

## **Cartografiado y Modelo Cinemático de la Evolución del Anticlinal de Puquín Cusco-2022**

### **Mapping and Kinematic Model of the Evolution of the Puquín Anticline Cusco-2022**

Recibido: 4 de Noviembre del 2022 | Aceptado: 12 de Enero del 2023

Yessenia Puma<sup>1</sup> &, Wilson López<sup>2</sup>, José Cárdenas<sup>3</sup>

<sup>1</sup> <sup>3</sup>*Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco – Perú*

<sup>2</sup>*Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, Brasil*

ORCID: [0000-0002-3522-4157](https://orcid.org/0000-0002-3522-4157)

Correo electrónico: [170401@unsaac.edu.pe](mailto:170401@unsaac.edu.pe)

#### **Resumen**

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal determinar las unidades geológicas que forman parte del anticlinal de Puquín y desarrollar un modelo cinemático de evolución del anticlinal de Puquín. Las diferentes unidades aflorantes en el área de estudio fueron las formaciones Maras, Puquín, Quilque, Chilca, Soncco, Kayra y el Grupo Tacaza en los que se adquirieron datos de campo como la parte litológica y estructural e información bibliográfica teniendo como base la geología brindado por INGEMMET y usando la técnica de las combinaciones de bandas en tres tipos de imágenes Lansat 8 OLI (RGB 4/3-6/2-7/4), Aster L1T (RGB 9-4-3) y Sentinel 2A (RGB 11/12-11/2-11/8) para el mapeo preliminar de las unidades geológicas que permitieron elaborar un mapa geológico semidetallado a una escala de 1/20000. También se propuso un modelo de evolución cinemático del anticlinal de Puquín, usando el método trishear que se realizó con el software Fault Fold Forward, teniendo como acortamiento total 12.1%.

*Palabras Clave: cartografía; modelo cinemático; anticlinal, trishear; pliegues*

#### **Abstract**

The main objective of this research work was to determine the geological units that are part of the Puquín anticline and to develop a kinematic model of the evolution of the Puquín anticline, the different outcropping units in the study area were the Maras, Puquín, Quilque, Chilca, Soncco, Kayra formations and the Tacaza Group in which field data were acquired as a lithological and structural part and bibliographic information based on the geology provided by INGEMMET and using the Band Combination technique in three types of Landsat 8 OLI images. (RGB 4/3-6/2-7/4), Aster L1T (RGB 9-4-3) and Sentinel 2A (RGB 11/12-11/2-11/8) for preliminary mapping of geological units which allowed the elaboration of a semi-detailed geological map at a scale of 1/20000. A kinematic evolution

model of the Puquín anticline was also proposed, using the trishear method performed with the Fault Fold Forward software, having a total shortening of 12.1%.

*Keywords: mapping; kinematic model; anticline, trishear; folds*

## Introducción

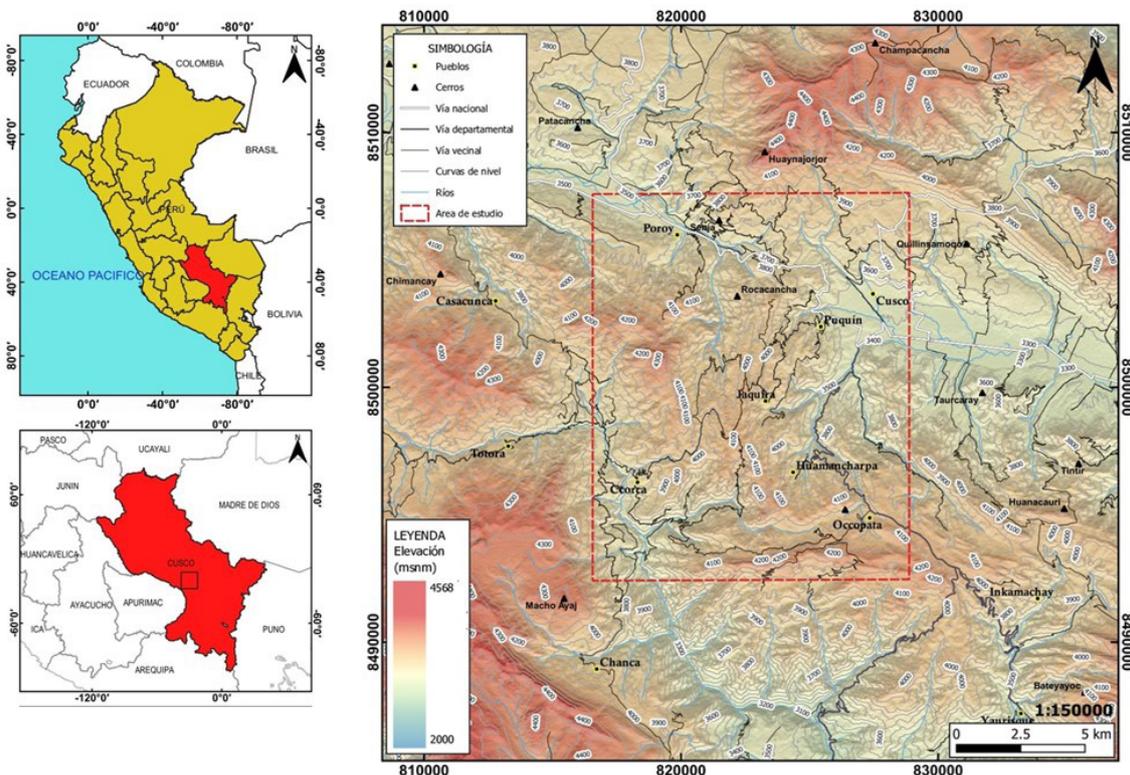
El anticlinal de Puquín se encuentra ubicado al sur del Perú en el departamento de Cusco, provincia de Cusco a 3399 ms.n.m, y abarca los distritos de Poroy, Cusco, Ccorca y Santiago (Figura 1). El área total aproximada cubierta en este trabajo es de 186.88 Km<sup>2</sup>, dentro del Altiplano.

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.

El presente trabajo busca mostrar el cartografiado geológico a partir de datos de campo y el modelo cinemático del anticlinal de Puquín a partir de un modelo directo construido con el software Fault Fold Forward (Allmendinger et al. 2012) para explicar la secuencia de evolución del anticlinal.

## Figura 1

*Mapa de ubicación del área de estudio (elaborado en el programa QGIS)*



## Metodología

Para realizar el cartografiado geológico del área del anticlinal de Puquín, se hizo uso de información bibliográfica como de campo. Como información bibliográfica se tiene información vectorial del GEOCATMIN e INGEMMET; del mismo modo se tiene el procesamiento de imágenes satelitales que es una técnica de teledetección muy usada actualmente y se realiza previo al campo; finalmente se tiene el cartografiado en campo en donde se midieron datos estructurales como la estratificación (rumbo y buzamiento) posicionados mediante GPS, los cuales colocados sobre una imagen satelital y con el programa QGIS 3.4.12 permitieron confeccionar el mapa geológico a escala 1: 75000 (Figura 5).

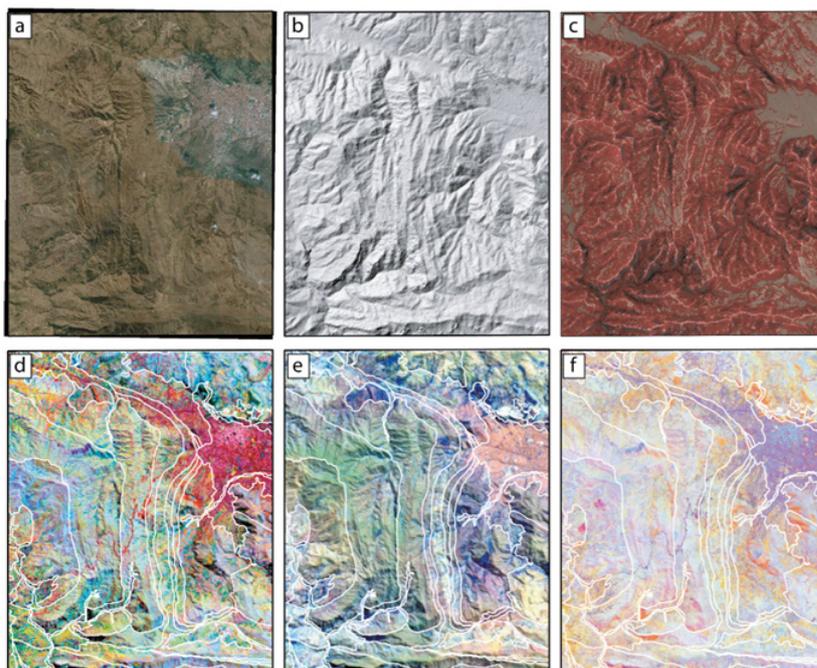
Se efectuó en el terreno una transecta estructural de orientación aproximada E-O (D-D', Figura 6) sobre la cual se densificó la medición de buzamientos para luego realizar la reconstrucción geométrica del anticlinal Puquín. Para desarrollar el modelo cinemático se usó el software libre Fault Fold Forward (Allmendinger et al. 2012).

## Resultados

### *Procesamiento de imágenes satelitales*

Para el mapeo preliminar de la geología se usó la técnica de las combinaciones de bandas que son utilizadas en teledetección debido a que al asignar un juego de bandas a los canales RGB (rojo, verde y azul), estos realzan características según al uso que se le quiera dar observando la respuesta espectral, mostrándolos en distintas coloraciones de acuerdo a su composición. En el área de estudio se hizo uso de tres tipos de imágenes (Lansat 8 OLI, Aster L1T y Sentinel 2A), de tal modo que el resultado se observa en la Figura 2.

**Figura 2**



*Nota.* (a) imagen satelital del anticlinal de Puquín, (b) DEM del anticlinal de Puquín, (c) RRIM del anticlinal de Puquín, (d) Lansat 8 OLI la combinación RGB 4/3-6/2-7/4 (Mwaniki et al., 2015), (e) Aster L1T la combinación RGB 9-4-3 (Mamani, 2017), (f) Sentinel 2A la combinación RGB 11/12-11/2-11/8 (El Atillah et al., 2019), estas tres imágenes delimitando las unidades geológicas. Fuente: Elaboración propia

### ***Estratigrafía de campo***

La estratigrafía del anticlinal de Puquín comprende capas cretácicas como la Formación Maras y Puquín, capas paleógenas como la Formación Quilque, Chilca, Kayra, Soncco y el Grupo Tacaza (Figura 5), según la información y comprobación en campo se hará la siguiente descripción.

#### **Formación Maras.**

La Formación Maras (Carlotto et al., 1996) son todos los afloramientos estratificados o caóticos de yesos y lutitas que aparecen dentro del Grupo Yuncaypata, incluidos los yesos que han sufrido removilizaciones por efectos tectónicos y diapíricos, es difícil calcular el espesor total de esta unidad por la forma caótica de presentarse, pero se puede estimar entre 100 y 400 metros (Carlotto et al., 2011).

En la zona de estudio está ampliamente distribuido 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 (Carlotto, 1992; Carlotto et al., 1992) sobreyace a la Formación Ayabacas, pero en general, el contacto corresponde a un nivel de despegue, presenta un espesor aproximado de 380 metros, está dividida en tres miembros llamados M1, M2 y M3(Carlotto et al., 2011).

En la zona de estudio la Formación Puquín es el núcleo del anticlinal, aunque también se puede observar en la parte sur y la litología que presenta son lutitas rojas, verdes y negras ricas en materia orgánica en la mayoría alteradas, yesos, calizas, margas y areniscas feldespáticas finas y medias de color rojo, gris y verde como se observa en la Figura 3.

**Figura 3**



*Nota.* Afloramiento de Calizas, Margas y lutitas de la Formación Puquín; vista tomada al noreste del poblado de Puquín.

### **Formación Quilque.**

La Formación Quilque (Gregory, 1916; Carlotto, 1992) reposa en discordancia erosional sobre la Formación Puquín, 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 con marcas de clastos blandos y costras de calcita, en el tope son más deleznable y presentan estructuras sedimentarias como flute cats.

### **Formación Chilca.**

La Formación Chilca (Audebaud, 1973; Carlotto, 1992) se encuentra en los mismos lugares donde aflora la Formación Quilque (Figura 4), se encuentra en discordancia erosional sobre la Formación Quilque y bajo la Formación Kayra, presenta un espesor aproximado de más de 100 metros (Carlotto et al., 2011).

En la zona de estudio la Formación Chilca forma parte del flanco este y oeste del anticlinal y la litología que presenta son lutitas rojas con láminas de yeso, margas y areniscas calcáreas y cuarzosas, estas pasan gradualmente de medios lacustres a areniscas rojas feldespáticas de un sistema fluvial.

### **Formación Kayra.**

La Formación Kayra (Córdova, 1986; Carlotto, 1998) sobreyace a la Formación Chilca e infrayace a la Formación Soncco (Figura 4), 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 del flanco este y oeste del anticlinal y la litología que presenta son areniscas feldespáticas, intercaladas con niveles de lutitas rojas, microconglomerados con clastos volcánicos y cuarcíticos; en las areniscas presenta una textura particular debido al proceso de diagénesis diferencial.

### **Formación Soncco.**

La Formación Soncco (Córdova, 1986; Carlotto, 1998) sobreyace concordantemente o en discordancia progresiva a la Formación Kayra, presenta un espesor aproximado entre 1200 y 2300 metros, 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 del flanco este que se encuentra erosionado y oeste del anticlinal y la litología que presenta son lutitas rojas, areniscas finas a medias con mineralización de Cu (malaquita y piritita), areniscas con clastos blandos y conglomerados con clastos volcánicos.

### Grupo Tacaza.

El Grupo Tacaza (Newell, 1949), presenta un espesor de más de 500 metros y en la zona de estudio el Grupo Tacaza se encuentra en el flanco oeste y la litología que presenta son brechas, lahares, volcanoclásticos con clastos de andesitas, tobas líticas brechadas y alteradas.

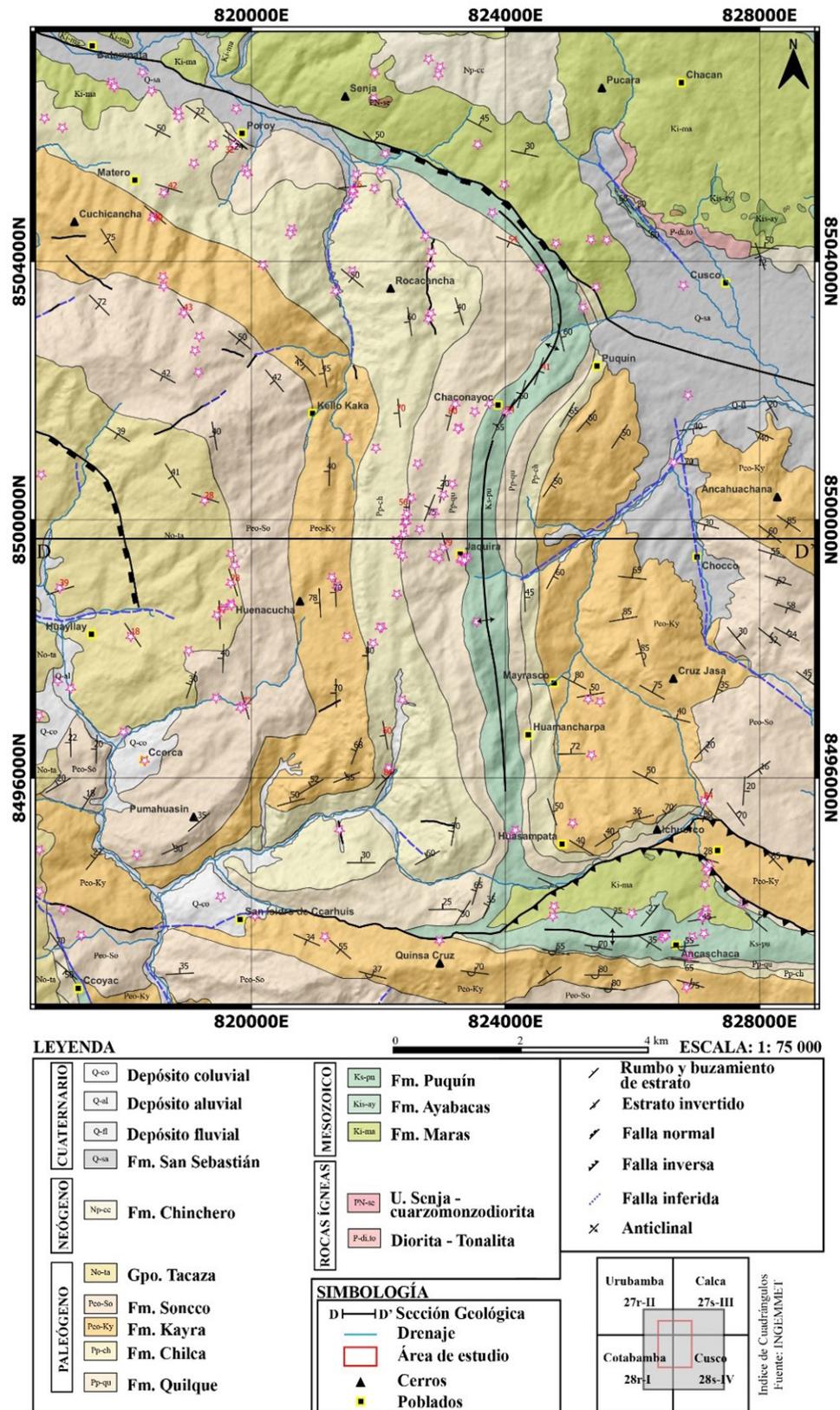
**Figura 4**



*Nota.* Panorámica en dirección SE-NO, tomada desde el cerro Senja, en el cual aflora la Unidad Senja en contacto con el bloque caótico de la Formación Maras; la Formación Maras en contacto con la Formación San Sebastián, por donde pasa la falla Cusco de cinemática normal, la Formación San Sebastián está en contacto con la Formación Quilque con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 32° a 52° al SO, Chilca con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 50° al SO y Maras; en la parte alta se observa el contacto entre la Formación Chilca y Kayra con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 40° al SO.

Figura 5

Mapa geológico del anticlinal de Puquín



*Nota.* Mapa geológico del anticlinal de Puquín con los puntos cartográficos (estrellas de color fucia) con datos de estratificación propios (en rojo) y de INGEMMET (en negro). Fuente: Elaboración propia

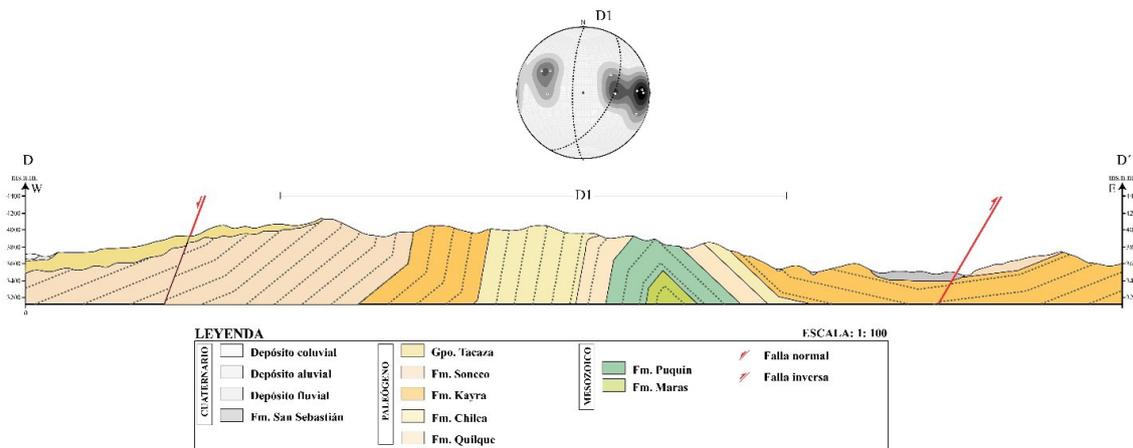
### ***Modelo de Evolución Cinemático***

El Altiplano se caracteriza por presentar varios microbloques separados por fallas que han controlado la sedimentación y tectónica principalmente durante el Terciario. Desde el punto de vista paleogeográfico, en el mesozoico constituye un alto estructural donde la sedimentación es poco espesa por comparación a la cuenca occidental. Sin embargo, durante el Terciario se depositaron más de 10 000 m de capas rojas. Aquí se presentan demasiados afloramientos de las formaciones Kayra y Soncco que se hallan fuertemente deformadas (Carlotto et al., 2003). Estas capas rojas del Grupo San Jerónimo descansan en discordancia erosional (concordancia estructural) sobre las formaciones Quilque-Chilca del Paleoceno, todas bien deformadas. Los pliegues en las capas rojas muestran en general dos esquistosidades. Una esquistosidad S1 de dirección NO-SE a ONO-ESE que es 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).

El anticlinal de Puquín es un ejemplo de pliegue de segunda generación con dirección N-S (Figura 5).

Antes de realizar el modelo cinemático sobre el mapa geológico elaborado se trazó una sección D-D' de dirección W-E, pasando por la parte media del área de estudio, aproximadamente perpendicular al anticlinal de Puquín (Figura 5). Para el perfil topográfico se obtuvo a partir de un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 12.5 m ALOS PALSAR obtenido de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), la cual se descargó de manera gratuita del sitio web de la NASA, en base a los datos de buzamiento medidos se realizó 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, obteniendo así una primera aproximación de la sección para su posterior interpretación en profundidad. (Figura 6).

Figura 6



*Nota.* Sección geológica D-D' del anticlinal de Puquín. Fuente: Elaboración propia

Para analizar la evolución cinemática del anticlinal de Puquín, construimos un modelo directo usando el software Fault Fold Forward (Allmendinger et al. 2012).

Este programa permite reconstruir las estructuras como pliegues de propagación de fallas por la metodología de trishear y sirve para calcular el acortamiento en cada etapa de deformación. Este tipo de pliegue relacionado con la falla depende de dos variables: el apical ángulo de la zona trishear y la propagación al deslizamiento relación (p/s). En zonas trishear con pequeños ángulos apicales, tensión intensa se concentra en una estrecha cuña de roca, mientras que los ángulos más amplios resultan en más difusa, tensión menos intensa (Allmendinger, 1998). Por otro lado, la relación p/s determina que tan rápido la línea de la punta se propaga en relación con el deslizamiento en la misma (Allmendinger, 1998). Valores bajos de p/s dan como resultado un pronunciado engrosamiento de las extremidades anteriores y plegado en la zona trishear, mientras que  $p/s > 1$  da como resultado en menos engrosamiento y plegamiento más abierto (Hardy y Ford, 1997).

Se usa este método de trishear para pliegues de propagación de falla, 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 algunos autores y no se puede hacer sin el uso de una computadora.

Después de probar con diferentes valores para estos parámetros, encontramos que la geometría y cinemática del anticlinal de Puquín puede explicarse adecuadamente utilizando un trishear apical ángulo de  $60^\circ$  y una relación p/s de 1.5.

El estadio inicial del área muestra las capas horizontales con una longitud inicial de 9.8 km tanto la Formación Maras, Puquín, Quilque y Chilca.

En el Estadio 1 se observa la deformación de capas y a medida que avanza la deformación, se desarrolla una falla de avance a lo largo del pliegue, teniendo esta falla se coloca la primera capa de crecimiento de la Formación Kayra, no se observa el acortamiento ya que este es imperceptible a esta escala.

En el estadio 2 se observa la deformación de capas completas aflorantes, habiendo incluido tanto en la Formación Kayra y Soncco como capas de crecimiento, finalizando este estadio y teniendo como longitud 9.7 km con un porcentaje de acortamiento de 0.9% 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 se observa la deformación de capas, siendo mayor y más visible la falla de avance, teniendo como longitud 9.03 km equivalente a un porcentaje de acortamiento de 7.8%.

En el estadio 4 se observa que la geometría final de la estructura modelada es comparable con la estructura mostrada en la sección D-D', dejando ver el anticlinal de Puquín y teniendo una longitud final de 8.6 km representando un porcentaje de acortamiento total de 12.1%. (Figura 7(A)).

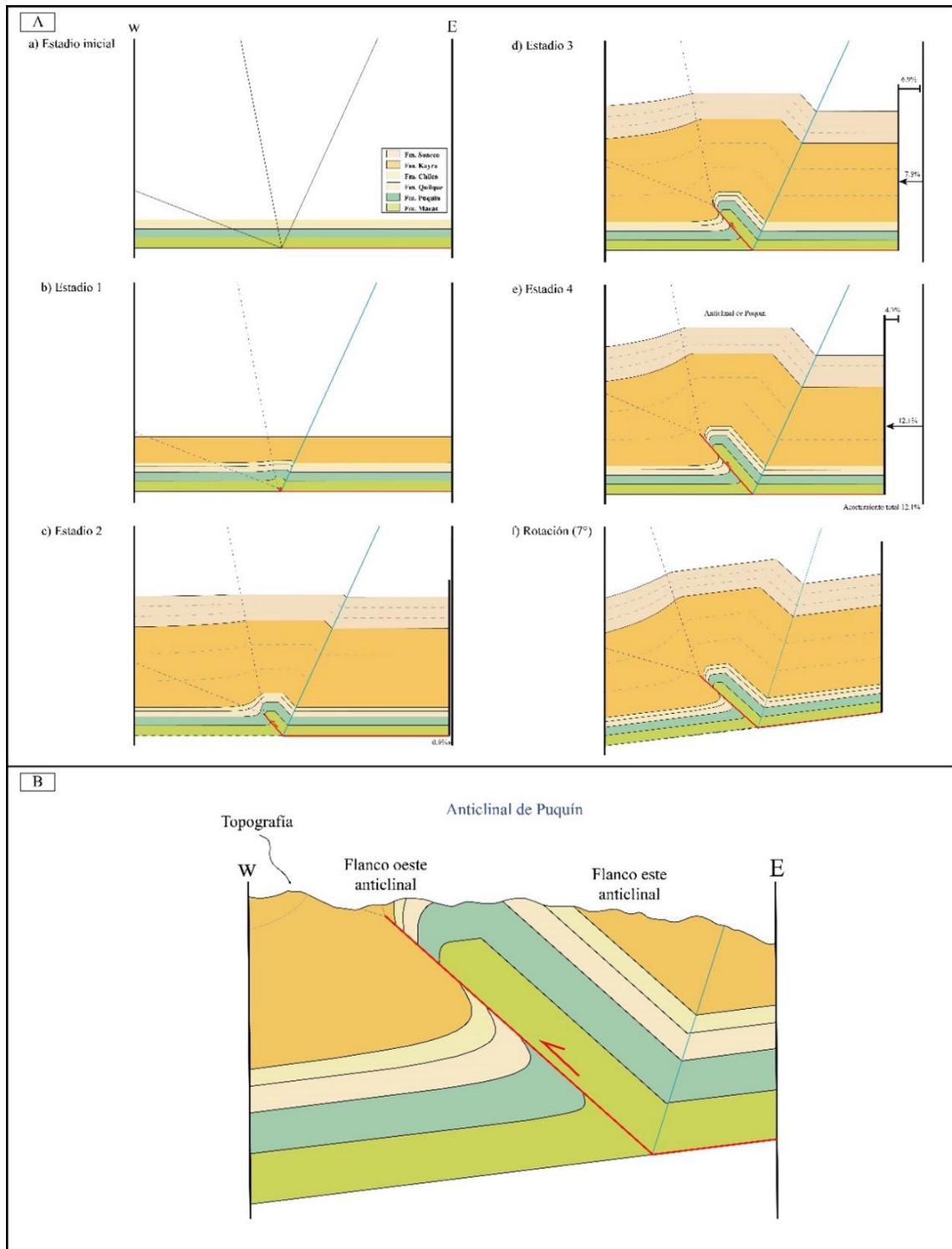
Posterior al estadio 4 se observa la rotación de capas de la estructura modelada (Figura 7(A)); finalmente la última imagen enfoca el anticlinal de Puquín de manera local, pudiendo observar la topografía actual (Figura 7(B)).

El acortamiento tectónico calculado es de 1182.4 m, lo que representa 12.1% de la longitud inicial.

### ***Instrumentos***

La presente investigación tiene como instrumentos de campo una brújula de mano, picota, lupa, ácido clorhídrico al 10%, flexómetro, escalímetro, protactor, GPS, mapa satelital (Google Earth Pro), rayador y para el procesamiento de datos se usaron los softwares libres y gratuitos Stereonet, QGIS y Fault Fold Forward.

Figura 7



*Nota.* Modelo de evolución cinemático propuesto para el anticlinal de Puquín. Fuente: elaboración propia

## **Discusiones**

En la Figura 2 se muestra el gráfico del mapeo preliminar de las unidades geológicas, se usó la técnica de las combinaciones de bandas en tres tipos de imágenes como Landsat 8 OLI, Aster L1T y Sentinel 2A, mostrándose en distintas coloraciones las unidades geológicas de acuerdo a su composición. Sirviendo de información base sobre el cual parte el trabajo de cartografiado geológico.

En la Figura 5 se muestra el mapa geológico final de acuerdo a los datos tomados en campo en el cual se observa las variaciones respecto a la información base, así tenemos el Grupo Tacaza el cual es un bloque mucho más aflorante en la zona oeste, reduciendo así el espesor de afloramiento de las capas rojas (Kayra y Soncco); las capas de la Formación Chilca y Quilque del flanco oeste varía de espesor de acuerdo a la información base, habiendo modificado el espesor de la Formación Puquin siendo el núcleo del anticlinal, finalmente el bloque norte propuesto por INGEMMET como Formación Chinchero, pertenece a la Formación Maras según la litología encontrada en este lugar.

En la Figura 6 se muestra la sección geológica D-D', se interpreta un pliegue con vergencia en dirección oeste, también se muestra la proyección estereográfica de datos estratigráficos de ambos flancos mostrados en el mapa geológico.

En la Figura 7 se muestra el modelo de evolución cinemático con el porcentaje de acortamiento para cada estadio propuesto para el anticlinal, usando el software Fault Fold Forward (Allmendinger et al. 2012).

## **Conclusiones**

Se realizó combinaciones de bandas en tres tipos de imágenes como Landsat 8 OLI (RGB 4/3-6/2-7/4), Aster L1T (RGB 9-4-3) y Sentinel 2A (RGB 11/12-11/2-11/8) para el mapeo preliminar de las unidades geológicas.

Se generó el mapa geológico a una escala de 1:20000 y el gráfico que se muestra en la presentación es de una escala 1:75000. Este mapa se elaboró con información del cartografiado de campo e información bibliográfica.

Se propone un modelo de evolución cinemático del anticlinal de Puquín, usando el método trishear que se realizó con el software Fault Fold Forward, teniendo como acortamiento total 12.1%.

## **Agradecimientos**

Agradecemos a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, vicerrectorado de investigación y al financiamiento de tesis de pre-grado 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 darme la oportunidad y el apoyo para la realización de este trabajo de investigación.

## Referencias

- Allmendinger, R. (1998). *Inverse and forward numerical modeling of trishear fault propagation folds*. *Tectonics* 17 (4), p. 640-656.
- Allmendinger, R., Cardozo, N., Fisher, D. (2012). *Structural Geology Algorithms: Vectors*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Audebaud, E. (1973). *Geología de los cuadrángulos de Ocongate y Sicuani*. *Servicio de Geología y Minería, Boletín 25*, 72 p
- Carlotto, V.; Jaillard, E. y Mascle, G. (1992). *Relación entre sedimentación, paleogeografía y tectónica en la región de Cusco (sur del Perú) entre el Jurásico superior - Paleoceno*. *Boletín Sociedad Geológica del Perú, (83)*: 1-20.
- Carlotto, V. (1992). *Relations entre sédimentation, paléogéographie et tectonique dans la région de Cuzco (Sud du Pérou) entre le Jurassique supérieur et le Paléocène*. *Mémoire DEA, Université de Grenoble I*, 113 p.
- Carlotto, V.; Gil W.; Cárdenas J. y Chávez, R. (1996). *Geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca*. *INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 65*, 245 p.
- 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*, 159 p.
- Carlotto, V., Cardénas, J. (2003). *Revisión y actualización del cuadrángulo de Cusco (28-s) Escala 1:50 000*. *INGEMMET*. 80 p.
- Carlotto, V. (2006). *La deformación y el acortamiento andino en el sur del Perú: Cusco-Abancay-Sicuani*. *Boletín Sociedad Geológica del Perú, (101)*: 91-119p.
- Carlotto, V., Cardénas, J., Carlier, G. (2011). *Geología del cuadrángulo de Cusco, hoja 28-s, escala 1 : 50,000*. *INGEMMET. Boletín, Serie A:138 Carta Geológica Nacional*, 258 p., 6 mapas
- Córdova, E. (1986). *Un bassin intramontagneux andin peruvien. Les couches rouges du bassin de Cuzco (Maestrichtien-Paleocene)*. *Docteur du 3ème cycle, Université de Pau et des Pays de L'Adour, Laboratoire de Géodynamique des Bassins Sédimentaires, Pau*, 272 p.
- El Atillah, A., El Morjani, Z., Mustapha, S. (2019). *Use of the sentinel-2a multispectral image for litho-structural and alteration mapping in al gloà map sheet (1/50,000) (bou azzer-el graara inlier, central anti-atlas, morocco)*. *Artificial Satellites*, v. 54, p. 73-96.

- Gregory, H. (1916). *A geological reconnaissance of the Cuzco valley, Peru*. *American Journal of Sciences*, 41(241): 1-100.
- Hardy, S., Ford, M. (1997). *Numerical of modelado fault trishear propagación folding*. *Tectonics* 16 (5), p. 841-854.
- Mamani, T. (2017) *Aplicación de imágenes aster en la detección de zonas de alteraciones hidrotermales, sector Titire, Carumas, Moquegua* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4231>
- Mwaniki, M. W., Moeller, M. S., Schellmann, G. (2015). *A comparison of Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) in mapping geology and visualising lineaments: A case study of central region Kenya*. 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, v. XL-7/W3, p. 897-903.
- Newell, N. (1949). *Geology of the Lake Titicaca region, Perú and Bolivia*. *New York: Geological Society of America*, 111 p. Memoir 36.
- Sitter, L. (1976). *Geología Estructural*. *Barcelona, Editorial Omega S.A.*, Cuarta edición, 522 p.
- Suppe, J., Medwedeff, D. (1990). *Geometry and kinematics of fault propagation folding*. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 83, p. 409-454.
- Poblet, J. (2004): “Geometría y Cinemática de Pliegues relacionados con Cabalgamientos. Trabajo de Geología, Universidad de Oviedo, pp. 127-146.