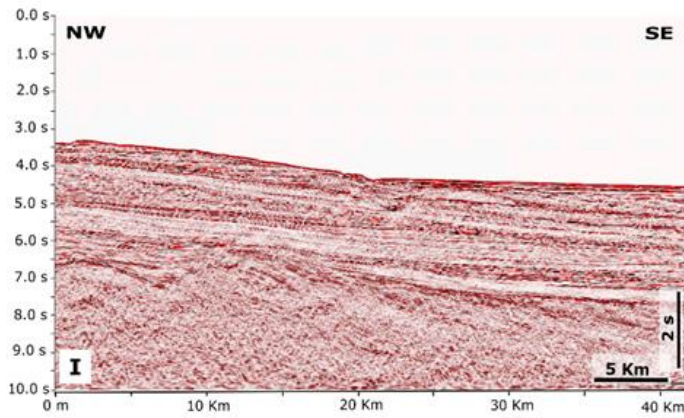


Figura 6.30: Cuñas en los SDRs Punta del Este en secciones sísmicas completas.

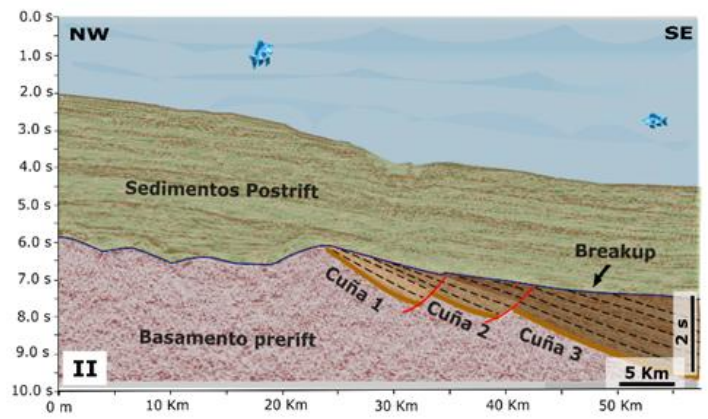
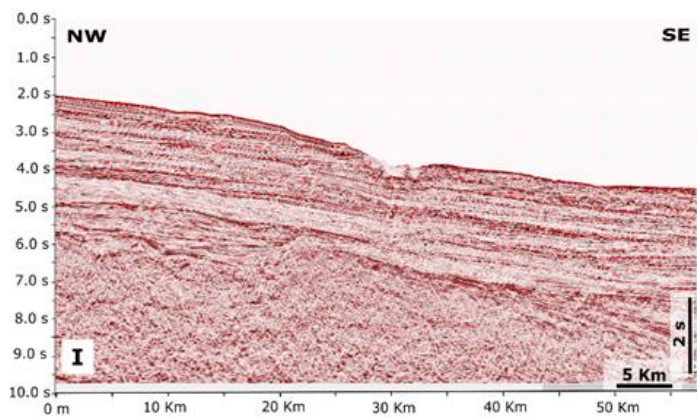
**A. Detalle sección sísmica 2D UR07-012**



**B. Detalle sección sísmica 2D UR07-008**



**C. Detalle sección sísmica 2D UR07-006**



**D. Detalle sección sísmica 2D UR07-002**

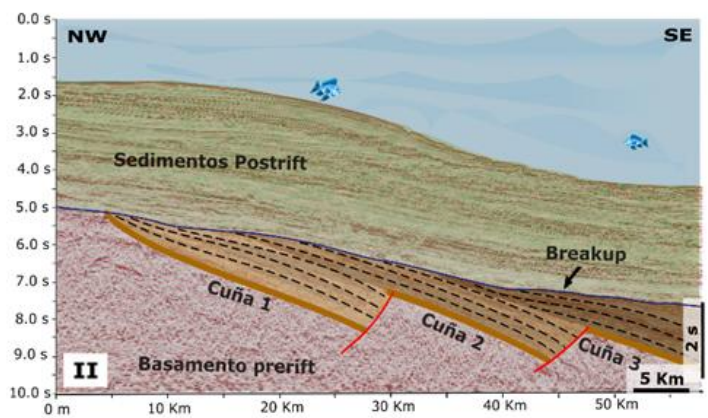
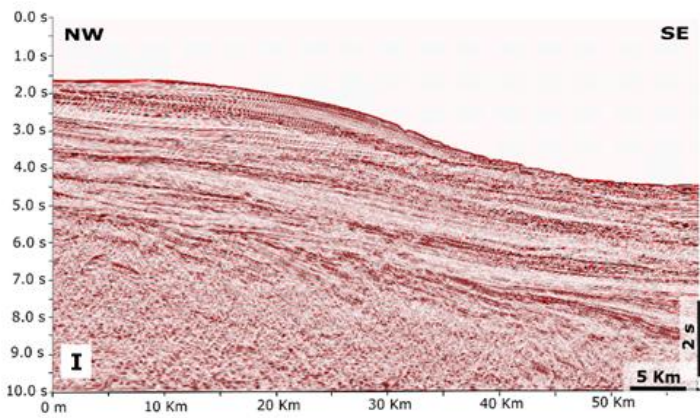


Figura 6.31: Detalle de las cuñas en los SDRs Punta del Este.

## 6.6.2 Otros fallamientos de los SDRs

Se realizó el mapeo de las fallas con mayor penetración (superior a 1 Km) presentes en los SDRs Punta del Este y Pelotas, cuyos resultados se ilustran en la Figura 6.32. Como muestran los histogramas de frecuencia (Figura 6.32.a y Figura 6.32.b), la distribución general es cuatrimodal: el dominio de los SDRs Pelotas exhibe tres modas bien definidas, mientras que el de los SDRs Punta del Este presenta una única moda principal. Debido a la vasta extensión de los SDRs Pelotas, se observa que cada moda se vincula geográficamente con un sector específico del área como puede verse en la Figura 6.33. Datos estadísticos en Datos estadísticos de las fallas mapeadas.

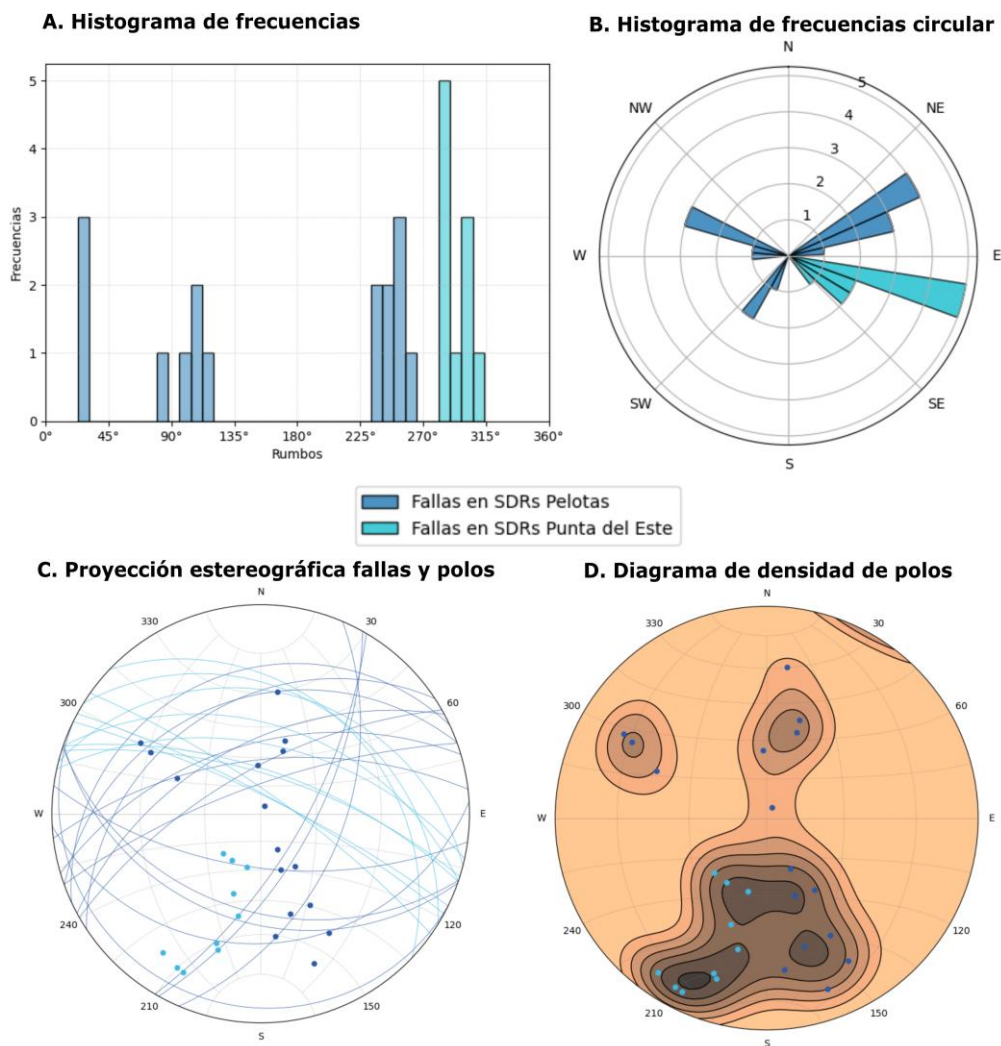


Figura 6.32: Histogramas de frecuencias y, proyección estereográfica de fallas y diagrama de densidad de polos para las fallas de los SDRs Punta del Este y Pelotas. Datos obtenidos con el software IHS Kingdom.

Como se observa en las figuras Figura 6.32.c y Figura 6.32.d, cada familia de fallas posee orientaciones de rumbo y buzamiento características. Con base en estos datos, se elaboraron diagramas de rosas de los vientos que integran ambas variables para cada grupo, permitiendo una visualización más clara de las direcciones preferentes. En la Figura 6.33 se integran estos diagramas junto con la distribución geográfica de las familias de fallas, utilizando una discriminación por colores para identificar cada SDR grupo y facilitar su correlación espacial.

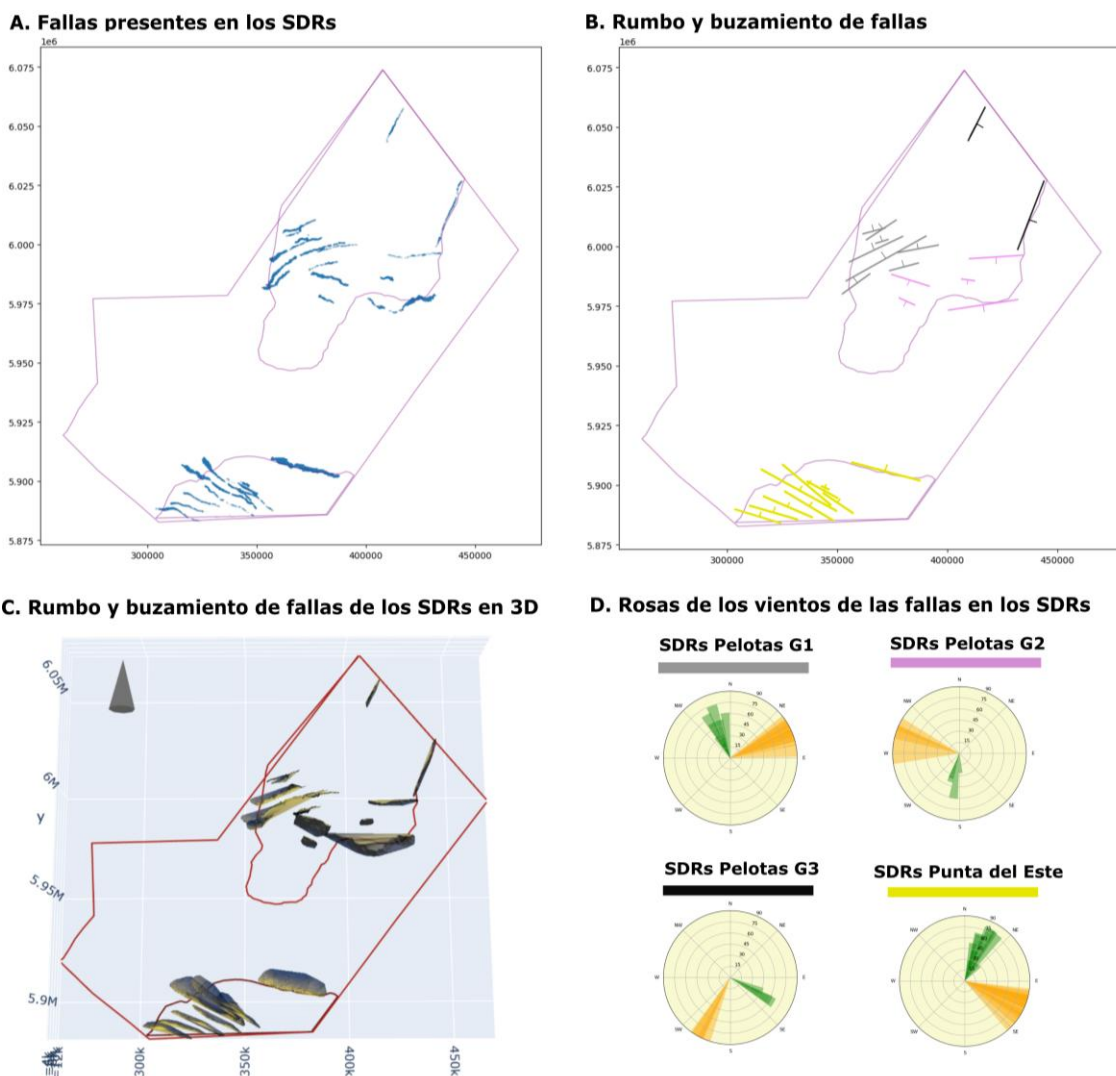


Figura 6.33: Fallas en los SDRs. **A.** Rumbos de fallas según datos extraídos. **B.** Rumbos calculados en base a mínimos cuadrados de las líneas de A. **C.** Representación 3D de las fallas en los SDRs. **D.** Rosas de los vientos de las fallas.

A continuación se presentan las características fundamentales presente en cada uno de los grupos de fallas mencionados

El grupo n° 1 (Figura 6.34, Figura 6.35 y Figura 6.36), caracterizado por fallas normales con un rumbo predominante E-NE y un buzamiento de dirección N-NW, es el más importante y presenta un conjunto de cinco fallas mayores y un gran número de fallas asociadas. Las fallas presentan profundidades de penetración promedio de entre 2 Km y 3 Km, con máximos locales de 5 Km, con rechazos máximos que oscilan desde los 500 m hasta un máximo de 2. (Figura 6.36)

El grupo n° 2 (Figura 6.34 y Figura 6.35) está caracterizado por fallas normales con un rumbo predominante W-NW y un buzamiento de dirección S-SW. A diferencia del grupo 1, estas fallas son más reducidas en cantidad, con penetraciones con máximos locales de 4 Km y rechazos máximos de 1 Km. Estas fallas presentan direcciones coincidentes con el fallamiento presente en la zona de interrupción de los SDRs, y algunas de ellas fueron interpretadas como el límite de los SDRs Pelotas en el sector S de los mismos.

El grupo n° 3 (Figura 6.34 y Figura 6.35) está caracterizado por dos grandes fallas normales con un rumbo predominante N-NE y un buzamiento de dirección E-SE. Estas fallas se presentan penetraciones con menores a los 2 Km y rechazos de entre 200 m y 500 m y se encuentran en dos zonas bien distintas de los SDRs Pelotas, en la porción proximal y en la porción distal, siendo esta última interpretada como el límite distal de los SDRs.

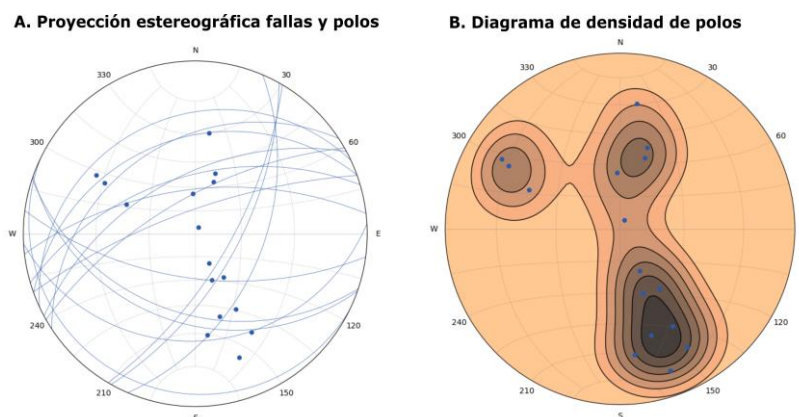
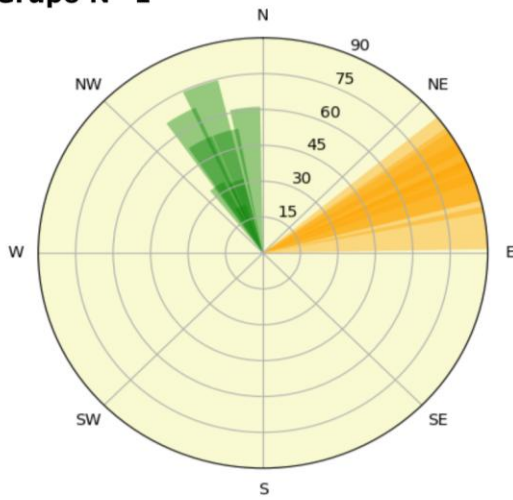
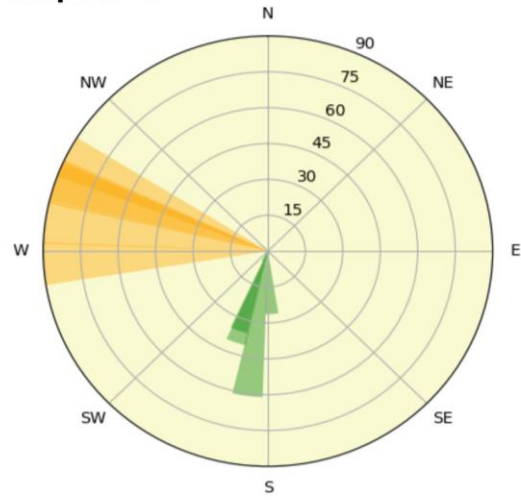


Figura 6.34: Proyección estereográfica de fallas y diagrama de densidad de polos para las fallas de los SDRs Pelotas.

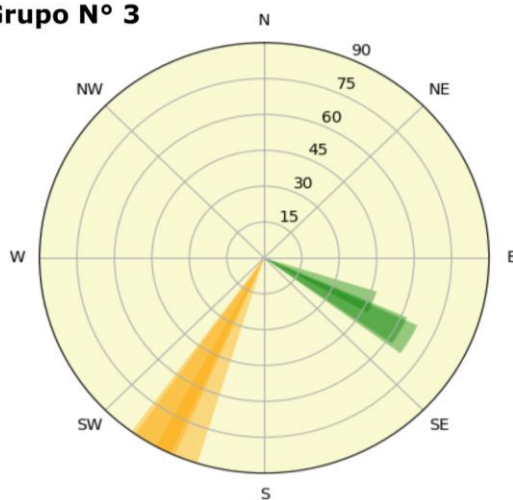
**Grupo N° 1**



**Grupo N° 2**



**Grupo N° 3**



— Rumbos de Fallas  
— Direcciones y ángulos de buzamiento

**Mapa de las fallas**

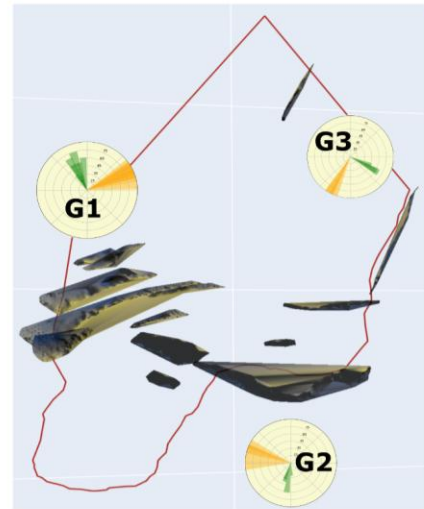
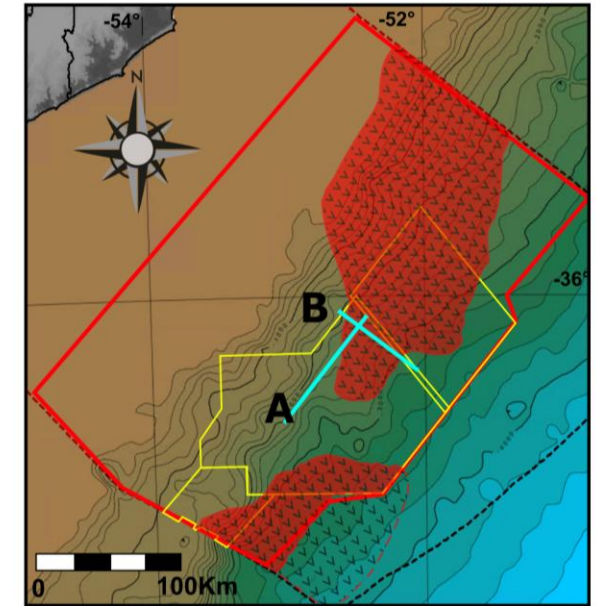
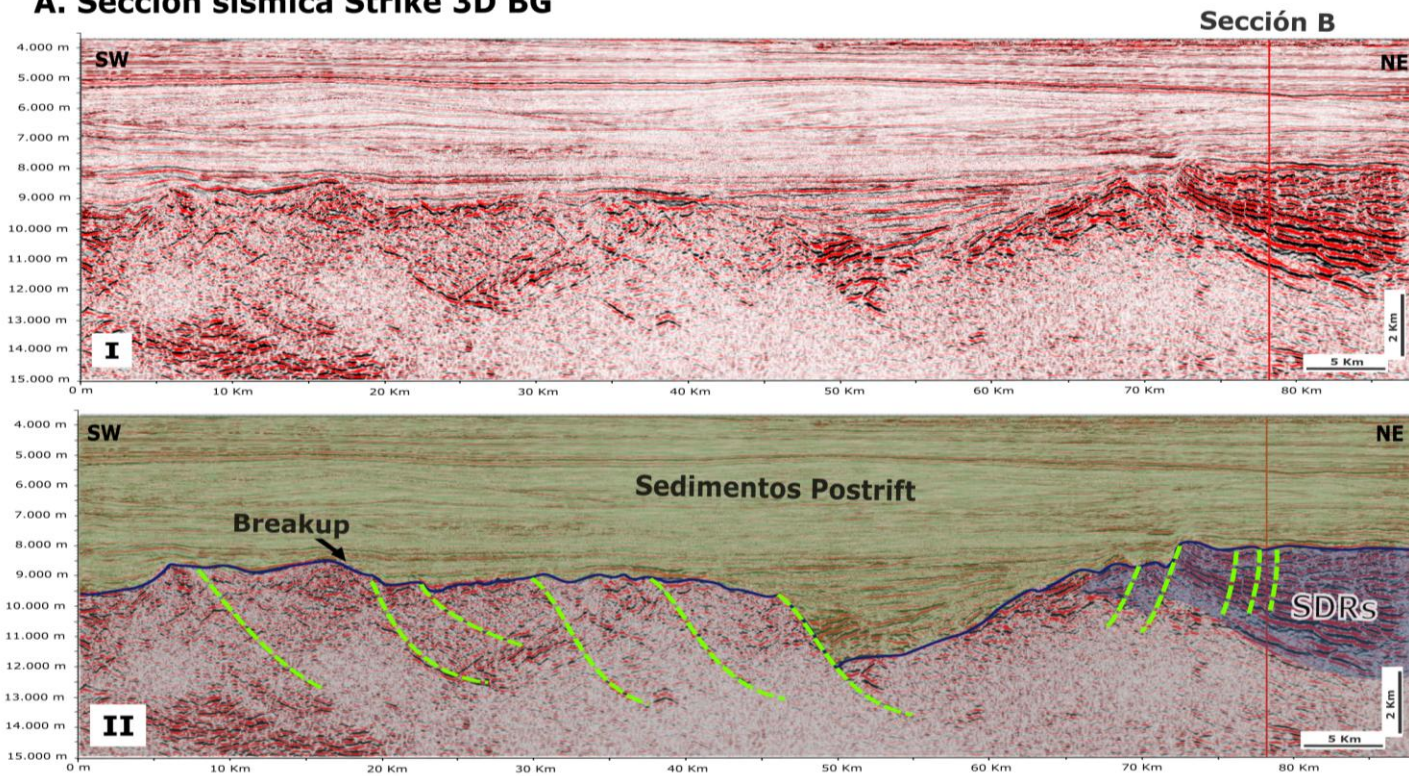


Figura 6.35: Rosas de los vientos de los distintos grupos de fallas en los SDRs Pelotas y su ubicación espacial.

### A. Sección sísmica Strike 3D BG



### B. Sección sísmica Dip 3D BG

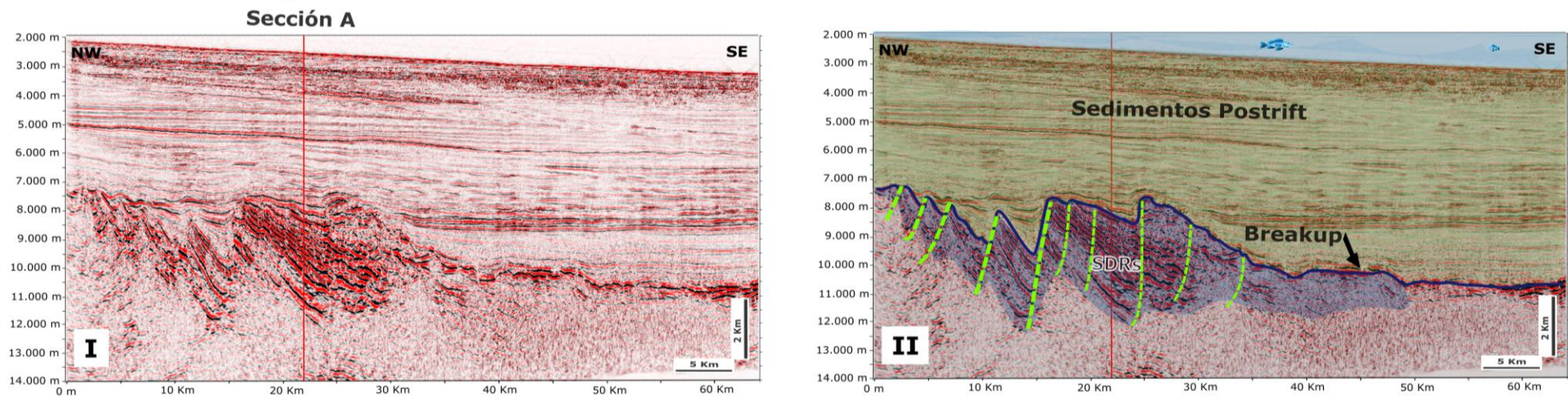


Figura 6.36: Secciones sísmicas 3D en direcciones *Strike* y *Dip* del grupo n°1 de fallas en los SDRs Pelotas.

En cuanto al fallamiento presente en los SDRs Punta del Este, se puede observar un único grupo de fallas caracterizado por fallas normales con un rumbo predominante E-SE y un buzamiento de dirección N-NE. Presenta un conjunto de siete fallas mayores y un gran número de fallas asociadas. Las fallas presentan profundidades de penetración promedio de entre 4 y 5 Km, con rechazos máximos que oscilan desde los 500 m hasta un máximo de 1 Km (Figura 6.37, Figura 6.38 y Figura 6.39).

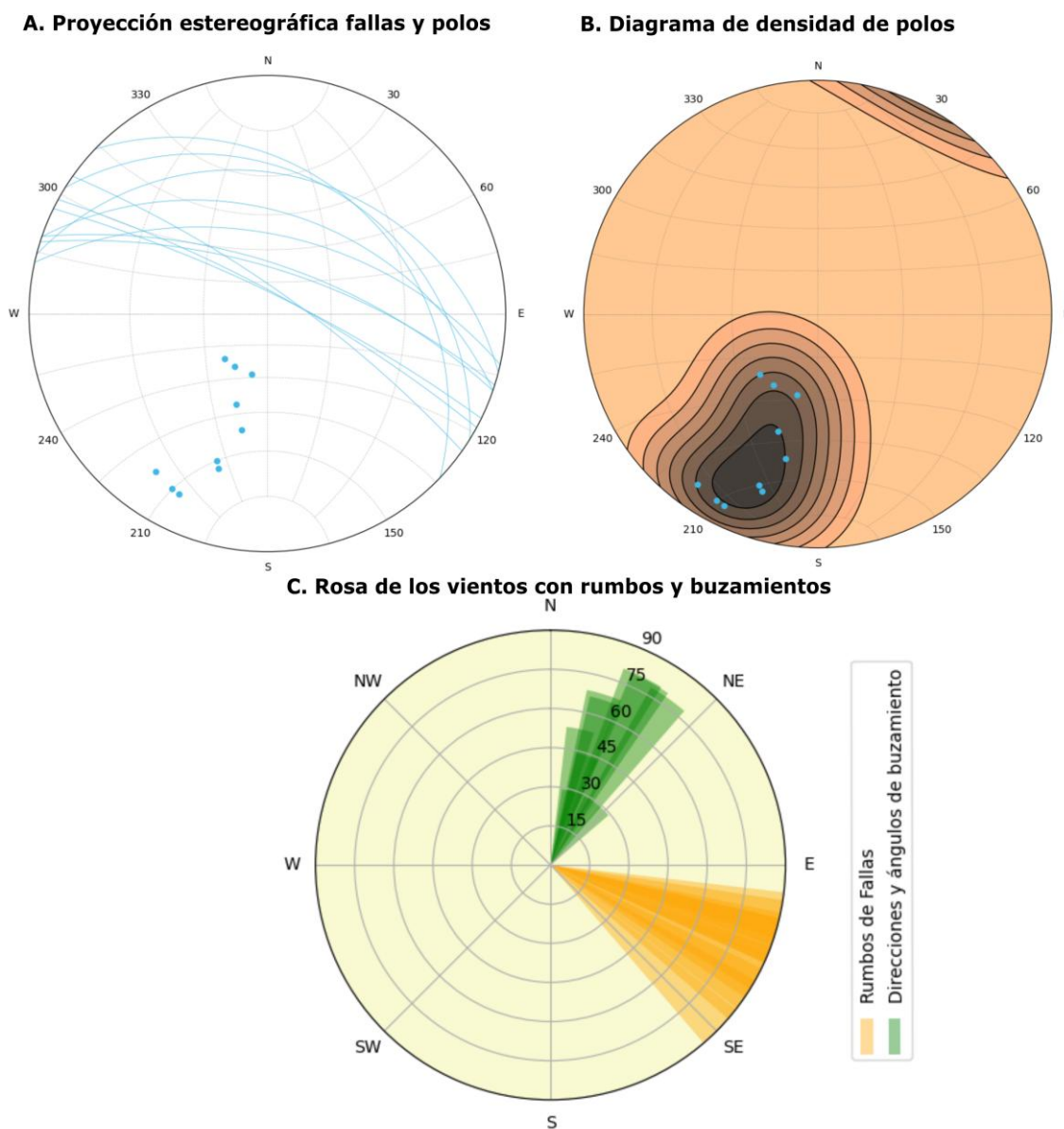
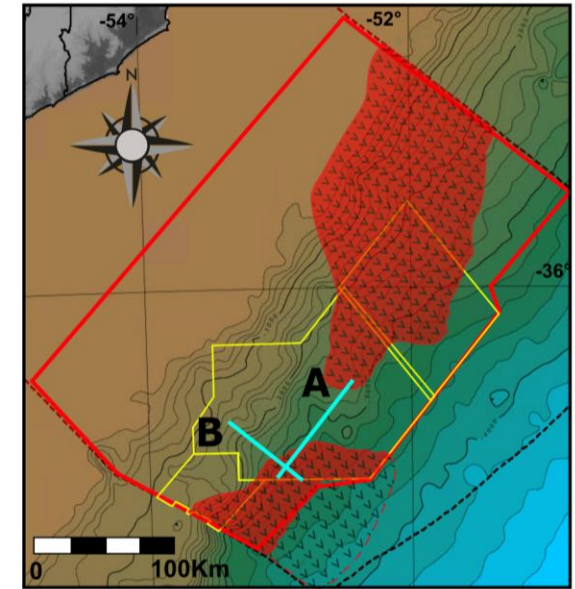
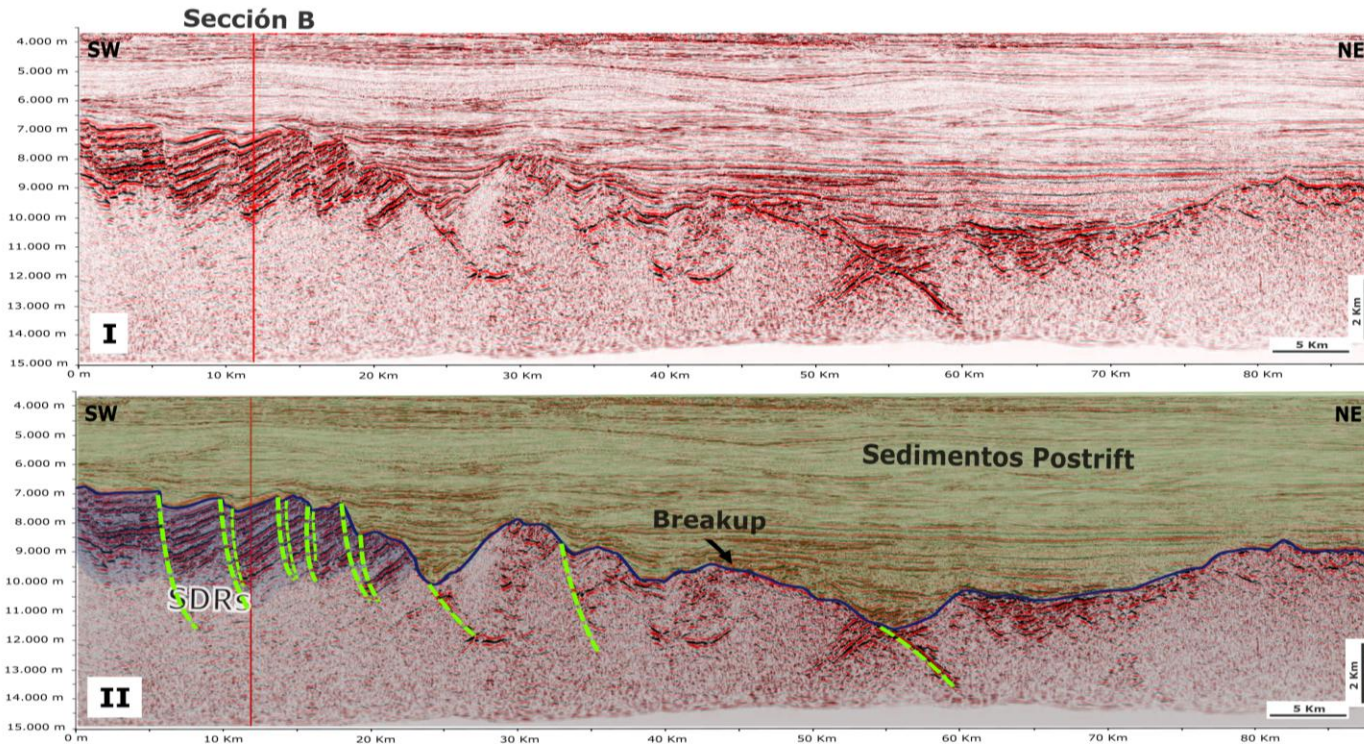


Figura 6.37: Rosas de los vientos de las fallas de los SDRs Punta del Este.

## A. Sección sísmica Strike 3D BG 8200



## B. Sección sísmica Dip 3D BG 4200

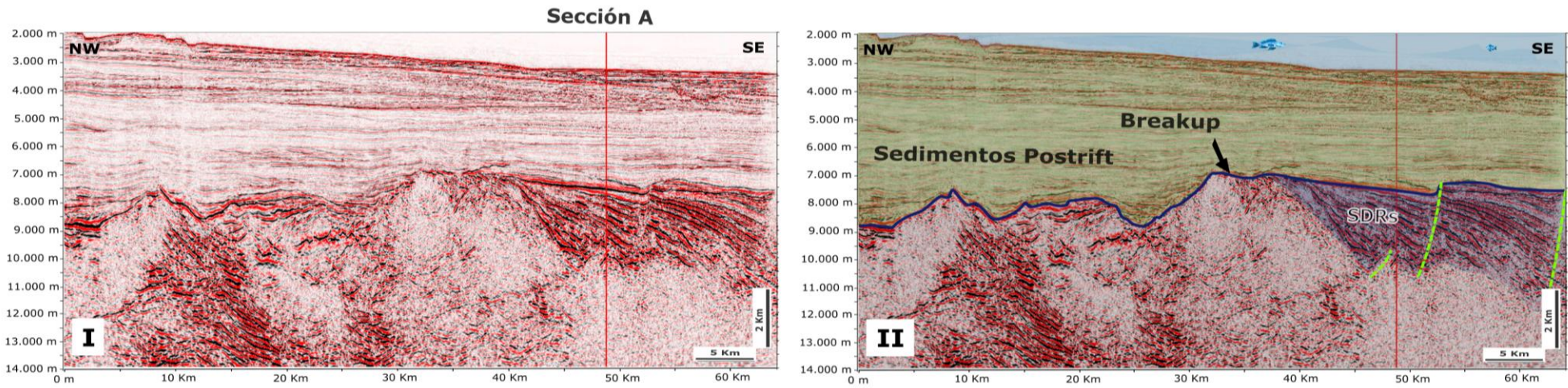


Figura 6.38: Secciones sísmicas 3D en direcciones *Strike* y *Dip* de las fallas en los SDRs Punta del Este.

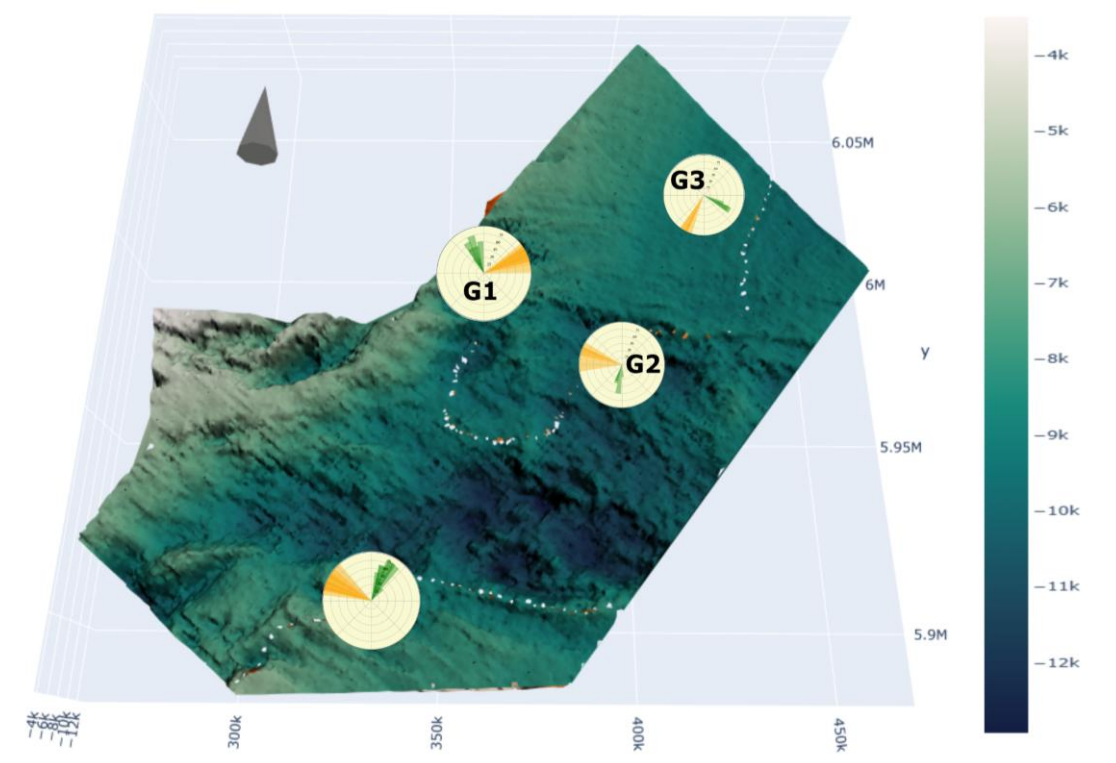


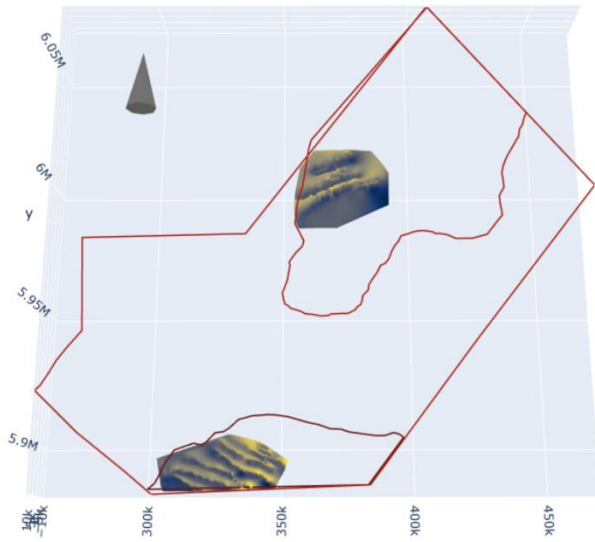
Figura 6.39: Ubicación de las rosas de los vientos de las fallas de los SDRs en la vista 3D de los bloques con datos 3D del MCU.

### 6.6.3 Aproximación al análisis de fallas mediante algoritmos de aprendizaje automático

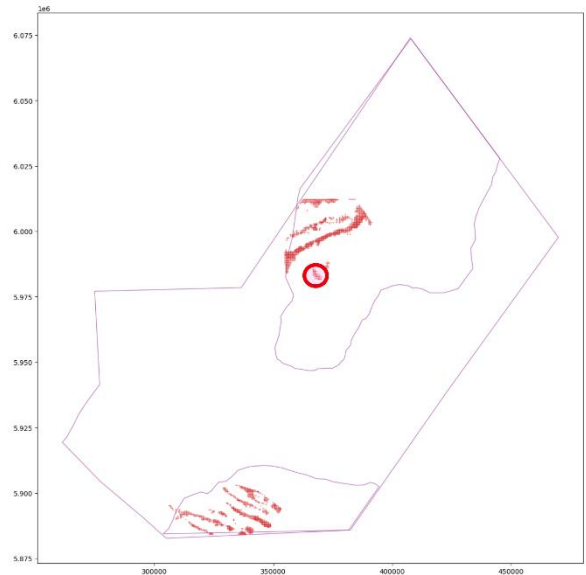
El análisis de direcciones de rumbos obtenidos mediante la combinación del algoritmo DBSCAN y la regresión lineal por mínimos cuadrados puede verse en la

Figura 6.40 y Figura 6.41. En esta figura se muestra una tendencia de rumbo predominante E-SE para las fallas pertenecientes a los SDRs Punta del Este, y una tendencia de rumbo predominante E-NE para las fallas pertenecientes a los SDRs Pelotas, con una particular anomalía NW dado que el conjunto de que los puntos marcados con un círculo rojo en los SDRs Pelotas, no se agrupan con los puntos inmediatamente contiguos al NE producto de los parámetros escogidos de EPS y MinPts.

**A. Contorno estructural de áreas con mayor fallamiento de los SDRs**

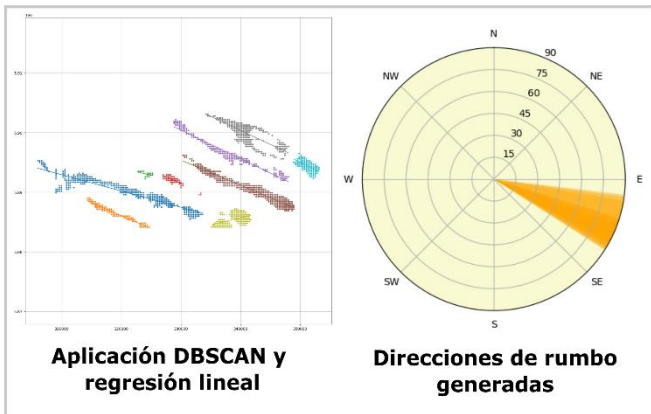


**B. Puntos con valores Z mayores al percentil 88**



**C. Aplicación de DBSCAN y regresión lineal sobre los puntos generados**

**Fallas en SDRs Punta del Este**



**Grupo n° 1 de fallas en SDRs Pelotas**

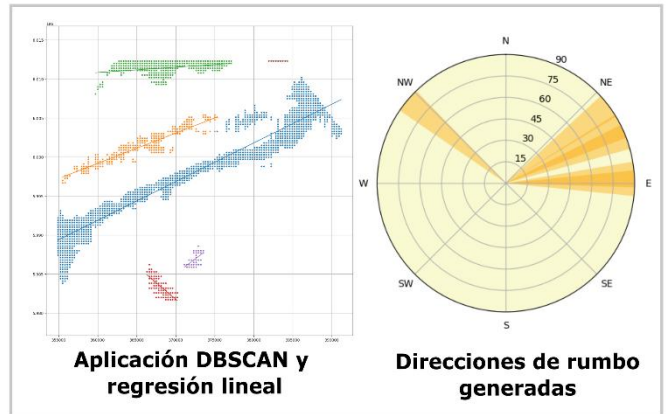


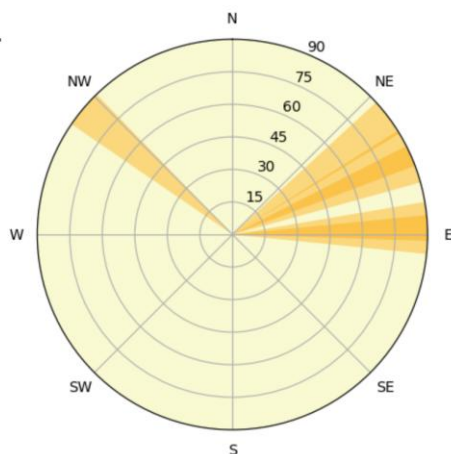
Figura 6.40: Ubicación de las rosas de los vientos de las fallas del G1 de los SDRs Pelotas y los SDRs Punta del Este, mapeados mediante el uso combinado del algoritmo DBSCAN con regresión lineal por mínimos cuadrados.

Como puede verse en la Figura 6.40 el uso combinado estos algoritmos presenta una excelente aproximación al estudio de las direcciones de rumbos de fallas como puede verse en la Figura 6.41 que compara los resultados obtenidos mediante el mapeo manual y el algoritmo DBSCAN.

### A. Grupo de fallas n° 1 en SDRs Pelotas

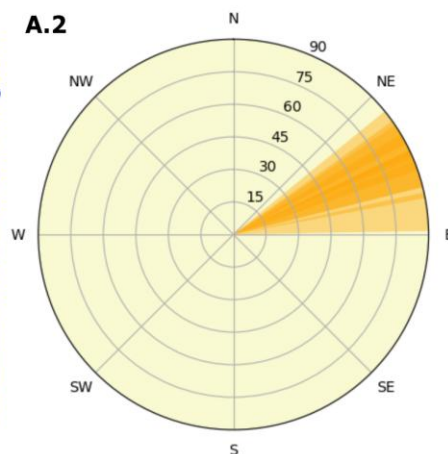
A.1

Resultados DBSCAN



A.2

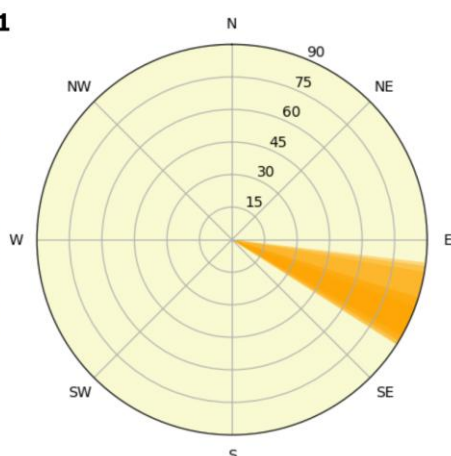
Resultados mapeo en IHS Kingdom



### B. Grupo de fallas en SDRs Punta del Este

B.1

Resultados DBSCAN



B.2

Resultados mapeo en IHS Kingdom

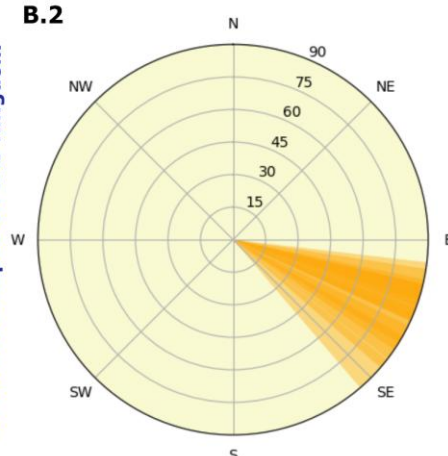
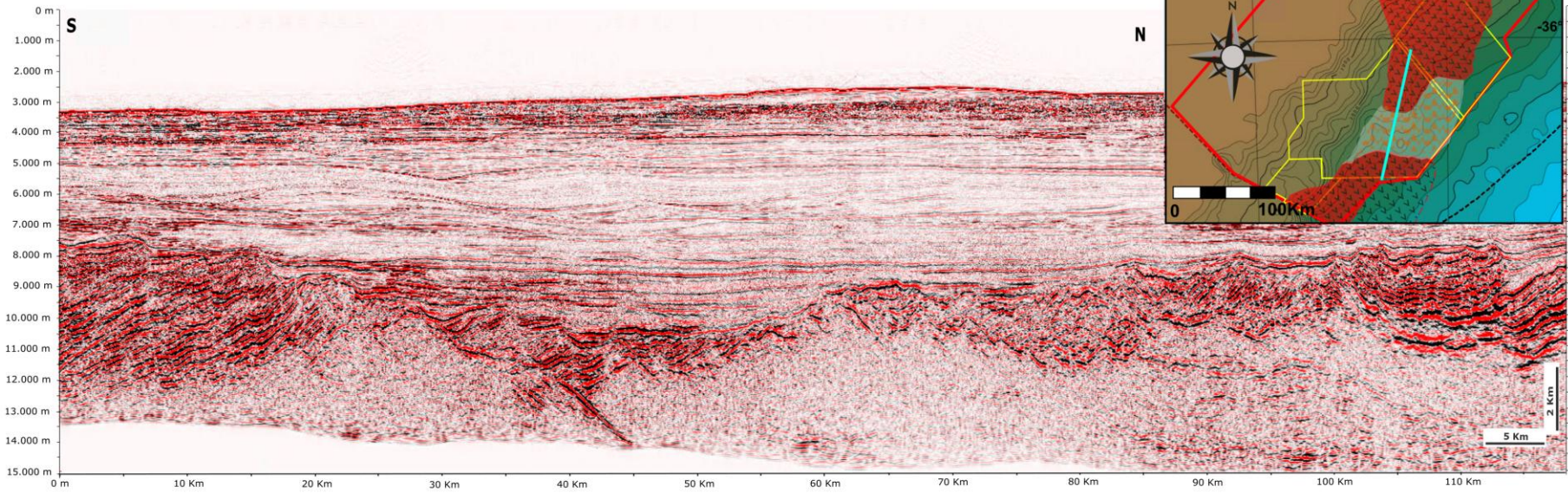


Figura 6.41: Comparación de los resultados del uso combinado del algoritmo DBSCAN con regresión lineal por mínimos cuadrados (A.1, B.1) y el mapeo a través del software IHS Kingdom (A.2, B.2).

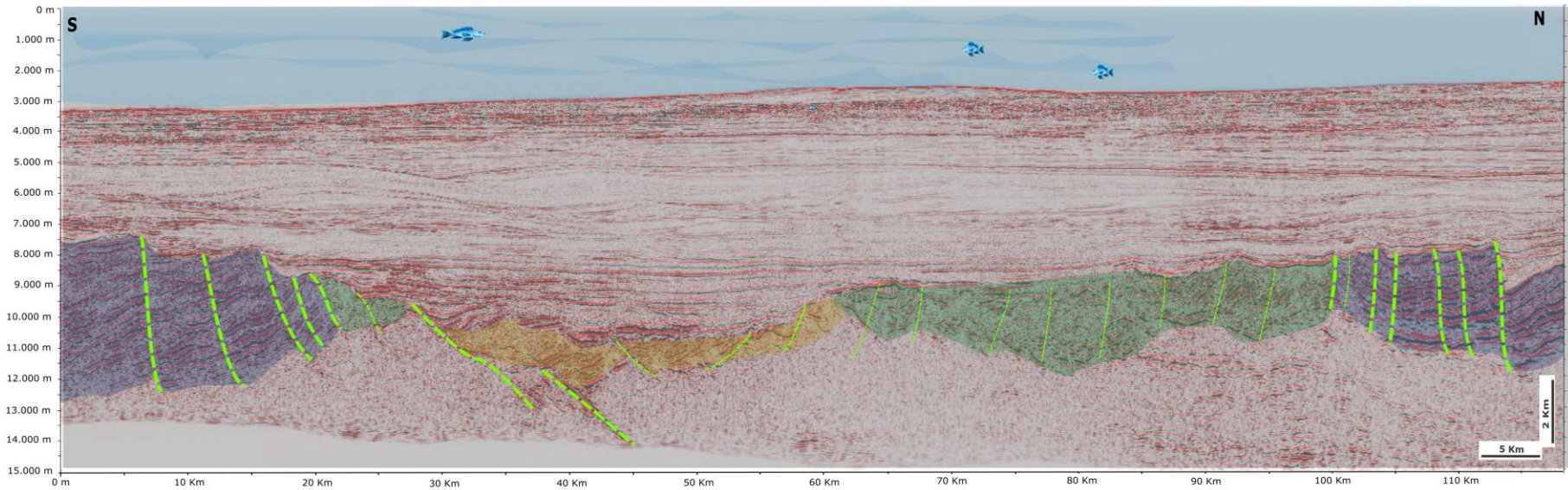
## 6.7 Sector central del MCU

La zona central del MCU donde se ubica la interrupción de los SDRs con sus características conspicuas debido al intenso fallamiento, presenta un adelgazamiento cortical que encuentra la discontinuidad de Mohorovicic a una profundidad aproximada de 3 Km, así como un complejo de fallas normales y grabens (Figura 6.42). En esta figura también pueden observarse SDRs conspicuos con fallas normales, SDRs altamente fallados pero que aún conservan algunos de sus rasgos morfológicos y los relictos de SDRs.

### A. Sección sísmica arbitraria BG12



### B. Sección sísmica arbitraria BG12 interpretada



 **SDRs conspicuos**

 **SDRs altamente fallados**

 **Relictos de SDRs fallados**

Figura 6.42: Sección sísmica arbitraria del sector central del MCU con distintas visualizaciones de SDRs.

Asimismo, en el sector del MCU con cobertura de datos sísmicos 3D, se mapearon las fallas principales vinculadas al *breakup* fuera del dominio de los SDRs conspicuos. Como se ilustra en la Figura 6.43, estas estructuras presentan una distribución trimodal, permitiendo identificar tres familias de fallas.

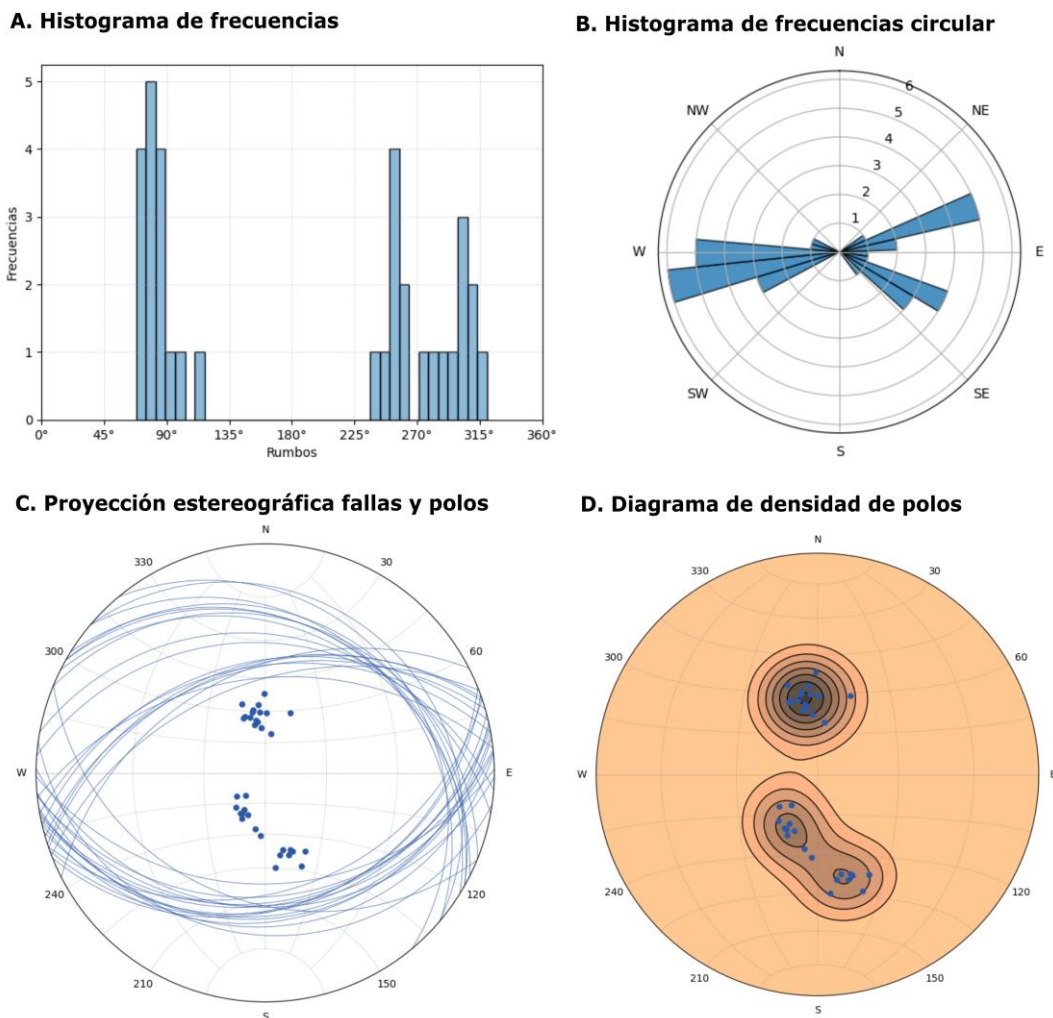


Figura 6.43: Histogramas de frecuencias y, proyección estereográfica de fallas y diagrama de densidad de polos para las fallas del MCU donde no se observan los SDRs conspicuos. Datos obtenidos con el software IHS Kingdom.

Para simplificar la Como se puede ver en la Figura 6.44 el grupo A está caracterizado por fallas normales de bajo ángulo con una dirección de rumbo E-NE y una dirección de buzamiento N-NW, el grupo B está caracterizado por fallas normales de bajo ángulo con una dirección de rumbo W-SW y una dirección de buzamiento S-SE, por último el grupo C está caracterizado por fallas normales

de bajo ángulo con una dirección de rumbo E-SE y una dirección de buzamiento N-NE.

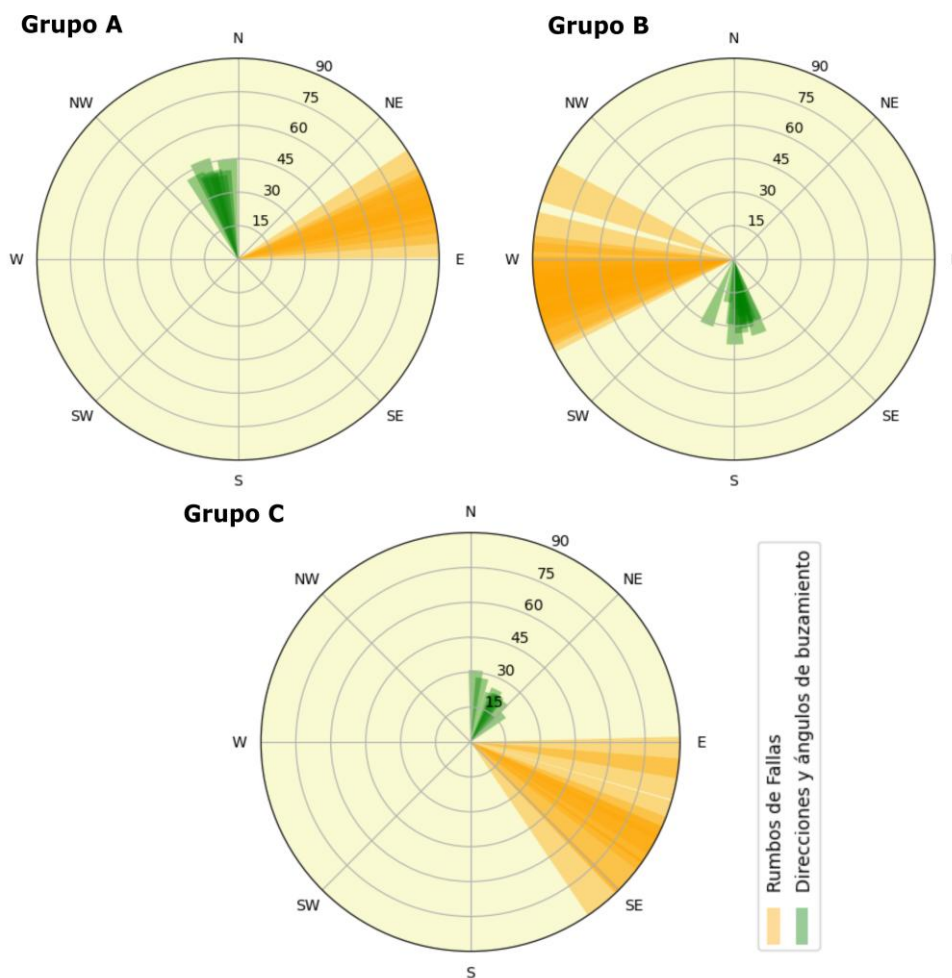


Figura 6.44: Rosas de los vientos de los distintos grupos de del MCU, solo se expresan las fallas de mayor penetración (superior a 1 Km).

Sector	Grupo	Cantidad Fallas	Mediana Rumbo	$\sigma$ Rumbo	Mediana Buzamiento	$\sigma$ Buzamiento
MCU	A	8	72°	6.58	40°	3.07
	B	12	260°	11.17	29°	4.74
	C	10	119°	13.85	22°	4.50
SDRs Pelotas	G1	8	67°	8.55	52°	18.26
	G2	8	288°	11.57	35°	20.57
	G3	6	209°	6.95	62°	10.57
SDRs Punta del Este	-	10	112°	10.09	59°	21.61

Tabla 6:3 Datos estadísticos de las fallas mapeadas.

De acuerdo a las direcciones de rumbo y buzamiento observadas para los grupos de fallas en el área donde no se encuentran presentes los SDRs conspicuos, y a los grupos de fallas presentes en el MCU fuera del dominio de los SDRs, se podría determinar que los mismos regímenes de esfuerzos dieron lugar a las siguientes asociaciones de grupos de fallas (Figura 6.45)<sup>4</sup>:

- Asociación 1: grupo A de fallas con grupo n°1 de fallas de SDRs Pelotas.
- Asociación 2: grupo B de fallas con grupo n°2 de fallas de SDRs Pelotas.
- Asociación 3: grupo C de fallas con fallas de SDRs Punta del Este.
- Sin asociación: grupo n°3 de fallas de SDRs Pelotas.

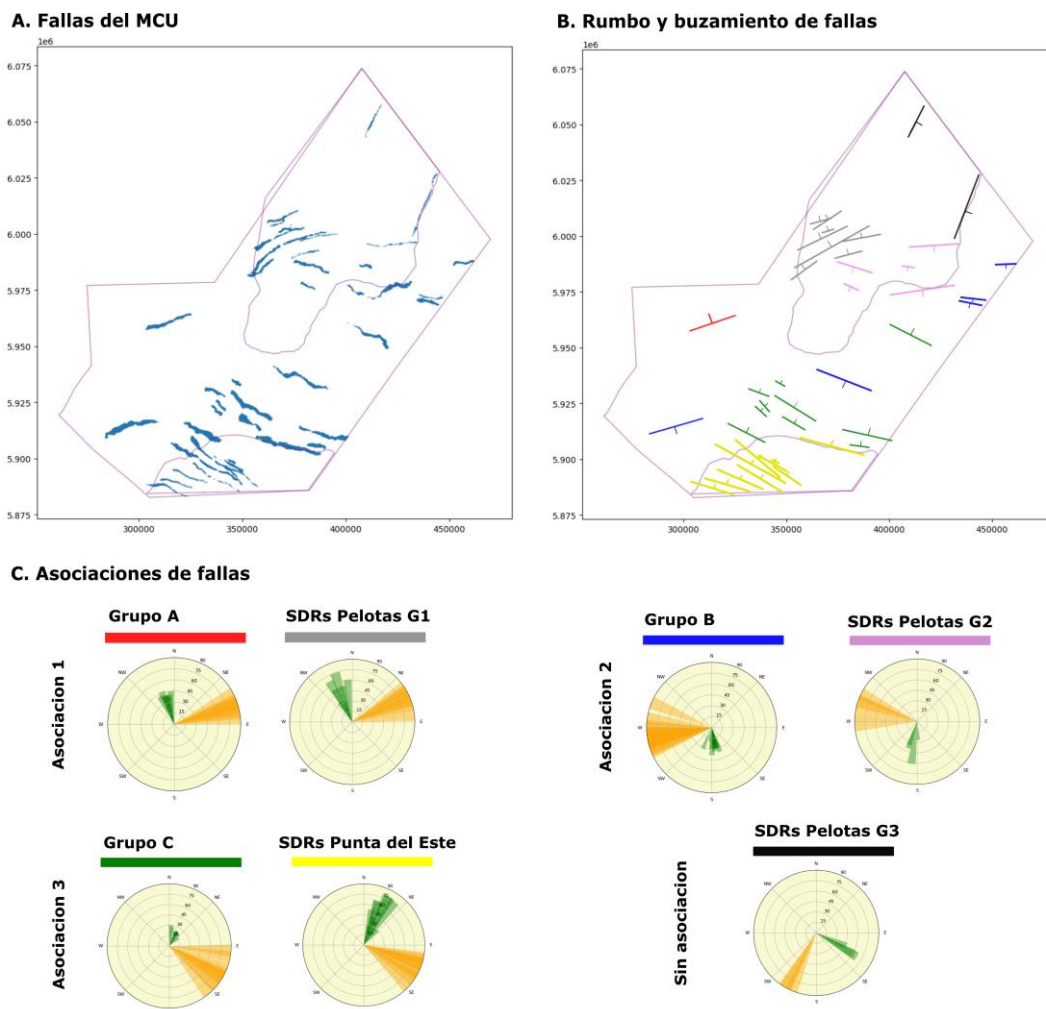


Figura 6.45: Asociaciones de fallas. **A.** Líneas de fallas calculadas en base al percentil 88 de los datos extraídos del software IHS Kingdom. **B.** Rumbos calculados en base a mínimos cuadrados de las líneas de A. **C.** Rosas de los vientos calculadas en base a mapeos realizado en el software IHS Kingdom.

<sup>4</sup> El estudio pormenorizado de los diagramas de esfuerzos queda fuera del alcance del presente trabajo.

## 6.8 Comparativa entre SDRs Pelotas y SDRs Punta del Este

A continuación se presenta una tabla comparativa de las características fundamentales de los SDRs en el MCU.

Característica	SDRs Pelotas			SDRs Punta del Este
Área de extensión	17.730 Km <sup>2</sup>			> 4.000 Km <sup>2</sup>
Deposición proximal	Sobre corteza continental			Sobre corteza transicional
Profundidad media del tope (Datos 3D)	8.624 m			8.120 m
Punto más profundo del tope (Datos 3D)	10.867 m			10.128 m
Punto menos profundo del tope (Datos 3D)	6.018 m			5.913 m
Espesor máximo	6 Km			5 Km
Fallas antitéticas “cuñas”	3			3
Grupos de fallas sintéticas	G1	G2	G3	-
Rumbos predominantes	E-NE	W-NW	N-NE	W-NW
Buzamientos predominantes	N-NW	S-SW	E-SE	N-NE
Penetraciones promedio	3.880 m	2.879 m	1.539 m	4.578 m
Profundidad máxima	13.026 m	11.956 m	10.113 m	13.221 m
Rechazos máximos	2 Km			1 Km

Tabla 6:4 Principales características de los SDRs conspicuos del MCU.

## 7 Discusión

### 7.1 Extensión de los SDRs en el MCU

Si bien la morfología conspicua en forma de cuña de los SDRs resulta muy evidente tanto en secciones sísmicas 2D como 3D, sus límites hacia el centro del MCU siguen siendo motivo de controversia. Modelos como los propuestos por Soto *et al.* (2011) del STRP, Marmisolle *et al.* (2025) del depocentro Polonio o el de Maya & Mann (2025) de la rotación del bloque tectónico “microplaca” Salado, aún no permiten llegar a un consenso.

En este sentido se observa que el modelo de RNC implementado puede aportar nuevos datos a esta discusión ya que no solo predice con buena eficacia los SDRs conspicuos, sino que además, predice otros sectores que podrían vincularse con SDRs altamente fallados y rotados.

Otra observación que puede aportar a esta discusión es la diferencia presente en los ángulos de buzamiento de las fallas ya que las fallas asociadas a los SDRs presentan ángulos de buzamiento mucho mayores a los de las fallas de los grupos A a C, esto podría relacionarse al comportamiento reológico de los distintos tipos de rocas asociados y a su emplazamiento cortical, aunque su discusión excede del alcance del presente trabajo.

### 7.2 Implicancias de los distintos modelos de tipos de SDRs

El mapeo de los diferentes tipos de SDRs expuestos por McDermott *et al.* (2018) y Chauvet *et al.* (2021) presentan una relevante importancia para el estudio del desarrollo de la fase Rift en un VPM, así como constituye una estructura esencial para la identificación del fallamiento posterior.

Si bien los criterios conceptuales para la proposición de los tipos de SDRs por McDermott *et al.* (2018) y Chauvet *et al.* (2021) son distintos, estando los primeros vinculados al tipo de *Breakup* (tectónico o magmático) y los segundos al tipo de corteza a la hora de su emplazamiento, de acuerdo a las definiciones morfológicas expuestas por dichos autores como criterios para la identificación

de los diferentes tipos de SDRs, en este trabajo se propone considerar que los tipos “*internos*” e “*intermedios*” de Chauvet *et al.* (2021) son coincidentes morfológicamente con el tipo *I* de McDermott *et al.* (2018), así como los SDRs tipo *externo II* son coincidentes morfológicamente con el tipo *I/a* de McDermott *et al.* (2018), estos tipos de SDRs son los más característicos presentes en la literatura, siendo a su vez los identificados en los trabajos previos (Franke *et al.*, 2007, Soto *et al.*, 2011)

Los SDRs tipo *I* (McDermott *et al.*, 2018) mapeados, evidencian la contemporaneidad del emplazamiento de los SDRs Pelotas y SDRs Punta del Este ya que este tipo refiere al desarrollo de la fase de *Breakup* tectónico con su consecuente estiramiento cortical con la formación de hemigrábens que sirven de espacio de acomodación para que los flujos basálticos que conforman los SDRs generen sus características formas de cuñas.

Por otro lado, el mapeo de los SDRs tipo “*internos*” de Chauvet *et al.* (2021) para el caso de los SDRs Punta del Este no se emplazan en el límite de la corteza continental en el cuello proximal como propone el autor para estos tipos, sino que para el caso del MCU, su emplazamiento se encuentra sobre una corteza transicional. Esto podría explicarse por la afectación de fallas sobre la corteza continental que desplazaron los SDRs posteriormente a su emplazamiento lo cual sería coincidente con la mayor profundidad que se observa en el tope de los SDRs Punta del Este con respecto a los SDRs Pelotas –considerando que según el modelo tradicional de desarrollo de los SDRs implica el emplazamiento a cotas similares-, con las fallas observadas al N de los SDRs Punta del Este y consecuente con el modelo expuesto por Marmisolle *et al.* (2025) así como por Maya & Mann (2025).

En última instancia, cabe destacar que la porción distal de los SDRs, es decir los tipo *I/a* según la clasificación de McDermott *et al.* (2018) y tipo *externo II* según la clasificación de Chauvet *et al.* (2021) suelen fusionarse lateralmente con flujos de basaltos cuasi planares propios de la corteza oceánica lo que determina una zona de transición difusa que impide precisar el fin de los SDRs.

### 7.3 Evolución del emplazamiento de los SDRs en la fase Rift

De acuerdo a los resultados obtenidos y a la discusión planteada, se podría interpretar la evolución del emplazamiento y posterior fallamiento de los SDRs en las siguientes etapas:

1. Emplazamiento de los SDRs tanto Punta del Este como Pelotas del tipo I, tipo internos e intermedios sobre el cuello proximal con sus extremos proximales sobre la corteza continental.
2. Aplicación de un esfuerzo transtensivo con un diagrama de esfuerzos similar al expuesto por Marmisolle *et al.* (2025), el cual afecta al MCU en ciertas zonas de debilidad preexistentes, generando:
  - a) La asociación de fallas 1 y desplazando en conjunto los SDRs Punta del Este paulatinamente hacia el S, generando: i) la extensión del cuello proximal que lleva a verlos actualmente emplazados sobre la corteza transicional. ii) su hundimiento con respecto a los SDRs Pelotas. iii) la herencia estructural que definió morfología del quiebre plataforma-talud actual en esa zona, el cual se muestra muy diferente en comparación a la zona de Pelotas. (comparar Figura 6.28 con Figura 6.30).
  - b) Generación del depocentro Polonio, vinculado a la asociación de fallas 2 y 3, e interrumpiendo la continuidad original de los rasgos característicos de los SDRs del MCU afectándolos con fallamientos, dislocaciones y rotaciones dando lugar a relictos de SDRs.
3. Depositación postrift.

## **8 Conclusiones**

Los SDRs del MCU presentan sendas diferencias que permiten caracterizarlos por separado, proponiendo el nombre de SDRs Pelotas para los SDRs pertenecientes al sector NE del MCU y SDRs Punta del Este para los SDRs pertenecientes al sector SW del MCU.

La utilización de bases de datos con secciones sísmicas tanto 2D como 3D permitieron un estudio más continuo del desarrollo de los SDRs en el MCU, lo cual llevó al mapeo de una mayor extensión de los SDRs en comparación los trabajos antecedentes en el área.

Asimismo, el carecer de datos en la zona distal del MCU así como en profundidad en el caso del bloque TO12, impidieron por un lado mapear completamente la extensión de los SDRs Punta del Este, así como otros conjuntos de fallas que afectan al MCU, y por otro, mapear enteramente la base de los SDRs Pelotas.

De acuerdo a los modelos de RNC, el intenso fallamiento que afectó el centro del MCU podría contener relictos de SDRs, los cuales debido a su gran afectación tectónica habrían perdido sus rasgos morfológicos característicos, siendo originalmente continua su distribución.

A través de la implementación de los distintos modelos de RNC se pudo observar que, a medida que el tamaño de la sección de imagen elegida aumenta, también aumenta la precisión de la RNC para determinar el área donde aparecen los SDRs (secciones de imágenes más grandes contienen más reflectores). Esto es esperable dada la característica de los reflectores asociados a los SDRs, los cuales se presentan en asociación con varios reflectores paralelos o subparalelos de gran contraste de impedancia.

Se estima que la combinación de técnicas y algoritmos de análisis computacional de imágenes que destaquen los reflectores característicos de los SDRs, pueda ser un importante complemento para el entrenamiento de las RNC,

así como una ampliación en el tamaño de las secciones para entrenamiento, que ya demostraron una mejora en la predicción.

Cabe aclarar que estos métodos de momento no pueden ser considerados determinativos, sino como una herramienta que simplifique el mapeo o indique la observación particular de algún sector, el cual en última instancia debe ser revisado y corregido por un investigador capacitado.

Esta primera aproximación al uso de las nuevas metodologías de RNC, análisis computacional de imágenes y algoritmos de aprendizaje automático como DBSCAN, resulta novedosa en el área. Estos algoritmos permitieron nuevos enfoques cuantitativos al estudio de las secciones sísmicas dando resultados que instan a futuros desarrollos metodológicos que permitan una mayor precisión en el estudio de las sismofacies.

Particularmente el uso de RNC demuestra ser un conjunto de herramientas que puede simplificar la tarea de mapeo de este tipo de estructuras así como focalizarse en áreas dónde los algoritmos enfatizan sectores que, *a priori*, no se observan como SDRs. Asimismo la aplicación combinada del algoritmo DBSCAN y de regresión lineal por mínimos cuadrados para la detección automática de rumbos de fallas, presentó resultados de gran similitud con los datos mapeados manualmente con el software IHS Kingdom. Asimismo, es importante notar que esta metodología en principio no permite determinar ángulos ni direcciones de buzamiento.

La observación de los distintos tipos de SDRs siguiendo los modelos de McDermott *et al*, (2018) y Chauvet *et al.*, (2021), permitió un estudio pormenorizado de la evolución del emplazamiento de los SDRs así como su correlación con el tipo de *breakup* y su contexto cortical.

## **8.1 Recomendaciones y futuros trabajos**

Futuras adquisiciones de datos en el área de los SDRs Punta del Este, podrá permitir un estudio más detallado redundando en una mejor interpretación

de los procesos de emplazamiento de los mismos así como de la evolución en la fase Rift del MCU.

Si bien la metodología que combina el algoritmo DBSCAN con regresión lineal por mínimos cuadrados resulta eficaz para la detección automática de rumbos, se requiere el desarrollo de un modelo estadístico robusto que permita evaluar sesgos y optimizar los parámetros de *EPS* y *MinPts*. Asimismo, dado que el método actual se limita al cálculo de rumbos, se propone como trabajo futuro la integración de estos resultados con el gradiente de los *grids* para determinar automáticamente los ángulos y direcciones de buzamiento.

Para un análisis más exhaustivo sobre el fallamiento de los SDRs y su relación con el MCU, se recomienda realizar mayores mapeos de las fallas.

## **9 Referencias bibliográficas**

- Belyadi, H., Haghghat, A. (2021) Machine Learning for Oil and Gas using Python. Elsevier, Gulf Professional Publishing. ISBN: 978-0-12-821929-4
- Brown Jr, L. F., Fisher, W. L. (1977). Seismic-stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from brazilian rift and pull-apart basins: section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation. Catuneanu, O. (2022). Principles of sequence stratigraphy. Second Edition. Elsevier
- Bueno García, G. Deniz Suarez, O., Espinosa Aranda, J. L., Salido Tercero, J., Serrano Gracia, I., Vállez Enano, N. (2015) Learning Image Processing with OpenCV. Packt Publishing, Open Source. Birmingham-Mumbai.
- Chauvet, F., Sapin, F., Geoffroy, L., Ringenbach, J., Ferry, J. (2021). Conjugate volcanic passive margins in the austral segment of the South Atlantic—Architecture and development. Earth-Science Reviews, 103461.
- Conti, B., de Jesus Perinotto, J. A., Veroslavsky, G., Castillo, M. G., de Santa Ana, H., Soto, M., Morales, E. (2017). Speculative petroleum systems of the southern Pelotas Basin, offshore Uruguay. Marine and Petroleum Geology.
- Cross, T. A.; Lessenger, M. A. (1988). Seismic Stratigraphy, Annu. Ver. Planet. Sci., v. 16, p. 319-354.
- Ester, M.; Kriegel, H.; Sander, J.; Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. Institute for Computers Science, University of Munich, Germany. Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). AAAI Press. pp. 226–231. CiteSeerX 10.1.1.121.9220. ISBN 1-57735-004-9.

- Franke, D., Neben, S., Ladage, S., Schreckenberger, B., Hinz, K. (2007). Margin segmentation and volcano-tectonic architecture along the volcanic margin off Argentina/Uruguay, South Atlantic. *Marine Geology* 244 (1e4), 46e67.
- Franke, D., 2012, Rifting, lithosphere breakup and volcanism: Comparison of magma-poor and volcanic rifted margins: *Marine and Petroleum Geology*, v. 43, p. 63-87.
- Geoffroy, L., 2005, Volcanic passive margins: *Comptes Rendus Geoscience*, v. 337, no. 16, p. 1395-1408.
- Geoffroy, L., Burov, E. B., and Werner, P., 2015, Volcanic passive margins: another way to break up continents: *Scientific Reports*, v. 5, p. 14828.
- Heine, C., Zoethout, J., Müller, R. Kinematics of the South Atlantic rift. *Solid Earth* 4: 215-253.
- Harris, J. 2023 ML Basics ~ Part 3: Comparing K-Means to DBSCAN clustering of Tesla GigaFactory effect on Texas Housing Market Analysis w/ Python 'from Scratch!' [Link](#)
- Heine, C., Zoethout, J. & Muller, D. (2013). Kinematics of the South Atlantic rift. *Solid Earth*, 4, 215–253.
- Hernández-Molina, J., Soto, M., Piola, A., Tomasini, J., Preu, B., Thompson, P., Paterlini, M. (2016). A contourite depositional system along the Uruguayan continental margin: sedimentary, oceanographic and paleoceanographic implications. *Marine Geology*, 378, 333-349.
- Hinz, K., Neben, S., Schreckenberger, B., Roeser, H.A., Block, M., Goncalvez de Souza, K., Meyer, H. (1999). The Argentine continental margin north of 48S: sedimentary successions, volcanic activity during breakup. *Marine and Petroleum Geology* 16, 1e25.
- Jackson, M.P.A., Cramez, C., Fonck, J.M. (2000). Role of subaerial volcanic rocks and mantle plumes in creation of South Atlantic margins:

implications for salt tectonics and source rocks. *Marine and Petroleum Geology*. 17, 477-498.

LeCun, Y., Boser, B., Denker, J. S., Henderson, D., Howard, R. E., Hubbard, W., & Jackel, L. D. (1989). Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition. *Neural Computation*, 1(4), 541–551. doi:10.1162/neco.1989.1.4.541

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. doi:10.1038/nature14539

Lovecchio, J. P., Rohais, S., Joseph, P., Bolatti, N. D., Ramos, V. A. (2020). Mesozoic rifting evolution of SW Gondwana: a poly-phased, subduction-related, extensional history responsible for basin formation along the Argentinean Atlantic margin. *Earth-Science Reviews*, 203, 103138.

Marmisolle, J., Morales, E., Conti B. (2023). Barremian - Aptian structural control in the central region offshore Uruguay. First EAGE Conference on South Atlantic Offshore Energy Resources, Montevideo, Uruguay.

Marmisolle, J., Morales, E., Rossello, E., Soto, M. Hernández-Molina, J. (2025). Tectonic evolution of the Atlantic rift, central sector offshore Uruguay, *Tectonophysics*, Volume 899. Sciencedirect. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2025.230654>.

Maya, D., Mann, P. Clockwise rotation of the Salado microplate within the Early Cretaceous, volcanic-rifted margin of Uruguay and northern Argentina, *Journal of South American Earth Sciences*, (2025) 105600, ISSN 0895-9811, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105600>.

McDermott, C., Lonergan, L., Collier, J. S., McDermott, K. G., Bellingham, P. (2018). Characterization of seaward-dipping reflectors along the South American Atlantic margin and implications for continental breakup. *Tectonics*, 37, 3303–3327.

- Milani E.J., Thomaz Filho A. (2000). Sedimentary Basins of South America. In: Cordani U.G., Milani E.J., ThomazFilho A., Campos D.A. Tectonic Evolution of South America. Edição Especial do 31st International Geological Congress, p. 389-449.
- Mitchell, T. (1997). Machine Learning. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- Mitchum, R. M., Jr., Vail, P. R., Thompson, S. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 2: The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. AAPG Memoir 26, pp. 53-97.
- Mohriak, W. U., Rosendahl, B. R., Turner, J. P., & Valente, S. C. (2002). Crustal architecture of South Atlantic volcanic margins. Special papers-geological society of america, 159-202.
- Morales, E. (2013). Evolução tectônica e estratigráfica das bacias da margem continental do Uruguai. PhD Thesis, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus Rio Claro.
- Morales, E., Chang, H., Soto, M., Corrêa, F., Veroslavsky, G., de Santa Ana, H., Daners, G. (2017). Tectonic and stratigraphic evolution of the Punta del Este and Pelotas basins (offshore Uruguay). Petroleum Geoscience, 23(4), 415-426.
- Morales, E., Conti, B., Soto, M., Viera-Honegger, B. (2020). Risks inherent in the Cenozoic stratigraphic plays in basins of the Uruguayan continental margin. Marine and Petroleum Geology, 112, 104072.
- Moulin, M., Aslanian, D., Olivet, J-L., Contrucci, I., Matias, L., Géli, L., Klingelhoefter, F., Nouzé, H. and Réhault, J-P & Unternehr, P. (2005). Geological constraints on the evolution of the angolan margin based on reflection and refraction seismic data ZaïAngo project. Geophys. J. Int. 162: 793-810.

- Moulin, M., Aslanian, D., & Unternehr, P. (2010). A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean. *Earth-Science Reviews*, 98(1-2), 1-37.
- Paton, D; Pindell, J; McDermott, K; Bellingham, P; Horn, B. (2017). Evolution of seaward-dipping reflectors at the onset of oceanic crust formation at volcanic passive margins: Insights from the South Atlantic. *Geology*. 45. 10.1130/G38706.1.
- Petrelli, M. 2021. *Introduction to Python in Earth Science Data Analysis: From Descriptive Statistics to Machine Learning*. Berlin Heidelberg New York: Springer.
- Planke, S., Symonds, P.A., Alvestad, E., Skogseid, J., 2000. Seismic volcanostratigraphy of large-volume basaltic extrusive complexes on rifted margins. *J. Geophys. Res.* 105, 19335–19351.
- Reuber K., Mann P., Pindell J., 2019. Hotspot origin for asymmetrical conjugate volcanic margins of the austral South Atlantic Ocean as imaged on deeply penetrating seismic reflection lines. *Interpretation* 7, SH71–SH97.
- Rotzien, J. R., Yeilding, C. A., Sears, R. A., Hernández-Molina, F. J., & Catuneanu, O. (2022). *Deepwater Sedimentary Systems: Science, Discovery, and Applications*. Elsevier.
- Rowlands, H., Paton, D., Mortimer, E., Turner, J. Thompson, P., Soto, M., de Santa Ana, H. (2016). New insights into the early development of a volcanic passive margin: 3D imaging of seaward dipping reflections and a South Atlantic transfer zone. In *AAPG/SEG*
- Sequeira, M.; Morales, E.; Conti, B. (2024). Seismic stratigraphy of the Cretaceous post-rift sedimentary interval in the Punta del Este Basin (offshore Uruguay) and its implications for deep-water reservoir. *Petroleum Geoscience*. <https://doi.org/10.1144/petgeo2023-063?ref=pdf&rel=cite-as&jav=VoR>--Soto, M., Morales, E., Veroslavsky, G., de Santa Ana, H.,

- Ucha, N., Rodríguez, P. (2011). The continental margin of Uruguay: Crustal architecture and segmentation. *Marine and Petroleum Geology*.
- Sheriff, R. E. (1980) *Seismic Stratigraphy*. IHRDC, Publishers, Boston, MA. 1st edition 1980. ISBN-13: 978-0-934634-51-9
- Soto, M., Morales, E., Veroslavsky, G., de Santa Ana, H., Ucha, N., Rodríguez, P. (2011). The continental margin of Uruguay: Crustal architecture and segmentation. *Marine and Petroleum Geology*, 28(9), 1676-1689.
- Stoakes, F.A., Campbell, C.V., Cass, R., Ucha, N. (1991). Seismic stratigraphic analysis of the Punta del Este Basin, offshore Uruguay, South America. *Bulletin American Association of Petroleum Geologists*, 75, 219–240.
- Sukmono, Sigit. (2020). *Practical Seismic Interpretation for Petroleum Exploration*.
- Ucha, N.; de Santa Ana, H., Veroslavsky, G. (2004). La Cuenca Punta del Este: geología y potencial hidrocarburífero. 173 - 192p. En Veroslavsky, G.; Ubilla, M., Martínez, S. (eds.), *Cuencas Sedimentarias de Uruguay: Geología, Paleontología y recursos naturales – Mesozoico*. DIRAC, Montevideo.
- Viera-Honegger, B., Morales, E., Soto, M., Conti, B. (2018): Seismic stratigraphy of the Eocene – Lower Oligocene in the Uruguayan continental margin, *Journal of Sedimentary Environments*, 3(4): 290-306.
- Will, T., Frimmel, H. (2018). Where does a continent prefer to break up? Some lessons from the South Atlantic margins. *Gondwana Research* (53), 9-19.
- Narayan Pandey, Y., Rastogi, A., Kainkaryam, S., Bhattacharya, S., Saputelli, L. (2020) *Machine Learning in the Oil and Gas Industry Including Geosciences, Reservoir Engineering, and Production Engineering with Python*. Apress.

Zhao, T. (2018). Seismic facies classification using different deep convolutional neural networks. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018. doi:10.1190/segam2018-2997085.1

## 10 Anexos

### 10.1 Algoritmos de procesamiento digital de imágenes utilizados

A continuación se proporcionan los links a la documentación de los algoritmos utilizados en la sección 6.3 *Análisis computacional de imágenes sísmicas*. Algoritmos para lenguaje de programación python de la librería [open computer vision](#).

- Algoritmo *blur* - [cv.GaussianBlur](#)
- Algoritmo *th2* - [cv.threshold](#)
- Algoritmo *th3* - *cv.threshold* combinado con *blur*
- Algoritmo *opening* - [cv.morphologyEx](#) - [cv.MORPH\\_OPEN](#)
- Algoritmo *closing* - [cv.morphologyEx](#) - [cv.MORPH\\_CLOSE](#)
- Algoritmo *gradient* - [cv.morphologyEx](#) - [cv.MORPH\\_GRADIENT](#)
- Algoritmo *tophat* - [cv.morphologyEx](#) - [cv.MORPH\\_TOPHAT](#)
- Algoritmo *blackhat* - [cv.morphologyEx](#) - [cv.MORPH\\_BLACKHAT](#)
- Algoritmo *opening* sobre *cv.threshold*

*«El resultado más importante de un estudio racional de la naturaleza es comprender la unidad y la armonía que subyace en este inmenso conjunto de entes y fuerzas»*

Alexander Von Humboldt - Cosmos