

Tabla de contenido

Resumen.....	I
Summary.....	II
Tabla de contenido.....	IV
Índice de Figuras.....	VII
1: Introducción.....	1
1.1.- Los Oroclinos: común en la arquitectura geodinámica.	2
1.2.- Oroclinos en Sudamérica: Andes centrales	8
1.4.-Problemáticas relacionadas al Oroclino Boliviano: Causas y Azares	14
1.5.-Las Heterogeneidades en la placa de Nazca y su relación con la placa Sudamericana.....	17
1.6.- Problemática: ¿Qué propicia el flexuramiento?	18
1.7.- Hipótesis de Trabajo	21
1.8.- Objetivo general.....	22
1.9.- Objetivos específicos	23
1.10.- Metodologías	23
2: Estado del arte en el conocimiento del Oroclino Boliviano y los procesos tectónicos relacionados.....	24
2.1- Estilos estructurales y edad de deformación en el flat-slab pampeano	25
2.2 – Rotaciones tectónicas y su relación a la construcción del orógeno andino.	27
3: The southern limit of the Central Andean Rotation Pattern.	32
The southern limit of the Central Andean Rotation Pattern	33
3.1- Introduction	34
3.2- Geological and tectonic setting between 25-31°S.....	37
3.2.1- Forearc Section	38

3.2.2- Sierras Pampeanas Section	40
3.3.- U-Pb LA-ICPMS and Ar-Ar Geochronology	41
3.3.1- Sampling and methodology	41
3.4- Paleomagnetism	43
3.4.1- Sampling and paleomagnetic techniques	43
3.4.2- Magnetic properties	45
3.4.3- Characteristic Directions.....	47
3.5.- Tectonic rotations in the South-Central Andes.....	56
3.5.1 Spatial variations.....	57
3.5.2 Temporal variations	59
3.6.- Local variations in rotations and their relation to structural heterogeneities	61
3.7.- Discussion: The CARP and its limits.....	63
3.10.- Conclusions	68
Acknowledgments.....	69
4: Tectonic rotations in the northermost Chile: A continuous view of the Bolivian Orocline Forearc.....	71
Tectonic rotations in the northermost Chile: A continuous view of the Bolivian Orocline Forearc. ¹	72
4.1- Introduction	73
4.2- Geological and tectonic setting between 18° and 23°S.....	76
4.3- Paleomagnetism	78
4.3.1- Sampling and paleomagnetic techniques	78
4.3.2- Magnetic properties	79
4.3.3- Characteristic Directions.....	81
4.4.- Discusion	88
4.4.1.-Tectonic rotations in the southern limb of Bolivian Orocline.	88

4.4.2.- Age of the tectonic block rotations	90
4.4.3.- Rotations around the Atacama Fault System	92
4.4.4 The segmentation of the CARP.	94
4.5.- Conclusions	98
Acknowledgments	100
5: Relaciones de heterogeneidades de la placa continental y oceánica en la deformación rotacional.	101
5.1.- Sectorización de los patrones de deformación rotacional.....	102
5.2.- Edad de las rotaciones en los andes Centrales.	111
5.3.- Límites de los patrones rotacionales: Lineamientos y debilidades corticales.	116
5.4.- Heterogeneidades de la placa subductante y su relación con los patrones rotacionales.....	122
5.5.- Heterogeneidades en el plano de Wadatti-Benioff: subducciones relictas.	127
5.6.- ¿Oroclino Boliviano o Arco Progresivo?	132
5.7.- Síntesis de la discusión.....	134
6: Conclusiones.....	135
Bibliografía	137
Anexos	173
Anexo A: Tablas de datos del capítulo 2	173
Anexo B: Tablas de datos del capítulo 3	181
Anexo C: Resumen presentado en AGU Fall Meeting (2015). San Francisco, EEUU. T23A-2909.....	187
Anexo D: Resumen presentado en en XIV Congreso Geológico Chileno (2015). La Serena, Chile.....	188

Anexo E: Resumen presentado en el XV Congreso Geológico Chileno (2018). Concepción, Chile. P.1267.....	192
Anexo F: Publicaciones de Coautor en revistas indexadas.....	193

Índice de Figuras

Figura 1.1 : Salientes de Montañas Oachita, en Oklahoma y Arkansas, estudiadas por Miser (1929).....	3
Figura 1.2: Modelos de curvamiento oroclinal según los planeamientos de Carey (1955).....	4
Figura 1.3: Clasificación de flexuras orogénicas. (A) corresponde a un arco primario con un vector de deformación uniforme, (B) un arco primario con un vector de deformación radia y (C) corresponde a un Oroclino. (Weil et al 2013).....	5
Figura 1.4: Curvaturas orogénicas formadas por heterogeneidades en los despegues de fajas plegadas y corridas según Marshak (2004).....	7
Figura 1.5: Flexuramientos producidos por irregularidades en el margen (Marshak, 2004).....	8
Figura 1.6: Principales Flexuras de América del Sur a lo largo de la cadena Andina.	10
Figura 1.7: Evolución del entendimiento del Oroclino Boliviano a través del entendimiento de las rotaciones tectónicas. Primero como un patron de rotaciones con un modelo de un orógeno previo totalmente recto (Heki et al., 1984), para luego entender los Andes pre-oroclinales como una cadena montañosa levemente arqueada, con una edad de deformación propuesta alrededor de los 12 My (Isacks, 1988), luego propuesta para el Cenozoico (Roperch et al., 1992), y luego para el Cretácico, enaltesiendo el rol de sistemas de fallas de rumbo (Randall et al., 1996).	12
Figura 1.8: Acortamientos calculados alrededor del Oroclino Boliviano. Compilacion basadas en los trabajos de Arriagada et al. (2008), Eichelberger et al. (2015) y	

Martínez et al. (2017). Las líneas blancas corresponden a los límites de terrenos acrecionados según Ramos (2010).....	16
Figura 1.9: Posición de los distintos Ridges observables en la placa de Nazca, y su correlación latitudinal con la placa sudamericana.	18
Figura 1.10 Hipótesis de deformación oroclinal, los bloques azules corresponden a una sectorización que representa las rotaciones de los distintos bloques antes mencionados: Bloque Arequipa (AR), Antofalla (AN), Atacama (AT), Elqui (EL) y Arauco (ARA).	22
Figura 2.1: Distintas secciones estructurales a través del valle del río Copiapo, denotando las geometrías similares, pero con interpretaciones disímiles.	25
Figura 2.2: Rotaciones tectónicas en los Andes Centrales de Chile. Los provienen de diversos estudios previos a este trabajo (Arriagada et al., 2006; Roperch et al., 2006; Somoza et al., 2015; Japas et al., 2016; Narea et al., 2015; Puigdomenech et al., 2020).	28
Figura 2.3: Distintos modelos de reconstrucción del margen continental de los Andes Centrales de acuerdo a datos de rotaciones tectónicas y acortamientos (Heki, et al., 1984; Isacks, 1988; Roperch et al., 2006; Arriagada et al., 2008).....	30
Figure 3.1: Central Andes and its main morphotectonic provinces. The black rectangles mark the locations of the paleomagnetic sites shown in figures 2 and 3.	35
Figure 3.2: Simplified geological map of the Andes in the flat-slab subduction zone, modified from SERNAGEOMIN (2003) and Gomez et al. (2019). The black squares represent paleomagnetic localities, or group of localities.	37
Figure 3.3: Simplified geological map of the Chilean Andes in the flat-slab subduction zone, modified from SERNAGEOMIN (2003). The black circles represent paleomagnetic sites, organized in localities (black squares), and the red squares correspond to the U-Pb samples from this work.....	38

Figure 3.4: Location of some of the Southern Puna- Sierras Pampeanas paleomagnetic sites. (a) Corresponds to Antofalla locality, (b) Tambillos and Guandacol localities and (c) Laguna Verde and Chascuil localities. 39

Figure 3.5: U/Pb age plots. Tera-Wasserburg plots are used for the intrusives, and Tuff-zircon plots for tuffs. 41

Figure 3.6: The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra of selected samples. The thickness of the gray rectangles for each step corresponds to 1σ uncertainty of apparent ages. ... 43

Figure 3.7: (a) Variation of magnetic susceptibility versus temperature, showing an important amount of magnetite carrying the magnetization, with an minor amount of hematite. (b) Normalized intensity of IRM versus magnetic field, the left one shows hematite as the main magnetic carrier in red beds, with some amounts of magnetite; the right one shows magnetite as the main magnetic carrier in extrusive rocks and intrusives, although there is a strong influence of hematite in tuffs. (c) Variation of magnetic intensity versus temperature, the rapid fall of intensity around 650°C shows hematite as an important magnetic carrier, but others show magnetite, pirrotine and maghemite as secondary magnetic carriers. 46

Figure 3.8: Orthogonal projections (in situ) of thermal (temperatures in $^\circ\text{C}$) or alternating field (steps in mT) demagnetization diagrams for samples from volcanic, sedimentary or intrusive rocks for each locality. The projections represent the paleomagnetic locations described in the text. The viscous overprint is removed during the first steps of demagnetization, and the ChRM component is defined linearly through the origin. Solid (open) circles correspond to the projection onto the horizontal (vertical) plane. 48

Figure 3.9: Equal-area projection of site-mean ChRM directions in situ (IS) and after tilt correction (TC) for localities listed in Table 2. Localities from 1 to 11 are in the north of the studied area, while 12-16 are in the south. Open (solid) symbols correspond to the projection in the upper (lower) hemisphere. 51

Figure 3.10: Simplified map of the Chilean Andes in the flat-slab subduction zone, modified from Martínez *et al.* (2013), with the paleomagnetic results of this work. 57

Figure 3.11: Variation in rotation in latitude and longitude for different age groups of samples, separated in the northern and southern domains..... 58

Figure 3.12: Tectonic sketch of how the inversion of the Mesozoic basins added more rotations to the K-T volcanosedimentary deposits, related to localities 1 and 2. See figure 10 to correlate with a plant-view map..... 63

Figure 3.13: Paleomagnetic rotations in the South American western margin. Different colors represent different magnetization ages. The orange cone above the circles correspond to the error margin of the rotation. 66

Figure 3.14: Schematic model of the rotational deformation segmentation and its consequences. The red arrows represent the different rotational domains north and south of 29°S, showing the latitudinal differences in the mean values. 68

Figure 4.1: (a) Digital map of the ocean floor age (Muller et al., 2008) and principal tectonic plates in central-south South America. The black box represents the studied area. (b) Rotational data in the studied area from previous works (Roperch et al 2006; Arriagada et al., 2006; Prezzi et al., 2014). (c) Simplified geological map of Central Andes between 18°-23° South Latitude. The black circles represent the paleomagnetic sites, the black rectangles paleomagnetic localities and the segmented line the Antofagasta-Calama Lineament (ACL). 74

Figure 4.2 : Orthogonal projections (in situ) of thermal (temperatures in °C) or alternating field (steps in mT) demagnetization diagrams for samples from volcanic, sedimentary or intrusive rocks for each locality. The projections represent the paleomagnetic locations described in the text. The viscous overprint is removed during the first steps of demagnetization and the ChRM component is defined linearly through the origin. Solid (open) circles correspond to projection onto the horizontal (vertical) plane and blacks circles correspond to vertical plane projection. 80

Figure 4.3: (a) Variation of magnetic susceptibility versus temperature (red heating and blue cooling), showing an important amount of magnetite carrying the magnetization, with a minor amount of hematite. (b) Variation of magnetic intensity

versus temperature, the rapid fall of intensity around 650°C shows hematite as an important magnetic carrier..... 82

Figure 4.4: Equal-area projection of site-mean ChRM directions *in situ* and after tilt correction for Domeyko and Coastal Range localities listed in Table 1. The localities *in situ* (IS) are in the left stereogram and the ones after tilt correction (TC) are in the right. Open (solid) symbols correspond to projection in the upper (lower) hemisphere. 84

Figure 4.5: Equal area projection of site mean directions for all the localities, plus localities from other works. PM= Palmer et al. (1980); HK=Heki et al.(1985); ST=Scalan and Turner (1992); RP= Roperch et al. (2006); AR= Arriagada et al. (2006b)..... 89

Figure 4.6: Variation of tectonic rotations versus latitude For the Andean forearc and for the Altiplano and Subandean Range domain, for different age groups of samples. The black smooth line shows a third-degree polynomial interpolation. The green rectangles shows the limit of the different patterns..... 90

Figure 4.7: Compilation of balanced cross-sections in the Central Andes (Arriagada et al., 2008; Eichelberger 2015; McGroder et al., 2015; Martinez et al., 2016), and its shortening associated..... 92

Figure 4.8: Variation of tectonic rotations versus longitude for the Andean Forearc between 18-22,5°S. and between 23-27°S. Both zones show likeness in the amount of rotations in Coastal and Domeyko ranges..... 94

Figure 4.9: Tectonic rotations around the Antofagasta-Calama Lineament. The different colors are made by a triangulation in the software GMT, based in the paleomagnetic data represented in the small circles. The big circles are the copper porphyries, separated by age due to distinc colors. 96

Figure 4.10: Tectonic rotations around the Bolivian Orocline, denoting the changes between the clockwise rotational pattern (south of 22-23°S) in the forearc, the counterclockwise rotational pattern (north of 19°S), also in the forearc, and the little rotational pattern between both previous ones..... 97

Figure 4.11: Schematic model of the rotational deformation segmentation and its consequences. The blue blocks represent the different domains of rotational changes, showing the latitudinal differences in the mean values, both in the Forearc and the Altiplano-Subandean Range. The red rotations in the western South American margin represents the Eocene-Oligocene rotational pattern of the CARP, and the yellow ones corresponds to the Miocene-Oligocene pattern 98

Figura 5.1: rotaciones tectónicas producidas por deformación diferencial controlada por una heterogeneidad estructural heredada..... 103

Figura 5.2: Rotaciones tectónicas en el ante arco Sudamericano. Cada círculo representa una localidad paleomagnética, con rotación según la escala de colores mostrada. Las localidades se encuentran agrupadas en las zonas de GCRZ (gentle clockwise rotations zone), SCRZ (strong clockwise rotations zone), SCCRZ (strong counterclockwise rotations zone) y LCCRZ (gentle-counterclockwise rotations zone). 104

Figura 5.3: Rotaciones paleomagnéticas versus latitud para el antearco de los Andes Centrales. Comparado con curvas de acortamiento según Arriagada et al. (2008), línea azul, y Kley y Monaldi (1998), curva roja para un modelo de 35 Km de espesor y cortical y curva amarilla para uno de 40 Km. Puede observarse de forma directa como la zona de nules rotaciones entre los 18-23°S corresponde a la zona de mayor acortamiento modelada. 105

Figura 5.4: Rotaciones tectónicas en el ante arco Sudamericano. Cada círculo representa una localidad paleomagnética según la escala de colores mostrada. Las localidades se encuentran agrupadas en las zonas de LCRZ (little clockwise rotations zone) y LCCRZ (little counterclockwise rotations zone). Nótese la gran diferencia en magnitud con respecto a la figura 36 de las rotaciones en el ante-arco. 107

Figura 5.5: (a) Rotaciones tectónicas en los Andes Centrales, luego de los resultados de este trabajo, (b) Triangulación de Delaunay utilizando los mismos resultados, (c) Triangulación de superficie continua, también con los mismos datos. Los puntos negros en (b) y (c) muestran la ubicación de los datos. 108

Figura 5.6: Rotaciones tectónicas medias para cada cuadrado Latitud-Longitud de los Andes Centrales. (a) Disposición de cuadrángulos, (b) interpolación de datos por triangulación de Delaunay, (c) e interpolación de datos en superficie continua. Todos los gráficos utilizan los mismos datos.	109
Figura 5.7: Triangulación de los datos de rotaciones tectónicas, realizados el software GMT 5 (Wessel et al., 2013) a la izquierda, y triangulación mostrada en Arriagada (2018). La triangulación muestra de forma continua no solo la segmentación latitudinal, sino que muestra una clara diferencia con la variación de las rotaciones longitudinalmente, así como ciertos patrones anómalos dentro de las grandes segmentaciones.	111
Figura 5.8: Rotaciones tectónicas versus Edad (en millones de años). La curva roja representa una regresión lineal con un coeficiente de correlación de 0.44418. Nótese la cima de la curva alrededor de los 80-90 My.....	112
Figura 5.9: Superficie interpolada para magnitud de rotaciones tectónicas pre 35 My (izquierda) y pos 35 My (derecha). Puede observarse de forma clara las altas rotaciones horarias producidas el Chile relacionado al evento incaico y anteriores.	113
Figura 5.10: Comparación entre la reconstrucción del margen continental andino a los 45 millones de años de Arriagada et al. (2008), en la parte superior, y modelo propio generado por Gplates en la parte inferior.....	115
Figura 5.11: Cambios longitudinales en las rotaciones entre los 18° y 26°S, designando las rotaciones a las distintas geomorfologías andinas.....	117
Figura 5.12: Principales sistemas de fallas N-S, siendo SFA el sistema de fallas de Atacama y SFD el sistema de fallas de Domeyko; junto con algunos lineamientos importantes, como la falla Barazarte (FB), la falla Taltal (FT) y el lineamiento de la carretera Antofagasta-Calama.	119
Figura 5.13: Definición y extensión área de terrenos acrecionados paleozoicos por distintos autores. Nótese la intensa diferencia entre la definición de los bloques de Arequipa y Antofalla (siendo incluso fusionados en algunas interpretaciones) y de la posición y extensión de Chileña.	120

Figura 5.14: Datos de rotaciones interpolados en una superficie continua. Izquierda: el área achurada en negro corresponde a la zona interpretada para las cuencas del Oxfordiano, mientras el área en blanco corresponde a las cuencas del Pliensbachiano, según Vicente, J.C.(2006). Derecha: el área entre las líneas segmentadas correspondo a los límites de terrenos acrecionados definidos por Ramos, V. et al. (2010). 121

Figura 5.15: (a) Topografía y Batimetría del margen occidental Sudamericano; (b) Anomalia gravitacional de Bouguer según el modelo EIGEN-GRGS.RL04 (Lemoine et al., 2019), (c) Espesor cortical para la placa de Nazca según Pérez-Gussinyé et al.(2008). Se marca con el nombre los Ridges mas importantes reconocidos en la placa de nazca, junto con curvas de contorno para la topografía y anomalia gravitatoria..... 123

Figura 5.16: Comparación de las posiciones de distintos ridges subductados en el margen occidental de Sudamérica (negro Taltal, verde Copiapo y amarillo Juan Fernandez) comparado con una interpolación de datos de rotaciones en superficie continua para cada edad. Puede notarse a modo general, que las rotaciones altas se concentran en una zona que no necesariamente esta gatillado por el paso de estas heterogeneidades. La escala de colores de rotaciones es la misma de la Figura 5.14. 125

Figura 5.17: Comparación de las posiciones de distintos ridges subductados en el margen occidental de Sudamérica (negro Taltal, verde Copiapo y amarillo Juan Fernandez) comparado con graficos de cajas de rotaciones vs latitud. Otra forma de observar como el paso de estas heterogeneidades no produce un efecto notable en los patrones de rotaciones tectónicas. 126

Figura 5.18: Rotaciones tectónicas entre 25-5 Ma alrededor de los Andes Centrales. Heterogeneidades de la placa de Nazca han sido graficadas en sus latitudes de subducción correspondientes, y se compara con las distintas extensiones latitudinales de ruptura de sismos (Ruiz y Madariaga, 2018). 129

Figura 5.19: Sismicidad producida por la subducción de la placa de Nazca. El mapa superior izquierdo muestra el catálogo NEIC de profundidades mayores a 20 Km en

puntos azules, en rojo se encuentran marcadas las zonas de fractura de la placa oceánica, y rodeadas por líneas negras segmentadas los distintos ridges (NR: Nazca Ridge; IR: Iquique Ridge; TR: Taltal Ridge; CR: Copiapó Ridge; JFR: Juan Fernández Ridge). SF y NF corresponden a un plegamiento al sur y norte del Oroclino, respectivamente. El Mapa superior derecho muestra los sismos en una escala de colores donde los azules son los más profundos, extendiendo las zonas de fractura en el continente desde una grilla de campo total magnético. El esquema inferior es una visión 3D del catálogo NEIC, relacionando las distintas heterogeneidades en profundidad..... 130

Figura 5.20: Rotaciones entre los 18-23°S de la región del Altiplano-Puna-Sierras Subandinas de Sudamérica, comparado con la profundidad de eventos sísmicos en la región. El área definida como “Tocopilla slab tear zone” corresponde a la línea segmentada en negro y nombrada como SF en la figura anterior..... 131

Figura 5.21: Formación de la Cordillera de la costa (en verde) en el Cetácico Inferior y su posterior flexuramiento en el Cretácico Superior en adelante. La posterior formación de la Cordillera de los Andes (en naranja) sincronica a rotaciones tectónicas producidas en su interior, nos permite redefinir los conceptos oroclinales en los Andes Centrales.. 131