

# Influencia de la tectónica cenozoica del Antearco peruano en el mecanismo de deformación del Morro Solar mediante el análisis estructural

## Influence of the cenozoic tectonics from the Peruvian Forearc on the Morro Solar deformation mechanism by means of structural analysis

Luis Alberto Ayala Carazas <sup>1</sup>

Recibido: Enero 2019 - Aprobado: Junio 2019

### RESUMEN

Los afloramientos rocosos del Morro Solar tienen su origen en el Cretáceo inferior durante un régimen tectónico puramente extensional el cual a partir del Cretáceo superior y durante el Cenozoico cambió a un régimen compresional ligado a un contexto de convergencia oblicua de placas tectónicas. Con el fin de estudiar la tectónica cenozoica pos depósito que se superimpuso a tales afloramientos, se ha colectado una importante cantidad de datos estructurales de superficie representados por las orientaciones geométricas de superficies de falla que exhiben un desplazamiento tectónico observable y microestructuras bajo la forma de estrías e indicadores cinemáticos propios de ambientes frágiles. De manera que se ha determinado dos sistemas estructurales que funcionaron en tiempos distintos. El sistema estructural más joven se conforma por un conjunto de fallas normales NE-SO a O-E que mediante el análisis estructural propuesto se ha llegado a la conclusión de que se produjeron en transtensión como el resultado de una "partición de la deformación" ocurrida en el Cenozoico para el Antearco central del Perú.

**Palabras clave:** Morro Solar; tectónica cenozoica; Antearco peruano; análisis estructural.

### ABSTRACT

The outcrops from the Morro Solar locality gave birth in the Lower Cretaceous within a purely extensional tectonic regime which changed to a compressional regime linked to an oblique plate tectonic convergence as of the Upper Cretaceous and during Cenozoic era. In order to study the pos sedimentary cenozoic tectonics that superimposed to such outcrops, it has been necessary to collect an important quantity of structural data from surface represented by the geometric orientation of fault surfaces that shows a observable tectonic displacement as well microstructures such slickenlines and kinematic indicators from a fragile environment. Accordingly, it was possible to determine two structural systems that worked in different times. The younger structural system is composed by a set of ~NE-SW to ~W-E normal faults which by means of the proposed structural analysis in this study it concluded that they were yielded as the result of a "strain partitioning" that occurred during the Cenozoic times within the central Peruvian forearc.

**Keywords:** Morro Solar; cenozoic tectonics; peruvian forearc; structural analysis.

<sup>1</sup> Ingeniero geólogo. Alumno de posgrado (maestría) de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. E-mail: layalacz@gmail.com

## I. INTRODUCCIÓN

Los afloramientos rocosos del Morro Solar en la ciudad de Lima corresponden a una sucesión estratigráfica que se estableció en el Antearco central del Perú mediante un régimen tectónico extensional durante el Cretáceo inferior (Benavides, 1956; Jaillard y Soler, 1996; Sempere, et al. 2002; Jacay, 2005; Ramos, 2010). Donde la deformación que fue posterior a la sedimentación y diagénesis de tales rocas se caracteriza por un número importante de estructuras extensionales (fallas normales), las cuales de forma clásica han sido interpretadas como el resultado de una tectónica exclusivamente extensional (Sempere y Jacay, 2006; León, et al. 2008; Noury, et al. 2016; Rustichelli, et al. 2016; Alván, et al. 2017; Viveen y Schlunegger, 2018).

La razón de ser de la presente tesis nace de los diversos trabajos de campo que se han realizado en la localidad del Morro Solar. La existencia de estructuras tectónicas vistas en macro y microescala que no se tenían cartografiadas en trabajos anteriores, más la identificación cinemática a detalle a partir de indicadores cinemáticos sugerirían que no toda la deformación pos cretácica en el Morro Solar fue extensional. De esta manera, se tendrían argumentos para plantear una tectónica compresional por efectos de una convergencia oblicua que existió desde al menos inicios del Cretáceo superior y más probablemente durante el Cenozoico. Y que dicho sea de paso, ha sido menospreciada tanto para el Antearco peruano (Sempere, 2016), como para el chileno (Niemeyer, et al. 1996) basándose únicamente en evidencias estratigráficas y/o sedimentológicas.

Por lo tanto, el objetivo general de esta investigación es la de analizar la influencia que tuvo la tectónica cenozoica del Antearco peruano en el mecanismo de deformación estructural de los afloramientos rocosos del Morro Solar. Cabe resaltar que este tema no es sólo de interés académico, sino también es relevante para la exploración mineral-petrolera en el área costera del Perú.

### 1.1 Área de estudio

Los afloramientos rocosos del Morro Solar están localizados en la costa central del Perú dentro de lo que geológicamente se conoce como el Antearco peruano al oeste de la Cordillera Occidental. El área de estudio homónima se ubica en las coordenadas longitud  $-77.03$  y latitud  $-12.18$  a  $\sim 14.1$  km al SE de la ciudad de Lima dentro del distrito de Chorrillos. Estos afloramientos yacen en frente del Océano Pacífico y están comprendidos por llanuras entre los 30 y 150 msnm, así como por elevaciones topográficas que llegan hasta los  $\sim 270$  msnm (Figura N° 1).

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología de estudio fue del tipo básica (pura) e inductiva; mientras que su diseño es observacional (no experimental): descriptivo, analítico y cualitativo.

- Es descriptivo: Se ha realizado mediante la observación de campo, obtención y definición de características litológicas, estratigráficas y estructurales.



Figura N° 1. Mapa de ubicación del Morro Solar en el Antearco peruano de la costa central entre Huacho y San Vicente de Cañete.

- Es analítico: Se han descrito y analizado las diversas variables geológicas presentes en campo tal como sucede con las litologías, formaciones geológicas y estructuras.
- Es cualitativo: Se han recolectado datos a escala milimétrica/centimétrica/métrica a partir de estructuras geológicas. Estos datos se han expresado de forma no numérica y estadística.

La selección de la muestra es no probabilística. Esto es así porque el conjunto de elementos que se está considerando se realizó sin ningún criterio estadístico y según su accesibilidad. Al tener como área de estudio a la localidad Morro Solar, sus afloramientos rocosos habrían preservado de forma dispersa diferentes rasgos físicos por deformación tectónica (zonas de cizalla y/o fallas, microlineamientos tectónicos, indicadores cinemáticos y lineamientos estructurales locales).

La técnica para la recolección de datos se llevó a cabo a partir de 4 factores clave:

(A) Investigación bibliográfica: En la que se hizo una recopilación bibliográfica extensa e histórica de la información geológica de las estructuras presentes en los afloramientos rocosos del Morro Solar. Asimismo, se ha tomado en cuenta la obtención de cartografía, reportes técnicos estatales/privados y publicaciones internacionales.

(B) Mapeo geológico: El cual viene a ser el estudio base para todo trabajo de investigación en geociencias (Barnes y Lisle, 2004; Lisle, et al. 2011), especialmente si este trabajo de investigación está enfocado en el análisis estructural. Durante el proceso de mapeo se consideraron los diferentes tipos de rocas/unidades litoestratigráficas, planos de estratificación, relaciones geológicas de campo, zonas de cizalla y/o fallas, además de flancos y ejes de pliegues existentes. De hecho, para la realización del mapeo geológico de la presente tesis, se ha tomado como referencia la estratigrafía base de Fernández (1948). Para esto, se utilizó cartografía física y digital que se consiguió en el IGN (Instituto Geográfico Nacional del Perú) la cual abarcan los sitios donde se encuentran los afloramientos rocosos del Morro Solar. Tal cartografía se encuentra dividida en cuatro mapas a detalle (escala 1/5,000) cuyas curvas de nivel tienen separaciones verticales de 5m y áreas promedio de 2.0 x 1.8km por cada mapa. Comprendiendo un total de 2.60km de ancho por 4.50km de largo para el área de estudio. De manera que los afloramientos rocosos del Morro Solar han sido reestudiados a una escala 1/5,000.

(C) Medición de microlineamientos tectónicos e identificación de indicadores cinemáticos (tectoglifos): Se han localizado diversos afloramientos que han sido afectados por zonas de cizallas y/o fallas y sobre las cuales necesariamente se ha corroborado la existencia de microlineamientos tectónicos e indicadores cinemáticos. La ubicación de tales microestructuras es denominada como “estación” y es georeferenciada con GPS según coordenadas este (E) y norte (N). Luego se ejecutó la medición (mediante brújula brunton) del rumbo y buzamiento del plano de falla que contenga a los microlineamientos tectónicos; seguido de la medición de la magnitud y dirección de

inclinación del pitch (cabecero) correspondientes al microlineamiento de turno. El proceso de medición termina con la identificación cinemática de la estructura a partir de indicadores cinemáticos tales como: fracturas tipo riedel-antiriedel, foliaciones tectónicas, vetillas tensionales en-echelon, estructuras S-C, planos de recristalización, jogs/stepovers y tool marks. A partir de ello, se ha registrado un promedio de 5 mediciones por estación dentro de una base de datos estructural cuyos valores numéricos (en grados sexagesimales) y descripciones cinemáticas son transcritos de la forma más sistemática y ordenada posible.

(D) Fotointerpretación geológica de lineamientos estructurales locales: Como complemento al mapeo geológico y al empleo de estaciones estructurales, se han utilizado 03 imágenes satelitales de alta resolución LANDSAT RGB (bandas 7, 4, 2) que abarcan el área de estudio. Por ende, se han registrado a los lineamientos estructurales desde una escala 1/5,000 hasta otra más reducida 1/1,000. Este proceso permitirá dar continuidad de campo entre estructuras mapeadas e inferidas mediante una correlación geométrica y cinemática.

El análisis estrictamente estructural se ha ejecutado mediante el procesamiento estereográfico de datos provenientes de las estaciones microestructurales realizadas en campo con el fin de evaluar las cinemáticas de las estructuras de la manera más resumida y analítica posible. De hecho, el uso de estereogramas tiene su fundamento en la proyección horizontal de los elementos geométricos que se encuentren en el hemisferio inferior de una esfera que conserve el área (falsilla de Schmidt). En la presente tesis, se ha utilizado la proyección estereográfica para la representación de planos de estratificación, zonas de cizalla y/o fallas, microlineamientos tectónicos y cinemáticas estructurales haciendo uso de la metodología de los diedros rectos (Bott, 1959; Angelier y Mechler, 1977; Angelier, 1984; Hippolyte, et al. 2012) con la ayuda del software Faultkin® (Marrett y Allmendinger, 1990; Allmendinger, et al. 2012).

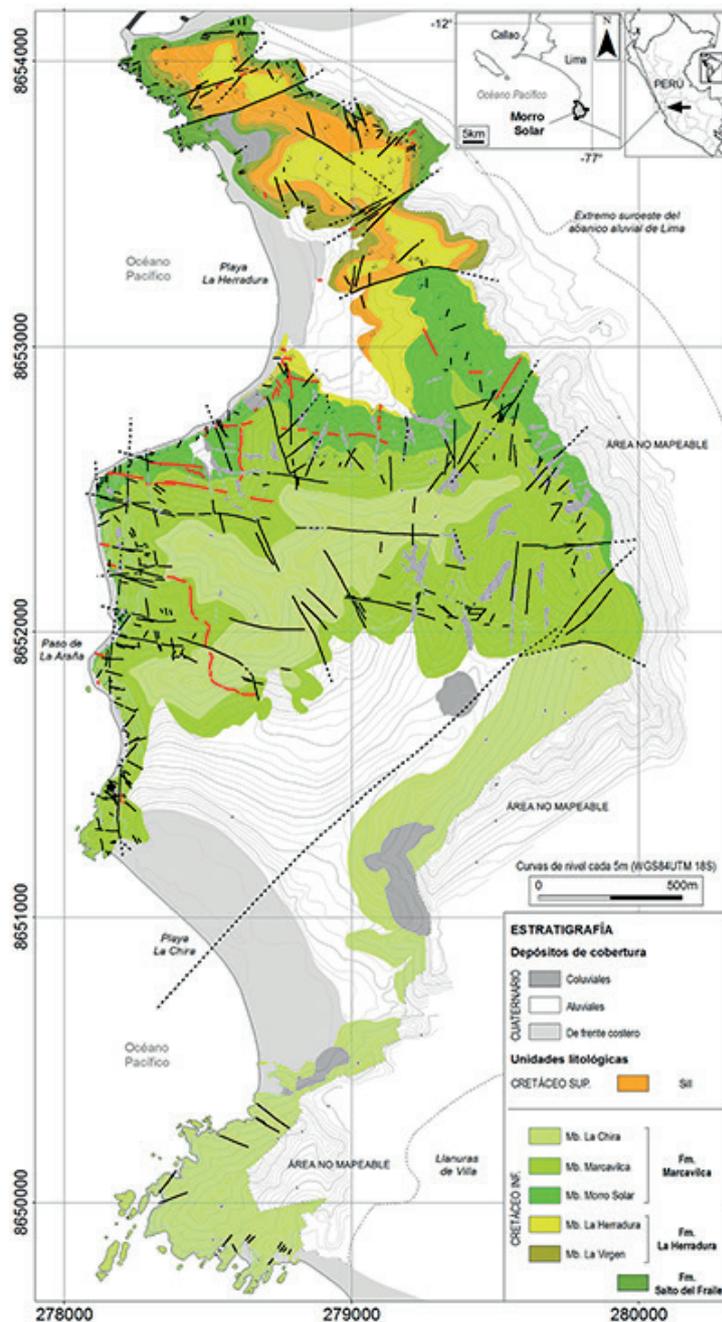
### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Geología actualizada del Morro Solar

Los afloramientos rocosos (Figura N° 2) de la localidad del Morro Solar son de origen siliciclástico marino los cuales fueron sedimentados por la acción de las mareas durante el Cretáceo inferior. Teniendo así, una estratigrafía que se compone de tres unidades bastante susceptibles a ser mapeadas (Figura N° 3): (1) 61m de espesor de areniscas cuarzosas y lutitas ocasionales de la Formación Salto del Fraile cuya base no está expuesta en esta localidad. (2) Aproximadamente 94m de espesor de lutitas oscuras con nódulos calcáreos, areniscas cuarzosas y calizas de la Formación La Herradura que yace en contacto transicional por encima de la Formación Salto del Fraile y que a su vez está subdividida en los Miembros La Virgen y La Herradura. (3) 326m de espesor de areniscas cuarzosas y ocasionales niveles estratigráficos de limolitas y lutitas de la Formación Marcavilca la cual yace en contacto neto sobre la Formación La Herradura y que también está subdividida en los Miembros Morro Solar, Marcavilca y La Chira.



**Figura N° 2.** Vista SE-NO de los afloramientos rocosos del Morro Solar. Al fondo, se aprecia a los niveles estratigráficos de areniscas cuarzosas de la Formación Marcavilca.



**Figura N° 3.** Geología actualizada del Morro Solar (este estudio) debidamente cartografiada y georeferenciada sobre una topografía base.

### 3.2. Análisis estructural

#### 3.2.1. Descripción de estructuras

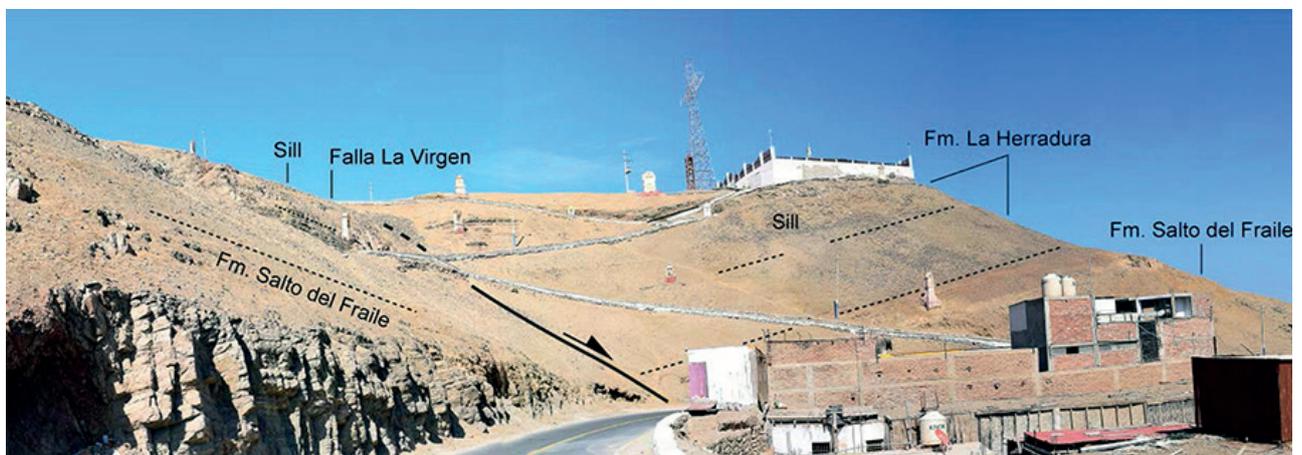
El Morro Solar presenta una abundancia de estructuras a escala macroscópica desde escalas mayores a 1/10,000 hasta otras de tamaño más restringido que sólo pueden observarse a escalas inferiores a 1/5,000. De forma similar, las cinemáticas son también bastante variadas. No obstante, existe una predominancia de estructuras extensionales y/o fallas normales. Seguidas de una cantidad mucho más ocasional de estructuras compresionales y de desgarre las que en conjunto cortan parcial y/o totalmente a la estratigrafía presente en el Morro Solar.

Las estructuras extensionales se dividen en dos grupos. El primer grupo (Figura N° 4) está conformado por fallas normales de dirección ~N-S a ~NO-SE cuyos azimuts varían entre los 170° y 20°. Estas fallas son paralelas al emplazamiento de diques andesíticos y según su cercanía

con niveles dúctiles (lutitas) dentro de la Formación Salto del Fraile es posible observar pliegues de menos de 1.5m de altura por compensación tectónica. El segundo grupo (Figura N° 5) está conformado por fallas normales de dirección ~NE-SO a ~O-E cuyos azimuts varían entre los 40° y 80°, de forma ocasional es posible verlas paralelas a los diques andesíticos. Dentro de las lutitas oscuras de la Formación La Herradura, es muy frecuente encontrar pliegues por compensación tectónica cuyos azimuts son paralelos a las fallas normales que las generan. Uno de los pliegues más característicos de este tipo es el pliegue conocido como “pliegue en cofre” cuya parte inferior exhibe una pequeña falla inversa que se propaga a través de lutitas parduzcas que progresivamente flexionan la parte superior de la estratigrafía dando el aspecto de una aparente deformación sinsedimentaria. No obstante, este tipo de pliegues por compensación también ocurren en otros afloramientos dentro de la Formación La Herradura



**Figura N° 4.** Vista E-O de un conjunto de estructuras extensionales de ángulo alto que buzan hacia el este. Nótese que el nivel estratigráfico tabular de arenisca cuarzosa (en color claro) se encuentra basculado de un lado a otro debido a una tectónica extensional.



**Figura N° 5.** Vista O-E de una falla normal de azimut 30° cuyo bloque techo (a la derecha) se encuentra desplazado hacia abajo con respecto a su bloque piso (a la izquierda). En la prolongación hacia el mar (oeste) esta estructura corta a los diques andesíticos asociados al primer grupo de estructuras extensionales.

cerca al túnel del mismo nombre, así como en la Formación Marcavilca. Cabe agregar que las fallas normales de este segundo grupo y sus respectivas compensaciones tectónicas cortan mayoritariamente a las fallas normales y a los diques del primer grupo. De esta manera, se puede establecer que el segundo grupo de fallas normales es posterior (o más joven) respecto del primero.

Por otro lado, si bien la cantidad de estructuras compresionales y de desgarre es mucho menor que los ejemplos descritos anteriormente, ello no les quita su

respectiva importancia tectónica. Las de cinemática compresional se les puede observar bajo la forma de reactivaciones tectónicas por compresión dentro de algunas de las superficies correspondientes al primer grupo de fallas normales. Así como en los alrededores del asentamiento humano Alto Perú es posible ver a fallas inversas cuyos bloques techos levantan a la Formación Salto del Fraile sobre la Formación La Herradura de modo que dentro de esta última se observe un sinclinal con flancos de buzamiento de ángulo alto (Figura N° 6). Con respecto a las estructuras generadas por desgarre (Figura N° 7), sólo



**Figura N° 6.** Vista SE-NO del sinclinal de dirección NO-SE localizado dentro de la Formación La Herradura. Nótese que los bloques techo asociados a las fallas observadas corresponde a la Formación Salto del Fraile lo cual explicaría una etapa compresional ya que en este caso por falta de un nivel de despegue estratigráfico dicho de pliegue no puede ser explicado por la compensación tectónica de fallas normales.



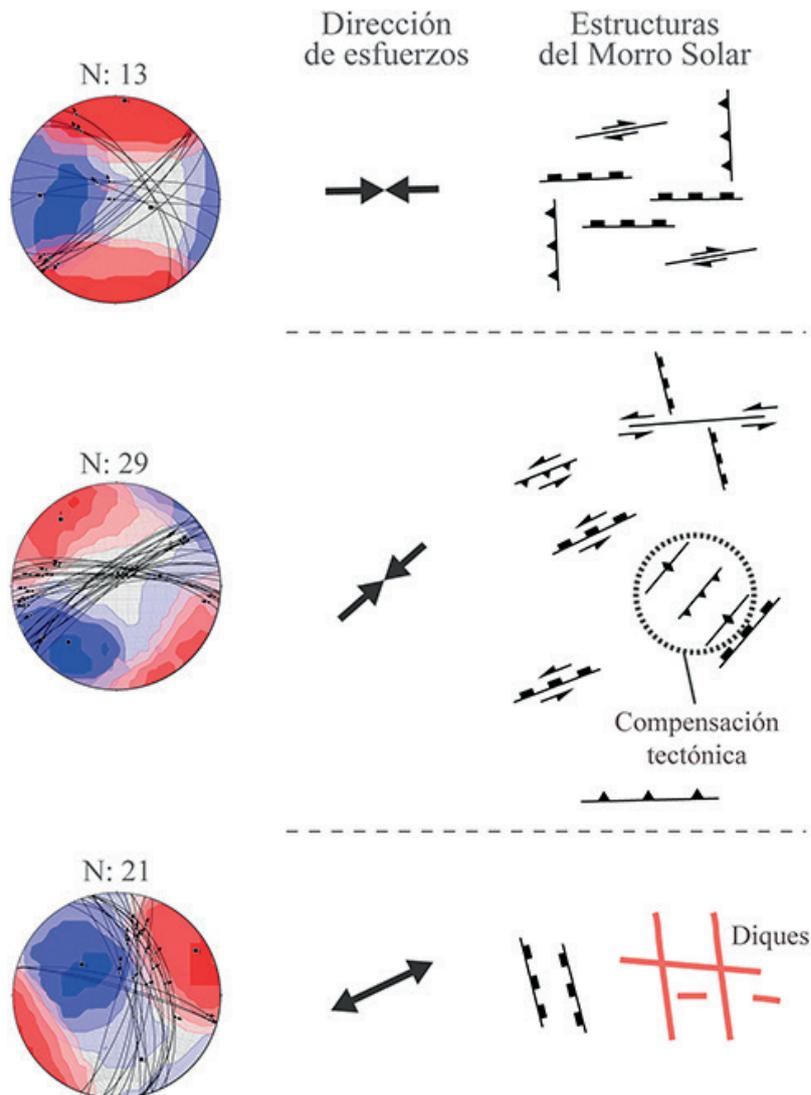
**Figura N° 7.** Estructura de azimut 110° con cinemática sinistral y componente secundaria extensional deducida a partir de una protuberancia (tool mark tectónico) cuyo cabeceo es de ángulo bajo.

se les puede apreciar por medio de estrías e indicadores cinemáticos tal como sucede con la presencia de fracturas tipo riedel, foliaciones tectónicas o tool marks tectónicas. Las estrías se pueden encontrar en afloramientos aislados o también sobrepuestas dentro de las superficies de fallas normales correspondientes a los dos grupos de estructuras extensionales previamente descritos.

### 3.2.2. Cinemática de estructuras y regímenes tectónicos

El procesamiento cinemático de microlineamientos tectónicos e indicadores para 13 estaciones y una población total de 63 datos medidos arroja tres eventos tectónicos para una “partición de la deformación” bien definida (Figura N° 8). El primer evento está caracterizado por una extensión de dirección NE-SO que fue contemporánea con el funcionamiento de las estructuras extensionales ~N-S a ~NO-SE, a la formación de las compensaciones tectónicas locales y a la mayor parte de los diques andesíticos que afloran en el Morro Solar para una edad probablemente coetánea a los ~110Ma (Bussell, 1983). El segundo evento

corresponde a una compresión de dirección NE-SO la cual fue oblicua a estructuras de desgarre con componente secundaria de movimiento extensional y/o compresional tal como sucede para la existencia del segundo grupo de estructuras extensionales de dirección ~NE-SO a ~O-E. De manera que, si este evento es más joven que el evento que generó al primer grupo de estructuras extensionales, entonces se trata de una deformación posterior al Cretáceo Superior y que bien encaja con el vector de convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana para el Cenozoico (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza y Ghidella, 2005). El tercer evento también se trata de una compresión pero de dirección O-E de la que se cree que es la última etapa de deformación y que fue la responsable de generar movimientos tectónicos de desgarre sobre las estructuras previamente formadas. Asimismo, la dirección de compresión coincide con la convergencia oblicua de placas tectónicas durante el Cenozoico aunque por la falta de relaciones de contacto con pisos geológicos más jóvenes del Cretáceo superior o del Cenozoico, sumado a la ausencia de dataciones radiométricas es difícil saber cuál es la edad precisa de este evento de deformación.



**Figura N° 8.** Interpretación estereográfica y cinemática de los datos microestructurales tomados en el Morro Solar. Las áreas en azul y en rojo corresponden a las franjas dominadas por compresión y extensión, respectivamente.

## IV. CONCLUSIONES

Las estructuras tectónicas del Morro Solar están caracterizadas por dos sistemas principales: (1) el primero de cinemática extensional cuya dirección promedio es ~N-S a ~NO-SE a la cual se le atribuye una edad del Cretáceo superior; (2) y otro segundo sistema extensional más joven de dirección promedio ~NE-SO a ~O-E que cortó al primero y que funcionó durante el Cenozoico. Tal como se menciona en las discusiones y se observa en la figura N° 8, el mecanismo de deformación del Morro Solar si estuvo influenciado por una tectónica cenozoica compresional. No obstante, es necesario aclarar que esta compresión estuvo ligada a un contexto de convergencia oblicua de placas tectónicas (transtensión) como consecuencia de una “partición de la deformación” la que en última instancia es la responsable de exhibir a las estructuras del Morro Solar tal como las observamos en la actualidad.

## V. AGRADECIMIENTOS

A las autoridades y profesores de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. En especial al Mg. Ing. Hugo Rivera Mantilla por su especial y concienzudo interés en ver que después de poco más de medio siglo se haya podido actualizar la geología del Morro Solar.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allmendinger, R.W., Cardozo, N.C., Fisher, D. (2012). *Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors*: Cambridge, England, Cambridge University Press, 289 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511920202> PMCid:PMC3223407
- Alván, A., Criales, A., von Eynatten, H., Dunkl, I., Gerdes, A. y Jacay, J. (2017). Seismic-stratigraphic architecture of the Oligocene-Pliocene Camaná Formation, southern Peruvian forearc (Province of Arequipa). *Andean Geology* 44 (1): 17-38. <https://doi.org/10.5027/andgeoV44n1-a02>
- Angelier, J. (1984). Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research* 89 (B7), 5835-5848. <https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05835>
- Angelier, J. y Mechler, P. (1977). Sur un méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Géol. France*, 7: 1309-1318. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-XIX.6.1309>
- Barnes, J. y Lisle, R. (2004). *Basic Geological Mapping*, fourth edition. The Geological Field Guide Series. John Wiley & Sons Ltd. 200p. <https://www.wiley.com/en-pe/Basic+Geological+Mapping,+4th+Edition-p-9781118685426>
- Benavides, V. (1956). Cretaceous system in northern Peru. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, v. 108, article 4. <https://searchworks.stanford.edu/view/1149999>
- Bott, M.H.P. (1959). The mechanics of oblique slip faulting. *Geol. Mag.*, 96, 109-117. <https://doi.org/10.1017/S0016756800059987>
- Bussell, M.A. (1983). Timing of tectonic and magmatic events in the central Andes of Peru. *Geol. Soc. London*, Vol. 140, p. 279-286. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.140.2.0279>

- Fernández, J. (1948). *Geología del Morro Solar*. Monografía del Ministerio de Fomento y Obras Públicas. República del Perú. 78p. Recuperado de <http://www.sgp.org.pe/category/bibliovirtual/?descarga=b.033-01.pdf>
- Hippolyte, J-C., Bergerat, F., Gordon, M.B., Bellier, O. y Espurt, N. (2012). Keys and pitfalls in mesoscale fault analysis and paleostress reconstructions, the use of Angelier's methods. *Tectonophysics*, v. 581, 144-162. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.01.012>
- Jacay, J. (2005). *Análisis de la sedimentación del sistema cretáceo de los Andes del Perú Central*. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, vol. 8, N° 15, p. 49-59. Recuperado de [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/Vol8\\_N15/a08.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/Vol8_N15/a08.pdf)
- Jaillard, E. y Soler, P. (1996). Cretaceous to early Paleogene tectonic evolution of the northern Central Andes (0-18 degrees S) and its relations to geodynamics. In: Geodynamics of the Andes. *Tectonophysics*, v. 259, 41-53. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00107-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00107-7)
- León, W., Rosell, W., Alemán, A., Torres, V. y De La Cruz, O. (2008). *Estratigrafía, Sedimentología y Evolución Tectónica de la Cuenca Pisco Oriental*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Boletín N°27 Serie D. Estudios Regionales, p. 1-154. Recuperado de <http://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/ingemmet/341>
- Lisle, R.J., Brabham, P. y Barnes, J.W. (2011). *Basic Geological Mapping*, fifth edition. The Geological Field Guide Series. John Wiley & Sons Ltd. 230p. Recuperado de [http://www.science.earthjay.com/instruction/HSU/2016\\_spring/GEOL\\_335/Basic\\_Geological\\_Mapping.pdf](http://www.science.earthjay.com/instruction/HSU/2016_spring/GEOL_335/Basic_Geological_Mapping.pdf)
- Marrett, R. A. y Allmendinger, R. W. (1990). Kinematic analysis of fault-slip data: *Journal of Structural Geology*, v. 12, p. 973-986. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(90\)90093-E](https://doi.org/10.1016/0191-8141(90)90093-E)
- Niemeyer, H., González, G. y Martínez-De Los Ríos, E. (1996). Evolución tectónica cenozoica del margen continental activo de Antofagasta, norte de Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 23. No 2, p. 165-186. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6639444>
- Noury, M., Bernet, M., Schildgen, T.F., Simon-Labric, T., Philippon, M. y Sempere, T. (2016). Crustal-scale block tilting during Andean trench-parallel extension: Structural and geo-thermochronological insights. *American Geophysical Union. Tectonics*, 35, doi:10.1002/2016TC004231. <https://doi.org/10.1002/2016TC004231>
- Pardo-Casas, F. y Molnar, P. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American Plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, Volume 6, Issue 3, 233-248. <https://doi.org/10.1029/TC006i003p00233>
- Ramos, V. A. (2010). The tectonic regime along the Andes: Present-day and Mesozoic regimes. *Geological Journal* 45: 2-25. <https://doi.org/10.1002/gj.1193>
- Rustichelli, A., Di Celma, C., Tondi, E. y Bianucci, G. (2016). Deformation within the Pisco Basin sedimentary record (southern Peru): Stratabound orthogonal vein sets and their impact on fault development. *Journal of South American Earth Sciences*. Manuscript Draft SAMES-D-15-00160. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.11.002>

- Sempere, T. (2016). El “pensamiento único” en tectónica andina y subandina: ¿Hasta cuándo?. Resúmenes ampliados del XVIII Congreso Peruano de Geología. Publicación Especial N°12. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/357402318/El-pensamiento-unico-en-tectonica-andina-y-subandina-Hasta-cuando>
- Sempere, T., Carlier, G., Soler, P., Fornari, M., Carlotto, V., Jacay, J., Arispe, O., Neraudeau, D., Cárdenas, J., Rosas, S., Jiménez, N. (2002). Late Permian-Middle Jurassic lithospheric thinning in Peru and Bolivia, and its bearing on Andean-age tectonics. *Tectonophysics*, Elsevier, 345 (1-4), pp.153-181. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00211-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00211-6)
- Sempere, T. y Jacay, J. (2006), Estructura tectónica del sur del Perú (antearco, arco, y Altiplano suroccidental), in *XIII Congreso Peruano de Geología: Resúmenes extendidos* Sociedad geológica del Perú, Lima, pp. 324-327. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Thierry\\_Sempere/publication/282171766\\_Estructura\\_tectonica\\_del\\_sur\\_del\\_Peru\\_Antearco\\_Arco\\_y\\_altiplano\\_suroccidental/links/57fe032f08aeaf819a5bfb5.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Thierry_Sempere/publication/282171766_Estructura_tectonica_del_sur_del_Peru_Antearco_Arco_y_altiplano_suroccidental/links/57fe032f08aeaf819a5bfb5.pdf)
- Somoza, R. y Ghidella, M.E. (2005). Convergencia en el margen occidental de América del Sur durante el Cenozoico: subducción de las placas de Nazca, Farallón y Aluk. *Revista de la Asociación Geológica de Argentina*, 60 (4): 797-809. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/262626535\\_Convergencia\\_en\\_el\\_margen\\_occidental\\_de\\_America\\_del\\_Sur\\_durante\\_el\\_Cenozoico\\_subduccion\\_de\\_las\\_placas\\_de\\_Nazca\\_Farallon\\_y\\_Aluk/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/262626535_Convergencia_en_el_margen_occidental_de_America_del_Sur_durante_el_Cenozoico_subduccion_de_las_placas_de_Nazca_Farallon_y_Aluk/citation/download)
- Viveen, W. y Schlunegger, F. (2018). Prolonged extension and subsidence of the Peruvian forearc during the Cenozoic. *Tectonophysics* v. 730, 48-62. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.02.018>

