

Análisis geométrico y cinemático del anticlinal Puquín, Cusco - Perú

Yessenia Puma-Enriquez^{1*}; Wilson López-Abanto²; José Cárdenas-Roque¹

¹Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú. (*) 170401@unsaac.edu.pe, jose.cardenas@unsaac.edu.pe

²Consultor independiente, Lima, Perú. wilsonlopezgeo@gmail.com

Resumen

El anticlinal de Puquín es una estructura geológica ubicada en la región de Cusco que se extiende ~9,8 km. En el núcleo del anticlinal afloran rocas sedimentarias de la Formación Puquín (Cretácico Tardío); en los flancos afloran rocas sedimentarias de las formaciones Quilque (Paleoceno Temprano), Chilca (Paleoceno Tardío), Kayra (Eoceno) y Soncco (Eoceno-Oligoceno). Tiene un rumbo de eje de pliegue N-S, se caracteriza como un pliegue asimétrico, cerrado en su porción norte y centro y abierto en su porción sur, y con eje con doble inmersión de ~21°S y ~34°N. El flanco frontal presenta mayor engrosamiento que el flanco trasero y es atravesado por un retrocorrimento. Por sus características el anticlinal de Puquín es interpretado como un pliegue por propagación de falla transportado. El acortamiento calculado a partir de tres secciones estructurales, realizadas por el método de *trishear*, es de 8,32 km (15,1%), 8,61 km (12,1%) y 8,62 km (12,0%) para las zonas norte, centro y sur, respectivamente. El análisis del patrón de fracturas, fallas y vetillas realizado en 23 estaciones estructurales en distintos sectores del anticlinal permitió distinguir 5 juegos de orientaciones: ONO-ESE, NNE-SSO, O-E, NE-SO y OSO-ENE. Estas estructuras son compatibles con el arreglo estructural que se origina en los pliegues, específicamente en este caso con el pliegue de Puquín.

Palabras clave: Pliegue por propagación de falla; Trishear; Kink; Análisis estructural.

Geometric and kinematic analysis of the Puquín anticline, Cusco - Perú

Abstract

The Puquín anticline is a geological structure located in the Cusco region that extends ~9.8 km. In the core of the anticline, sedimentary rocks of the Puquín Formation are exposed. Likewise, sedimentary rocks of the Quilque, Chilca, Kayra and Soncco formations outcrop on the flanks of the anticline. It is an asymmetric fold with a N-S fold axis strike, closed in the northern and central portion and open in the southern portion, and has a double dip axis of approximately 21°S and 34°N. The front flank shows greater thickening than the rear flank and is traversed by a backthrust. Based on these features, the Puquín anticline is interpreted as a fault-propagation fold. The shortening calculated from three structural sections, carried out by the trishear method, is 8.32 km (15.1%), 8.61 km (12.1%) and 8.62 km (12.0%) for the northern, central and south cross-sections, respectively. The analysis of the pattern of fractures, faults and veinlets carried out in 23 structural stations in different sectors of the anticline made it possible to distinguish 5 sets of orientations: WNW-ESE, NNE-SSW, W-E, NE-SW and WSW-ENE. These structures are compatible with the structural arrangement that originates in the folds and in this case with the Puquín fold.

Keywords: Fault propagation fold; Trishear; Kink; Structural analysis.

Forma de citar: Puma-Enriquez, Y.; López-Abanto, W.; Cárdenas-Roque, J. (2024). Análisis geométrico y cinemático del anticlinal Puquín, Cusco - Perú. *Boletín de Geología*, 46(3), 147-168. <https://doi.org/10.18273/revbol.v46n3-2024006>

Introducción

Los pliegues son definidos por Sitter (1976) como estructuras dúctiles, aun cuando a menudo llevan asociadas estructuras frágiles. Esto es debido a que algunas rocas, principalmente las sedimentarias, tienen un comportamiento dúctil, incluso a temperatura ambiente, al menos hasta adquirir una cierta cantidad de deformación. La presente investigación busca analizar la geometría del anticlinal de Puquín, el cual es una estructura geológica ubicada en la región de Cusco (Figura 1). En el núcleo del anticlinal afloran rocas sedimentarias del Cretácico Tardío de la Formación Puquín; en los flancos afloran rocas sedimentarias del Paleoceno-Oligoceno de las formaciones Quilque, Chilca, Kayra y Soncco y rocas volcano-sedimentarias del Oligoceno-Mioceno del Grupo Tacaza.

En el área de estudio no existe un trabajo de investigación detallado sobre el análisis geométrico y cinemático del anticlinal de Puquín, aunque se resaltan trabajos a mayor escala o regionales de Carlotto (1998) y Carlotto *et al.* (2011). La configuración geológica y estructural en esta área es muy interesante, ya que presenta gran variación, por lo cual es necesario tener información actualizada que sirva como base para otras investigaciones cercanas al área de estudio.

El interés por comprender el desarrollo geométrico de los pliegues se remonta a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, cuando se realizaron algunos de los primeros modelos y estudios para comprender los mecanismos de plegamiento y fallamiento (Heim, 1878; Peach *et al.*, 1888; Cadell, 1889; Buxtorf, 1916; Rich, 1934, entre otros). El fuerte desarrollo de las industrias mineras y petroleras, en la segunda mitad del siglo XX, reveló la necesidad e importancia de conocer con la mayor exactitud posible la geometría de las estructuras en subsuelo. Así, durante las décadas de los 80 y 90, surgieron los modelos clásicos de pliegues relacionados a fallas (*fault-related folds*), con geometría tipo *kink*, y sustentados en las premisas de conservación de áreas o longitudes de capas, que permiten reconstruir completamente una estructura conociendo sólo algunos parámetros del pliegue (Suppe, 1983, 1985; Jamison, 1987; Mitra, 1990, 2002; Suppe y Medwedeff, 1990; Poblet, 2004, entre otros).

El objetivo principal de este trabajo es analizar la geometría y cinemática del anticlinal de Puquín, esencialmente a partir de datos estructurales de campo.

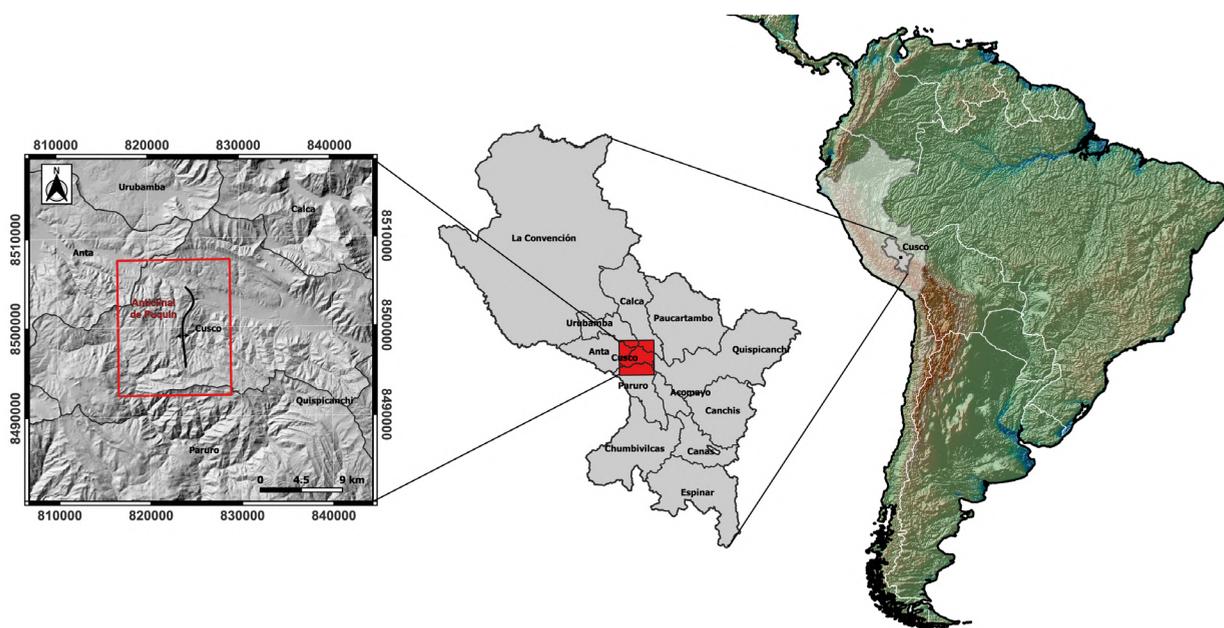


Figura 1. Ubicación del área de estudio, indicando el anticlinal de Puquín.

Marco geológico

Contexto tectonoestratigráfico regional

El área de estudio está ubicada en la región de Cusco, que geomorfológicamente pertenece al Altiplano, y está delimitada por dominios estructurales, con

orientaciones paralelas a la cadena andina de dirección NO-SE. Al norte el sistema de fallas Urcos-Ayaviri y al sur el sistema de fallas Cusco-Lagunillas (Figura 2). También se tiene la evidencia de múltiples eventos de deformación (Figura 3).

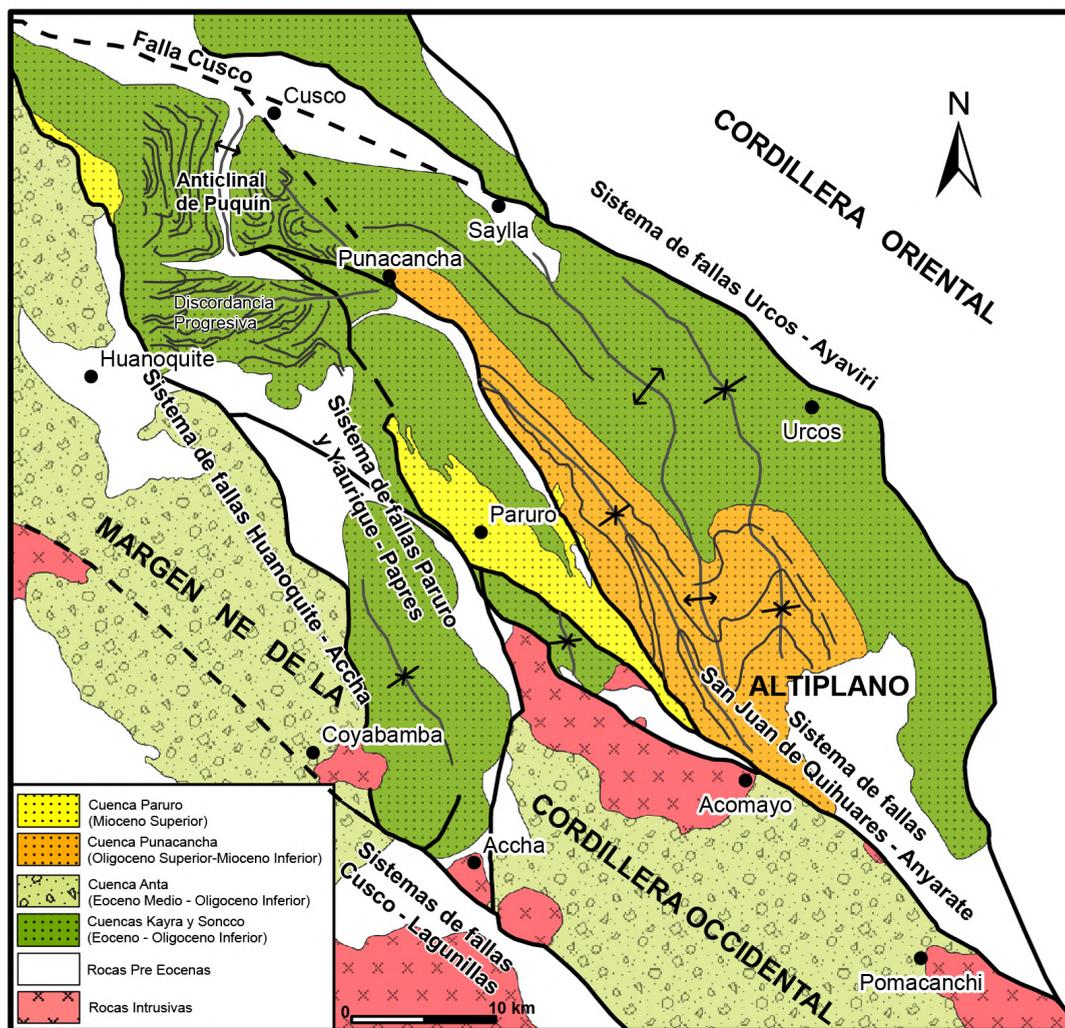


Figura 2. Mapa de la geología regional de la zona de estudio que muestra las cuencas cenozoicas y estructuras principales. Modificado de [Carlotto \(2013\)](#).

La serie estratigráfica del Cretácico Temprano tectónicamente representa un régimen extensional, registrado en la Formación Maras (Carlotto *et al.*, 1996), formada por pelitas rojas y masas evaporíticas (Callot, 2008). Según Carlotto *et al.* (2011), en la serie estratigráfica del Cretácico Tardío está caracterizado por un cambio paleogeográfico regional, ya que se pasa de una sedimentación carbonatada a una sedimentación detrítica fina y evaporítica, es decir de la Formación Ayabacas al Miembro M1 de la Formación Puquín, debido al inicio del levantamiento de la zona costera que comenzó a separar la cuenca occidental del mar abierto. Este cambio paleogeográfico marca el inicio del periodo de deformaciones conocido como evento peruano (Jaillard y Sempere, 1989; Jaillard, 1993, 1994; Carlotto, 1998). En el límite Cretácico-Paleoceno, una importante erosión ocurrió hacia el límite Maastrichtiano-Paleoceno, lo que produjo la discordancia entre las formaciones Quilque (Paleoceno) y Puquín (Cretácico Tardío). En el Eoceno Temprano, movimientos dextrales a lo largo de las fallas NNO-SSE, y sinestrales sobre fallas E-O, son responsables de la depresión romboédrica de la cuenca continental Kayra (Figura 2). Estos movimientos son interpretados como consecuencia de un evento tectónico transtensivo entre 52 y 43 Ma (Carlotto, 1998).

En el Eoceno Medio-Oligoceno Temprano tuvo lugar el evento tectónico Inca (43-30 Ma), que dio origen a la cuenca Anta formada dentro del sistema de fallas Cusco-Lagunillas, y al norte, la cuenca Soncco (Figura 2). Tanto las cuencas Anta como Soncco fueron deformada por tectónica sinsedimentaria. Esta tectónica Inca generó cabalgamientos y discordancias progresivas entre las formaciones Kayra y Soncco. En el Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano, tuvo lugar la tectónica Quechua, y a lo largo del sistema de fallas San Juan de Quihuare-Anyarate se generó la depresión romboédrica de la cuenca continental Punacancha (Figura 2).

El periodo Neógeno está caracterizado por una actividad tectónica y sedimentaria importante con el relleno de cuencas sinorogénicas intramontañosas. Durante el Neógeno ocurrió un cambio tectónico

que dio paso a movimientos sinestrales a lo largo de los principales sistemas de fallas NO-SO y E-O, ya estructurados previamente en el Eoceno y que tuvieron juegos dextrales y de contracción pura. En el Mioceno Tardío la tectónica Quechua continua; alrededor de los 12 Ma, una compresión regional E-O (primer periodo) dio lugar a movimientos de rumbo sinistral a lo largo del sistema de fallas Yaurisque-Papres y Paruro que provocaron la individualización romboédrica de la cuenca Paruro (Figura 2), de tipo *pull apart*. El relleno corresponde a una sedimentación lacustre y fluvial, acompañado de actividad volcánica del Miembro I de la Formación Paruro. Un segundo periodo está marcado por una compresión regional NE-SO que se traduce por el movimiento inverso de las fallas Yaurisque-Papres y Paruro, y por una sedimentación gruesa de conos aluviales que progradan al norte sobre los depósitos fluviales, así como el desarrollo de discordancias progresivas en el Miembro II.

En el Plioceno-Cuaternario se emplazaron los depósitos aluviales y fluvio-torrenciales de la Formación Chinchero. Estas series están afectadas por deformaciones contraccionales E-O (Cabrera, 1988). La Formación San Sebastián del Pleistoceno Temprano se deposita en las depresiones formadas en el Plioceno y ya rellenas en los bordes por la Formación Chinchero. Después del evento compresivo, la evolución tectónica es dominada en el Pleistoceno basal o límite Plioceno-Pleistoceno, por un régimen de extensión, con extensión casi E-O, que está relacionado con el funcionamiento inicial de la cuenca Cusco (Cabrera, 1988). En el Pleistoceno Temprano el funcionamiento de la cuenca San Sebastián fue interrumpido por deformaciones contraccionales sinsedimentarias y postsedimentarias (fallas inversas y flexuras) que indican dos direcciones de acortamiento: N-S y E-O. Después de este periodo de compresión y hasta la época actual, la región de Cusco está dominada por una extensión de dirección N-S. Así, un conjunto de fallas cuaternarias activas se debe a esta extensión de dirección N-S, como la falla de Tambomachay. La variación de esfuerzos estaría ligada a la interacción de fuerzas debido a la convergencia y las fuerzas asociadas a la alta topografía (Cabrera, 1988).

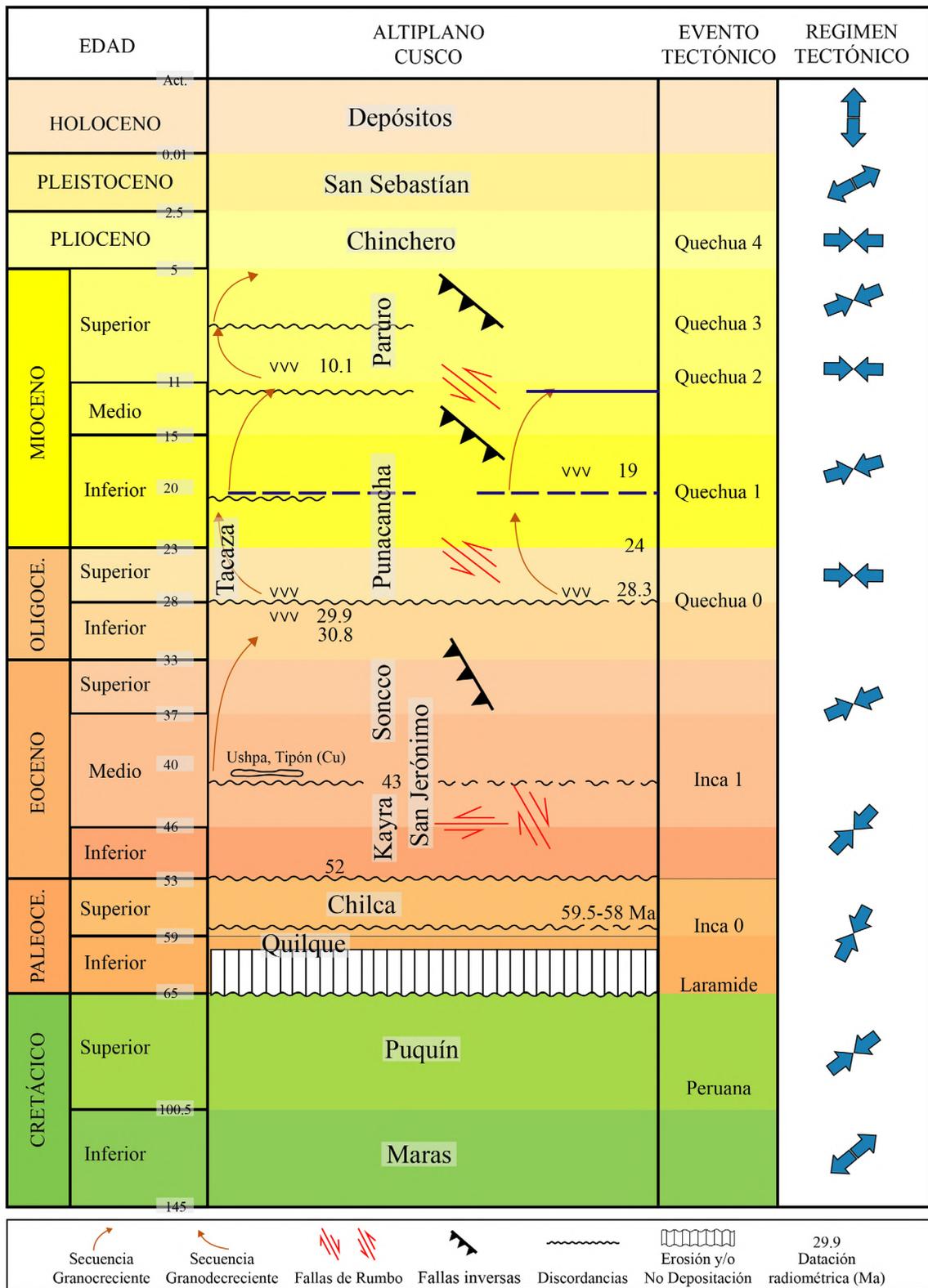


Figura 3. Correlación de las edades de las unidades estratigráficas del Altiplano para el cuadrángulo de Cusco y su régimen tectónico. Modificado de Carlotto (1998) y Carlotto et al. (2005).

Contexto estratigráfico del anticlinal de Puquín

La estratigrafía del anticlinal de Puquín comprende capas cretácicas como las formaciones Maras y Puquín, capas paleógenas como las formaciones Quilque, Chilca, Kayra, Soncco, y el Grupo Tacaza (Figura 4). Según la información y comprobación en campo, se hará la siguiente descripción.

Formación Maras: la Formación Maras se caracteriza por presentar los afloramientos caóticos de yesos y lutitas, el espesor total de esta unidad es difícil de calcular debido a su arreglo caótico en la zona de estudio, sin embargo, puede estimarse entre 100 y 400 metros (Carlotto *et al.*, 2011).

En la zona de estudio está ampliamente distribuida, tanto en la parte norte como en la parte sur, y la litología que presenta son calizas, margas, yesos y lutitas rojas.

Formación Puquín: la Formación Puquín sobreyace a la Formación Ayabacas, pero, en general, el contacto corresponde a un nivel de despegue. Presenta un espesor aproximado de 380 metros y está dividida en tres miembros llamados M1, M2 y M3 (Carlotto *et al.*, 2011).

En la zona de estudio, la Formación Puquín es parte del núcleo del anticlinal, también aflora en la zona sureste como parte del flanco, y la litología que presenta son calizas, margas, lutitas rojas, verdes y negras ricas en materia orgánica en la mayoría alteradas, areniscas feldespáticas finas a medias en las que se observan venillas, costras y nódulos de calcita, óxidos de hierro y marcas de clastos blandos; presenta también estructuras sedimentarias ondulantes.

Formación Quilque: la Formación Quilque reposa en discordancia erosiva sobre la Formación Puquín y presenta un espesor aproximado de más de 150 metros (Carlotto *et al.*, 2011).

En la zona de estudio, la Formación Quilque forma parte del flanco este y oeste del anticlinal, y la litología que presenta son areniscas finas, medias y gruesas de color rojo, algunas están intercaladas con materiales más finos como lutita. Se observan clastos blandos de 10 cm de diámetro mayor, vetillas, costras y nódulos de calcita, clastos líticos de 4 mm de diámetro mayor. Hacia el tope son más deleznable y presentan estructuras sedimentarias como laminación cruzada lenticular, *tool marks*, rizaduras de corriente, laminación paralela, grietas de desecación, *flute mark*, nódulos o concreciones y sísmas.

Formación Chilca: la Formación Chilca se distribuye del mismo modo que la Formación Quilque (Figura 4). Se encuentra en discordancia erosional sobre la Formación Quilque y bajo la Formación Kayra, y presenta un espesor aproximado de más de 100 metros (Carlotto *et al.*, 2011).

En la zona de estudio, la Formación Chilca es parte de ambos flancos del anticlinal, aflora en la zona sureste y suroeste en pequeños bloques. La litología que presenta son areniscas feldespáticas y cálcicas finas y medias, algunas se encuentran intercaladas con materiales más finos como lutita; se observan clastos blandos, vetillas, costras y nódulos de calcita, presentan estructuras sedimentarias como laminación paralela, laminación cruzada planar de bajo ángulo, laminación cruzada lenticular, rizaduras de corriente, grietas de desecación, *flute mark* e icnofósiles.

Formación Kayra: la Formación Kayra sobreyace a la Formación Chilca e infrayace a la Formación Soncco (Figura 3), el espesor de esta unidad varía entre 2000 a 3000 metros (Carlotto *et al.*, 2011).

En la zona de estudio, la Formación Kayra forma parte de ambos flancos del anticlinal, también aflora en la zona sur en el cerro Quinsa Cruz al este del poblado Ccoyac en bloques. La litología que presenta son areniscas feldespáticas finas a medias intercaladas con niveles de lutitas rojas, microconglomerados con clastos volcánicos y cuarcíticos. Se observan clastos blandos, vetillas, costras y nódulos de calcita, presentan estructuras sedimentarias como laminación y estratificación cruzada, laminación paralela, *flute mark* y rizaduras de corriente. Las areniscas presentan una textura particular debido al proceso de diagénesis diferencial.

Formación Soncco: la Formación Soncco sobreyace concordantemente o en discordancia progresiva a la Formación Kayra. Presenta un espesor aproximado entre 1200 y 2300 metros, y se divide en dos miembros: el Miembro I o inferior (200-300 m) y el Miembro II o superior (1000-2000 m) (Carlotto *et al.*, 2011).

En la zona de estudio, la Formación Soncco forma parte de ambos flancos del anticlinal, así como también aflora en la zona suroeste en bloques más grandes, la litología que presenta son areniscas feldespáticas finas, medias y gruesas con mineralización de Cu (malaquita y piritita) intercaladas con niveles de lutitas rojas, microconglomerados con clastos volcánicos de diámetro mayor a 10 cm. Se observan clastos

blandos, vetillas de calcita, costras de óxidos de hierro, estructuras sedimentarias como laminación cruzada, paralela y *flute mark* en las areniscas.

Grupo Tacaza: el Grupo Tacaza cronológicamente pertenece al Oligoceno Tardío (Newell, 1949). Aflora al oeste y suroeste del área de estudio en el poblado Huayllay. La litología que presenta corresponde a brechas, lahares, volcanoclásticos con clastos de andesitas, tobas líticas brechadas y alteradas, y presenta estructuras de tipo láminas o capas.

Contexto estructural del anticlinal de Puquín

Las capas rojas del Grupo San Jerónimo (formaciones Kayra y Soncco) descansan en discordancia erosional sobre las formaciones Quilque y Chilca del Paleoceno, todas fuertemente deformadas. Los pliegues en las capas rojas muestran en general dos esquistosidades: una esquistosidad S1 de dirección NO-SE a ONO-ESE, paralela a los pliegues y fallas de primera generación, y la otra S2, NE-SO a N-S, que recorta a S1 y es paralela a pliegues de una segunda generación (Carlotto, 2006).

A partir del mapa geológico del área de estudio se presenta estructuras tanto al norte como al sur (Figura 4). La falla de cinemática normal que se encuentra al norte es la falla de Cusco, la falla de cinemática inversa que se encuentra al sur es la falla Paruro, la falla normal que se encuentra al oeste del área de estudio es la falla de Casacunca y el pliegue que presenta un eje de dirección N-S es el anticlinal de Puquín.

Metodología

Para estudiar las características en superficie del anticlinal de Puquín y las estructuras asociadas en toda su extensión, se utilizó información bibliográfica existente del área de estudio, se llevó a cabo el procesamiento de imágenes satelitales *Aster LIT*, *Landsat 8 OLI* y *Sentinel 2A* de la *USGS Earth Explorer* para determinar unidades y estructuras geológicas. También se realizó un cartografiado geológico detallado del área de estudio, en donde se midieron datos estructurales como rumbo y buzamiento de la estratificación posicionados mediante GPS, los cuales fueron registrados sobre un mapa topográfico y utilizando el programa QGIS 3.4.12, y permitieron confeccionar el mapa geológico a escala 1:75.000 (Figura 4).

Se efectuaron en el terreno 3 transectas estructurales de orientación aproximada E-O (D-D', E-E' y F-F'), Figura 4) sobre las cuales se densificó la medición de buzamientos para luego realizar la reconstrucción geométrica del anticlinal Puquín. A lo largo del área de estudio, se eligieron 23 sitios para efectuar estaciones estructurales sobre las formaciones Puquín, Quilque, Chilca, Kayra, Soncco y el Grupo Tacaza, distribuidos en ambos limbos y en la charnela del anticlinal (Figura 3), en cada una de las cuales se midieron y describieron los juegos de vetillas, fracturas y fallas presentes. Todas las fracturas medidas fueron graficadas y analizadas estadísticamente en la red estereográfica de igual área (Schmidt y Lambert), mediante el programa *Stereonet* (Allmendinger et al., 2012); se ilustraron los diagramas de densidad de polos, lo que permitió distinguir con más claridad las orientaciones dominantes.

El mapa geológico detallado y las tres secciones estructurales E-O dan información geométrica del anticlinal de Puquín y ayudan en la realización del modelo en 2.5D. Por lo tanto, a partir del cartografiado local, se obtiene de manera indirecta los espesores de las formaciones aflorantes. Para analizar la geometría del anticlinal de Puquín, se construyeron tres modelos directos usando el software *Fault Fold Forward* (Allmendinger, 2012), a partir de las secciones geológicas norte (D-D'), centro (E-E') y sur (F-F'), realizadas por la metodología de *kink*. Este programa, que permite reconstruir las estructuras como pliegues por propagación de falla a partir de la metodología de *trishear*, sirve para calcular el acortamiento en cada etapa de deformación y depende de dos variables como el ángulo apical de la zona *trishear* y la relación propagación-deslizamiento (p/s). En base a estos parámetros, se reconstruyó la estructura completa utilizando el modelo de pliegue relacionado a falla que mejor se ajusta a los datos relevados.

Resultados

Mapa geológico

El anticlinal de Puquín comprende unidades cretácicas como las formaciones Maras y Puquín, unidades paleógenas como las formaciones Quilque, Chilca, Kayra, Soncco y el Grupo Tacaza (Figura 4). Según la información y comprobación en campo se presenta el siguiente mapa geológico a escala 1:75000.

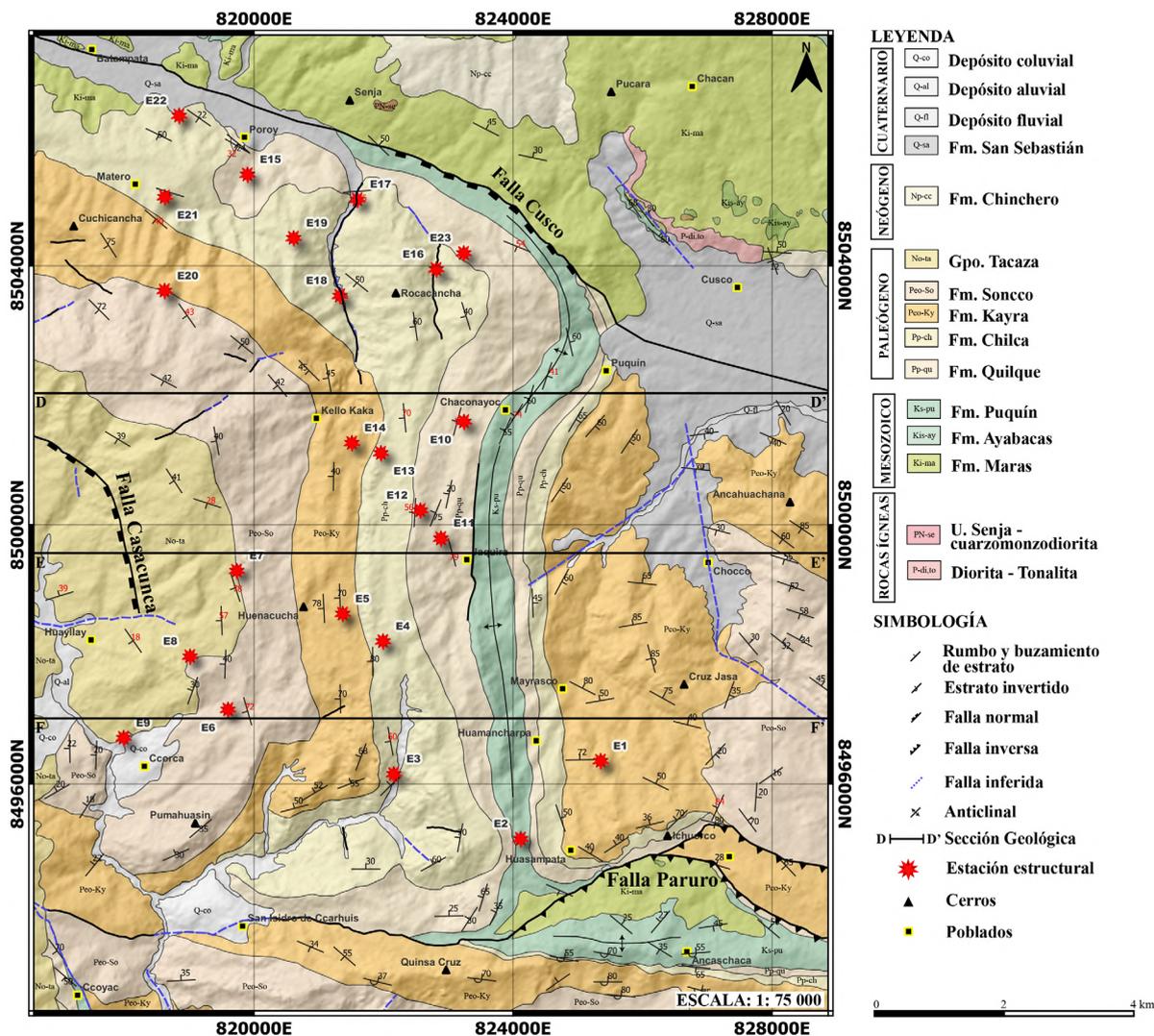


Figura 4. Mapa geológico del área de estudio donde se muestran las estaciones estructurales realizadas en este trabajo. Modificado de Carlotto *et al.* (2011).

Secciones transversales

Sobre el mapa geológico elaborado se trazaron tres secciones geológicas de dirección O-E, cortando de manera perpendicular al anticlinal de Puquín (Figura 4). Sobre la base de los datos de buzamiento medidos se llevó a cabo una reconstrucción de la geometría superficial de las estructuras aplicando el método *kink* de las bisectrices, el cual permite conservar constante el espesor de las unidades, por lo cual se obtiene una primera aproximación de la sección para su posterior interpretación en profundidad.

Secciones transversales - método *kink*: las secciones geológicas transversales en dirección O-E fueron denominadas D-D' (Norte), E-E' (Centro) y F-F' (Sur). Se interpreta que en el anticlinal de Puquín, la litología

que presenta aflorando es de edad Cretácica, Paleógena hasta Cuaternaria, como las capas de las formaciones Maras, Puquín, Quilque, Chilca, Kayra, Soncco, Grupo Tacaza y Formación San Sebastián (Figura 5). En las secciones también se observó que el núcleo del anticlinal está conformado por una capa Cretácica de la Formación Puquín. La variación de espesor de las capas en cada flanco del anticlinal es notoria y la vergencia es oeste. En la sección D-D', la proyección estereográfica de los datos estratigráficos de las capas aflorantes en el tramo deja representar los flancos del pliegue, y la intersección de estos planos deja visualizar el eje de pliegue, este es un dato estructural lineal que estaría representado por un punto (Figura 5), con una inmersión hacia el suroeste con $12,6^\circ$ considerada como baja. En la sección E-E' (Figura

5) se representa el anticlinal de Puquín, pero también dos fallas geológicas: una al oeste, la falla Casacunca, de cinemática normal y la falla Tancarpatá al este con cinemática inversa. La proyección estereográfica de los datos estratigráficos de las capas aflorantes en el tramo representa los flancos del pliegue, y la intersección de estos planos representan el eje de pliegue; con esto se determina la inmersión de dirección suroeste de $30,4^\circ$

considerada baja. Finalmente, en la sección F-F' se representa la proyección estereográfica de los datos estratigráficos de las capas aflorantes en el tramo, donde se observan los flancos del anticlinal de Puquín y la dirección de inmersión es noroeste de $34,5^\circ$, considerada mediana.

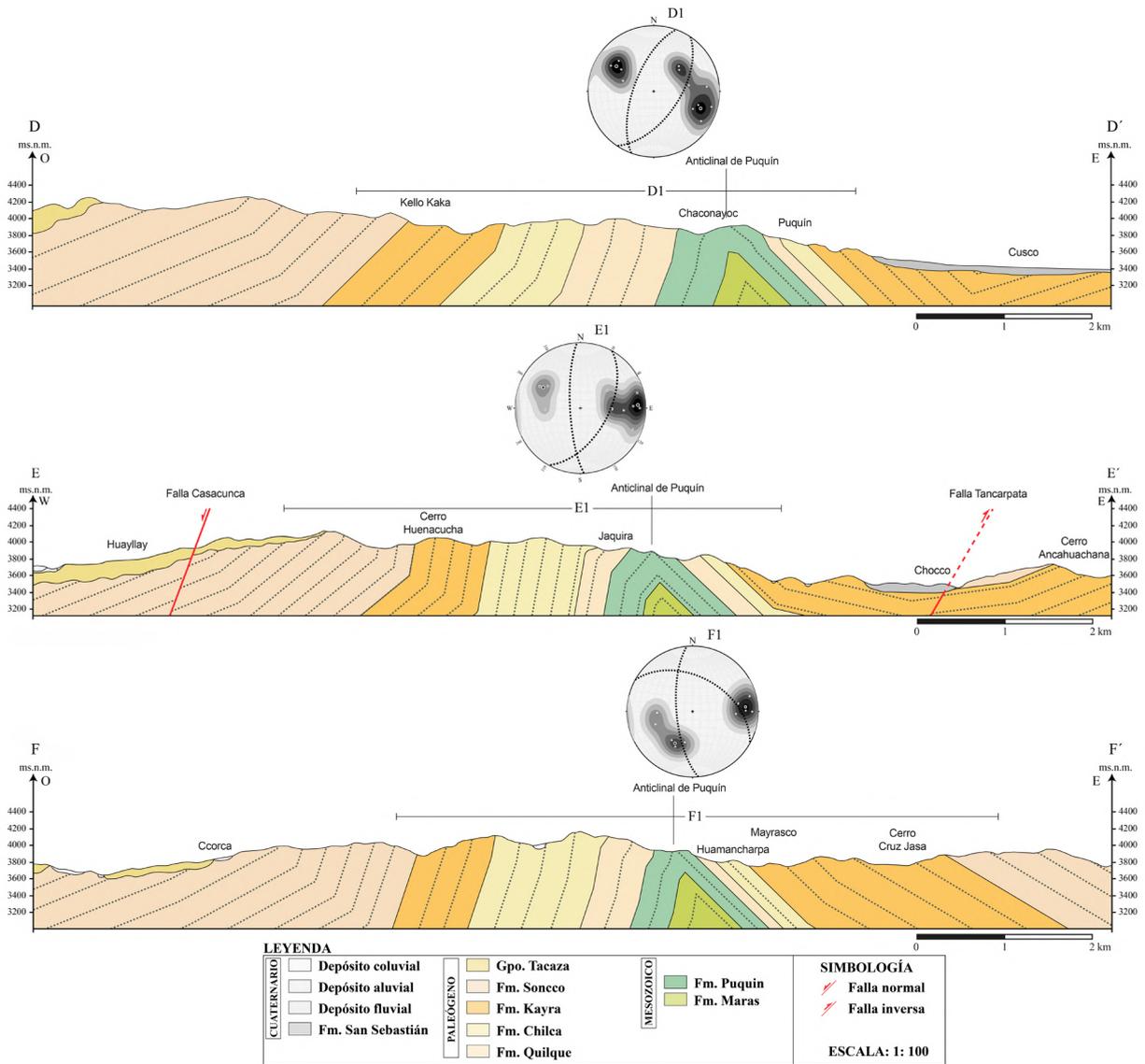


Figura 5. Secciones geológicas locales D-D' al norte, E-E' al centro y F-F' al sur del área de estudio en dirección O-E, construidas con la metodología de *kink*.

Caracterización del anticlinal de Puquín

Análisis de datos de estratificación: la recolección de datos de estratificaciones se llevó a cabo en zonas con buenas condiciones estructurales para la toma de información; se evitaron datos que pudieran ser muy locales y por ende en el procesamiento de información fueran datos aleatorios. Durante las visitas a campo se tomaron 227 datos de estratificaciones.

Según el análisis de datos de estratificación, para determinar algunas características y presentar los resultados, se dividió el área en dos zonas: zona norte y zona sur; de las 23 estaciones, 9 estaciones se encuentran en la zona norte (E15, E16, E17, E18, E19, E20, E21, E22 y E23) del área de estudio, y 14 se ubican en el lado sur (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11, E12, E13 y E14) del área de estudio (Figura 4).

Zona norte: El análisis de poblaciones de estratificación se realiza con la aplicación de técnicas estadísticas a partir del tratamiento de los datos de orientación. Con un total de 80 datos de estratificación en esta zona norte, se plotean en el gráfico de proyección estereográfica (Figura 6); se observa un conjunto de datos con orientación aproximadamente NO-SE, pero también se observan algunos datos variables puntuales.

Como parte de la interpretación, estos datos forman parte del flanco oeste con un promedio de planos de estratificación de 122/45 en el que posiblemente hay una rotación de estratificación debido a una estructura importante como la falla regional de Cusco.

Zona sur: Con un total de 147 datos de estratificación, en esta zona sur se plotea en el gráfico de proyección estereográfica (Figura 7A), donde se distinguen 3 familias de estratificaciones. La familia más representativa, T1, tiene orientación aproximadamente NNO-SSE (plano de color verde) con buzamiento al oeste; la segunda familia T2 (datos del cuadro de color morado con línea discontinua) (Figura 7B) presenta orientación aproximadamente NNO-SSE (plano de color verde discontinuo) con buzamiento al este, y

la tercera familia T3 (datos del cuadro de color rojo) presenta orientación aproximadamente O-E.

Como parte de la interpretación, los datos de la primera familia principal forman parte del flanco oeste con un promedio de planos de estratificación de 177/72; los datos de la segunda familia corresponden a la estación estructural E2, la cual pertenece al flanco este (Figura 7C) con un promedio de planos de estratificación de 348/70; los datos de la tercera familia corresponden a la estación estructural E8 con ángulos de buzamiento muy altos que son datos tomados del Grupo Tacaza que se encuentra al oeste dentro del área de estudio, pero también la E9 (cuadro color anaranjado) forma parte de este Grupo Tacaza con ángulos de buzamientos bajos; ambos pertenecen a rocas volcano-sedimentarias emplazadas en un evento posterior a la formación del anticlinal de Puquín. Al observar la proyección estereográfica se cuenta también con algunos datos puntuales variables (datos aleatorios), esto debido a eventos posteriores que originan deformación local y rotación de la estratificación.

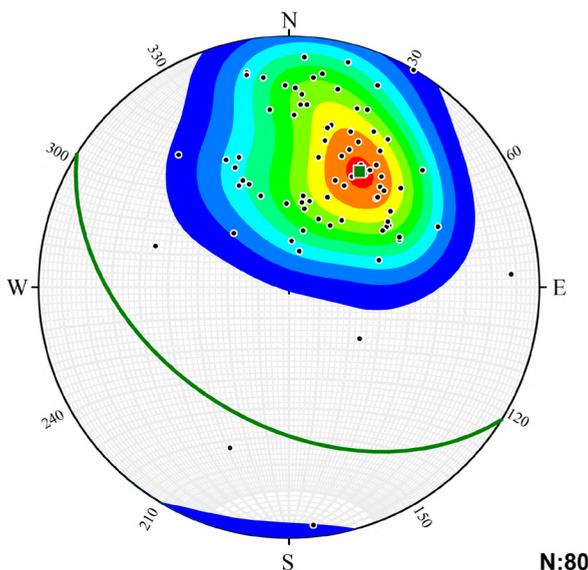


Figura 6. Estereograma de los polos de la estratificación y su plano promedio de la zona norte.

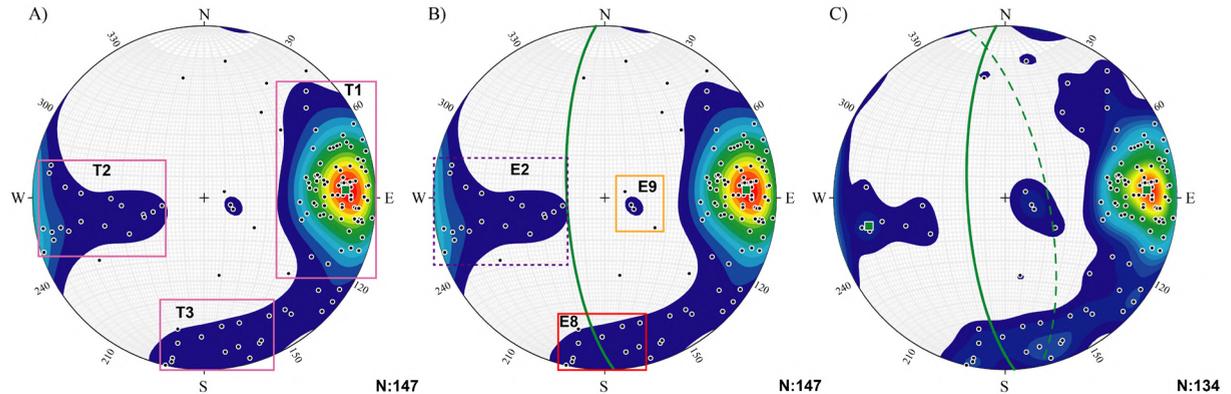


Figura 7. Estereogramas de los polos y planos promedio de las estratificaciones de la zona sur. En **A** se delimitan las tres familias principales de estratificación; en **B** se delimita las estaciones E9, E2 y E8, y el plano promedio de la familia principal (T1); y en **C** se muestran los dos planos promedio de los flancos.

Análisis de vetillas, fracturas y fallas: el área de estudio estructuralmente es bastante complejo, por ende, realizar el análisis estructural por geometría de fallas usando el modelo de fallas conjugadas o fracturas conjugadas de Anderson no es muy factible. La mayor deformación en el área de estudio se produce con la formación del anticlinal de Puquín. Por ese motivo, se optó por correlacionar con modelos de estructuras generadas al formar el pliegue, como el modelo propuesto por [Twiss y Moores \(2007\)](#), considerando tres ejes ortogonales entre sí: el eje *a* perpendicular al rumbo de la capa plegada, el eje *b* paralelo al rumbo (y paralelo al eje del pliegue) y el eje *c* perpendicular al plano de estratificación ([Figura 8A](#)), en donde se relacionan las vetillas, fracturas y fallas interpretando su orientación respecto al plegamiento.

La estación estructural E12 con un total de 8 datos de vetillas ([Figura 8B](#)) también se asocia a modelos de fracturas asociadas a plegamientos; de acuerdo a su orientación respecto al pliegue, es posible interpretar un juego tipo *m* (NO-SE) que geoméricamente se encuentra en el flanco oeste del anticlinal de Puquín. La estación estructural E11 presenta un total de 14 datos de vetillas conjugadas y extensionales; las vetillas se encuentran rellenas de calcita y se hace la representación estereográfica de los datos ([Figura 8C](#)). En la proyección estereográfica de la [Figura 8C](#) se muestra la orientación promedio de cada juego de vetillas identificado. De acuerdo a su orientación respecto al pliegue, es posible interpretar juegos conjugados tipo *m'* (NE-SO), tipo *m* (NO-SE) y un juego extensional que es horizontal o paralelo al paleoesfuerzo principal máximo. Estas estructuras

geoméricamente se encuentran en los flancos del modelo de pliegue y en el área de estudio forma parte del flanco oeste. Para la estación estructural E16, con un total de 5 datos de vetillas extensionales ([Figura 8D](#)), es posible interpretar un juego tipo *m'* (NE-SO) que geoméricamente se encuentra en el flanco oeste del anticlinal de Puquín.

El análisis estructural de los 480 datos de fracturas se divide en 2 sectores; la [Figura 8E](#) muestra la representación estereográfica de las 264 fracturas del sector norte, donde se cuenta con fracturas oblicuas denominadas tipo *m* de color azul, que son particularmente comunes en los flancos del pliegue, y fracturas oblicuas denominadas tipo *n'* de color mostaza que tienden a asociarse con la charnela del pliegue. Además, en la [Figura 8E](#) se tiene la representación estereográfica de las 216 fracturas del sector sur, en las cuales se cuenta con fracturas inclinadas denominadas tipo *bb'* de color verde oscuro y verde claro, que tienden a asociarse con la charnela del pliegue, y las fracturas denominadas tipo *ac* de color rojo que corresponden a fracturas de extensión formadas paralelas a la dirección del máximo esfuerzo compresivo σ_1 .

El análisis estructural de los 769 datos de fallas se divide en 2 sectores; en la [Figura 8F](#) se presenta la representación estereográfica de las 278 fallas del sector norte en donde las fallas sin cinemática asociadas a fracturas inclinadas denominadas tipo *bb'* de color verde oscuro y verde claro tienden a asociarse a la charnela del pliegue. Además, la [Figura 8F](#) se tiene la representación estereográfica de las 182

fallas del sector sur, en donde las fallas sin cinemática relacionadas con fracturas oblicuas, denominadas tipo m de color azul y tipo m' de color celeste, son particularmente comunes en los flancos del pliegue, y las fallas sin cinemática, relacionadas con fracturas denominadas tipo bb' de color verde oscuro, tienden a asociarse a la charnela del pliegue.

Reconstrucción geométrica y cinemática del anticlinal de Puquín

Geometría del anticlinal de Puquín: la geometría del anticlinal de Puquín se determina a partir de diferentes clasificaciones de pliegues. El gráfico de la **Figura 9A** muestra las representaciones estereográficas de los flancos promedio con datos superficiales de estratificación de las secciones geológicas norte (D-D'), centro (E-E') y sur (F-F'), en los cuales se determinaron los valores de los diferentes elementos de pliegue, como: eje de pliegue, plano axial, ángulo interflanco y la vergencia.

Según la clasificación de los pliegues por **Fleuty (1964)**, tomando la inclinación del plano axial y el *plunge* de la línea de charnela o del eje de pliegue, se determinó el pliegue en el sector norte con 86,5° de inclinación del

plano axial y 12,6° de *plunge* de la línea de charnela como un pliegue casi recto con inmersión suave; en el sector centro presenta 78,6° de inclinación del plano axial y 30,4° de *plunge* de la línea de charnela como un pliegue inclinado abrupto con inmersión moderada, y en el sector sur presenta 76,5° de inclinación del plano axial y 34,5° de *plunge* de la línea de charnela como un pliegue inclinado abrupto con inmersión moderada (**Figura 9B**).

Según la clasificación de los pliegues por **Fleuty (1964)**, tomando el ángulo de interflanco, se determinó que el pliegue en el sector norte tiene 58,5° de ángulo de interflanco como un pliegue cerrado; en el sector centro tiene 56,8° de ángulo de interflanco como un pliegue cerrado, y en el sector sur tiene 81,9° de ángulo de interflanco como un pliegue abierto.

La dirección del eje de pliegue en el sector norte es de 206,0°/12,6° SO, en el sector centro es de 184,8°/30,4° SSE y en el sector sur es de 340,5°/34,5° NO. La orientación de la vergencia en el sector norte es hacia el NO, en el centro hacia el ONO y en el sur hacia el SO (**Figura 9C**).

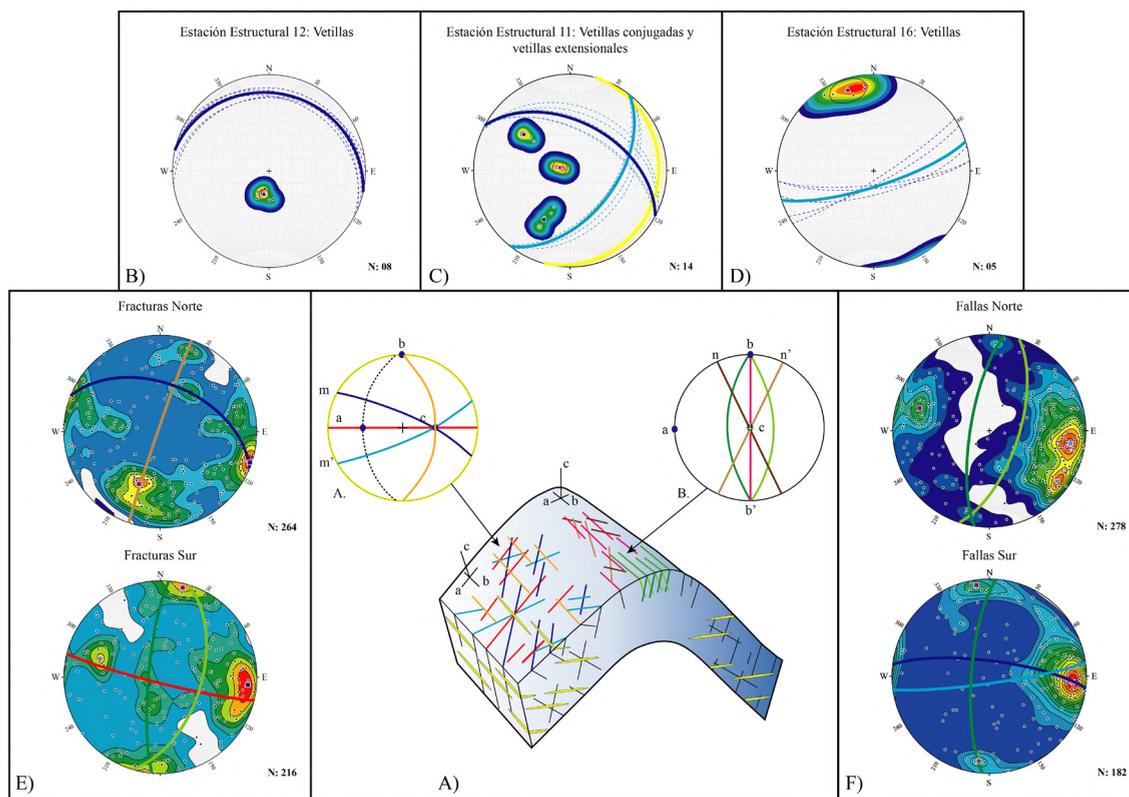


Figura 8. A. Principales juegos de vetillas, fracturas y fallas asociadas a pliegues (modificado de **Sibson, 1996** y **Twiss y Moores, 2007**). B., C. y D. Estereogramas de vetillas. E. Estereograma de las fracturas de la parte norte y sur del anticlinal. F. Estereogramas de las fallas de la parte norte y sur del anticlinal.

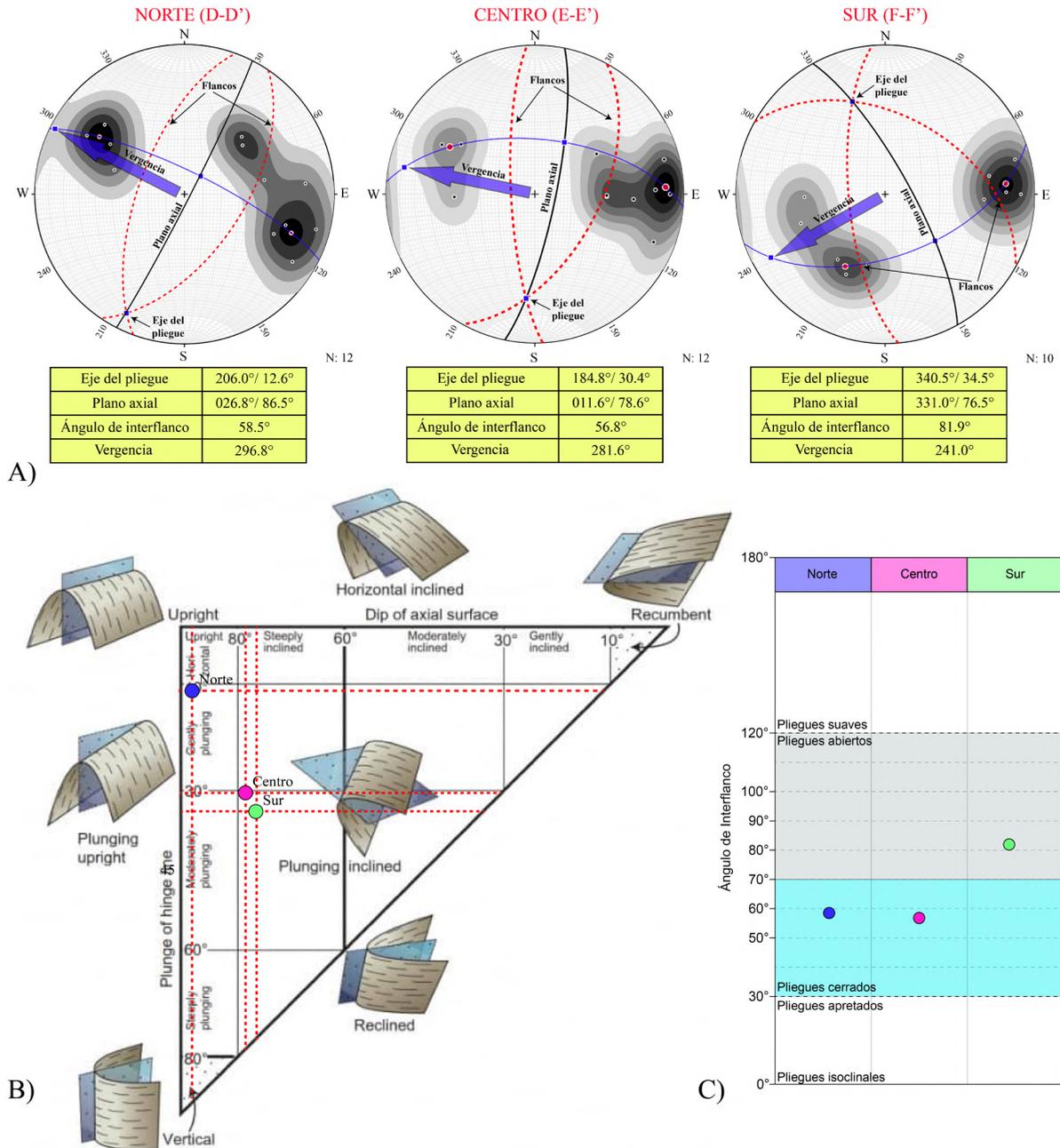


Figura 9. A. Proyecciones estereográficas de los flancos de los pliegues y los valores de los diferentes elementos del pliegue. **B.** y **C.** Clasificaciones de pliegue según *Fleuty (1964)* tomando en cuenta la inclinación del plano axial y el *plunge* de la línea de charnela o del eje de pliegue. **C.** Ángulo de interflanco para el sector norte (D-D'), centro (E-E') y sur (F-F').

La estructura analizada se caracteriza como un pliegue asimétrico, ya que el plano axial presenta inclinación, cerrado en el sector norte y centro, abierto en el sector sur, y posee un eje de pliegue con doble inmersión de ~21°S y ~34°N (no cilíndrico).

El anticlinal de Puquín se considera un pliegue por propagación de falla, de acuerdo con los siguientes criterios geométricos: i) las capas que se encuentran sobre la zona de rampa de la falla están truncadas por la misma, a diferencia de pliegues por flexión de falla

donde las capas son paralelas a la rampa de la falla y son las capas que se encuentran en el rellano superior de dicha falla las que están truncadas por ella según los modelos propuestos por [Suppe y Medwedeff \(1990\)](#); y ii) los pliegues de propagación de falla ([Dahlstrom, 1970](#)) se forman contemporáneamente a la propagación de una falla en situación de rampa, como se observa en los modelos de evolución del anticlinal de Puquín ([Figura 10, 11 y 12](#)), a través de una serie de estratos, de forma que el acortamiento da lugar a la formación de un pliegue en la zona próxima a su terminación.

Evolución del anticlinal de Puquín: para analizar la evolución cinemática del anticlinal de Puquín, se construyeron tres modelos usando el *software Fault Fold Forward* ([Allmendinger, 2012](#)), a partir de las secciones geológicas norte (D-D'), centro (E-E') y sur (F-F'), realizadas por la metodología de *kink* ([Figura 5](#)). Este programa permite reconstruir las estructuras como pliegues de propagación de falla por la metodología de *trishhear*, y sirve para calcular el acortamiento en cada etapa de deformación. Este tipo de pliegue relacionado con la falla depende de dos variables: el ángulo apical de la zona *trishhear* y la relación propagación-deslizamiento (p/s). En zonas *trishhear* con pequeños ángulos apicales, la deformación es intensa y se concentra en una estrecha cuña de roca, mientras que la deformación es menos intensa y resulta más difusa cuando los ángulos son más amplios. Por otro lado, la relación p/s determina qué tan rápido la línea de la punta se propaga en relación con su deslizamiento ([Allmendinger, 1998](#)). Valores bajos de p/s dan como resultado un pronunciado engrosamiento de las extremidades anteriores y plegado en la zona *trishhear*, mientras que $p/s > 1$ da como resultado menos engrosamiento y plegamiento más abierto ([Hardy y Ford, 1997](#)).

Este método de *trishhear* para pliegues de propagación de falla se utiliza porque, a diferencia del método propuesto por [Suppe y Medwedeff \(1990\)](#) que es práctico y fácil de usar, solo constituye una de las aproximaciones geométricas a las estructuras de este tipo que se encuentran en la naturaleza. Para ejemplos naturales como el anticlinal de Puquín es muy común encontrar pliegues de propagación de falla de limbos curvos y con cambios de espesor en los estratos. Predecir y reconstruir este tipo de estructuras no es tan simple como los modelos geométricos propuestos por [Suppe \(1985\)](#), y no se puede hacer sin el uso de una computadora; por lo mencionado anteriormente es mejor usar el método de *trishhear*.

En los tres modelos de evolución cinemática a partir de las secciones geológicas realizadas, el nivel de despegue basal elegido fue el de las evaporitas de la Formación Maras.

Norte (D-D'): Para obtener el modelo directo de la evolución cinemática del sector norte a lo largo de la sección geológica (D-D') del anticlinal de Puquín usando el *software Fault Fold Forward* ([Allmendinger, 2012](#)), se realizaron alrededor de 25 pruebas con diferentes valores para los diferentes parámetros de reconstrucción. Como resultado de las pruebas se encontró que la geometría y cinemática del anticlinal de Puquín puede explicarse adecuadamente utilizando un ángulo apical de la zona *trishhear* de 60° y una propagación al deslizamiento relación p/s de 1,5. El ángulo de rampa se determina solamente aplicando criterios geométricos y de relaciones angulares; en el sector norte se tiene un ángulo de rampa de -45° (negativo ya que es un pliegue con vergencia occidental). Es importante destacar el valor que tiene este dato debido a que frecuentemente el ángulo de buzamiento del plano de falla es difícil de conocer, producto de una mala exposición o porque la falla es ciega.

La [Figura 10Aa](#) representa el estadio inicial del anticlinal de Puquín sin deformar, a partir del cual se realizó el modelado hacia adelante o *forward modeling* (en este caso hacia el oeste porque es una estructura retrovergente); muestra capas horizontales de las formaciones Maras, Puquín, Quilque y Chilca, con una longitud inicial de 9,8 km. En línea roja se observa la falla vinculada con la estructuración de este pliegue.

En el estadio 1 ([Figura 10Ab](#)) de contracción, se observa la deformación de las capas del estadio inicial y se desarrolla una falla en línea roja continua que crece lenta y sincrónicamente con el plegamiento de avance a lo largo del pliegue; teniendo esta falla se superpone la primera capa de crecimiento de la Formación Kayra, el acortamiento no se observa, ya que este es imperceptible a esta escala.

En el estadio 2 ([Figura 10Ac](#)) se observa la deformación de capas de las formaciones Maras, Puquín, Quilque, Chilca, Kayra y Soncco; las últimas formaciones Kayra y Soncco superpuestas como capas de crecimiento. También se puede observar que se sigue desarrollando una falla con el mismo buzamiento en línea roja continua que crece lenta y sincrónicamente con el plegamiento de avance; al finalizar este estadio se tiene como longitud de las capas 9,67 km con un porcentaje

de acortamiento de 1,3% de la longitud inicial obtenido a partir de la operación $(L_f - L_i) / L_i$ multiplicado por el 100%, siendo L_f : longitud final y L_i : longitud inicial.

En el estadio 3 (Figura 10Ad) se observa la deformación de todas las formaciones y más en los niveles afectados por la falla de avance que tiene el mismo buzamiento en línea roja continua, cuya longitud de las capas es de 8,98 km equivalente a un porcentaje de acortamiento de 8,3% de la longitud inicial.

En el estadio 4 (Figura 10Ae) se observa que la geometría final de la estructura modelada es comparable con la

estructura mostrada en la sección geológica D-D', deja ver el anticlinal de Puquín, tiene una longitud final de las capas de 8,32 km que representa un porcentaje de acortamiento total de 15,1% de la longitud inicial.

Posterior al estadio 4 se observa la rotación de 7° de la estructura modelada, según modelos bibliográficos regionales (Carlotto, 1998, 2006; Figura 10Af). Finalmente, la última imagen (Figura 10B) enfoca el anticlinal de Puquín de manera puntual; donde se puede observar la topografía actual y el modelo de evolución del anticlinal de Puquín en un evento de compresión.

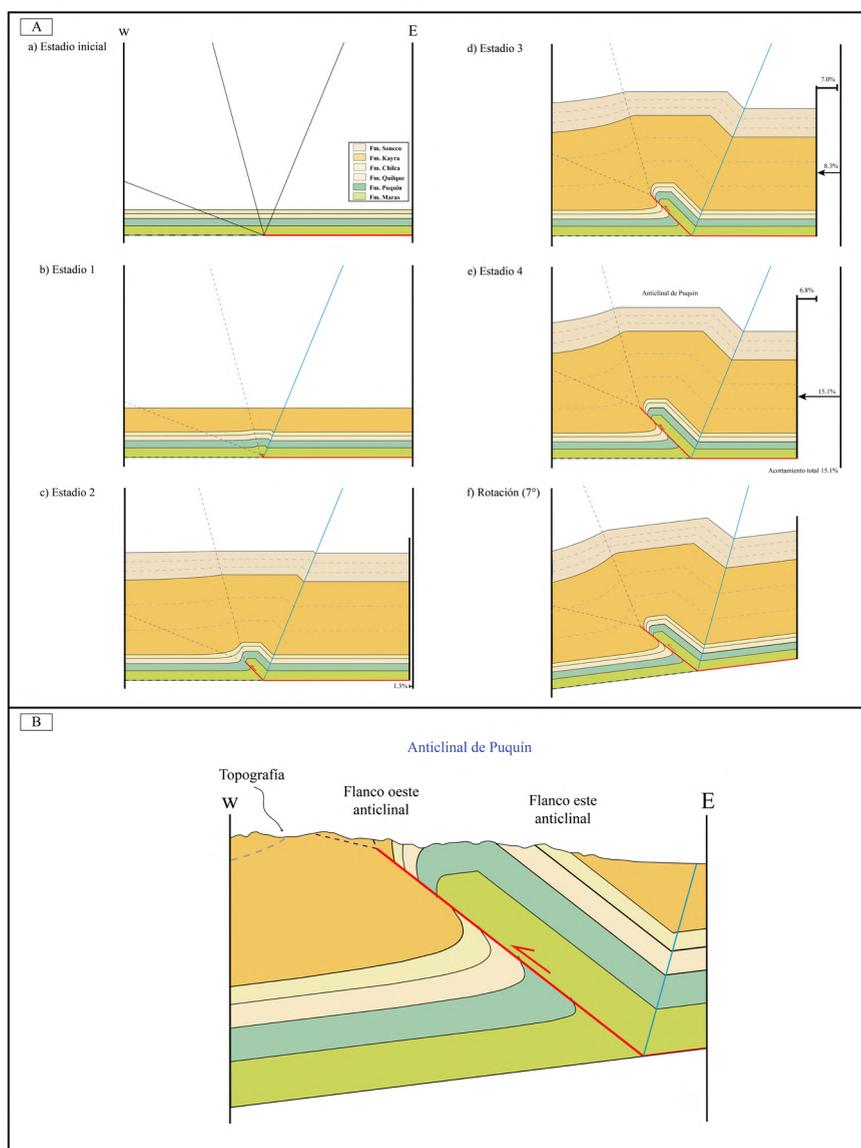


Figura 10. A. Modelo de evolución cinemático propuesto para el anticlinal de Puquín en el sector norte (D-D') con el porcentaje (%) de acortamiento en cada etapa. **B.** Sección geológica de Puquín con el relieve actual.

Centro (E-E'): en el sector centro a lo largo de la sección geológica (E-E'), se probó alrededor de diez veces con diferentes valores (siendo este valor menor, ya que se sigue el modelo a partir de la sección norte) para los diferentes parámetros de reconstrucción; se encontró que la geometría y cinemática del anticlinal de Puquín puede explicarse adecuadamente utilizando un ángulo apical de la zona trishear de 60° y una propagación al deslizamiento relación p/s de 1,5, al igual que el sector norte. El ángulo de rampa es de -49 que también se determina aplicando criterios geométricos y de relaciones angulares.

La [Figura 11Aa](#) representa el estadio inicial del anticlinal de Puquín sin deformar, muestra capas horizontales de las formaciones Maras, Puquín, Quilque y Chilca, con una longitud inicial de 9,8 km; en línea roja se observa la falla vinculada con la estructuración de este pliegue.

En el estadio 1 ([Figura 11Ab](#)) de contracción, se observa la deformación de las capas del estadio inicial y se desarrolla una falla en línea roja continua que crece lenta y sincrónicamente con el plegamiento de avance a lo largo del pliegue, teniendo esta falla se superpone la primera capa de crecimiento de la Formación Kayra, el acortamiento no se observa, ya que este es imperceptible a esta escala.

En el estadio 2 ([Figura 11Ac](#)) se observa la deformación de capas de las formaciones Maras, Puquín, Quilque, Chilca, Kayra y Soncco; las últimas formaciones Kayra y Soncco superpuestas como capas de crecimiento, también se puede ver que se sigue desarrollando una falla con el mismo buzamiento en línea roja continua que crece lenta y sincrónicamente con el plegamiento de avance y que finalizando este estadio se tiene como longitud de las capas de 9,71 km con un porcentaje de acortamiento de 0,9% de la longitud inicial.

En el estadio 3 ([Figura 11Ad](#)) se observa la deformación de todas las formaciones y más en los niveles afectados por la falla de avance que tiene el mismo buzamiento en línea roja continua, teniendo como longitud de las capas de 9,03 km, equivalente a un porcentaje de acortamiento de 7,8% de la longitud inicial.

En el estadio 4 ([Figura 11Ae](#)) se observa que la geometría final de la estructura modelada es comparable con la estructura mostrada en la sección geológica E-E', dejando ver el anticlinal de Puquín, y teniendo una longitud final de las capas de 8,61 km

que representa un porcentaje de acortamiento total de 12,1% de la longitud inicial.

Posterior al estadio 4 se observa la rotación de 7° de la estructura modelada, según modelos bibliográficos regionales ([Carlotto, 1998, 2006; Figura 11Af](#)). Finalmente, la última imagen ([Figura 11B](#)) enfoca el anticlinal de Puquín de manera puntual; donde se puede observar la topografía actual y el modelo de evolución del anticlinal de Puquín en un evento de compresión.

Sur (F-F'): en el sector sur a lo largo de la sección geológica (F-F'), se probó alrededor de diez veces con diferentes valores (siendo este valor menor, ya que se sigue el modelo a partir de la sección norte y centro) para los diferentes parámetros de reconstrucción y se encontró que la geometría y cinemática del anticlinal de Puquín puede explicarse adecuadamente utilizando un ángulo apical de la zona *trishear* de 60° y una propagación al deslizamiento relación p/s de 1,5 al igual que el sector norte y centro. El ángulo de rampa es de -44 que también se determina aplicando criterios geométricos y de relaciones angulares.

La [Figura 12Aa](#) representa el estadio inicial del anticlinal de Puquín sin deformar, muestra capas horizontales de las formaciones Maras, Puquín, Quilque y Chilca, con una longitud inicial de 9,8 km; en línea roja se observa la falla vinculada con la estructuración de este pliegue.

En el estadio 1 ([Figura 12Ab](#)) de contracción, se observa la deformación de las capas del estadio inicial y se desarrolla una falla en línea roja continua que crece lenta y sincrónicamente con el plegamiento de avance a lo largo del pliegue, teniendo esta falla se superpone la primera capa de crecimiento de la Formación Kayra, el acortamiento no se observa, ya que este es imperceptible a esta escala.

En el estadio 2 ([Figura 12Ac](#)) se observa la deformación de capas de las formaciones Maras, Puquín, Quilque, Chilca, Kayra y Soncco; las últimas formaciones Kayra y Soncco superpuestas como capas de crecimiento, también se puede ver que se sigue desarrollando una falla con el mismo buzamiento en línea roja continua que crece lenta y sincrónicamente con el plegamiento de avance. Al finalizar este estadio se tiene como longitud de las capas 9,70 km con un porcentaje de acortamiento de 1,0% de la longitud inicial.

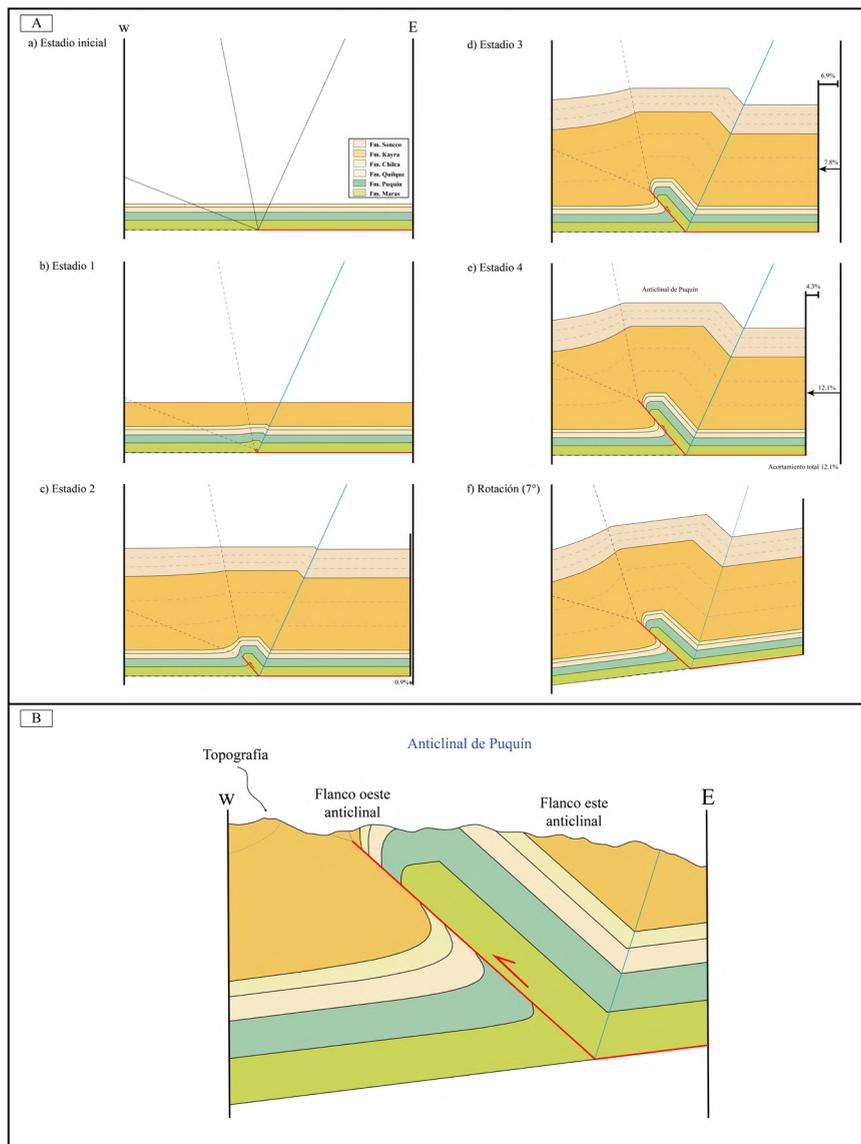


Figura 11. A. Modelo de evolución cinemático propuesto para el anticlinal de Puquín en el sector centro (E-E') con el porcentaje (%) de acortamiento en cada etapa. **B.** Sección geológica de Puquín con el relieve actual.

En el estadio 3 (Figura 12Ad) se observa la deformación de todas las formaciones y más en los niveles afectados por la falla de avance que tiene el mismo buzamiento en línea roja continua, teniendo como longitud de las capas de 8,96 km equivalente a un porcentaje de acortamiento de 8,5% de la longitud inicial.

En el estadio 4 (Figura 12Ae) se observa que la geometría final de la estructura modelada es comparable con la estructura mostrada en la sección geológica F-F', dejando ver el anticlinal de Puquín, y

teniendo una longitud final de las capas de 8,62 km que representa un porcentaje de acortamiento total de 12,0% de la longitud inicial.

Posterior al estadio 4 se observa la rotación de 7° de la estructura modelada, según modelos bibliográficos regionales (Carlotto, 1998, 2006; Figura 12Af). Finalmente, la última imagen (Figura 12B) enfoca el anticlinal de Puquín de manera puntual; donde se puede observar la topografía actual y el modelo de evolución del anticlinal de Puquín en un evento de contracción.

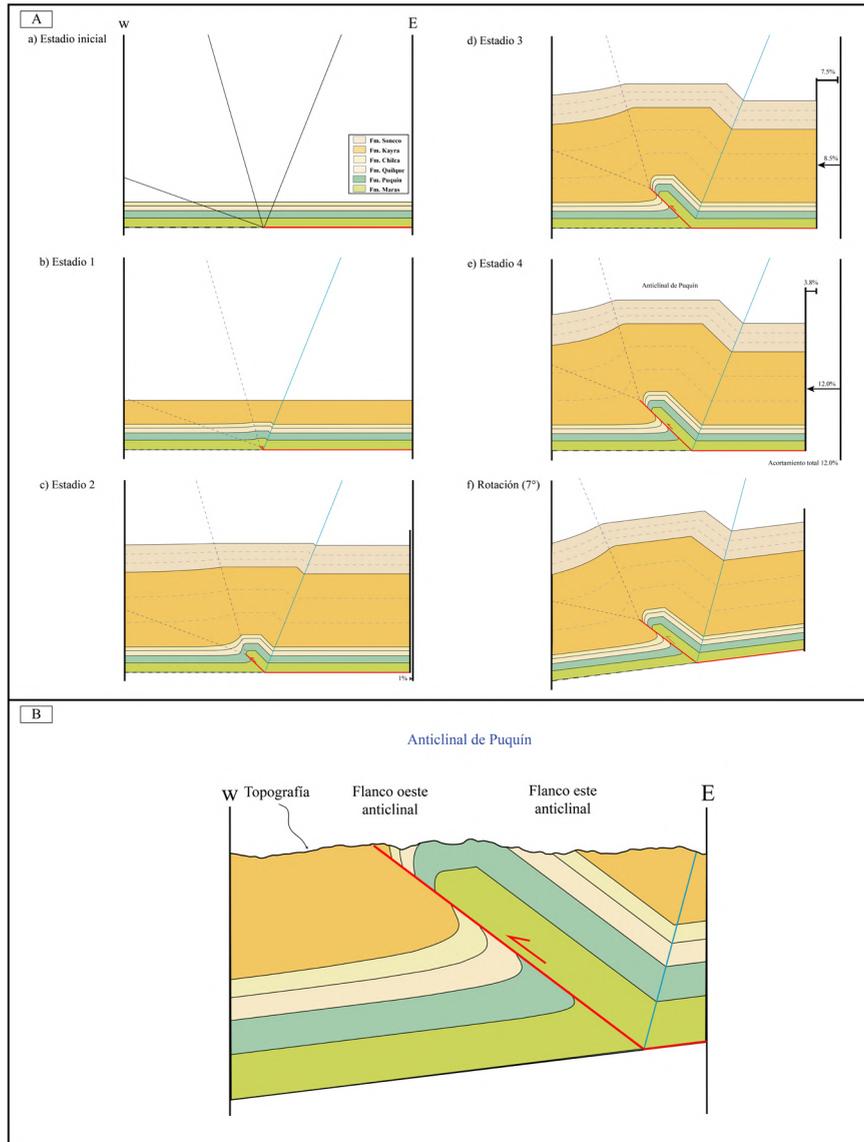


Figura 12. A. Modelo de evolución cinemático propuesto para el anticlinal de Puquín en el sector sur (F-F') con el porcentaje (%) de acortamiento en cada etapa. B. Sección geológica de Puquín con el relieve actual.

Modelo en 2,5D

Para obtener la superficie en el bloque diagrama 2,5D geológico se descargó un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 12,5 m ALOS PALSAR, el cual se proyectó en el sistema de coordenadas *Universal Transversal de Mercator* WGS-84 UTM Zona 18S, superponiéndolo con una imagen satelital (Figura 13) en el *software* libre QGIS 3.4.12 y mostrándolo en una vista con dirección norte.

A partir de las secciones transversales realizadas aplicando el método *kink* de las bisectrices, y la reconstrucción de un modelo directo usando el *software* *Fault Fold Forward* (Allmendinger, 2012) por la metodología *trishear*, se realizó el bloque diagrama 2,5D geológico (Figura 13) en el cual se observa el ordenamiento de las capas aflorantes a profundidad y se muestra un modelo de pliegue por propagación de falla que deja observar en superficie estructuras geológicas como el eje del anticlinal de Puquín y la falla Cusco.

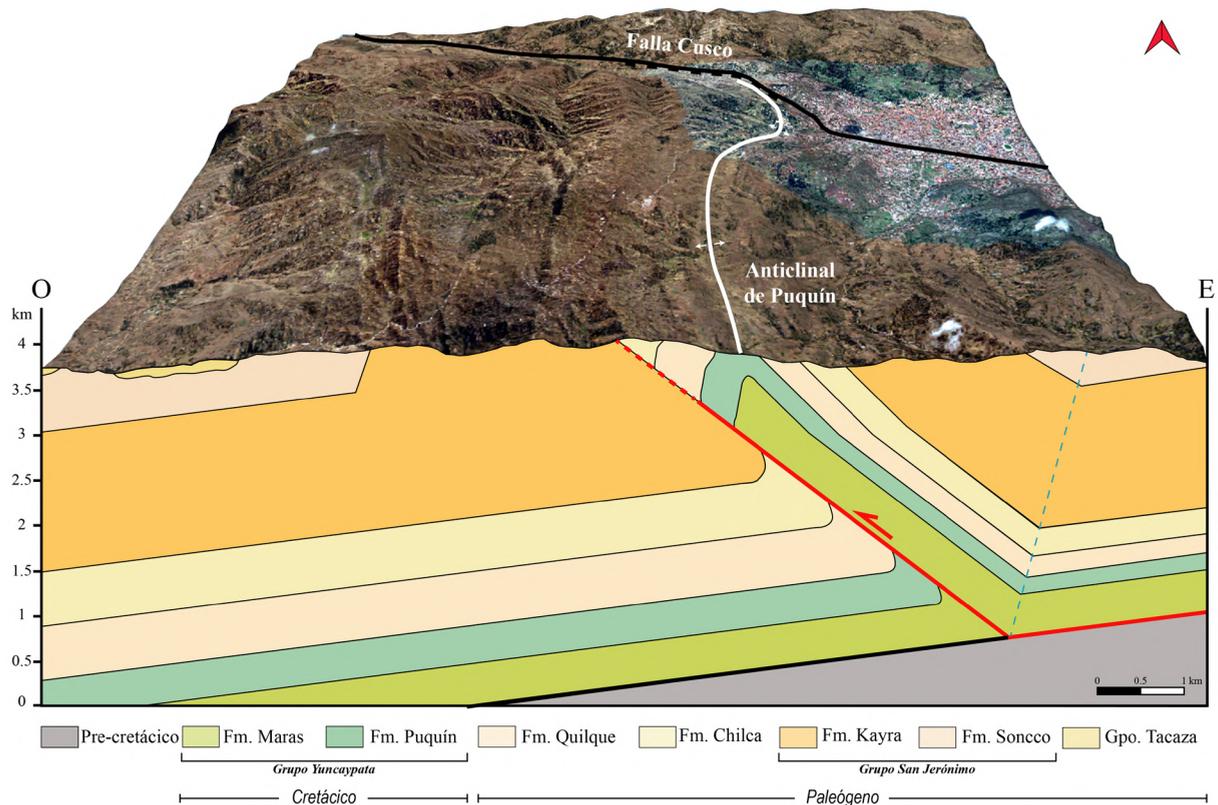


Figura 13. Bloque diagrama 2.5 D geológico del área de estudio construida a base de las secciones geológicas O-E con la metodología de *kink* y la metodología *trishhear*. Vista de la sección geológica E-E'.

Discusión

Las estructuras en superficie, teniendo en cuenta el trabajo de [Carlotto et al. \(2011\)](#), tienen una dirección ONO-ESE a NO-SE y una vergencia NE. Es así que se interpreta las fallas como cabalgamientos que desarrollan pliegues de amortiguamiento en las capas rojas eocenas. El anticlinal de Puquín se interpreta como una estructura de retrocabalgamiento; localmente se ha considerado también la posible participación de un mecanismo de plegamiento por despegue sobre niveles evaporíticos como los de la Formación Maras. Las unidades geológicas presentan disminución de espesor en el flanco este, debido a la presencia de estratos de crecimiento, así como la deformación del anticlinal que presenta al tener una rotación de dirección NO-SE a N-S en sentido horario y se interpreta como un amortiguamiento (transferencia de rechazo), que tiene como límite de rotación a la falla de Cusco.

El anticlinal de Puquín es sin duda un excelente ejemplo para estudiar el desarrollo estructural de un pliegue por propagación de falla, volcado hacia el oeste ([Figuras 10, 11 y 12](#)). Esta geometría es comparable

con uno de los modelos de pliegues por propagación de falla transportados (*high-angle breakthrough*) propuestos por [Suppe y Medwedeff \(1990\)](#). La presencia de estrías en los planos de estratificación en ambos flancos es compatible con el mecanismo de plegamiento por deslizamiento flexural requerido por la mayoría de los modelos de pliegues relacionados a fallas. Finalmente, los tres modelos directos usando el software *Fault Fold Forward* ([Allmendinger, 2012](#)) para reconstruir pliegues por propagación de falla; a partir de las secciones geológicas norte (D-D'), centro (E-E') y sur (F-F') realizadas por la metodología de *kink*, muestran los modelos de evolución cinemática con el porcentaje de acortamiento para cada estadio propuesto para el anticlinal, tomando como nivel de despegue las evaporitas de la Formación Maras como una zona dúctil, el porcentaje de acortamiento total es de 15,1% ([Figura 10](#)) de la longitud inicial para el sector norte, de 12,1% ([Figura 11](#)) para el sector centro y de 12,0% ([Figura 12](#)) para el sector sur; teniendo así el mayor acortamiento en el sector norte debido que al rotar en este sector sufre un amortiguamiento cuando esta choca con la falla de Cusco.

Según las proyecciones estereográficas realizadas con datos superficiales en las secciones realizadas en tres sectores, se obtiene que la vergencia en el sector norte es hacia el NO, en el centro hacia el ONO y en el sur hacia el SO. La medición de datos de estratificación en ambos flancos del anticlinal Puquín permitió ajustar la geometría del pliegue y obtener parámetros que no podían medirse directamente en el campo, como el ángulo de la rampa. Esta metodología no ha sido aplicada previamente en el área de estudio, por lo cual puede ser una valiosa información a tener en cuenta en futuras reconstrucciones de las estructuras tanto aflorantes como en subsuelo.

Conclusiones

El cartografiado de campo detallado del anticlinal de Puquín permite describirlo como un pliegue con rumbo N-S y marcada vergencia al oeste, que involucra capas cretácicas como las formaciones Maras y Puquín, capas paleógenas como las formaciones Quilque, Chilca, Kayra, Soncco y el Grupo Tacaza.

Este pliegue se ve más adelgazado a la parte norte, el limbo trasero es extenso y con menores buzamientos, por lo cual el anticlinal es asimétrico y volcado hacia el oeste. El eje del pliegue es doblemente buzante, con inclinaciones de $\sim 21^\circ$ S y $\sim 34^\circ$ N, conformando una estructura en forma de “silla de montar”.

Por sus características el anticlinal de Puquín es interpretado como un pliegue por propagación de falla transportado hacia el oeste. El acortamiento calculado a partir de tres secciones estructurales, realizadas por el método de *trishear*, es de 8,32 km (15,1 %), 8,61 km (12,1 %) y 8,62 km (12,0 %) para las zonas norte, centro y sur, respectivamente. El análisis del patrón de fracturas, fallas y vetillas realizadas en 23 estaciones estructurales en distintos sectores del anticlinal permitió distinguir 5 juegos de orientaciones: ONO-ESE, NNE-SSO, O-E, NE-SO y OSO-ENE. Estas estructuras son compatibles con el arreglo estructural que se origina en los pliegues, en este caso con el pliegue de Puquín.

Por otro lado, en ambos limbos del pliegue se midieron superficies estriadas subparalelas a los planos de estratificación que evidencian deslizamiento entre capas (*flexural slip*), compatibles con el modelo cinemático de plegamiento propuesto.

Los resultados presentados revelan la importancia del cartografiado de campo detallado y la adquisición de datos estructurales en campo, que permiten reconocer e interpretar estructuras de plegamiento complejas.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Vicerrectorado de Investigación y al financiamiento de tesis de pregrado convocatoria 2022-1, programa de fortalecimiento de investigación “Yachayninchis Wiñarinanpaq” con número de resolución R-408-2022-UNSAAC y contrato N° 005 –VRIN-2022-UNSAAC, por darnos la oportunidad y el apoyo para la realización de este trabajo de investigación. Finalmente, estamos muy agradecidos con los dos revisores anónimos por sus observaciones y sugerencias para la mejora del manuscrito original.

Referencias

- Allmendinger, R.W. (1998). Inverse and forward modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics*, 17(4), 640-656. <https://doi.org/10.1029/98TC01907>
- Allmendinger, R.W. (2012). FaultFoldForward.v.6. <http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs/faultfoldforward-v-6.html>
- Allmendinger, R.; Cardozo, N.; Fisher, D. (2012). *Structural geology algorithms: Vectors*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511920202>
- Buxtorf, A. (1916). Prognosen und Befunde beim Hauensteinbasis-und Grenchenburg-tunnel und die Bedeutung der letzteren für die Geologie des Juragebirges. *Naturforschung Gesellschaft Basel Verhandlungen*, 27, 184-254.
- Cabrera, J. (1988). Néotectonique et sismotectonique dans la Cordillère Andine au niveau du changement de géométrie de la subduction: la région de Cusco, Pérou. Thèse Docteur, Université Paris-Sud, Francia.
- Cadell, H.M. (1889). Experimental researches in mountain building. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 35(1), 337-357. <https://doi.org/10.1017/S0080456800017658>

- Callot, P. (2008). La Formation Ayabacas (limite Turonien-Coniacien, Sud-Pérou): collapse sous-marin en réponse à l'amorce de l'orogénèse andine. Thèse Docteur, Université Paul Sabatier, Toulouse, Francia.
- Carlotto, V.; Gil, W.; Cárdenas, J.; Chávez, R. (1996). Geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 65.
- Carlotto, V. (1998). Évolution andine et raccourcissement au niveau de Cusco (13-16°S), Pérou: enregistrement sédimentaire, chronologie, contrôles paléogéographiques, évolution cinématique. Thèse Docteur, Université de Grenoble I, Francia.
- Carlotto, V.; Jaillard, E.; Carlier, G.; Cárdenas, J.; Cerpa, L.; Flores, T.; Latorre, O.; Ibarra, I. (2005). Las cuencas terciarias sinorogénicas en el Altiplano y en la Cordillera Occidental del sur del Perú. En: J. Arce (ed.). *Alberto Giesecke Matto* (pp. 103-126). Sociedad Geológica del Perú.
- Carlotto, V. (2006). La deformación y el acortamiento andino en el sur del Perú: Cusco-Abancay-Sicuani. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, 101, 91-119.
- Carlotto, V.; Cárdenas, J.; Carlier, G. (2011). Geología del cuadrángulo de Cusco, hoja 28-s, escala 1:50,000. INGEMMET. Boletín, Serie A:138 Carta Geológica Nacional.
- Carlotto, V. (2013). Paleogeographic and tectonic controls on the evolution of Cenozoic basins in the Altiplano and Western Cordillera of southern Peru. *Tectonophysics*, 589, 195-219. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.002>
- Dahlstrom, C.D.A. (1970). Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 18(3), 332-406. <https://doi.org/10.35767/gscpgbull.18.3.332>
- Fleuty, M.J. (1964). The description of folds. *Proceedings of the Geologists' Association*, 75(4), 461-492. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(64\)80023-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(64)80023-7)
- Hardy, S.; Ford, M. (1997). Numerical modeling of trishear fault propagation folding. *Tectonics*, 16(5), 841-854. <https://doi.org/10.1029/97TC01171>
- Heim, A. (1878). *Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung im Anschluss an die geologische Monographie der Tödi-Windgällen-Gruppe: Atlas, Volumen 3*. Benno Schwabe.
- Jaillard, E.; Sempere, T. (1989). Cretaceous sequence stratigraphy of Peru and Bolivia. In: *Contribuciones de los simposios sobre el Cretácico de América Latina, Parte A: Eventos y registro sedimentario*. Buenos Aires, 1-27.
- Jaillard, E. (1993). L'évolution tectonique de la marge péruvienne au Sénonien et Paléocène et ses relations avec la géodynamique. *Bulletin Société Géologique de France*, 164(6), 819-830.
- Jaillard, E. (1994). Kimmeridgian to Paleocene tectonic and geodynamic evolution of the Peruvian (and Ecuadorian) margin. En: J.A. Salfity (ed.). *Cretaceous tectonics of the Andes* (pp. 101-166). Vieweg Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-322-85472-8_3
- Jamison, W.R. (1987). Geometric analysis of fold development in overthrust terranes. *Journal Structural Geology*, 9(2), 207-219. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(87\)90026-5](https://doi.org/10.1016/0191-8141(87)90026-5)
- Mitra, S. (1990). Fault-propagation folds: geometry, kinematic evolution, and hydrocarbon traps. *AAPG Bulletin*, 74(6), 921-945. <https://doi.org/10.1306/0C9B23CB-1710-11D7-8645000102C1865D>
- Mitra, S. (2002). Fold-accommodation faults. *AAPG Bulletin*, 86(4), 671-693. <https://doi.org/10.1306/61EEDB7A-173E-11D7-8645000102C1865D>
- Newell, N.D. (1949). *Geology of the Lake Titicaca region, Perú and Bolivia*. Geological Society of America.
- Peach, B.N.; Horne, J.; Gunn, W.; Clough, C.T.; Hinxman, L.W.; Cadell, H.M. (1888). Report on the recent work of the Geological Survey in the north-west Highlands of Scotland, based on the field notes and maps. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 44, 378-441. <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1888.044.01-04.34>

- Poblet, J. (2004). Geometría y cinemática de pliegues relacionados con cabalgamientos. *Trabajos de Geología*, 24, 127-146. <https://doi.org/10.17811/tdg.24.2004.127-147>
- Rich, J.L. (1934). Mechanics of low-angle overthrust faulting as illustrated by Cumberland thrust block, Virginia, Kentucky and Tennessee. *AAPG Bulletin*, 18(12), 1584-1596. <https://doi.org/10.1306/3D932C94-16B1-11D7-8645000102C1865D>
- Sibson, R.H. (1996). Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. *Journal of Structural Geology*, 18(8), 1031-1042. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(96\)00032-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(96)00032-6)
- Sitter, L. (1976). *Geología Estructural*. Editorial Omega S.A., 4ta edición.
- Suppe, J. (1983). Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science*, 283(7), 684-721. <https://doi.org/10.2475/ajs.283.7.684>
- Suppe, J. (1985). *Principles of structural geology*. Prentice Hall.
- Suppe, J.; Medwedeff, D. (1990). Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 83(3), 409-454.
- Twiss, R.; Moores, E. (2007). *Structural Geology*. 2nd edition. W.H. Freedman and Company.
-
-
- Fecha de recibido: 09 de abril de 2023
Fecha de aceptado: 09 de agosto de 2024
-
-