



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica

Unidad de Posgrado

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

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Geología con
Mención en Tectónica y Geología Regional

AUTOR

Luis Alberto AYALA CARAZAS

ASESOR

Mg. Enrique GUADALUPE GÓMEZ

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Ayala, L. (2021). *Influencia de la tectónica cenozoica del antearco peruano en el mecanismo de deformación del Morro Solar mediante el análisis estructural*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Luis Alberto Ayala Carazas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	44744402
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-2047-994X
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Enrique Guadalupe Gómez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	09191995
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-9583-8807
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Aldo Alfonso Alván de la Cruz
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	41133899
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Jorge Eduardo Chira Fernández
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07342254
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Darwin Romero Fernández
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	24994255
Miembro del jurado 3	
Nombres y apellidos	Enrique Guadalupe Gómez
Tipo de documento	DNI

Número de documento de identidad	09191995
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Empresa EXPLOROCK SAC País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: San Miguel Dirección: Jr. Arica 353, Dpto. 402 Latitud: -12.09175 Longitud: -77.07873
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2017-2021
URL de disciplinas OCDE	Geología http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima, a los nueve días del mes de noviembre del año 2021, siendo las 15:00 horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000496-2021-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 06 de noviembre del 2021, con la finalidad de evaluar la sustentación virtual al amparo de la Directiva de la UNMSM aprobada con Resolución Rectoral N°01357-R-20 de la siguiente tesis:

TÍTULO

«INFLUENCIA DE LA TECTÓNICA CENOZOICA DEL ANTEARCO PERUANO EN EL MECANISMO DE DEFORMACIÓN DEL MORRO SOLAR MEDIANTE EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL»

Que, presenta el Bach. **LUIS ALBERTO AYALA CARAZAS**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN GEOLOGÍA CON MENCIÓN EN TECTÓNICA Y GEOLOGÍA REGIONAL**.

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente digital N° 04335-FIGMMG-2016 del 27 de junio del 2016, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente en conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

BUENO 16

Habiendo sido aprobada la sustentación virtual de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN GEOLOGÍA CON MENCIÓN EN TECTÓNICA Y GEOLOGÍA REGIONAL** al Bach. **LUIS ALBERTO AYALA CARAZAS**.

Siendo las 16:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DR. ALDO ALFONSO ALVÁN DE LA CRUZ
Presidente


MG. JORGE EDUARDO CHIRA FERNÁNDEZ
Secretario


MG. DARWIN ROMERO FERNÁNDEZ
Miembro


MG. ENRIQUE GUADALUPE GÓMEZ
Asesor

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Dedico esta tesis a mi esposa Cinthia Fernández quien desde el 2013 me ha apoyado en la obtención de los resultados e interpretaciones de las siguientes páginas. Nuestro antiguo pasatiempo de visitar el Morro Solar terminó en la presentación de este manuscrito. Mi mascota Totó sirvió en algunas ocasiones de “perro escala” en campo, así como siempre me acompañó silenciosamente durante las madrugadas en las que se desarrolló esta redacción. También hago esta dedicatoria a mi amigo el Ing. Vladimir Amorin quien mapeó conmigo la zona sur del Morro Solar.

Muchas gracias a los Drs. José Macharé y Carlos Ángeles quienes gentilmente aceptaron asesorar la hipótesis, cartografía y tectónica del Morro Solar. Asimismo, las contribuciones de los Drs. Andrés Folguera y Fernando Martínez sirvieron para la reflexión de diversas ideas sobre la Tectónica Andina, las cuales han llevado a plantear una discusión adecuada de los resultados.

Gracias especiales al Mg. Hugo Rivera, profesor de posgrado del curso de *Metodología de la Investigación* en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, quien me enseñó la geología del Morro Solar desde mis estudios de pregrado.

Finalmente, agradezco a mi asesor el Mg. Enrique Guadalupe, al jurado de tesis Dr. Aldo Alván, Ing. Javier Jacay, Mg. Christian Hurtado, Ing. Walther León y Bach. Wilson López quienes brindaron crítica valiosa para la mejora de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE FIGURAS.....	VI-VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	X
 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	 1
1.1. Situación problemática.....	1
1.2. Formulación del problema.....	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos.....	2
1.3. Justificación teórica.....	2
1.4. Justificación práctica.....	3
1.5. Objetivos.....	3
1.5.1. Objetivo general.....	3
1.5.2. Objetivos específicos.....	3
 CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	 4
2.1. Antecedentes de la investigación.....	4
2.2. Bases teóricas.....	6
2.2.1. Tectónica cenozoica del antearco peruano.....	6
2.2.2. Tectónica de placas.....	9
2.2.3. Interacción en los bordes de placas tectónicas.....	10
2.2.4. Direcciones y velocidades de convergencia de placas en el Cenozoico.....	11
2.2.5. Geometrías de estructuras tectónicas.....	14
2.2.6. Cinemáticas de estructuras tectónicas.....	15
2.2.7. Compatibilidad y partición de estructuras tectónicas.....	19
2.3. Marco conceptual o glosario.....	20

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	23
3.1. Tipo y diseño de la investigación.....	23
3.2. Unidad de análisis.....	23
3.3. Población de estudio.....	23
3.4. Tamaño de muestra.....	24
3.5. Selección de muestra.....	24
3.6. Técnicas de recolección de datos.....	24
3.6.1. Investigación bibliográfica.....	24
3.6.2. Observación.....	24
3.6.2.1. Fotointerpretación geológica precampo.....	24
3.6.2.2. Mapeo geológico de campo.....	25
3.6.2.3. Procesamiento poscampo.....	27
3.7. Análisis e interpretación de la información.....	28
3.7.1. Estereografía de planos.....	28
3.7.2. Método de los Diedros Rectos.....	28
3.7.3. Modelamiento estructural 2D-3D.....	30
3.8. Hipótesis y variables.....	31
3.8.1. Hipótesis general.....	31
3.8.2. Hipótesis específicas.....	31
3.9. Matriz de consistencia.....	31
3.10. Operacionalización de variables.....	32
CAPÍTULO IV: GENERALIDADES.....	33
4.1. Estratigrafía del antearco de la región Lima.....	33
4.2. Estructuras tectónicas del antearco de la región Lima.....	37

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
5.1. Análisis, interpretación y discusión de resultados.....	40
5.1.1. Geología del Morro Solar.....	40
5.1.2. Análisis estructural dinámico y origen del mecanismo de deformación del Morro Solar.....	49
5.1.2.1. Estructuras extensionales N-S/NO-SE.....	51
5.1.2.2. Estructuras extensionales NE-SO/O-E.....	56
5.1.2.3. Estructuras compresionales.....	61
5.1.2.3.1. Pliegues y fallas inversas por compensación tectónica.....	61
5.1.2.3.2. Fallas inversas por compresión.....	65
5.1.2.4. Estructuras de desgarre.....	68
5.1.2.5. Microestructuras tectónicas.....	68
5.1.2.6. Arquitecturas tectónicas 2D y 3D.....	71
5.1.3. Evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar.....	76
5.2. Discusión de resultados.....	80
CONCLUSIONES.....	84
RECOMENDACIONES.....	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
ANEXOS Y TABLAS.....	95

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> El antearco peruano se encuentra en el extremo oeste de la Cordillera Occidental y está conformado por los dominios geotectónicos: 1 (Casma), 2 (Pisco-Chala) y 3 (Atico-Mollendo-Tacna). Tomado y basado de Carlotto et al. (2009) y Sébrier et al. (1988).....	8
<i>Figura 2.</i> Distribución de las placas tectónicas en la Tierra. Tomado de Simkin et al. (2006).....	9
<i>Figura 3.</i> Movimientos y tipos de bordes de las placas tectónicas en los Andes. Tomado de Van Der Pluijm y Marshak (2004).....	10
<i>Figura 4.</i> A: Convergencia de las placas Farallón (FA)-Sudamericana (68-28 Ma) y Nazca (NZ)-Sudamericana (26-10 Ma). B: Durante el Cenozoico, los vectores de convergencia de placas tuvieron direcciones NE-SO y O-E. Tomado de Somoza y Ghidella (2005) y Pardo-Casas y Molnar (1987).....	12
<i>Figura 5.</i> Velocidades de convergencia de placas y sus efectos en la placa tectónica cabalgante. Tomado de Daly (1989) y Royden (1993).....	12
<i>Figura 6.</i> Direcciones y velocidades de convergencia de placas en el margen occidental andino durante el Cenozoico entre los ~60 y ~10 Ma. Tomado de Fennell et al. (2018).....	13
<i>Figura 7.</i> Geometrías de estructuras tectónicas en un modelo analógico. Las estructuras aparecen invariablemente desde un primer orden (escala del modelo) hasta en dimensiones más reducidas (milimétricas). Tomado de Holohan et al. (2008).....	14
<i>Figura 8.</i> Microlineamientos tectónicos e indicadores cinemáticos. Tomado de Allmendinger (1987), Doblas (1998) y Van Der Pluijm y Marshak (2004).....	16
<i>Figura 9.</i> Cinemáticas de estructuras tectónicas asociadas a estados de esfuerzos según el modelo dinámico de fallas de Anderson (1905 y 1951).....	17
<i>Figura 10.</i> Arquitectura tectónica de fallas normales (Peacock et al., 2000; Delogkos et al., 2017), las fallas inversas tienen lugar por compensación tectónica cerca de reologías dúctiles. Tomado de Jackson et al. (2006).....	18
<i>Figura 11.</i> Arquitectura tectónica de fallas inversas y pliegues (Suppe y Donald, 1990; Erslev, 1991). Tomado de Van Der Pluijm y Marshak (2004).....	18
<i>Figura 12.</i> Arquitectura tectónica de fallas de desgarre (Sylvester, 1988) en la que coexisten fallas normales (por transtensión) e inversas (por transpresión). Tomado de Cunningham y Mann (2007).....	18
<i>Figura 13.</i> A: Modelo de Ramsay (1967). B: Deformación tectónica transtensional (subsistencia) y transpresional (levantamiento). Tomado de Van Der Pluijm y Marshak (2004) y McClay y Bonora (2001).....	19
<i>Figura 14.</i> Etapa inicial del mapeo geológico de campo (sector norte del Morro Solar).....	26
<i>Figura 15.</i> Bloque-diagrama de los <i>datums</i> de falla tomados en una estación microestructural. Basado y modificado de Rowland et al. (2007).....	26
<i>Figura 16.</i> Estereofalsilla de Schmidt. Tomado de Rowland et al. (2007).....	28
<i>Figura 17.</i> A: Método de los Diedros Rectos empleado para el análisis estructural dinámico de fallas. B: Las mejores interpretaciones se obtienen utilizando los modelos de Anderson (1905 y 1951) y de Ramsay (1967). Tomado de Allmendinger (1987).....	29
<i>Figura 18.</i> Etapa inicial del modelamiento estructural del sector norte del Morro Solar usando los softwares Blender y Photoshop®.....	30

<i>Figura 19.</i> Matriz de consistencia de este trabajo.....	31
<i>Figura 20.</i> Operacionalización de variables de este trabajo.....	32
<i>Figura 21.</i> Estratigrafía del antearco peruano de la región Lima, sintetizada a partir de los trabajos de Palacios et al. (1992), Romero et al. (2005), Aleman et al. (2006), Romero (2007) y Jacay et al. (2015). Tiempo geológico según Cohen et al. (2013).....	35
<i>Figura 22.</i> Mapa de ubicación del área de estudio (Morro Solar) en la costa central del Perú (antearco de la región Lima). Imagen satelital tomada de Google Earth.....	36
<i>Figura 23.</i> Mapa geológico regional de Lima entre las latitudes 11°30'S y 12°30'S (1: Antearco, 2: Vertiente Pacífica de la Cordillera Occidental, 3: Cordillera Occidental). Compilado de Pardo (1961), Caldas (1980), Palacios et al. (1981), Figueroa (1988), Palacios (1992), Palacios et al. (1992) y Caldas y Palacios (1998).....	39
<i>Figura 24.</i> Cartografía geológica clásica del Morro Solar. Tomado de A: Fernández et al. (1958), B: Caldas y Palacios (1998) y C: León y De La Cruz (2002).....	40
<i>Figura 25.</i> Mapa geológico del Morro Solar a escala 1/5,000 (este trabajo, ver escala más amplia en el Anexo N°1 y en las Tablas de la N°1 a la N°7). Las líneas negras son estructuras tectónicas, las estrellas azules indican la ubicación de estaciones microestructurales (ver datos en las Tablas N°8, N°9 y N°10) y las líneas punteadas corresponden a 19 secciones estructurales (Anexos N°2 y N°3).....	41
<i>Figura 26.</i> Estratigrafía del Grupo Morro Solar levantada cada 5 m en el área de estudio (ver a escala 1/1,200 en el Anexo N°1).....	44
<i>Figura 27.</i> Columna estratigráfica de la Formación Salto del Fraile.....	45
<i>Figura 28.</i> Columna estratigráfica de la Formación La Herradura.....	46
<i>Figura 29.</i> Columna estratigráfica de la Formación Marcavilca.....	47
<i>Figura 30.</i> Orientaciones de diques (N: 81). 57 mediciones se obtuvieron en campo y 24 azimuts se extrajeron de la fotointerpretación geológica pre y poscampo (ver Tabla N°1). La ubicación de los diques está señalada por las flechas blancas. "N" representa el número de datos medidos.....	48
<i>Figura 31.</i> Mediciones estructurales en el Morro Solar (ver Tablas N°2, N°3, N°4, N°5 y N°6). "N" representa el número de datos medidos.....	50
<i>Figura 32.</i> Estructuras extensionales N-S/NO-SE en el sector norte del Morro Solar. Las líneas rojas corresponden a diques.....	52
<i>Figura 33.</i> Estructuras extensionales N-S/NO-SE en el sector sur del Morro Solar. Las líneas rojas corresponden a diques.....	53
<i>Figura 34.</i> Vistas de campo del mapeo geológico observado en la Figura 32.....	54
<i>Figura 35.</i> Vistas de campo del mapeo geológico observado en las Figuras 32 y 33.....	55
<i>Figura 36.</i> Estructuras extensionales NE-SO/O-E en el sector norte del Morro Solar. Las líneas rojas corresponden a diques.....	57
<i>Figura 37.</i> Estructuras extensionales NE-SO/O-E en el sector sur del Morro Solar. Las líneas rojas corresponden a diques.....	58
<i>Figura 38.</i> Vistas de campo del mapeo geológico observado en la Figura 36.....	59
<i>Figura 39.</i> Vistas de campo del mapeo geológico observado en las Figuras 36 y 37.....	60

- Figura 40.* Pliegues y fallas inversas por compensación tectónica en el sector norte del Morro Solar. Las mediciones de los flancos de pliegues (N: 44) están descritas en la Tabla N°7. Las líneas rojas corresponden a diques.....62
- Figura 41.* Vistas de campo del mapeo geológico observado en la Figura 40. A: Anticlinal pequeño en los alrededores de la Falla La Virgen, B: Pliegue “en cofre”, C: Monoclinal en sill que aflora cerca de la Falla Salto del Fraile y D: Alrededores de la Falla La Herradura.....63
- Figura 42.* Vistas NO-SE de los pliegues y fallas inversas por compensación tectónica en el sector norte del Morro Solar. Estas estructuras están asociadas a fallas normales lístricas (NE-SO/O-E) y a las lutitas de la Formación La Herradura.....64
- Figura 43.* Fallas inversas por compresión en los sectores norte y sur del Morro Solar. Las mediciones de los flancos de los pliegues (N: 4) están descritas en la Tabla N°7. Las líneas rojas corresponden a diques.....66
- Figura 44.* Vistas de campo del mapeo geológico observado en la Figura 43.....67
- Figura 45.* Cinemáticas de las microestructuras tectónicas del Morro Solar según la clasificación de fallas de Angelier (1994). Los *datums* de falla están descritos en las Tablas N°8, N°9 y N°10.....69
- Figura 46.* Estados de paleoesfuerzos asociados a las estructuras mesoscópicas y microestructuras tectónicas del Morro Solar (ver *datums* de falla en las Tablas N°8, N°9 y N°10). ZC: Zona de cizalla principal.....70
- Figura 47.* Secciones estructurales SO-NE de azimuth 42.0° en el Morro Solar (ver escala más amplia en el Anexo N°2). Sus longitudes en kilómetros son: N°1=0.34, N°2=0.49, N°3=0.66, N°4=0.79, N°5=1.88, N°6=2.03, N°7=2.22, N°8=2.35, N°9=2.62, N°10=2.40 y N°11=2.22.....72
- Figura 48.* Secciones estructurales NO-SE de azimuth 132.6° en el Morro Solar (ver escala más amplia en el Anexo N°3). Sus longitudes en kilómetros son: N°12=1.62, N°13=2.21, N°14=2.56, N°15=1.94, N°16=2.09, N°17=1.98, N°18=1.59 y N°19=0.57.....73
- Figura 49.* Modelo estructural 3D del sector norte del Morro Solar construido a partir de las secciones SO-NE (42.0°). Las geometrías de las estructuras principales y secundarias están dadas por planos azules y líneas rojas, respectivamente. Las cinemáticas son principalmente de desgarre. El modelamiento estructural se realizó usando los softwares Blender y Photoshop®.....74
- Figura 50.* Modelo estructural 3D del sector sur del Morro Solar construido a partir de las secciones SO-NE (42.0°). Las geometrías de las estructuras principales y secundarias están dadas por planos azules y líneas rojas, respectivamente. Las cinemáticas son principalmente de desgarre. El modelamiento estructural se realizó usando los softwares Blender y Photoshop®.....75
- Figura 51.* Estado de paleoesfuerzos N°1 en el Morro Solar. Está asociado a una extensión NE-SO que produjo fallas normales, diques y fracturas N-S/NO-SE.....77
- Figura 52.* Estado de paleoesfuerzos N°2 en el Morro Solar. Está asociado a una compresión NE-SO que produjo fallas normales, pliegues y fallas inversas NE-SO/O-E (por compensación tectónica).....78
- Figura 53.* Estado de paleoesfuerzos N°3 en el Morro Solar. Está asociado a una compresión O-E que produjo fallas normales O-E, fallas inversas junto con pliegues menores N-S y fallas de desgarre NO-SE/NE-SO.....79
- Figura 54.* Evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar. Esta interpretación se propone tentativamente comparando los estados de paleoesfuerzos del Morro Solar y las convergencias de placas en el margen occidental andino durante el Cenozoico.....83

RESUMEN

La deformación poscretácica del antearco peruano ha sido comúnmente relacionada a una extensión cortical cenozoica. En la localidad del Morro Solar (longitud 77°02'O / latitud 12°11'S), región de Lima, no se ha esclarecido si dicha tectónica cenozoica influyó en el mecanismo de deformación de las rocas del Grupo Morro Solar (Cretácico Inferior). Para determinar ello, se llevó a cabo la revisión de la cartografía geológica de la región de Lima junto con un análisis estructural dinámico basado en un nuevo mapa geológico del Morro Solar a escala 1/5,000. Las poblaciones de estructuras extensionales, compresionales y de desgarre, así como estrías y marcas de arrastre tectónico, entre otros, fueron estudiados empleando el Método de los Diedros Rectos y modelamiento estructural 2D-3D. Los estados de paleoesfuerzos obtenidos revelaron una evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar en función de las convergencias de placas en el margen occidental andino. Un primer evento corresponde a una extensión cortical preorogénica NE-SO que fue contemporánea con enjambres de diques y el magmatismo del Batolito de la Costa en el Segmento Lima (120-60 Ma). Durante un segundo evento existió una predominancia de compresión regional NE-SO/O-E asociada a extensiones locales NO-SE a lo largo de la zona de subducción andina; asimismo, dicha compresión es compatible con el desarrollo de las cuencas cenozoicas de antearco en la costa peruana (~60-26 Ma y <26 Ma?). Así, la integración de estas interpretaciones dentro del contexto geológico de la región Lima permite concluir que el mecanismo de deformación de las rocas del Morro Solar, en efecto, estuvo influenciado por la tectónica cenozoica del antearco peruano. Y más importante aún, dicho mecanismo es propuesto como el resultado de cinemáticas oblicuas/de desgarre con componente extensional dentro de un modelo de cizalla simple activo desde el Cretácico Tardío-Paleógeno Tardío hasta posiblemente la época reciente.

Palabras clave:

Morro Solar, antearco peruano, tectónica cenozoica, análisis estructural.

ABSTRACT

Post-cretaceous deformation of the Peruvian forearc has commonly been related to a Cenozoic crustal extension. In Morro Solar locality (longitude 77°02'O / latitude 12°11'S), region of Lima, it is still unclear whether such Cenozoic tectonics influenced on rock deformation mechanism of Morro Solar Group (Lower Cretacic). To define that, a review of the geological cartography of Lima region was carried out along with the performance of a dynamic structural analysis based on a new geological map of Morro Solar at 1/5,000 scale. Populations of extensional, compressional and strike-slip structures, as well as striae and crescentic markings, among others, were studied using the Right Dihedra Method and 2D-3D structural modelling. Results about paleostress states revealed a tectonic evolution of the deformation mechanism of Morro Solar in terms of plate convergence in the western margin of the Andes. A first event corresponds to a NE-SW pre-orogenic crustal extension which was coeval with dyke swarms and magmatism of the Coastal Batholith in Lima Segment (120-60 My). During a second event there was a predominance of NE-SW/W-E regional compression associated with NW-SE local extension along the Andean subduction trench; furthermore, such compression is compatible with the development of Cenozoic forearc basins in the peruvian coast (~60-26 My and <26 My?). Thus, the integration of these interpretations within the geological framework of Lima region allows to conclude that deformation mechanism of Morro Solar rocks was indeed influenced by Cenozoic tectonics of the Peruvian forearc. And more importantly, such mechanism is proposed as the result of oblique/strike-slip kinematics with extensional component within an active simple shear model since Late Cretaceous-Late Paleogene until possibly modern times.

Keywords:

Morro Solar, Peruvian forearc, Cenozoic tectonics, structural analysis.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación problemática

Los estudios geológicos de la región Lima (Palacios et al., 1981; Palacios et al., 1992; León y De La Cruz, 2002; Aleman et al., 2006) no han esclarecido si la tectónica cenozoica del antearco peruano influyó en el mecanismo de deformación de las rocas del Cretácico Inferior en el Morro Solar (longitud 77°02'O / latitud 12°11'S). La falta de un análisis estructural dinámico en esta área de estudio hace difícil conocer cuál fue el origen y evolución de dicho mecanismo en términos de la Tectónica Andina. Y particularmente, no permite saber con precisión si las rocas del Morro Solar pudieron estar sometidas a una cizalla simple (por transtensión) durante el Cenozoico tal como se ha reportado en otras partes del antearco (Calderón, 2007; Witt et al., 2011; Decou et al., 2013; Alván et al., 2014, 2017; Noury et al., 2016; Alvarado et al., 2016; Rustichelli et al., 2016; Genge et al., 2020). A la luz de estudios termocronológicos de baja temperatura (<70-75°C), un posible escenario de cizalla simple se torna de interés ya que Wipf (2006) ha demostrado que existieron enfriamientos lentos de la corteza superior (60-25 Ma) en la región Lima. Especialmente porque la tectónica “extensional” poscretácica de esta región estuvo vinculada a una subducción plana antes de los 25 Ma (Somoza, 1998; Decou et al., 2013). Tiempo en el que la convergencia de alta oblicuidad y fuerte acoplamiento de las placas Farallón y Sudamericana se traducían en una partición de la deformación en continente y *offshore* (Reutter et al., 1996; Clift et al., 2003; Oncken et al., 2006; Thouret et al., 2007; Margirier et al., 2017; Fennell et al., 2018; Horton, 2018; Genge et al., 2020).

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

-¿Influyó la tectónica cenozoica del antearco peruano en el mecanismo de deformación de las rocas del Morro Solar?.

1.2.2. Problemas específicos

-¿Qué características geológicas tiene el Morro Solar en el antearco de la región Lima?.

-¿Cómo sería el análisis estructural dinámico integrando las geometrías, cinemáticas y arquitecturas 2D-3D de estructuras tectónicas para establecer el origen del mecanismo de deformación del Morro Solar?.

-¿Cómo fue la evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar por comparación entre sus estados de paleoesfuerzos y las convergencias de placas en el margen occidental andino durante el Cenozoico?.

1.3. Justificación teórica

El propósito de este trabajo es el de reflexionar académicamente sobre la tectónica cenozoica del antearco peruano. La influencia de esta tectónica respondería cómo las rocas del Morro Solar (Cretácico Inferior) estuvieron relacionadas al poco acortamiento tectónico del antearco peruano en una zona de convergencia de placas. Como una meta particular, se desea saber cómo se originó y evolucionó la deformación tectónica postsedimentaria de la localidad del Morro Solar.

1.4. Justificación práctica

Estudiar el mecanismo de deformación del Morro Solar ayudaría a comprender los problemas estructurales más frecuentes en los trabajos de exploración minera-petrolera e ingeniería que se realizan en el antearco peruano. Así como serviría para el ordenamiento territorial y puesta en valor del patrimonio geológico de la ciudad de Lima.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

-Determinar la influencia de la tectónica cenozoica del antearco peruano en el mecanismo de deformación de las rocas del Morro Solar mediante el análisis estructural.

1.5.2. Objetivos específicos

-Determinar las características geológicas del Morro Solar en el antearco de la región Lima.

-Realizar el análisis estructural dinámico integrando las geometrías, cinemáticas y arquitecturas 2D-3D de estructuras tectónicas para establecer el origen del mecanismo de deformación del Morro Solar.

-Determinar la evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar por comparación entre sus estados de paleoesfuerzos y las convergencias de placas en el margen occidental andino durante el Cenozoico.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

La localidad del Morro Solar ha sido estudiada desde los inicios del siglo XX. El primero en reconocer su geología fue Lisson (1904, 1907). No obstante, fueron Fernández (1948, 1958) y Fernández et al. (1958) quienes establecieron la litoestratigrafía formal del Cretácico Inferior en el Morro Solar (Grupo Morro Solar: formaciones Salto del Fraile, La Herradura y Marcavilca) mediante mapeos a escala 1/25,000. Posteriormente, la cartografía geológica del Morro Solar ha sido constantemente actualizada en las últimas cuatro décadas. Aunque, las versiones a escalas 1/100,000 y 1/50,000 de Palacios et al. (1981), Palacios et al. (1992), Caldas y Palacios (1998), León y De La Cruz (2002) se limitaron a mantener el espíritu estratigráfico-estructural de la cartografía primigenia.

Desde un enfoque evolutivo, el Grupo Morro Solar tuvo su origen en una sedimentación silicoclástica marina controlada por extensión preorogénica (Aleman et al., 2006; Jacay et al., 2015). Tal geodinámica se distingue muy bien de la sedimentación continental vinculada con el levantamiento y engrosamiento andino en el Cenozoico (Ramos, 2009). La edad del Grupo Morro Solar es Valanginiano-Hauteriviense, y está dada a partir de los trabajos paleontológicos de Rivera (1951), Wilson (1963), Rivera et al. (1975), Geyer y Aleman (1984) y Meza-Vélez y O’Gorman (2019). Los diversos estudios sedimentológicos han demostrado que su depósito estuvo influenciado por transgresiones marinas y hundimientos como parte de una tectónica extensional del Cretácico Temprano. Por ejemplo, Moulin (1988) se dedicó al estudio de figuras sedimentarias mareales de la Formación Salto del Fraile, con las que determinó tasas y direcciones de sedimentación para dicho tiempo. Más detalladamente, Núñez del Prado y Chávez (1989) examinaron la estratigrafía completa del Morro Solar, interpretando ambientes transicionales en sucesiones progradantes según cambios eustáticos. En la Formación Salto del Fraile, Peña et al. (2002) evidenciaron cortejos sedimentarios de alto y bajo nivel, de forma similar a como

Chacaltana et al. (2006) lo hicieron en la base de la Formación Marcavilca mediante el reconocimiento de icnofacies de *Glossifungites*.

Por otro lado, en el Morro Solar los estudios de índole estructural con relación a una tectónica postsedimentaria (cenozoica) han sido menos frecuentes. Ayala et al. (2014) hicieron el remapeo a escala 1/5,000 del sector norte del Morro Solar, registraron fallas normales y microestructuras tectónicas asociadas a cinemáticas de desgarre con el fin de interpretar posibles eventos de deformación. Sin embargo, tales interpretaciones no estaban integradas dentro de la tectónica poscretácica de la región Lima, lo que no permitía una diferenciación temporal de eventos tectónicos de acuerdo con las deformaciones mesoscópicas descritas en dicho trabajo. Años más tarde, Viveen y Schlunegger (2018) realizaron un análisis regional de las fallas normales del antearco del centro del Perú. Este estudio se basó principalmente en una revisión crítica de trabajos previos sobre la tectónica y estratigrafía del Cenozoico, abordando también la geodinámica del Cuaternario. Además, incluyó un mapeo de campo de las estructuras del Morro Solar, y mediante interpretación de imágenes satelitales, identificaron estructuras similares de orden mayor desde la ciudad de Lima hasta la Cuenca Pisco continental. Con estos resultados, los autores sostuvieron que las fallas normales del Morro Solar y del antearco peruano fueron producto de subsidencias cenozoicas prolongadas debido a la subducción de las placas andinas. Es a partir de estos antecedentes y de la propia situación problemática que el presente trabajo busca expandir, a detalle, el conocimiento de la deformación tectónica postsedimentaria en la localidad del Morro Solar.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Tectónica cenozoica del antearco peruano

La evolución tectónica de los Andes Centrales peruanos ha sido controlada por una sucesión de eventos extensionales precenozoicos (Wilson, 1963; Coira et al., 1982; Sempere et al., 2002; Cawood, 2005; Ramos, 2009; Chew et al., 2016) y alzamientos corticales ocurridos desde el Paleógeno (Isacks, 1988; Anders et al., 2002; Clift et al., 2003; Elger et al., 2005; Garzzone et al., 2008; Mamani et al., 2010; Decou et al., 2013). La alternancia de estos eventos ha sido comúnmente vinculada a factores geodinámicos: variaciones del *slab* de subducción de la placa oceánica Pacífica bajo el margen continental (Pilger, 1984; Pardo-Casas y Molnar, 1987; Macharé, 1987; Somoza y Ghidella, 2005; Schildgen et al., 2009; Müller et al., 2016; Fennell et al., 2018), cambios de direcciones y velocidades de convergencia de placas (Hampel, 2002; Clift et al., 2003; Kay et al., 2005), entre otros, los cuales han provocado deformación extensional y acortamiento en el margen occidental andino (Reutter et al., 1996; Clift et al., 2003; Oncken et al., 2006; Thouret et al., 2007; Margirier et al., 2017; Fennell et al., 2018; Horton, 2018).

En la Cordillera Occidental de Perú (Figura 1), la orogénesis andina iniciada a finales del Cretácico Tardío (Mégard, 1984, 1987; Sébrier et al., 1988; Wipf, 2006; Schildgen et al., 2009; Decou et al., 2013; Margirier et al., 2017; Genge et al., 2020), estuvo dominada por la reactivación de antiguas fallas normales preexistentes heredadas de la extensión mesozoica que afectó al margen continental (Carlotto et al., 2009). Comúnmente esto es mejor evidenciado en los límites estructurales de antiguos hemi-grábenes y cuencas de *rift* (Vicente, 1989; Sempere et al., 2002; Rosas et al., 2007; Alván et al., 2012).

Evidencias de tectónica extensional cenozoica (Thornburg y Kulm, 1981; Sempere y Jacay, 2006; León et al., 2008; Viveen y Schlunegger, 2018) también han sido reportadas en el antearco y son vinculadas con procesos de empinamiento (*roll-back subduction*) de la placa oceánica subducente (Hampel, 2002; Clift et al., 2003; Oncken et al., 2006; Wipf, 2006; Schildgen et al., 2009). Aunque, otros trabajos sugieren que tal tectónica extensional estuvo dominada por fallas transtensionales, que son transversales al margen occidental andino y que sirvieron como controles geodinámicos de las cuencas cenozoicas de antearco en la costa norte, central y sur del Perú: cuencas Tumbes-Talara (Witt et al., 2011; Alvarado et al., 2016), Salaverry-Trujillo-Lima (Genge et al., 2020), Pisco (Calderón, 2007; Rustichelli et al., 2016), Camaná-Mollendo (Alván et al., 2014, 2017) y Moquegua (Decou et al., 2013; Noury et al., 2016).

Debido a que el antearco presenta muchas más evidencias de tectónica extensional que de acortamiento (Jacay et al., 2002b; Noury et al., 2016), suele considerarse que una extensión cortical ha sido el régimen tectónico predominante durante el Cenozoico. En este sentido, los trabajos en el antearco de la región Lima (León y De La Cruz, 2002; Aleman et al., 2006; Viveen y Schlunegger, 2018) se han basado en dicha premisa a pesar de que las rocas del Cretácico Superior, aparte de fallas normales, también exhiben numerosas evidencias de deformación postsedimentaria compresional y transtensional (Pardo, 1961; Caldas, 1980; Palacios et al., 1981, Figueroa, 1988; Palacios, 1992; Palacios et al., 1992; Caldas y Palacios, 1998).

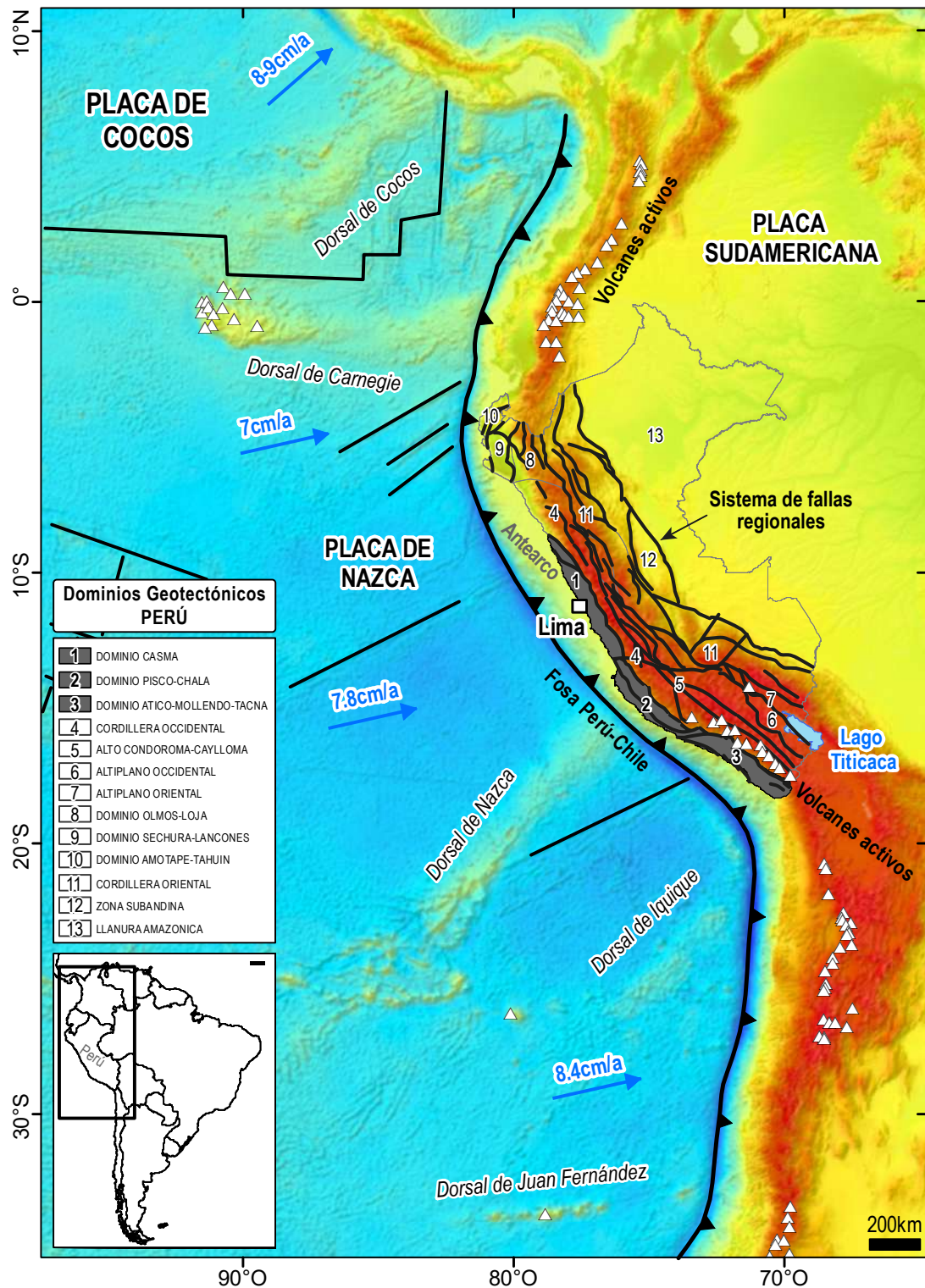


Figura 1. El antearco peruano se encuentra en el extremo oeste de la Cordillera Occidental y está conformado por los dominios geotectónicos: 1 (Casma), 2 (Pisco-Chala) y 3 (Atico-Mollendo-Tacna). Tomado y basado de Carlotto et al. (2009) y Sébrier et al. (1988).

2.2.2. Tectónica de placas

La Tectónica de Placas es el modelo actual para la geodinámica de las capas superficiales de la Tierra. Se basa en la propuesta de la Deriva Continental de Wegener (1912 y 1922) y sostiene que la superficie terrestre está dividida en bloques (Le Pichon et al., 1973; Simkin et al., 2006; Figura 2) cuyos límites concentran la actividad sísmica del planeta (Isacks et al., 1968). Estos bloques son “placas” impulsadas por corrientes de convección desde la astenósfera (Hess, 1962), que han estado en movimiento desde los ~4600 Ma produciendo la expansión de los océanos y levantamiento de cadenas montañosas a escala global (Moores et al., 2013; Wessel y Müller, 2015).

En el margen occidental andino, la placa de Nazca (de corteza oceánica) se subduce debajo de la placa Sudamericana (de corteza continental; Barazangi e Isacks, 1976) en la fosa Perú-Chile (o “trinchera”) tal como lo hizo su predecesora la placa Farallón durante los 68-28 Ma (Somoza y Ghidella, 2005). Así, el grado de acoplamiento, organización geométrica, ángulo de subducción y oblicuidad entre placas han definido la tectónica y el magmatismo andino a lo largo de la historia geológica (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Clift et al., 2003; Kay et al., 2005; Ramos, 2009; Schildgen et al., 2009; Margirier et al., 2017).

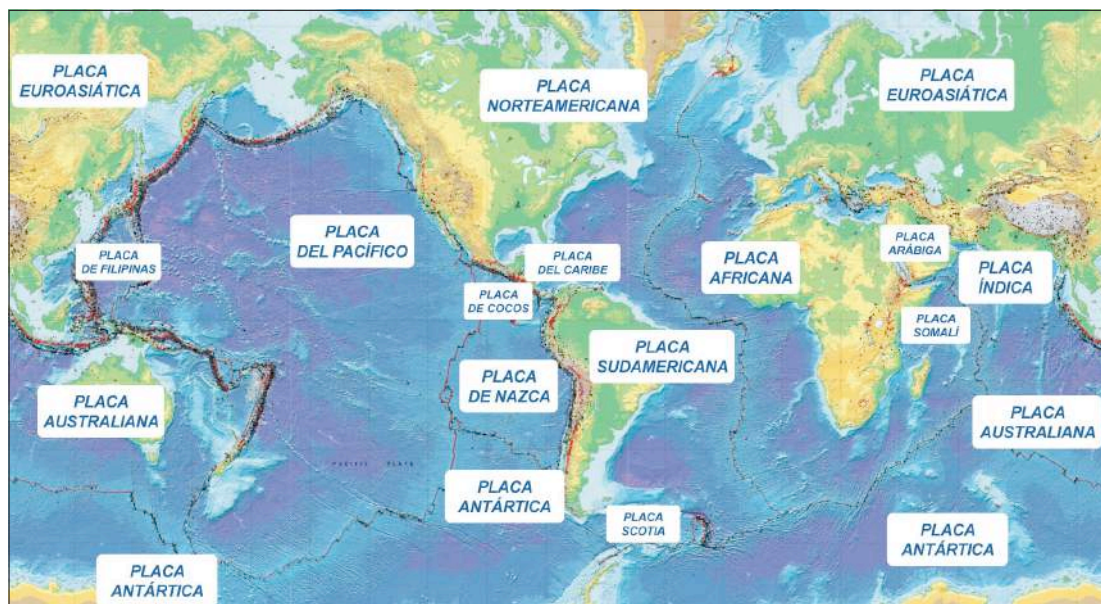


Figura 2. Distribución de las placas tectónicas en la Tierra.
Tomado de Simkin et al. (2006).

2.2.3. Interacción en los bordes de placas tectónicas

A escala cortical, los bordes entre placas son sitios de importante sismicidad que presentan esfuerzos variados debido a la distribución de densidades y relieves (Moore et al., 2013). Tales bordes son de tres tipos (Van Der Pluijm y Marshak., 2004; Figura 3): divergentes (acrecionales o constructivos), donde las placas se apartan entre sí por creación de nueva litósfera; convergentes (destructivos), donde las placas se acercan mutuamente, en el caso de la subducción del tipo andino, existe un régimen compresional y erosión tectónica dada por la profundización de la placa subducente debajo de la cabalgante; y transformantes, donde las placas se desplazan lateralmente.

Durante el Cenozoico, la zona de subducción andina (fosa Perú-Chile) no ha estado únicamente caracterizada por una tectónica compresional (Decou et al., 2013; Margirier et al., 2017). Especialmente porque la corteza continental experimentó una alternancia de extensiones (por erosión tectónica y partición) que dependieron del grado del acoplamiento interplaca (Horton, 2018).

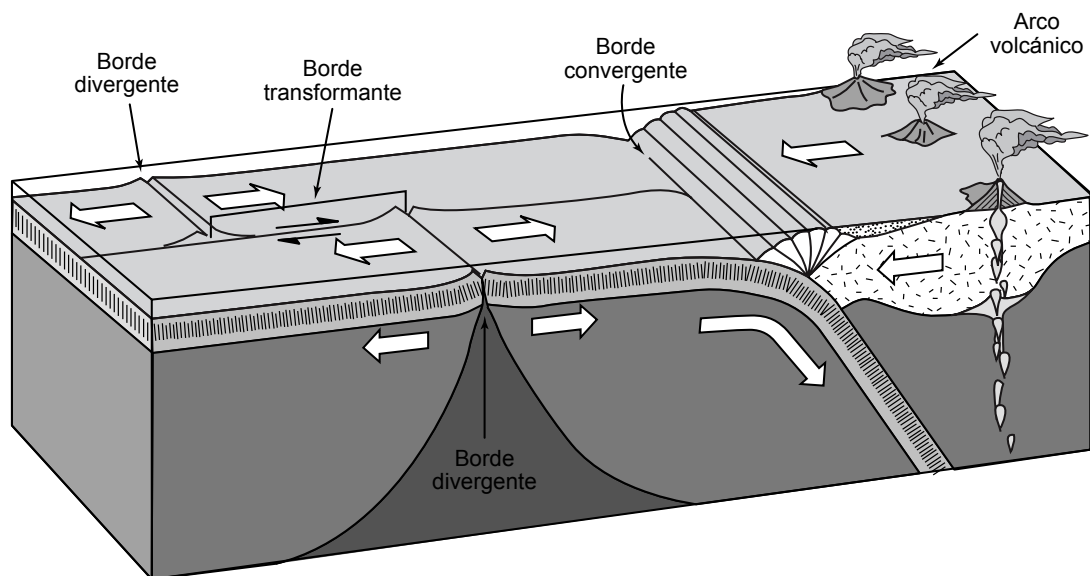


Figura 3. Movimientos y tipos de bordes de las placas tectónicas en los Andes.
Tomado de Van Der Pluijm y Marshak (2004).

2.2.4. Direcciones y velocidades de convergencia de placas en el Cenozoico

Entre los ~60 y ~26 Ma las placas de Farallón y Sudamericana tuvieron direcciones de convergencia NE-SO y O-E con ángulos altos (40°-50°) de oblicuidad respecto a la zona de subducción (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Macharé, 1987; Müller et al., 2016; Fennell et al., 2018; Figura 4). A partir de los ~26 Ma la placa Farallón se dividió en las placas de Nazca y de Cocos (Somoza y Ghidella, 2005), hecho que dio paso a una convergencia menos oblicua de 5°-15° (Fennell et al., 2018). Contemporáneamente con esta última convergencia, se produjo el engrosamiento y levantamiento de los Andes (Isacks, 1988; Garzione et al., 2008) iniciándose el magmatismo del Oligoceno Medio (Kay et al., 2005) y el enriquecimiento de Dy/Yb de la corteza inferior del sur del Perú sin delaminación (Mamani et al., 2010).

Asimismo, las velocidades de convergencia de placas fueron fundamentales para la deformación andina (Daly, 1989; Royden, 1993; Figura 5). La convergencia de alta oblicuidad de los ~60-26 Ma fue de 6-8 cm/año (Fennell et al., 2018; Fig. 6), estuvo relacionada a una exhumación lenta (Wipf, 2006), fuerte acoplamiento interplaca y a una subducción plana (Reutter et al., 1996; Horton, 2018). Mientras que a partir de los ~26 Ma la velocidad de convergencia se duplicó a 12-15 cm/año (Fennell et al., 2018) produciendo una exhumación más rápida (Wipf, 2006; Clift et al., 2013) y *roll-back* de la placa subducente (Somoza, 1998; Oncken et al., 2006; Schildgen et al., 2009). Desde los ~11 Ma, una convergencia de baja oblicuidad fue dominante debido a la subducción de la dorsal asísmica de Nazca debajo de la placa Sudamericana (Pilger, 1981; Hampel, 2002). Lo que produjo una aceleración de la erosión, levantamiento y extensión en continente (Thouret et al., 2007; Garzione et al., 2008; Margirier et al., 2017), así como un enriquecimiento de Sm/Yb de la corteza inferior (Mamani et al., 2010).

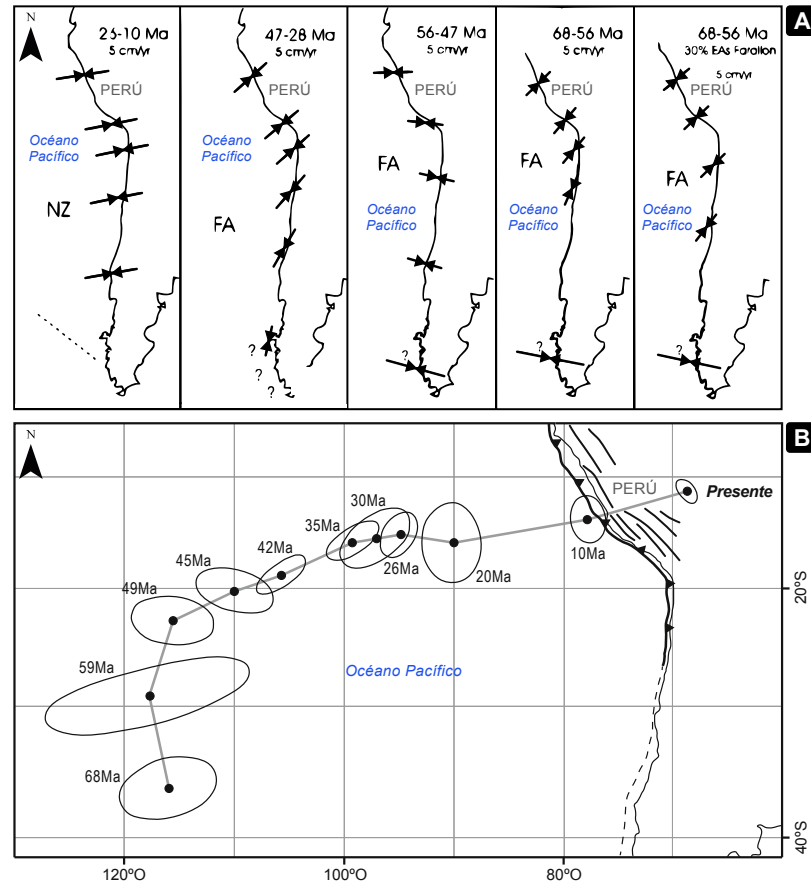


Figura 4. A: Convergencia de las placas Farallón (FA)-Sudamericana (68-28 Ma) y Nazca (NZ)-Sudamericana (26-10 Ma). B: Durante el Cenozoico, los vectores de convergencia de placas tuvieron direcciones NE-SO y O-E. Tomado de Somoza y Ghidella (2005) y Pardo-Casas y Molnar (1987).

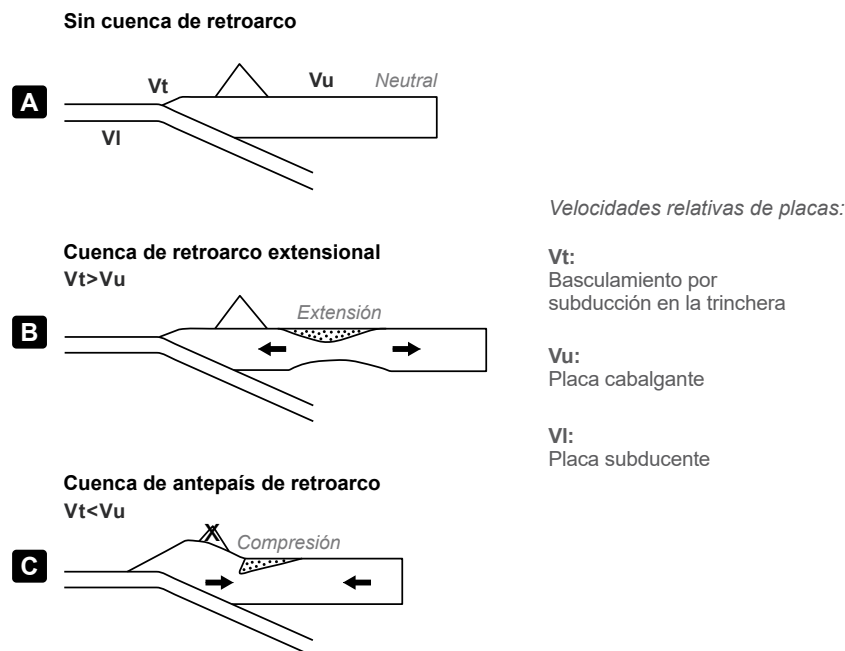


Figura 5. Velocidades de convergencia de placas y sus efectos en la placa tectónica cabalgante. Tomado de Daly (1989) y Royden (1993).

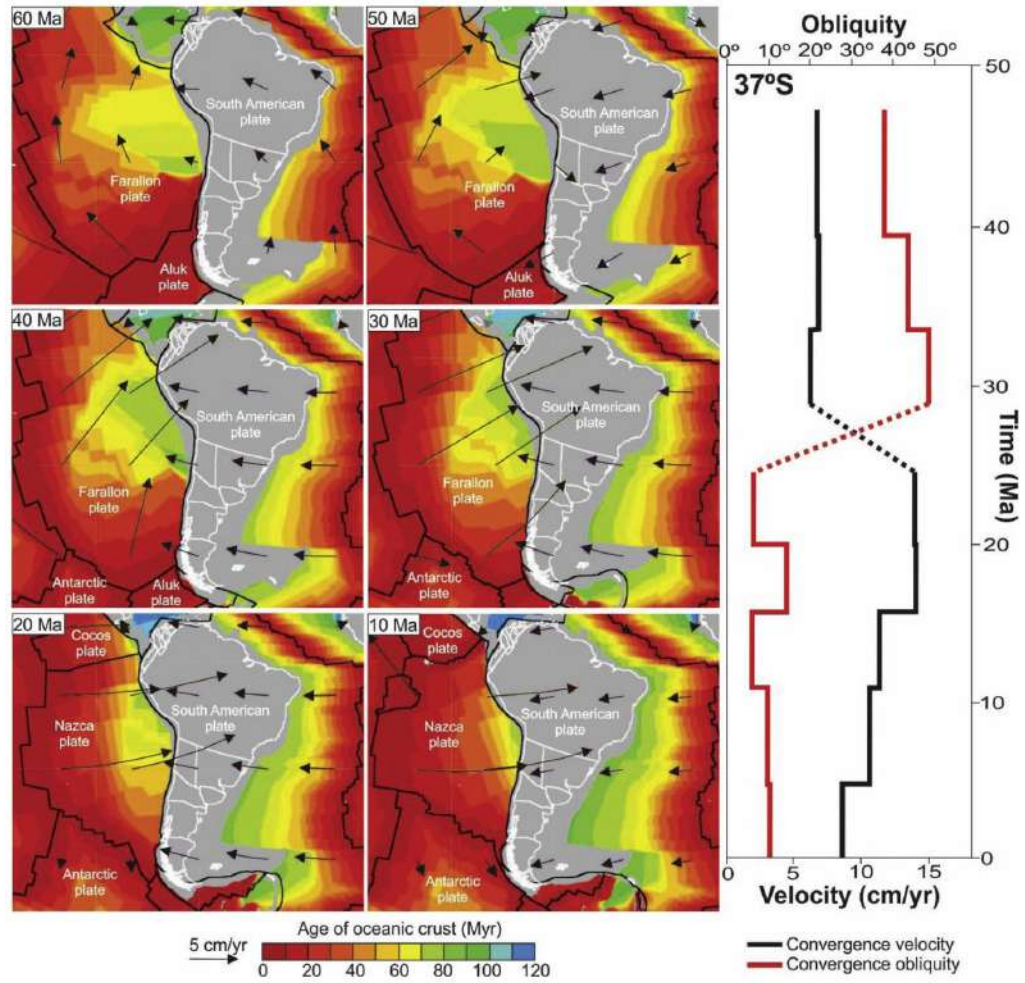


Figura 6. Direcciones y velocidades de convergencia de placas en el margen occidental andino durante el Cenozoico entre los ~60 y ~10 Ma. Tomado de Fennell et al. (2018).

2.2.5. Geometrías de estructuras tectónicas

Independientemente de la escala, las estructuras tectónicas son la manifestación de la deformación producida por la tectónica de placas (Tchalenko, 1970). Estas estructuras corresponden a superficies de ruptura que cuentan con orientaciones dadas por sus rumbos y buzamientos (Childs et al., 2017). Aparecen en zonas de deformación frágil y frágil-dúctil bajo la forma de fallas y fracturas, cuyas dimensiones y complejidades dependen del grado de la deformación tectónica (Walsh et al., 1991). Los modelos analógicos demuestran que sus geometrías aparecen en arreglos *en-echelon*, donde las fallas son cercanamente paralelas y espaciadas entre sí, así como tienden a ser oblicuas al rumbo de una estructura de orden mayor (Holohan et al. 2008; Figura 7).

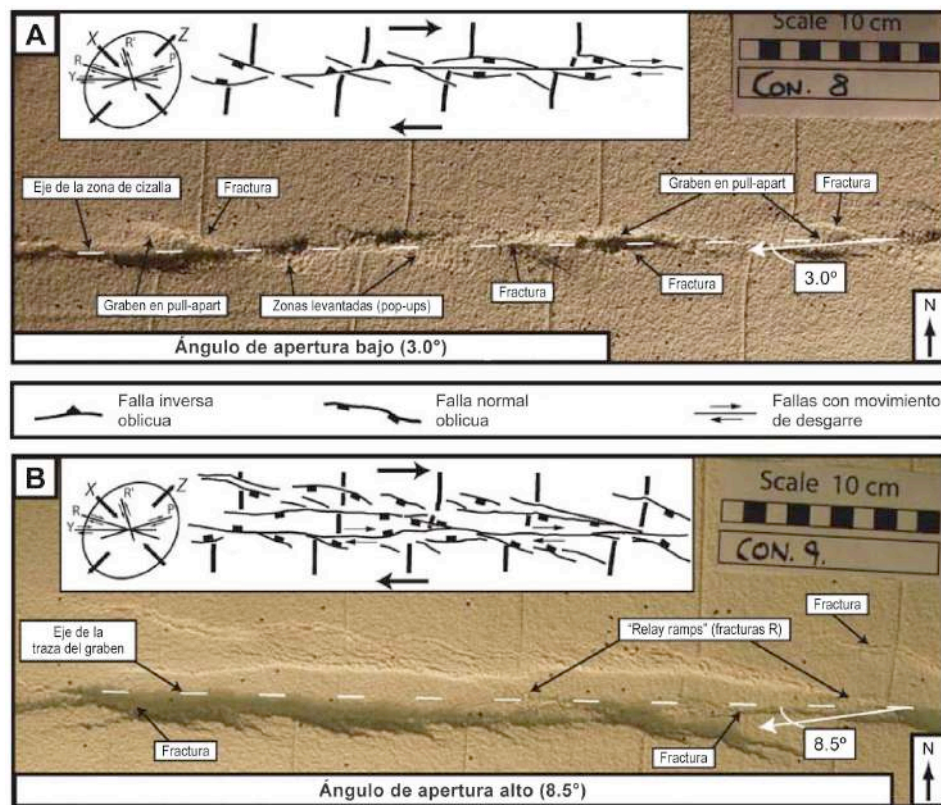


Figura 7. Geometrías de estructuras tectónicas en un modelo analógico. Las estructuras aparecen invariablemente desde un primer orden (escala del modelo) hasta en dimensiones más reducidas (milimétricas). Tomado de Holohan et al. (2008).

2.2.6. Cinemáticas de estructuras tectónicas

Corresponden al sentido del movimiento tectónico de fallas. Su determinación se basa en la identificación de desplazamientos estratigráficos y microestructuras tectónicas (Allmendinger, 1987). Estas microestructuras son las evidencias del cizallamiento frágil y dúctil, aparecen a una escala mesoscópica bajo la forma de microlineamientos tectónicos e indicadores cinemáticos (Allmendinger, 1987; Doblas, 1998; Van Der Pluijm y Marshak, 2004; Figura 8).

Las cinemáticas de fallas presentan un mecanismo de deformación que es producto de la acción de fuerzas litosféricas en las tres dimensiones del espacio (Allmendinger, 1987). El “modelo dinámico de fallas de Anderson” (Anderson, 1905 y 1951; Figura 9) establece que sobre la superficie terrestre sólo actúan esfuerzos normales: σ_1 (esfuerzo compresional máximo), σ_2 (esfuerzo compresional intermedio) y σ_3 (esfuerzo compresional mínimo). La importancia de este modelo radica en la determinación de los estados de esfuerzos (tensores) involucrados en la formación de fallas. En fallas normales, el σ_1 tiene un *plunge* vertical y un *trend* de σ_3 que se alinea con la dirección de extensión; las fallas inversas están dominadas por un *plunge* horizontal de σ_1 y sus rumbos son perpendiculares al *trend* del σ_1 ; así como las fallas de desgarre se producen por un *plunge* de ángulo moderado a bajo ($<40^\circ$) de σ_1 y sus rumbos son oblicuos respecto al *trend* del σ_1 . En la práctica, los *trend* y *plunge* de los esfuerzos normales tienden a asemejarse al modelo andersoniano, por lo que su cálculo exige una validación basada en la estadística-poblacional de estructuras tectónicas (Casas Sainz et al., 1990; Hippolyte et al., 2012).

La acción de los esfuerzos normales resulta en arquitecturas tectónicas que se distinguen individualmente por: cinemáticas extensionales, compresionales y de desgarre (Marrett y Peacock, 1999). De este modo, existen asociaciones de fallas normales (Figura 10), fallas inversas y pliegues (Figura 11), y fallas de desgarre relacionadas a transtensión y transpresión (Figura 12).

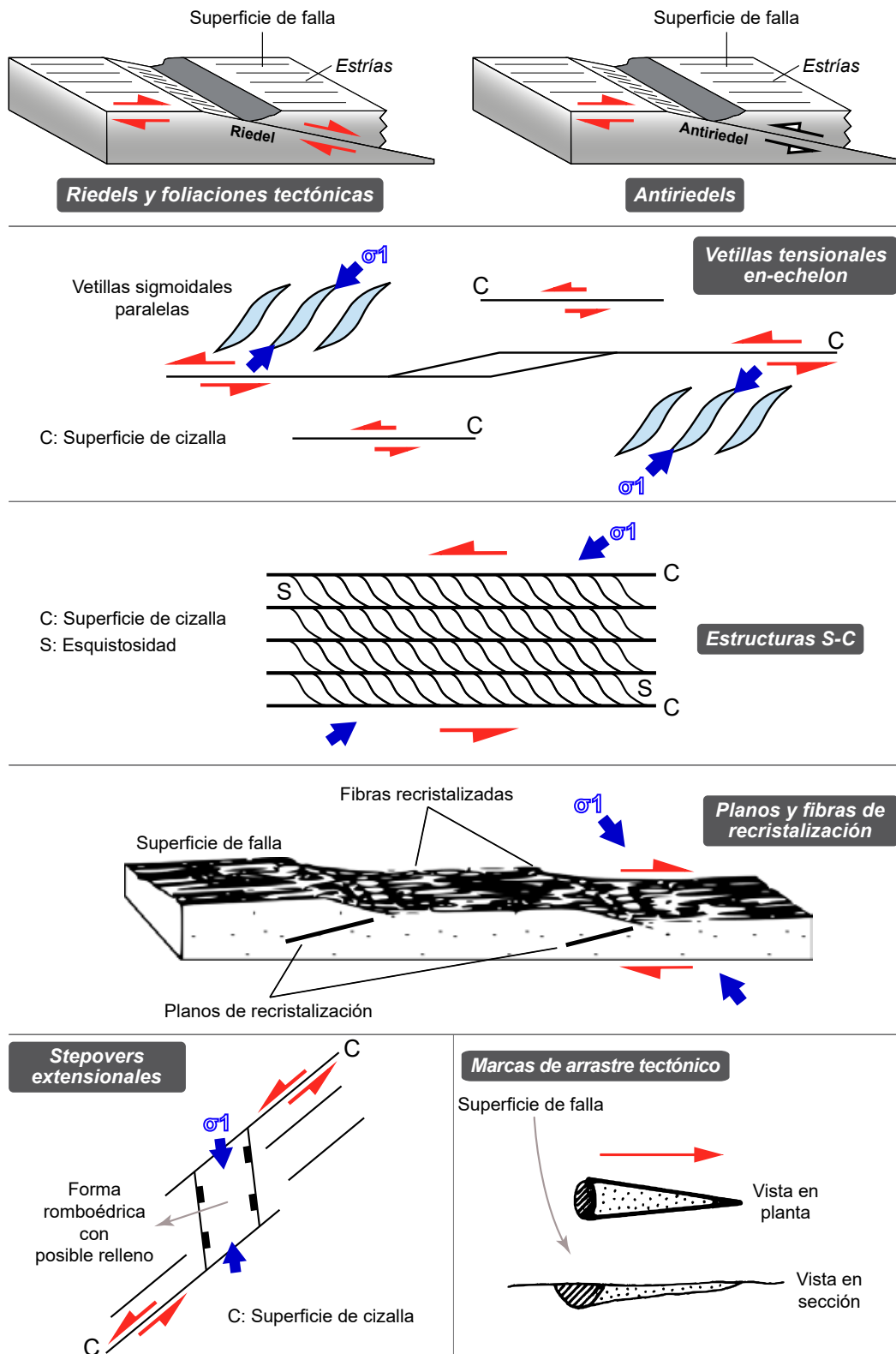


Figura 8. Microlineamientos tectónicos e indicadores cinemáticos.
Tomado de Allmendinger (1987), Doblas (1998) y Van Der Pluijm y Marshak (2004).

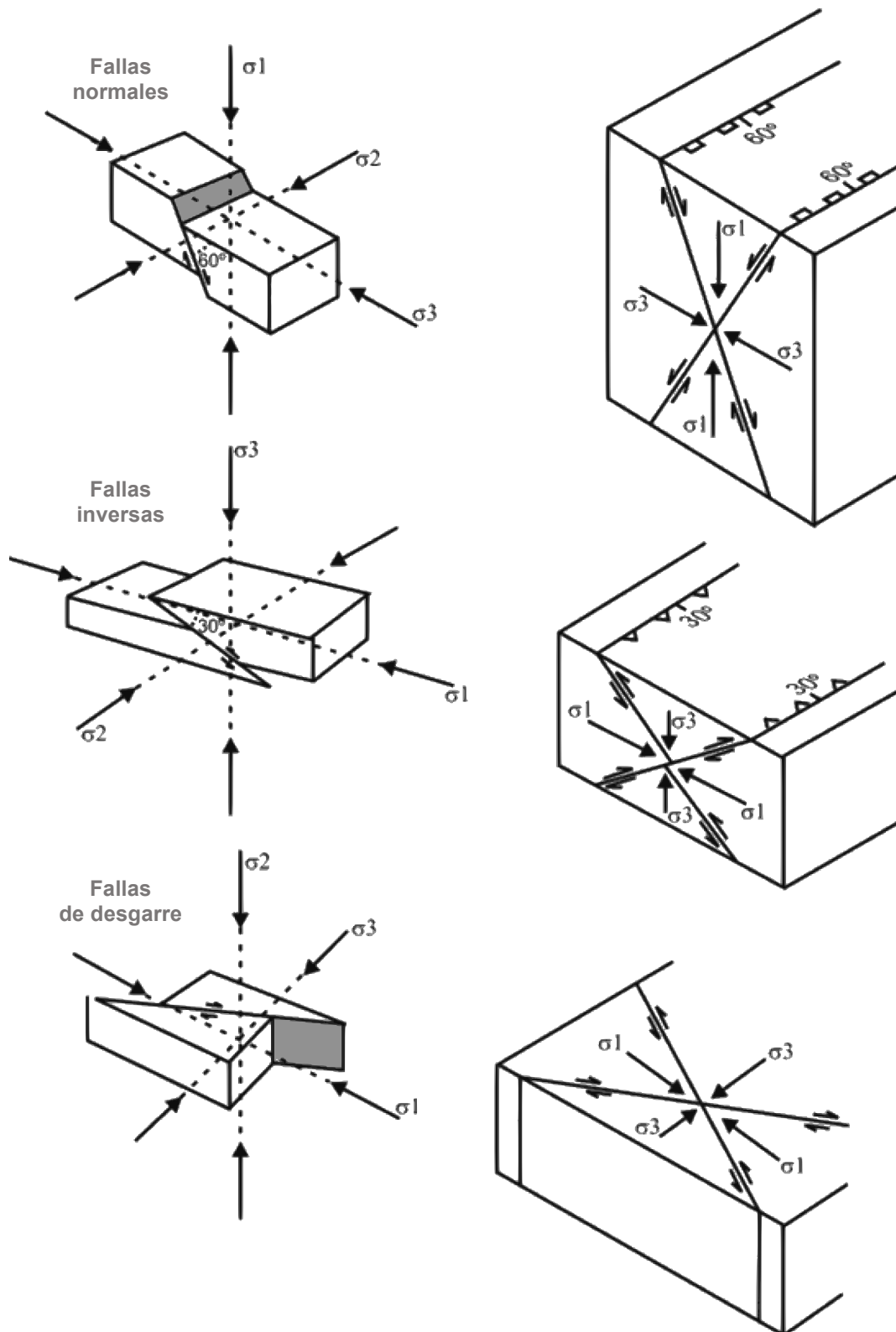


Figura 9. Cinemáticas de estructuras tectónicas asociadas a estados de esfuerzos según el modelo dinámico de fallas de Anderson (1905 y 1951).

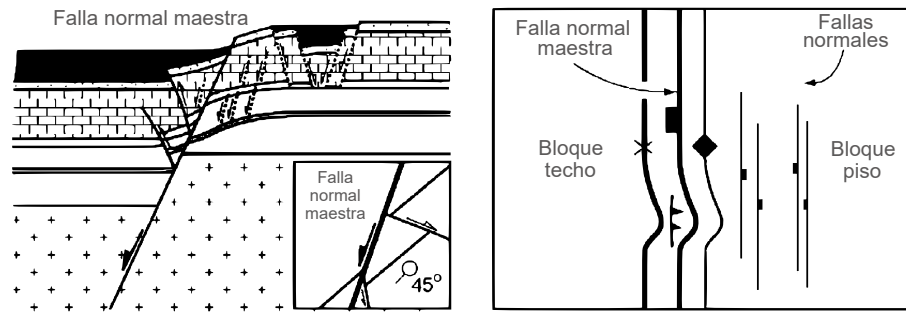


Figura 10. Arquitectura tectónica de fallas normales (Peacock et al., 2000; Delogkos et al., 2017), las fallas inversas tienen lugar por compensación tectónica cerca de reologías dúctiles. Tomado de Jackson et al. (2006).

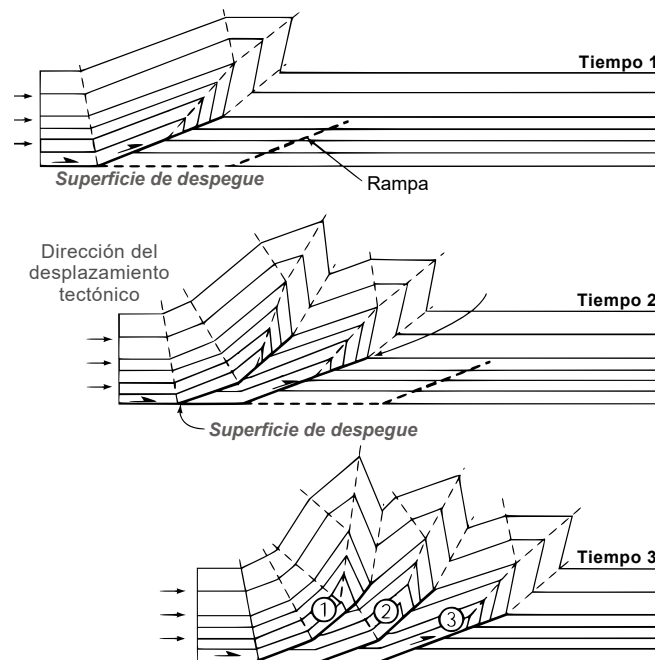


Figura 11. Arquitectura tectónica de fallas inversas y pliegues (Suppe y Donald, 1990; Erslev, 1991). Tomado de Van Der Pluijm y Marshak (2004).

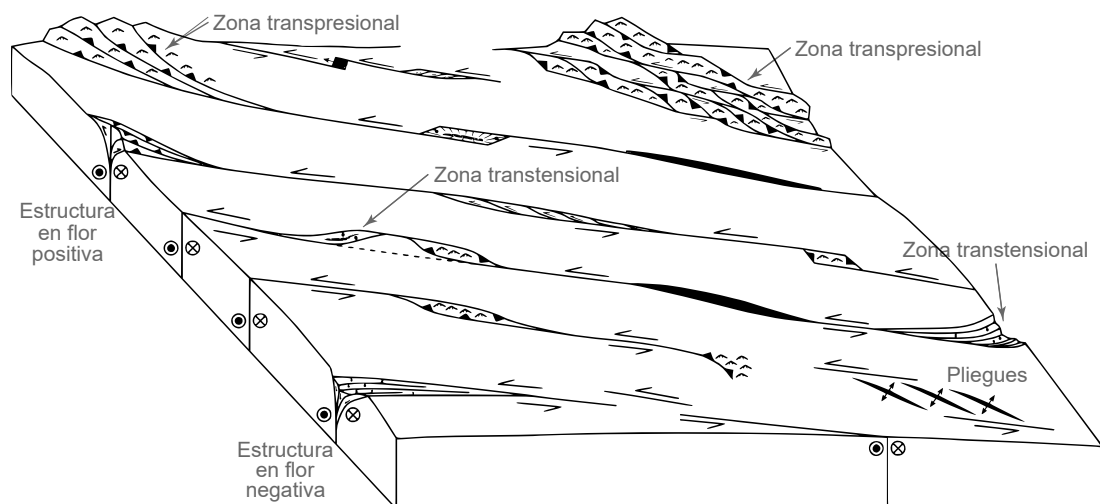


Figura 12. Arquitectura tectónica de fallas de desgarre (Sylvester, 1988) en la que coexisten fallas normales (por transtensión) e inversas (por transpresión). Tomado de Cunningham y Mann (2007).

2.2.7. Compatibilidad y partición de estructuras tectónicas

La ocurrencia de estructuras tectónicas se entiende según el modelo de cizalla de Ramsay (1967), en el que las geometrías y cinemáticas de fallas son consecuencia de la acción de esfuerzos tectónicos sobre rocas o sedimentos. Bajo este contexto, las fallas normales, inversas y de desgarre pueden producirse dentro de un modelo de cizalla simple (McClay, 2000). Tal diversidad estructural se vincula con una convergencia oblicua representada por el σ_1 (Ramsay, 1967; Figura 13A), donde los estados de esfuerzos son propios de eventos tectónicos y tiempos particulares (Fossen y Cavalcante, 2017).

En una cizalla simple (Ramsay, 1967; McClay, 2000), las geometrías y cinemáticas de las estructuras tectónicas siguen patrones definidos respecto al *trend* y *plunge* del esfuerzo compresional máximo: las fallas inversas son perpendiculares al σ_1 ; las fallas normales son paralelas al σ_1 , y las de desgarre son oblicuas al σ_1 . Esta relación esfuerzos/deformación define una “partición de la deformación” y estructuras “compatibles” formadas cercanamente en el mismo tiempo (Waldron, 2005). Por ejemplo, la magnitud de la partición depende del grado del acoplamiento y oblicuidad entre placas, así como de la propia reología de los materiales de la corteza terrestre (Sanderson y Marchini, 1984; Fossen y Tikoff, 1998). En este sentido, es posible tener zonas transtensionales y transpresionales (McClay y Bonora, 2001; Van Der Pluijm y Marshak, 2004; Figura 13B).

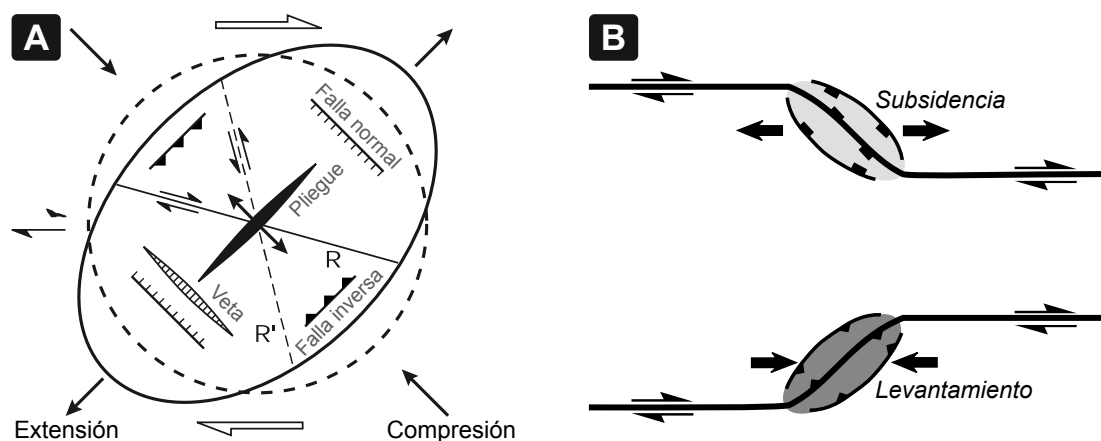


Figura 13. A: Modelo de Ramsay (1967). B: Deformación tectónica transtensional (subsidencia) y transpresional (levantamiento). Tomado de Van Der Pluijm y Marshak (2004) y McClay y Bonora (2001).

2.3. Marco conceptual o glosario

-Análisis estructural dinámico: Estudio estructural enfocado en el origen y evolución de paleoesfuerzos tectónicos.

-Antearco peruano: Zona entre la fosa Perú-Chile (trinchera) y el arco volcánico, también se le conoce como *arc-trench gap*.

-Arquitectura tectónica: Asociación de geometrías y cinemáticas de estructuras tectónicas (p. ej. fallas, pliegues, etc.).

-Basculamiento: Rotación tectónica producida por cinemáticas extensionales (y/o fallas normales).

-Bloque piso y techo: Bloques que yacen debajo y encima del plano inclinado de una falla, respectivamente.

-Cabeceo: Ángulo comprendido entre la línea de rumbo de una falla y el microlineamiento tectónico contenido en ella.

-Cinemática: Sentido del movimiento tectónico de una falla.

-Cizalla o cizallamiento: Es la deformación frágil/dúctil de una roca o sedimento por la acción de esfuerzos tectónicos.

-Cizalla simple: Deformación tectónica no coaxial.

-Compatibilidad tectónica: Situación en la que múltiples estructuras son contemporáneas independientemente de sus geometrías y cinemáticas.

-Compensación tectónica: Deformación compresional local que se produce en el pie de fallas normales y cerca de reologías dúctiles.

-Convergencia oblicua: Proceso en el que el esfuerzo compresional máximo (σ_1) tiende a ser oblicuo al rumbo de una estructura tectónica.

-Convergencia ortogonal: Proceso en el que el esfuerzo compresional máximo (σ_1) tiende a ser ortogonal al rumbo de una estructura tectónica.

-Deformación tectónica: Deformación de los materiales de la corteza terrestre y el manto debido al movimiento de las placas tectónicas.

- En-echelon*: Disposición con la que las estructuras tectónicas son cercanamente paralelas y espaciadas entre sí.
- Escala mesoscópica: Escala en la que las estructuras tectónicas son reconocibles en campo sin requerir el uso del microscopio.
- Estado de esfuerzos: Conjunto de esfuerzos tectónicos normales σ_1 - σ_2 - σ_3 que actúan sobre algún punto de la corteza terrestre.
- Estructura tectónica: Elemento planar o linear generado por la tectonismo, ya sea por cinemáticas extensionales, compresionales o de desgarre.
- Extensión: Deformación tectónica de carácter divergente (distensional).
- Falla lítrica: Falla normal curva y cuyo buzamiento decrece con la profundidad.
- Foliación: Término geométrico (independiente del origen o composición) usado para describir cualquier conjunto de planos estructurales repetidos sobre un volumen de roca o sedimento.
- Mecanismo de deformación: Son los procesos dinámicos causantes de la deformación tectónica en un punto de la corteza terrestre.
- Microlineamientos: Marcas de arrastre centimétricas o milimétricas que aparecen sobre una superficie cizallada como consecuencia de la deformación tectónica.
- Orientación: Geometría espacial de un plano o línea; corresponde al rumbo y buzamiento de un plano, o al *trend* y *plunge* de una línea.
- Pliegue: Flexión estructural que puede aparecer en un volumen de roca o sedimento.
- Plunge*: Ángulo de inclinación de una línea o vector.
- Reactivación tectónica: Deformación tectónica que actúa sobre una superficie previamente cizallada.
- Rechazo: Cantidad del desplazamiento tectónico horizontal en una falla.
- Régimen tectónico: Término que sirve para especificar la simetría y orientación de la deformación tectónica.

- Reología: Estudio de la deformación y el flujo de la materia según sus propiedades mecánicas (fragilidad, ductibilidad, elasticidad, etc.).
- Riedels: Red de bandas de cizalla que se forman en las etapas tempranas de la deformación tectónica, tienden a aparecer en dirección oblicua (15°) respecto a una falla principal.
- Roll-back*: Movimiento relativo de retroceso de la zona de subducción respecto al movimiento de la placa subducente.
- Salto: Cantidad del desplazamiento tectónico vertical en una falla.
- Sobreimposición tectónica: Evidencia física de la reactivación tectónica.
- Subducción normal: Hundimiento tectónico en el que la placa subducente posee $\sim 30^\circ$ de inclinación debajo de la placa cabalgante, se le asocia al acercamiento del arco volcánico hacia el límite de placas (trincheras).
- Subducción plana: Hundimiento tectónico en el que la placa subducente posee $< 30^\circ$ de inclinación debajo de la placa cabalgante, se le asocia a la migración del arco volcánico hacia el continente.
- Tectónica (o tectonismo): Disciplina geológica que estudia la deformación que se produce en la corteza terrestre, manto, continentes y cuencas oceánicas.
- Transpresión: Régimen tectónico que combina las deformaciones dadas por cinemáticas de desgarre y compresión dentro de un modelo de cizalla simple.
- Transtensión: Régimen tectónico que combina las deformaciones dadas por cinemáticas de desgarre y extensión dentro de un modelo de cizalla simple.
- Trend*: Es el azimut de una línea o vector inclinado.
- Zona de cizalla: Sitio de intensa deformación tectónica frágil o dúctil.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de la investigación

Esta investigación es básica, inductiva y de diseño:

- Observacional: Se basó en evidencias físicas que aparecen en las rocas.
- Descriptiva: Se realizó mediante la observación, definición y obtención de características litológicas, estratigráficas y estructurales de campo.
- Analítica: Se analizó dinámicamente el mecanismo de deformación de las rocas del Morro Solar para conocer su relación con la tectónica cenozoica del antearco peruano.
- Cuantitativa: Se midieron datos geométricos y cinemáticos de las estructuras tectónicas del Morro Solar para su interpretación estadística-poblacional.

3.2. Unidad de análisis

Es el conjunto de estructuras tectónicas de la localidad del Morro Solar.

3.3. Población de estudio

Está conformada por 527 estructuras tectónicas. Estas estructuras fueron estudiadas gracias a los indicadores del mecanismo de deformación del Morro Solar: control litológico de afloramientos, relaciones de corte estratigráficas-estructurales, geometrías y cinemáticas de estructuras mesoscópicas y microestructuras tectónicas; así como por arquitecturas tectónicas 2D y 3D, compatibilidad y partición de estructuras tectónicas.

3.4. Tamaño de muestra

527 estructuras tectónicas (427 mesoscópicas y 100 microestructuras). Las microestructuras fueron tomadas y organizadas en 15 estaciones (codificadas desde TOT-01 a TOT-15; ver ubicación en el Anexo N°1). La cantidad y descripción de datos microestructurales por estación se encuentran en las Tablas N°8, N°9 y N°10.

3.5. Selección de muestra

Debido a que la población de estudio y el tamaño de muestra son iguales, no ha sido necesario seleccionar las muestras del análisis. Además, porque los indicadores del mecanismo de deformación del Morro Solar aparecen en la naturaleza de forma aleatoria y no uniforme.

3.6. Técnicas de recolección de datos

3.6.1. Investigación bibliográfica

Se hizo la revisión de la cartografía geológica de la región Lima y el Morro Solar. Buena parte de este proceso también se enfocó en la obtención de reportes técnicos y publicaciones científicas peruanas y extranjeras.

3.6.2. Observación

Se desarrolló de la siguiente manera:

3.6.2.1. Fotointerpretación geológica precampo

Se efectuó utilizando imágenes satelitales *Landsat 8*. Las imágenes se descargaron desde la fuente cartográfica de los softwares SASPlanet y Google Earth con un detalle a escala 1/1,000. Se utilizó la topografía digital (curvas de nivel de cada 5 m) del Instituto Geográfico Nacional del Perú (IGN) para cubrir el área del Morro Solar. El uso de ArcGIS® sirvió para la carga de las imágenes satelitales y curvas de nivel; con las que se interpretaron contactos litológicos-estratigráficos, orientaciones de estratos y estructuras tectónicas a escalas 1/1,000 y 1/500.

3.6.2.2. Mapeo geológico de campo

Comenzó con el control litológico de afloramientos e identificación de las relaciones de corte estratigráficas-estructurales durante la confección inicial del mapa geológico de campo (Figura 14). El control litológico se obtuvo mediante el levantamiento estratigráfico del Morro Solar. La columna levantada se registró cada 5 m y a escala 1/1,200 con énfasis en la identificación de litologías, cambios granulométricos y figuras sedimentarias (Anexo N°1). Las relaciones de corte estratigráficas-estructurales se determinaron por observación visual y medición de las orientaciones de diques (Tabla N°1), estratos (Tablas N°2 y N°3), fracturas (Tabla N°4), fallas (Tablas N°5 y N°6) y pliegues (N°7).

Con el fin de conocer los vectores espaciales de los desplazamientos tectónicos vistos en la estratigrafía, se realizaron 15 estaciones microestructurales (codificadas desde TOT-01 a TOT-15 y geolocalizadas con GPS de ± 3 m de precisión, Anexo N°1). Las estaciones están descritas según *datums* de falla (Tablas N°8, N°9 y N°10) que incluyen los rumbos, buzamientos, magnitudes/direcciones de cabeceos y cinemáticas de las estructuras tectónicas (Figura 15).

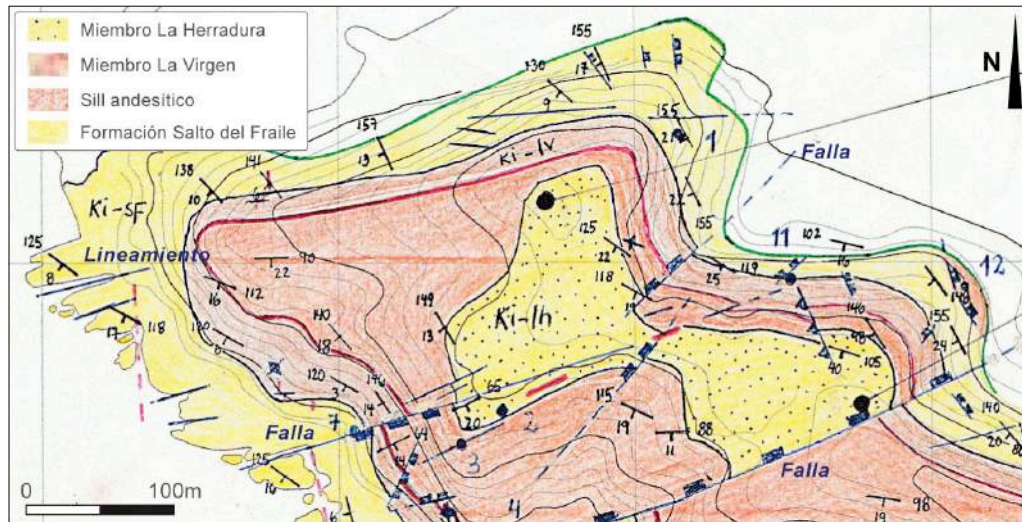


Figura 14. Etapa inicial del mapeo geológico de campo (sector norte del Morro Solar).

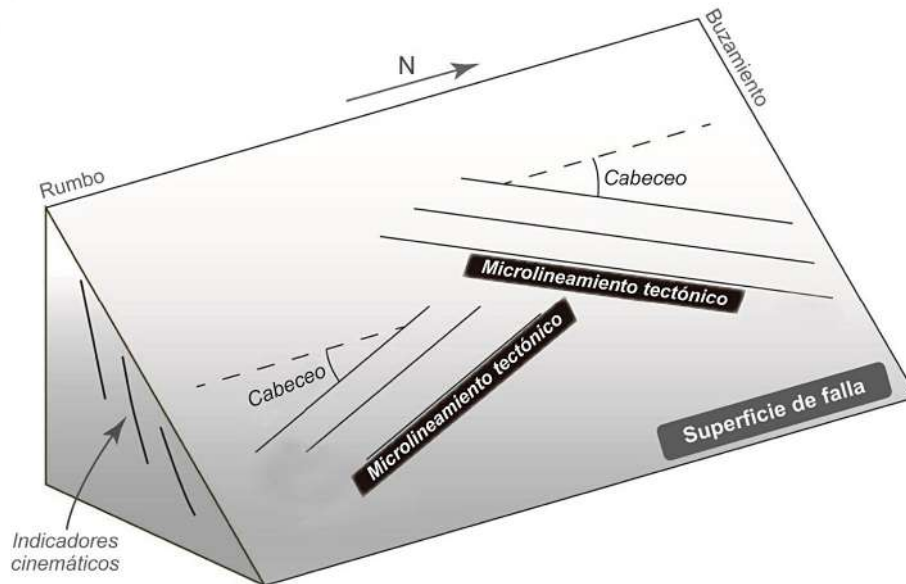


Figura 15. Bloque-diagrama de los *datums* de falla tomados en una estación microestructural. Basado y modificado de Rowland et al. (2007).

3.6.2.3. Procesamiento poscampo

La cartografía geológica de campo se trasladó a los softwares Microsoft Excel® y ArcGIS® para su análisis estructural. Dicha información complementó y mejoró las interpretaciones de precampo, ayudando a tener una asociación robusta de estructuras tectónicas desde superficie hasta parcialmente el subsuelo. Las orientaciones fotointerpretadas de diques y fracturas que no pudieron medirse en campo fueron geoprocesadas en ArcGIS® para la extracción de sus azimuts (ver datos en las Tablas N°1 y N°4). Adicionalmente, el tratamiento de fotografías, figuras y esquemas geológicos se llevó a cabo en los softwares Adobe Illustrator® y Photoshop®. Las geometrías y cinemáticas de las estructuras mesoscópicas y microestructuras tectónicas están ilustradas en un nuevo mapa geológico del Morro Solar a escala 1/5,000 (Anexo N°1).

3.7. Análisis e interpretación de la información

3.7.1. Estereografía de planos

El análisis del mecanismo de deformación del Morro Solar requirió de la proyección estereográfica de datos estructurales fotointerpretados y de campo (ver en las Tablas de la N°1 a la N°10). La estereofalsilla de Schmidt (Figura 16) ayudó a mostrar las orientaciones planares de estratos, estructuras mesoscópicas y microestructuras tectónicas según círculos mayores y menores en los softwares Faultkin® y Stereonet® (Marrett y Allmendinger, 1990; Allmendinger et al., 2012). Asimismo, tales orientaciones se proyectaron como diagramas de rosas y dispersiones polares (con contorno al 1% del área) para el cálculo de tendencias estructurales.

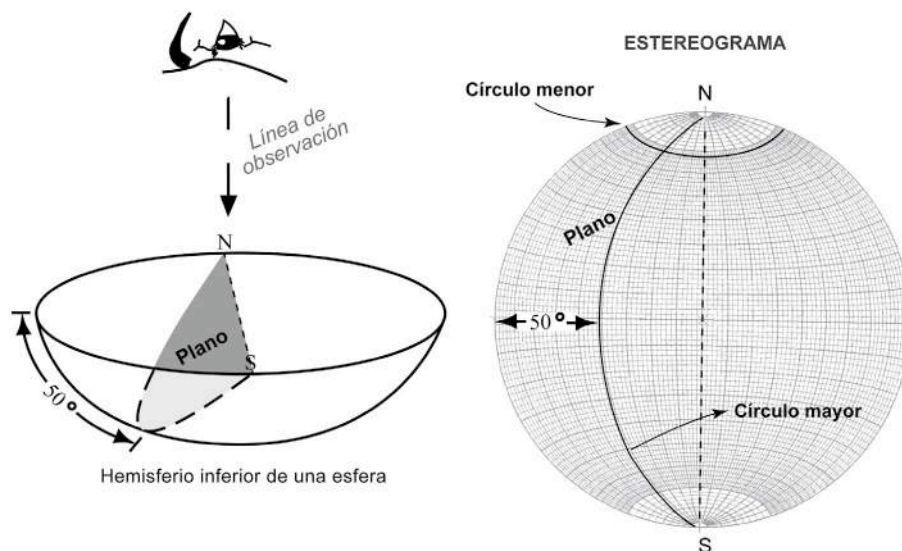


Figura 16. Estereofalsilla de Schmidt. Tomado de Rowland et al. (2007).

3.7.2. Método de los Diedros Rectos

El análisis estructural dinámico se basó en el procesamiento de los *datums* de falla mediante el *Método de los Diedros Rectos* (Bott, 1959; Angelier y Mechler, 1977; Angelier, 1984; Casas Sainz et al., 1990; Hippolyte et al., 2012). Este método invierte, de forma estereográfica, a las geometrías y cinemáticas de las microestructuras tectónicas para la obtención de los estados de paleoesfuerzos (*trend* y *plunge* de los σ_1 - σ_2 - σ_3 ; Figura 17). La validación de este método se realizó gracias al empleo de la clasificación cinemática de fallas de Angelier (1994), modelo de Anderson (1905 y 1951) y modelo de Ramsay (1967).

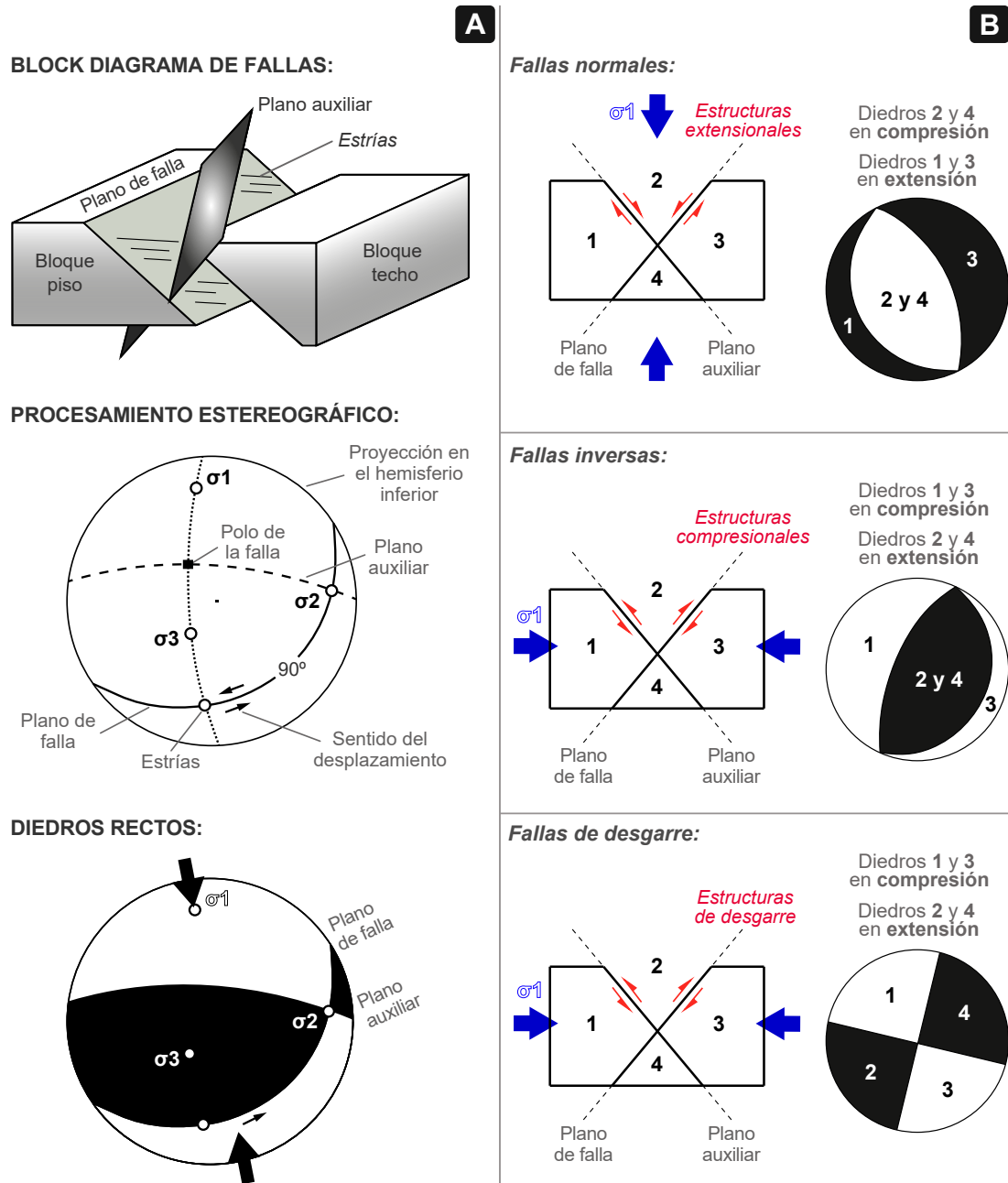


Figura 17. A: Método de los Diedros Rectos empleado para el análisis estructural dinámico de fallas. **B:** Las mejores interpretaciones se obtienen utilizando los modelos de Anderson (1905 y 1951) y de Ramsay (1967).
Tomado de Allmendinger (1987).

3.7.3. Modelamiento estructural 2D-3D

Mediante el software Blender y las herramientas 3D de Photoshop®, las curvas de nivel (cada 5 m) del Morro Solar se transformaron en modelos de elevación digital (Figura 18) que se combinaron con el mapa geológico final a escala 1/5,000 (Anexo N°1). Del mapa se establecieron 19 secciones estructurales (Anexos N°2 y N°3), en las que se interpretaron las relaciones de corte desde superficie hasta subsuelo: se proyectaron las bases, topes y espesores de unidades estratigráficas, se extrapolaron las geometrías y cinemáticas de estructuras tectónicas, al igual que se estimaron los desplazamientos tectónicos de estructuras extensionales (Tabla N°5) y compresionales hasta una profundidad arbitraria de -500 mns. Con estos procedimientos, fue posible construir las arquitecturas tectónicas 2D y 3D del Morro Solar.

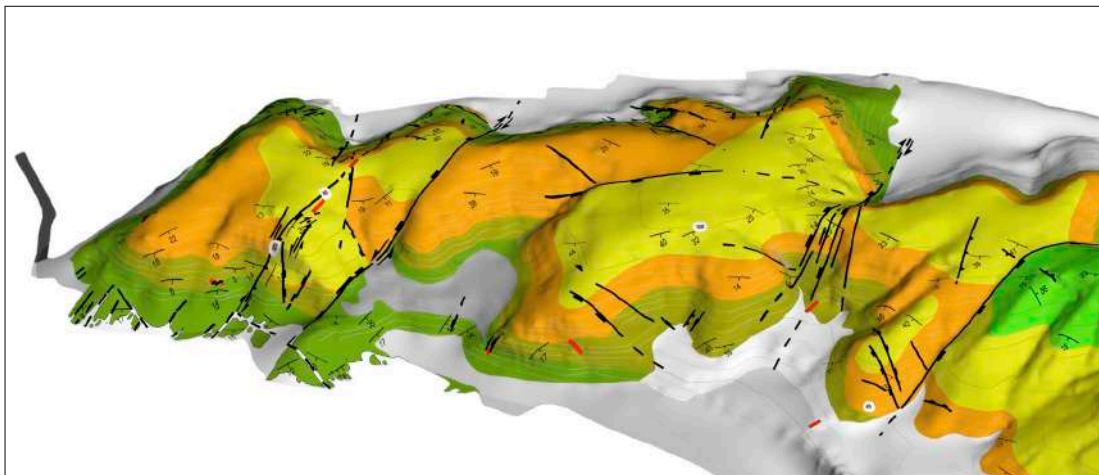


Figura 18. Etapa inicial del modelamiento estructural del sector norte del Morro Solar usando los softwares Blender y Photoshop®.

3.8. Hipótesis y variables

3.8.1. Hipótesis general

-La tectónica cenozoica del antearco peruano tiene influencia en el mecanismo de deformación del Morro Solar.

3.8.2. Hipótesis específicas

-Al realizar el análisis estructural dinámico integrando las geometrías, cinemáticas y arquitecturas 2D-3D de estructuras tectónicas se establecerá el origen del mecanismo de deformación del Morro Solar.

-Al comparar los estados de paleoesfuerzos y convergencias de placas en el margen occidental andino durante el Cenozoico se determinará la evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar.

-Las características geológicas del Morro Solar permitirán evidenciar su relación con la tectónica cenozoica del antearco de la región Lima.

3.9. Matriz de consistencia

INFLUENCIA DE LA TECTÓNICA CENOZOICA DEL ANTEARCO PERUANO EN EL MECANISMO DE DEFORMACIÓN DEL MORRO SOLAR MEDIANTE EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL			
PROBLEMAS DE LA INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS	VARIABLES
<i>Problema General</i>	<i>Objetivo General</i>	<i>Hipótesis General</i>	
¿Influyó la tectónica cenozoica del antearco peruano en el mecanismo de deformación de las rocas del Morro Solar?	Determinar la influencia de la tectónica cenozoica del antearco peruano en el mecanismo de deformación de las rocas del Morro Solar mediante el análisis estructural	La tectónica cenozoica del antearco peruano tiene influencia en el mecanismo de deformación del Morro Solar	Variable Independiente: Tectónica cenozoica del antearco peruano Variable Dependiente: Mecanismo de deformación del Morro Solar
<i>Problemas Específicos</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>Hipótesis Específicas</i>	<i>Variables Específicas</i>
¿Qué características geológicas tiene el Morro Solar en el antearco de la región Lima?	Determinar las características geológicas del Morro Solar en el antearco de la región Lima	Las características geológicas del Morro Solar permitirán evidenciar su relación con la tectónica cenozoica del antearco de la región Lima	1. Control litológico de afloramientos 2. Relaciones de corte estratigráficas-estructurales 3. Geometrías y cinemáticas de estructuras mesoscópicas y microestructuras tectónicas 4. Arquitecturas tectónicas 2D y 3D 5. Compatibilidad de estructuras tectónicas 6. Partición de estructuras tectónicas
¿Cómo sería el análisis estructural dinámico integrando las geometrías, cinemáticas y arquitecturas 2D-3D de estructuras tectónicas para establecer el origen del mecanismo de deformación del Morro Solar?	Realizar el análisis estructural dinámico integrando las geometrías, cinemáticas y arquitecturas 2D-3D de estructuras tectónicas para establecer el origen del mecanismo de deformación del Morro Solar	Al realizar el análisis estructural dinámico integrando las geometrías, cinemáticas y arquitecturas 2D-3D de estructuras tectónicas se establecerá el origen del mecanismo de deformación del Morro Solar	
¿Cómo fue la evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar por comparación entre sus estados de paleoesfuerzos y las convergencias de placas en el margen occidental andino durante el Cenozoico?	Determinar la evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar por comparación entre sus estados de paleoesfuerzos y las convergencias de placas en el margen occidental andino durante el Cenozoico	Al comparar los estados de paleoesfuerzos y convergencias de placas en el margen occidental andino durante el Cenozoico se determinará la evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar	

Figura 19. Matriz de consistencia de este trabajo.

3.10. Operacionalización de variables

INFLUENCIA DE LA TECTÓNICA CENOZOICA DEL ANTEARCO PERUANO EN EL MECANISMO DE DEFORMACIÓN DEL MORRO SOLAR MEDIANTE EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL			
VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Variable Independiente: Tectónica cenozoica del antearco peruano	Tectónica cenozoica del antearco peruano: Es el contexto geológico regional en el que se encuentra el área de estudio de este trabajo. Está vinculado con la subducción de las placas Farallón/Nazca y Sudamericana desde inicios del Cenozoico (ver Marco Teórico)	Tectónica de placas	Direcciones y velocidades de convergencia de placas en el Cenozoico
Variable Dependiente: Mecanismo de deformación del Morro Solar	Mecanismo de deformación: La deformación tectónica se expresa mediante estructuras regionales y locales. Estas estructuras tectónicas han estado sometidas a campos de esfuerzos en distintas épocas geológicas. La deformación natural de este tipo se evidencia a partir de geometrías, cinemáticas y arquitecturas tectónicas que suelen preservarse en las rocas (ver Marco Teórico)	Evidencias de la deformación tectónica	Control litológico de afloramientos
			Relaciones de corte estratigráficas-estructurales
			Geometrías y cinemáticas de estructuras mesoscópicas y microestructuras tectónicas
			Arquitecturas tectónicas 2D y 3D
			Compatibilidad de estructuras tectónicas
			Partición de estructuras tectónicas

Figura 20. Operacionalización de variables de este trabajo.

CAPÍTULO IV: GENERALIDADES

4.1. Estratigrafía del antearco de la región Lima

El antearco de la región Lima (costa central del Perú) se localiza en el extremo oeste de la Vertiente Pacífica de la Cordillera Occidental Andina donde posee una estratigrafía jurásica-cretácica (Figura 21). Este apilamiento infrayace en discordancia angular a las sucesiones volcánico-clásticas cenozoicas de la Cordillera Occidental de los Andes (Palacios et al., 1992; Salazar y Landa, 1993). Las rocas mesozoicas tienen su origen por procesos marinos y continentales vinculados a una subducción océano-continente (Benavides, 1956; Wilson, 1963) que fue previa al desarrollo de las cuencas cenozoicas de antearco (Thornburg y Kulm, 1981; Clift et al., 2003; Genge et al., 2020).

En el Calloviano-Kimmeridgiano?, las lutitas y areniscas de prodelta de la Formación Asia se depositaron sobre basamento precámbrico en la parte septentrional de la Cuenca Arequipa (Jacay et al., 2015). Esta sedimentación silicoclástica fue seguida por el establecimiento de ~1700 m de facies volcánicas del Grupo Puente Piedra en un arco de islas (Aleman et al., 2004) durante el Kimmeridgiano-Berriasiano (Jacay et al., 2015).

El reinicio de la sedimentación silicoclástica está dada por ~500 m del Grupo Morro Solar del Valanginiano (Lisson, 1907; Fernández, 1948; Aleman et al., 2006) y Hauteriviano (Geyer y Alleman, 1984; Jacay et al., 2015; Meza-Vélez y O’Gorman, 2019). El Grupo Morro Solar tiene como localidad tipo al área de estudio de este trabajo (Figura 22), cuyas rocas se depositaron por cambios cíclicos del nivel relativo del mar (Moulin, 1988; Núñez del Prado y Chávez, 1989; Peña et al., 2002; Chacaltana et al., 2006) y una tectónica extensional (Aleman et al., 2006; Jacay et al., 2015). En el Valanginiano también se depositaron ~1500 m de facies volcánicas de la Formación Pucusana encima del Grupo Morro Solar (Bosc, 1963; Salazar y Landa, 1993; Aleman et al.,

2006) en un régimen tectónico extensional (Vidal, 1990; Romero et al., 2005) y probablemente transtensional (Aleman y León, 2016).

La sedimentación carbonatada empezó con la instauración del Grupo Lima en el Valanginiano-Barremiano Temprano (Aleman et al., 2006). Sedimentación que Romero (2007) y otros trabajos (Boit, 1959; Bosc, 1963; Salazar y Landa, 1993) consideran ser del Albiano Temprano y ocurrida durante una tectónica extensional (Romero et al., 2005; Aleman et al., 2006). Posteriormente, en el Albiano-Cenomaniano Tardío se depositaron ~1800 m de facies volcánico-clásticas del Grupo Casma en una cuenca de trasarco (Martínez, 1959; Myers, 1974; Guevara, 1980; Palacios et al., 1992; Aleman et al., 2006; Romero, 2007). Estas facies se originaron por magmatismo calcoalcalino con fisuramiento profundo (Soler, 1991), retrabajo marino (Guevara, 1980) y corrientes de turbidez influenciadas por distensión cortical (Jacay et al., 2002a).

En el Cretácico Tardío (~105-60 Ma) se emplazó el Batolito de la Costa en la Vertiente Pacífica de la Cordillera Occidental (Romero, 2007). Esta intrusión, de tonalitas, dioritas y granodioritas tiene ~1600 km de largo y ~65 km de ancho. Se extiende desde el departamento de Arequipa hasta el noroeste peruano en dirección paralela a la zona de subducción andina. En la región Lima, intruye a la estratigrafía mesozoica en el “Segmento Lima” (Palacios et al., 1992) como consecuencia de un fisuramiento extensional (Cobbing, 1973; Pitcher, 1979) y enfriamientos rápidos de la corteza superior entre los 110 y 55 Ma (Wipf, 2006; Noury et al., 2016).

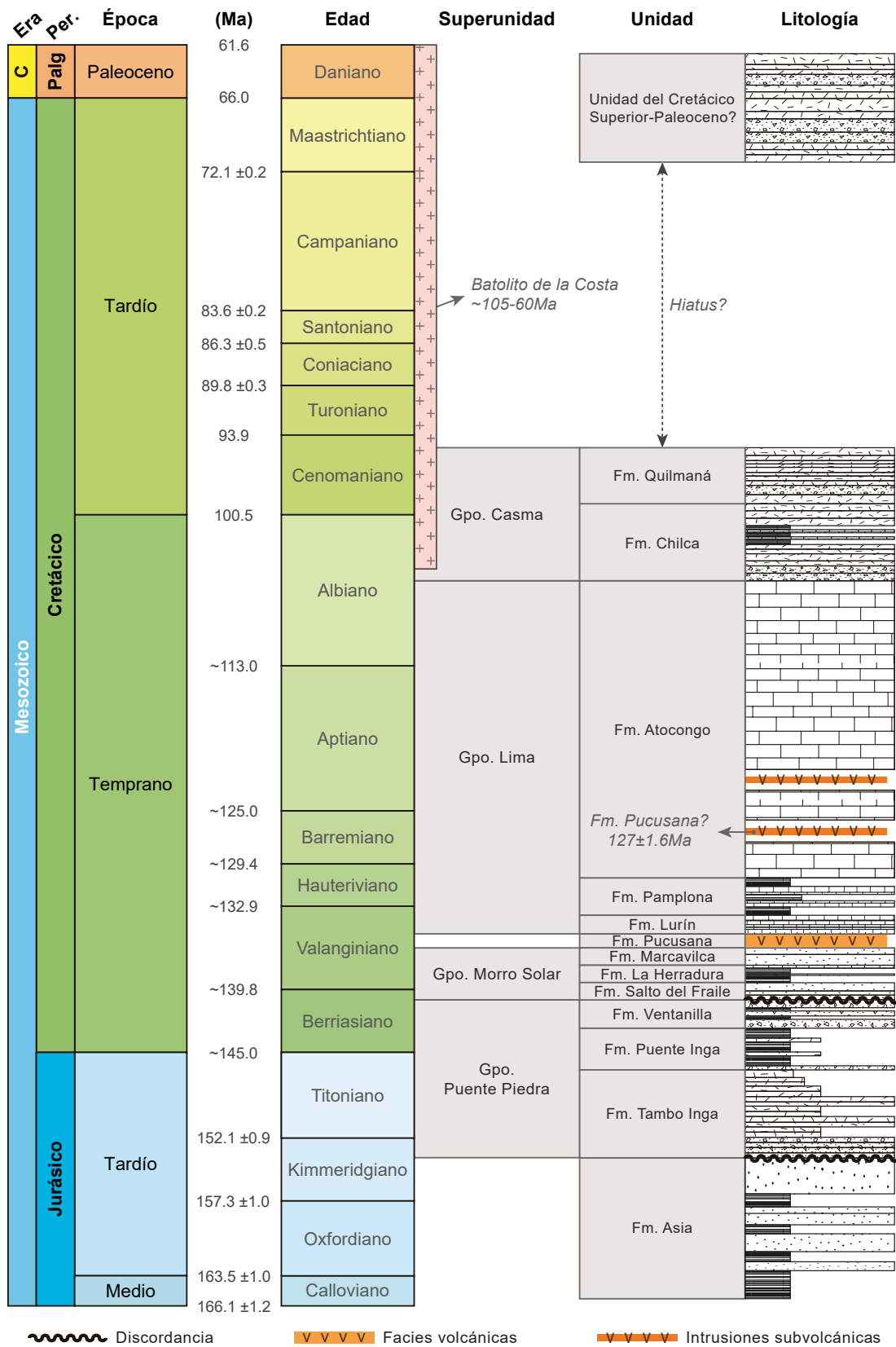


Figura 21. Estratigrafía del antearco peruano de la región Lima, sintetizada partir de los trabajos de Palacios et al. (1992), Romero et al. (2005), Aleman et al. (2006), Romero (2007) y Jacay et al. (2015). Tiempo geológico según Cohen et al. (2013).

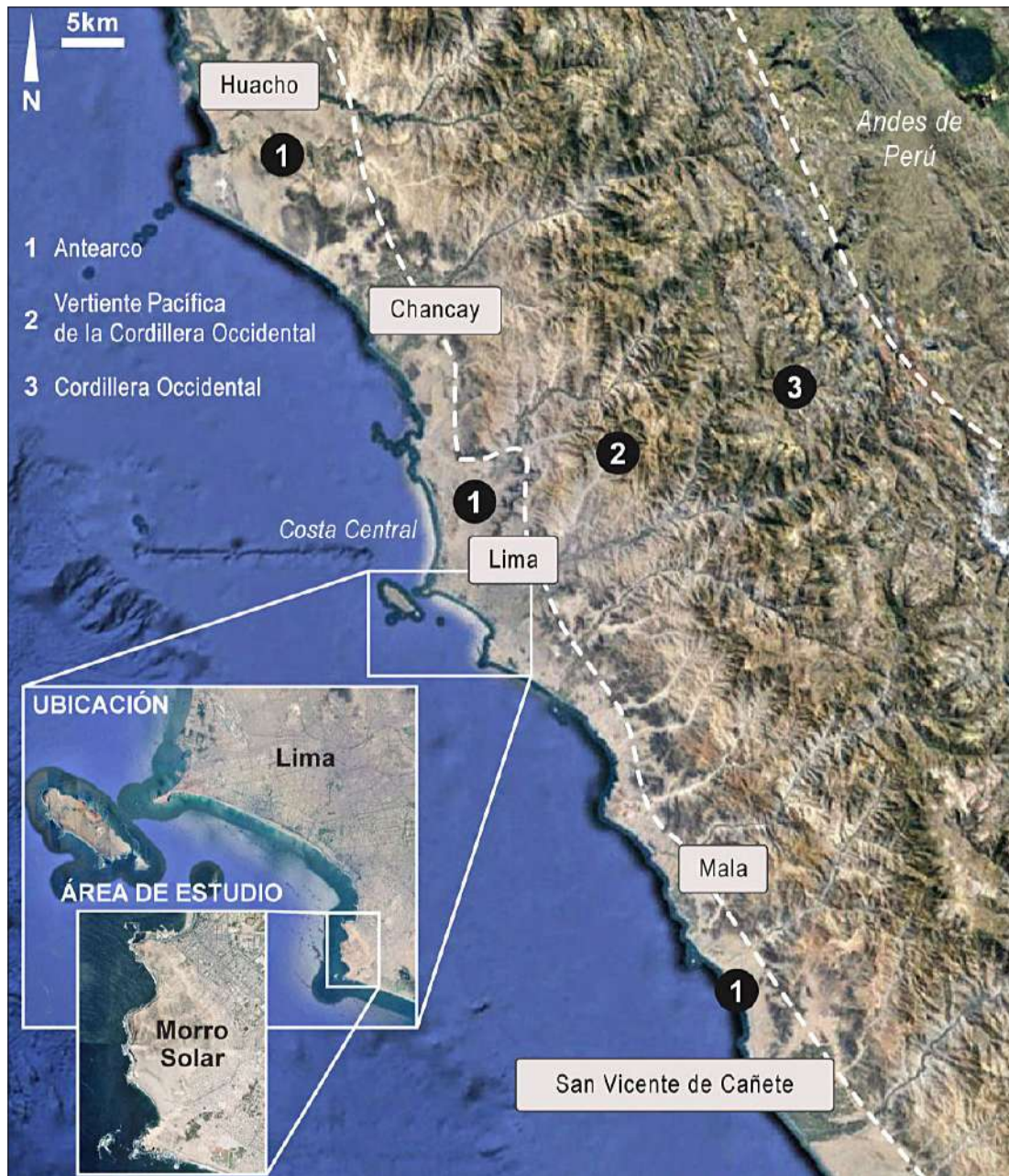


Figura 22. Mapa de ubicación del área de estudio (Morro Solar) en la costa central del Perú (antearco de la región Lima). Imagen satelital tomada de Google Earth.

4.2. Estructuras tectónicas del antearco de la región Lima

La cartografía geológica integrada de la región Lima (Figura 23) a escala 1/150,000 entre las latitudes 11°30'S y 12°30'S (Pardo, 1961; Caldas, 1980; Palacios et al., 1981, Figueroa, 1988; Palacios, 1992; Palacios et al., 1992; Caldas y Palacios, 1998) muestra:

Diques y sills N-S/NO-SE del Cretácico Temprano-Tardío generados por extensión regional NE-SO (Bussell, 1983; Aleman et al., 2006). En la Formación Pucusana (San Bartolo) los diques se disponen en enjambres de ~100 Ma (Vidal, 1990), y en la parte media del Grupo Lima (Pucusana) los sills tienen edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 127.1 y 91.9 Ma (Romero et al., 2005; Aleman y León, 2016). Los diques son también frecuentes en el Batolito de la Costa (Vertiente Pacífica de la Cordillera Occidental), especialmente a lo largo del corredor Cieneguilla-Huaycán-Ate donde aparecen como enjambres adjuntos a un sistema de fracturas regionales de dirección NO-SE.

Fallas normales N-S/NO-SE y NE-SO/O-E de ≤ 3.5 km de longitud. Cuentan con buzamientos moderados a altos y desplazamientos de ~100 m. Están cartografiadas en el norte (Ventanilla), sur (Pucusana) y este de Lima (valle del río Chillón), donde atraviesan a las rocas del Cretácico Inferior-Superior y al Batolito de la Costa. Las fallas normales N-S/NO-SE se generaron por una extensión regional NE-SO que en parte fue contemporánea con el emplazamiento del Batolito de la Costa durante los ~90 y 60 Ma (Aleman et al., 2006; Wipf, 2006). En Pachacámac (Lurín) e Isla San Lorenzo, dichas fallas son lístricas y muestran pliegues locales por compensación tectónica en lutitas del Grupo Morro Solar; y en el resto de la región, los niveles estratigráficos competentes del Grupo Morro Solar, Grupo Lima, Formación Pucusana y del propio Batolito de la Costa poseen bloques basculados (Aleman et al., 2006).

Además, los estudios microtectónicos de Palacios et al. (1981) en la región Lima plantean la existencia de fallas de desgarre NE-SO/O-E con componente extensional. Esto es particularmente notorio porque ellas desplazan a fallas normales, inversas, diques y pliegues NO-SE dentro del Grupo Casma (Cretácico Superior). Las fallas de desgarre-normales NE-SO/O-E muestran extensiones paralelas a la zona de subducción andina y cinemáticamente se asemejan a las reportadas en las cuencas cenozoicas de antearco de la costa peruana. En la costa norte del Perú, las cuencas *offshore* Salaverry y Lima albergan fallas normales miocenas NE-SO/O-E que desplazan a otras NO-SE del Cretácico Tardío-Oligoceno (Clift et al., 2003; Genge et al., 2020). En la costa central (regiones Ica-Lima), las zonas *offshore* y continental de la cuenca cenozoica Pisco exhiben fallas normales paleozoicas NO-SE que están cortadas por otras paleógenas y neógenas de dirección NE-SO/O-E (Calderón, 2007; León et al., 2008; Rustichelli et al., 2016); así como los sedimentos cuaternarios y miocenos del Abanico Aluvial de Lima albergan fallas normales sinsedimentarias O-E (Macharé, 1987; Noble et al., 2009). En la costa sur (región Arequipa), las cuencas miocenas Camaná y Mollendo exhiben fallas normales NE-SO/O-E por efecto de trantensiones ocurridas cerca de las estructuras regionales Cincha-Lluta-Incapuquio e Ica-Ilo-Islay de dirección NO-SE (Alván et al., 2014, 2017). Y en la cuenca transtensional Moquegua (~50-4.5 Ma), la disposición basculada del bloque Atico-Mollendo (basamento proterozoico) está controlada por fallas normales cenozoicas (de dirección NE-SO/O-E) que son transversales a la zona de subducción (Decou et al., 2013; Noury et al., 2016).

Las fallas inversas de la región Lima no son comunes en el antearco y mayormente se les observa en la Cordillera Occidental. Tienen direcciones NO-SE, cerca de ellas existen anticlinales y sinclinales de ~1-4 km de longitud en rocas del Cretácico Inferior-Superior. En Ventanilla (sector norte de la ciudad de Lima) una falla inversa pone al Grupo Puente Piedra en contacto con las rocas del Cretácico Inferior-Superior. En el valle del río Chillón, el extremo occidental del Batolito de la Costa muestra una falla inversa inferida que atraviesa al Anticlinal de Lima? por debajo del Abanico Aluvial de Lima (Lisson, 1907; Caldas, 1980). Otros ejemplos corresponden a las fallas inversas y pliegues del Grupo Morro Solar en los acantilados de Pasamayo (Ayala et al., 2012), Falla José Gálvez, pliegues del Cerro Manzano-Lurín, sinclinales de Huarangal/Pachacámac y anticlinales Atocongo/Manchay.

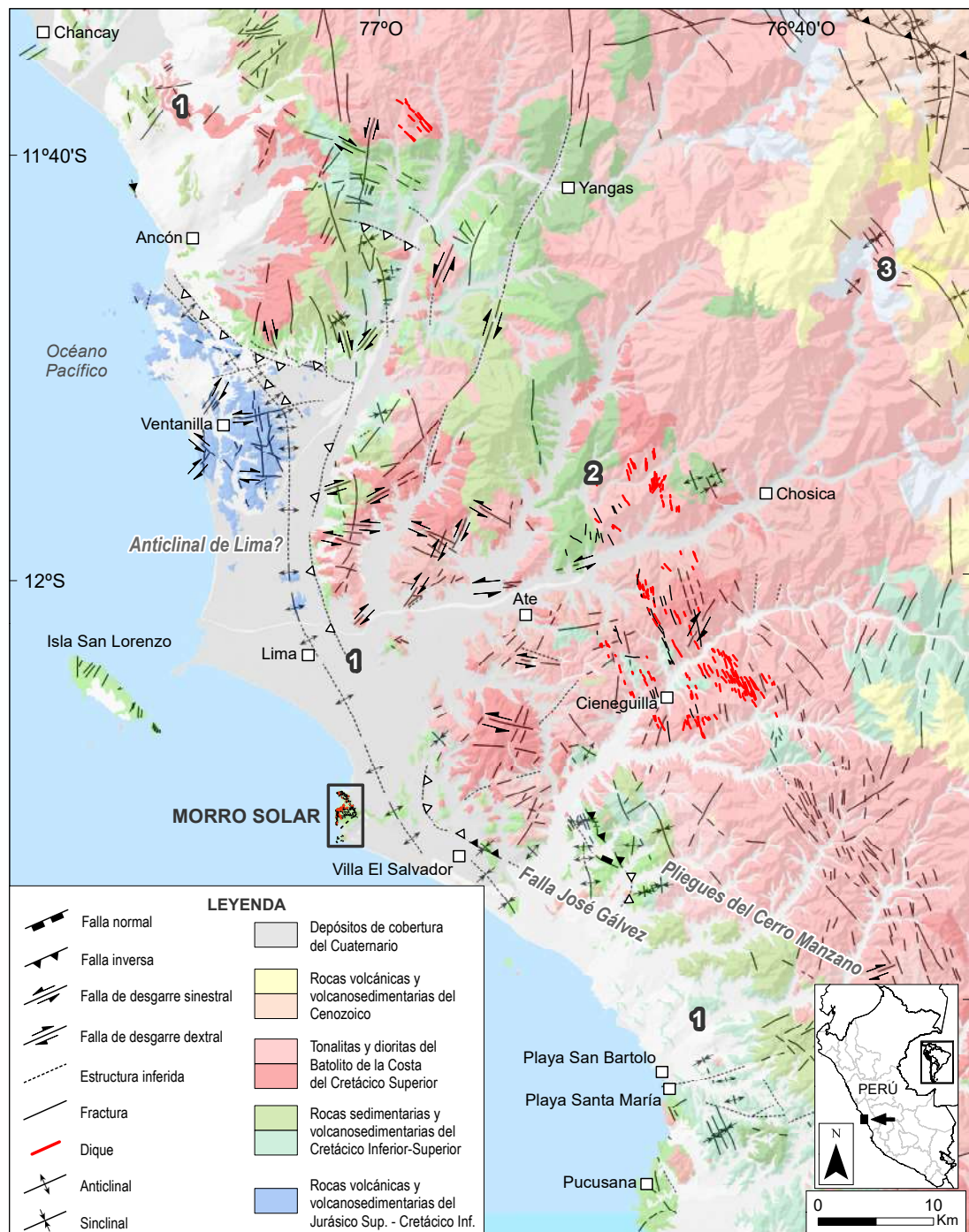


Figura 23. Mapa geológico regional de Lima entre las latitudes 11°30'S y 12°30'S (1: Antearco, 2: Vertiente Pacífica de la Cordillera Occidental Andina, 3: Cordillera Occidental). Compilado de Pardo (1961), Caldas (1980), Palacios et al. (1981), Figueroa (1988), Palacios (1992), Palacios et al. (1992) y Caldas y Palacios (1998).

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis, interpretación y discusión de resultados

5.1.1. Geología del Morro Solar

Las rocas del Morro Solar (longitud 77°02'O / latitud 12°11'S; distrito de Chorrillos) se localizan 14 km al suroeste de la ciudad de Lima entre los 0 y ~270 msnm al frente del Océano Pacífico. Aquí, ocupan un área mapeable de 4.61 km² donde se obtuvo un mapa geológico basado en la estratigrafía de Fernández (1948). Este mapa corrobora y amplía las observaciones de mapeos previos (Fernández et al., 1958; Caldas y Palacios, 1998; León y De La Cruz, 2002; Figura 24), al igual que brinda nuevas evidencias estratigráficas y estructurales a escala 1/5,000 (Figura 25).

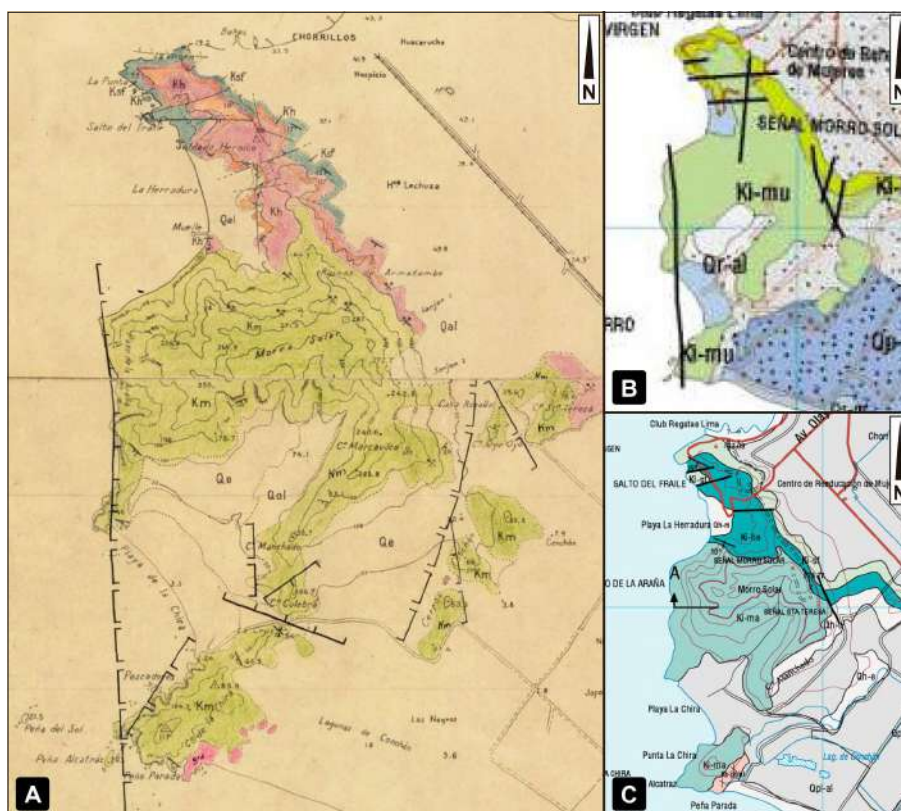


Figura 24. Cartografía geológica clásica del Morro Solar. Tomado de A: Fernández et al. (1958), B: Caldas y Palacios (1998) y C: León y De La Cruz (2002).

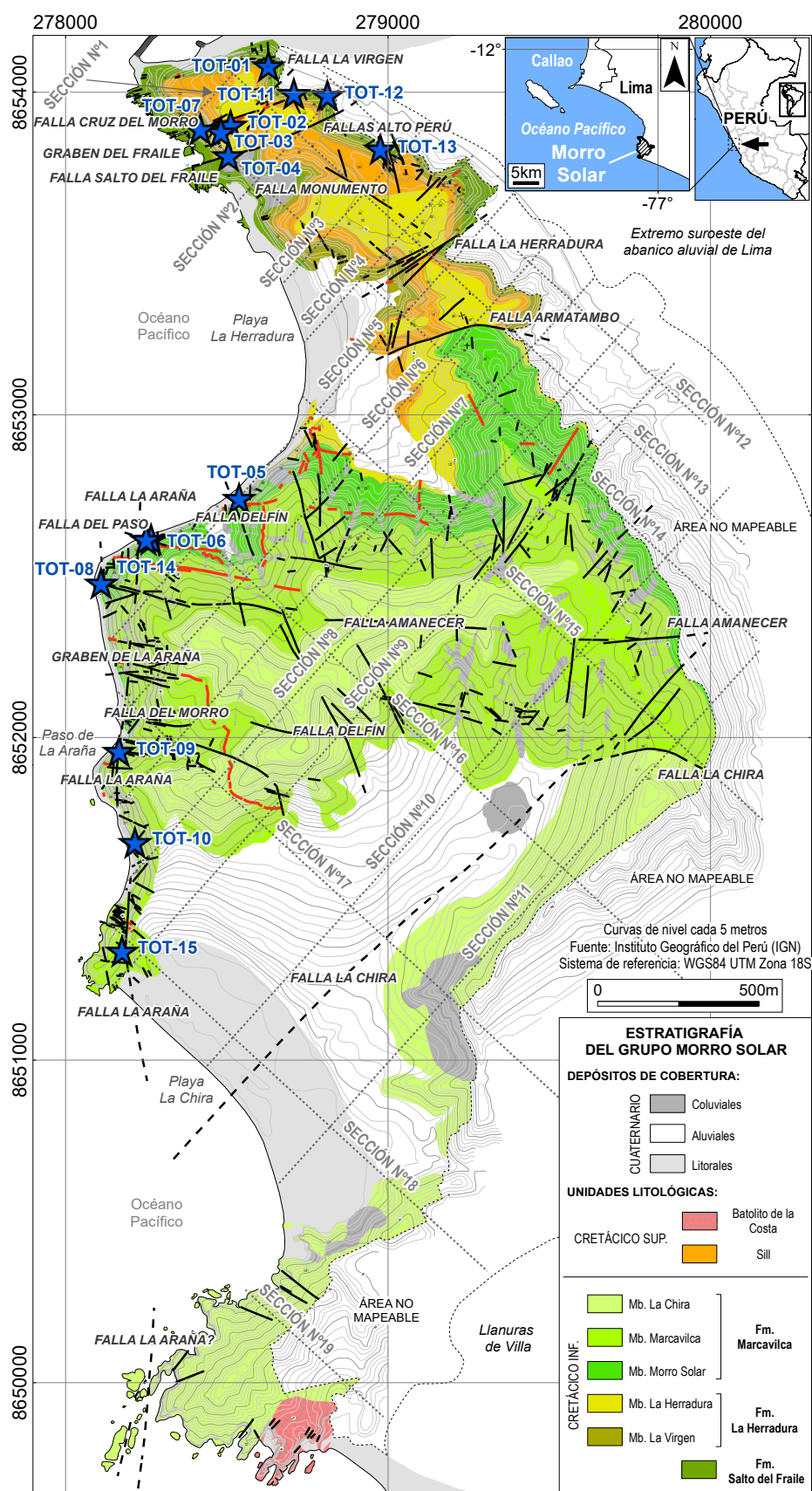


Figura 25. Mapa geológico del Morro Solar a escala 1/5,000 (este trabajo, ver escala más amplia en el Anexo N°1 y en las Tablas de la N°1 a la N°7). Las líneas negras son estructuras tectónicas, las estrellas azules indican la ubicación de estaciones microestructurales (ver datos en las Tablas N°8, N°9 y N°10) y las líneas punteadas corresponden a 19 secciones estructurales (Anexos N°2 y N°3).

El Grupo Morro Solar (Valanginiano-Hauteriviano) aflora con ~481 m de espesor en los sectores norte y sur del Morro Solar (Figura 26). Su estratificación tiene un buzamiento promedio de $<30^\circ$ con direcciones de inclinación hacia el suroeste. El levantamiento estratigráfico cada 5 m (ver a escala 1/1,200 en el Anexo N°1) comprende las siguientes unidades litológicas:

La **Formación Salto del Fraile** (Figura 27) se compone de 61 m de areniscas cuarzosas y lutitas en arreglos estratocrecientes que afloran entre la Cruz del Morro Solar y el A.H. Miguel Iglesias. Su contacto inferior con el Grupo Puente Piedra no está expuesto en esta localidad. Las areniscas son gris blanquecinas, de grano fino-medio en matriz arcillosa, se presentan como barras y lentes de 0.2-5 m de espesor, así como exhiben gradación normal y bioturbación por *Diplocraterium habichi*. Las figuras sedimentarias más frecuentes son laminaciones curvas, ondulares, sigmoidales; *mud drapes*; clastos blandos; estratificaciones *flaser*, lenticulares; *herring bone*, y superficies de reactivación. Las lutitas son abigarradas de <3 m de espesor y albergan fragmentos de bivalvos. El paso de esta unidad hacia la sobreyacente Formación Herradura es transicional.

La **Formación La Herradura** se compone de 94 m apilados en dos subunidades concordantes. La primera subunidad comprende 21 m del **Miembro La Virgen** (Figura 28) de lutitas y estratos centimétricos de areniscas cuarzosas que afloran entre la Cruz del Morro Solar y el A.H. Miguel Iglesias. Las lutitas son gris plomizas, parduzcas y muy oscuras; albergan nódulos de caliza de hasta 25 cm de largo, moldes de ammonites y disseminación de pirita. El tope de esta subunidad se definió en la base de un sill andesítico de ~6 m de potencia. La segunda subunidad comprende 67 m del **Miembro La Herradura** (Figura 28) de areniscas cuarzosas que afloran entre el planetario del Morro Solar y la playa La Herradura. Las areniscas son gris blanquecinas y de grano medio-grueso, se intercalan con 1-5 m de lutitas gris parduzcas, ~1 m de conglomerado de gránulos subredondeados de cuarzo, así como exhiben figuras sedimentarias similares a las observadas en la Formación Salto del Fraile. En el tope de esta subunidad hay areniscas cuarzosas de grano fino-medio de matriz calcárea, lutitas oscuras y una barra de 2.5 m de caliza *mudstone* que infrayace en contacto neto a la Formación Marcavilca.

La **Formación Marcavilca** aflora entre Armatambo y las partes altas del Cerro Marcavilca (~270 msnm), posee 326 m apilados en tres subunidades concordantes. La primera subunidad comprende 94 m del **Miembro Morro Solar** (Figura 29) de areniscas gris blanquecinas de grano fino-grueso, limolitas y lutitas oscuras en arreglos rítmicos que preservan moldes de *Thalassinoides* sp. La segunda subunidad comprende 146 m del **Miembro Marcavilca** (Figura 29) de areniscas cuarzosas gris blanquecinas de grano fino-muy grueso, limolitas y conglomerados de gránulos de cuarzo; las areniscas se presentan como barras de ~2 m de espesor que exhiben estratificaciones cruzadas de láminas rectas y curvas de hasta 3 m de altura; así como albergan figuras de deformación sinsedimentaria por colapso, *Thalassinoides* sp. y piritoedros pseudomórficos. La tercera subunidad comprende 86 m del **Miembro La Chira** (Figura 29) de areniscas cuarzosas que afloran en la playa homónima, su estratigrafía es similar a la del Miembro Marcavilca, y el contacto superior con la Formación Pucusana está ausente por erosión.

Las rocas ígneas son principalmente intrusiones subvolcánicas que cortan al Grupo Morro Solar. Tales intrusiones corresponden a diques del Cretácico Temprano-Tardío que fueron mapeados en 57 afloramientos y en otros 24 sitios por fotointerpretación (Figura 30, ver Tabla N°1). Los diques son de andesita y microdiorita, tienen azimuts N-S/NO-SE con buzamientos de 50°-90° inclinados hacia el este (Figura 30A); y cuentan con potencias de 0.5-8 m, intenso fracturamiento y halos de silicificación cerca de sus contactos con las formaciones Salto del Fraile y Marcavilca. Además, los diques pasan a ser sills debido a que se les observa emplazados concordantemente dentro de las lutitas estratificadas del Miembro La Virgen. El sill de mejor exposición (ver Figura 28: nivel 82-88 m) tiene una potencia promedio de ~6 m en el sector norte, pero se adelgaza con <2.5 m de potencia hacia el sector sur del Morro Solar. Con menos frecuencia, también afloran rocas plutónicas en el extremo sur de la playa La Chira donde las tonalitas y dioritas del Batolito de la Costa (Cretácico Superior) intruyen al Miembro La Chira.

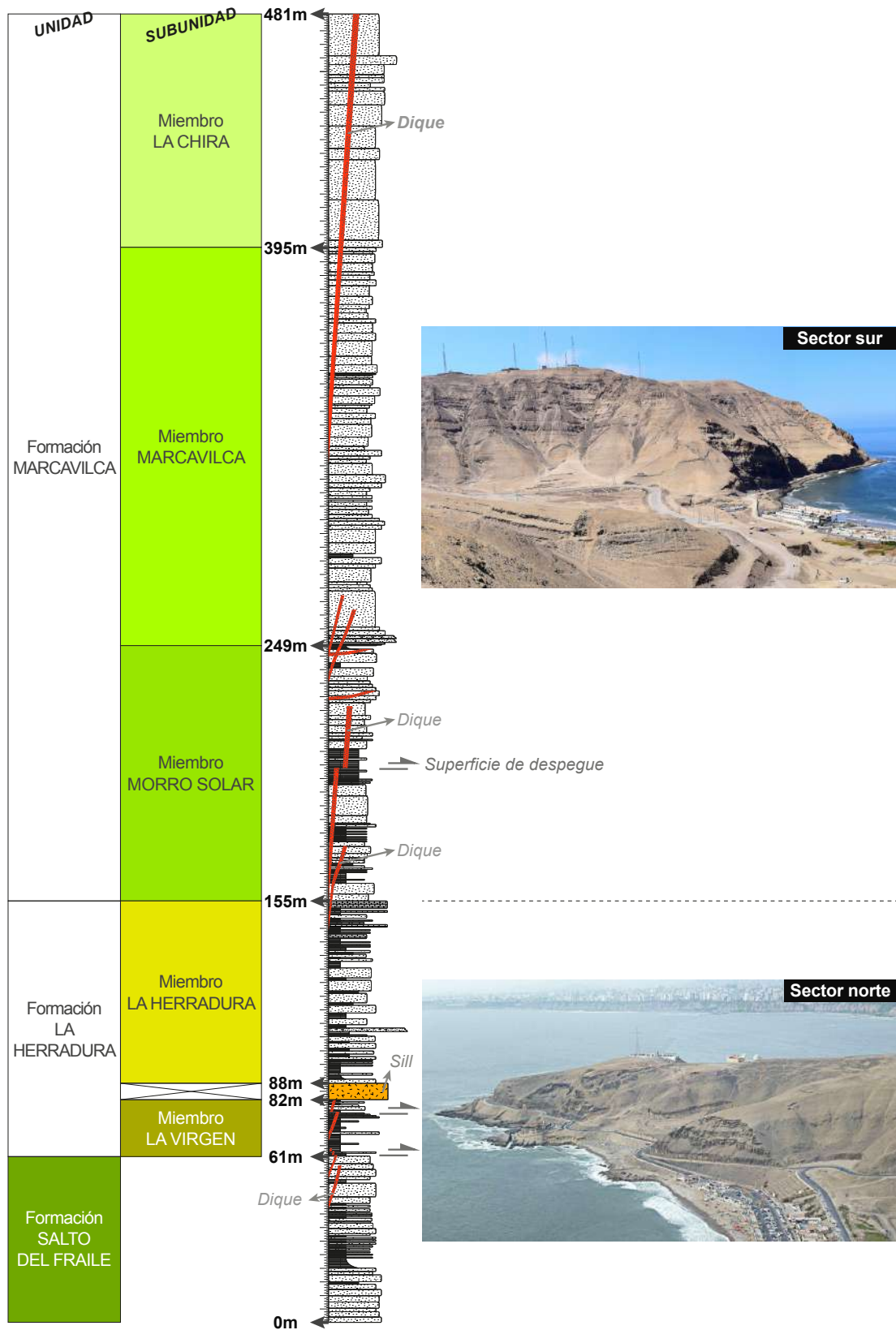


Figura 26. Estratigrafía del Grupo Morro Solar levantada cada 5 m en el área de estudio (ver a escala 1/1,200 en el Anexo N°1).

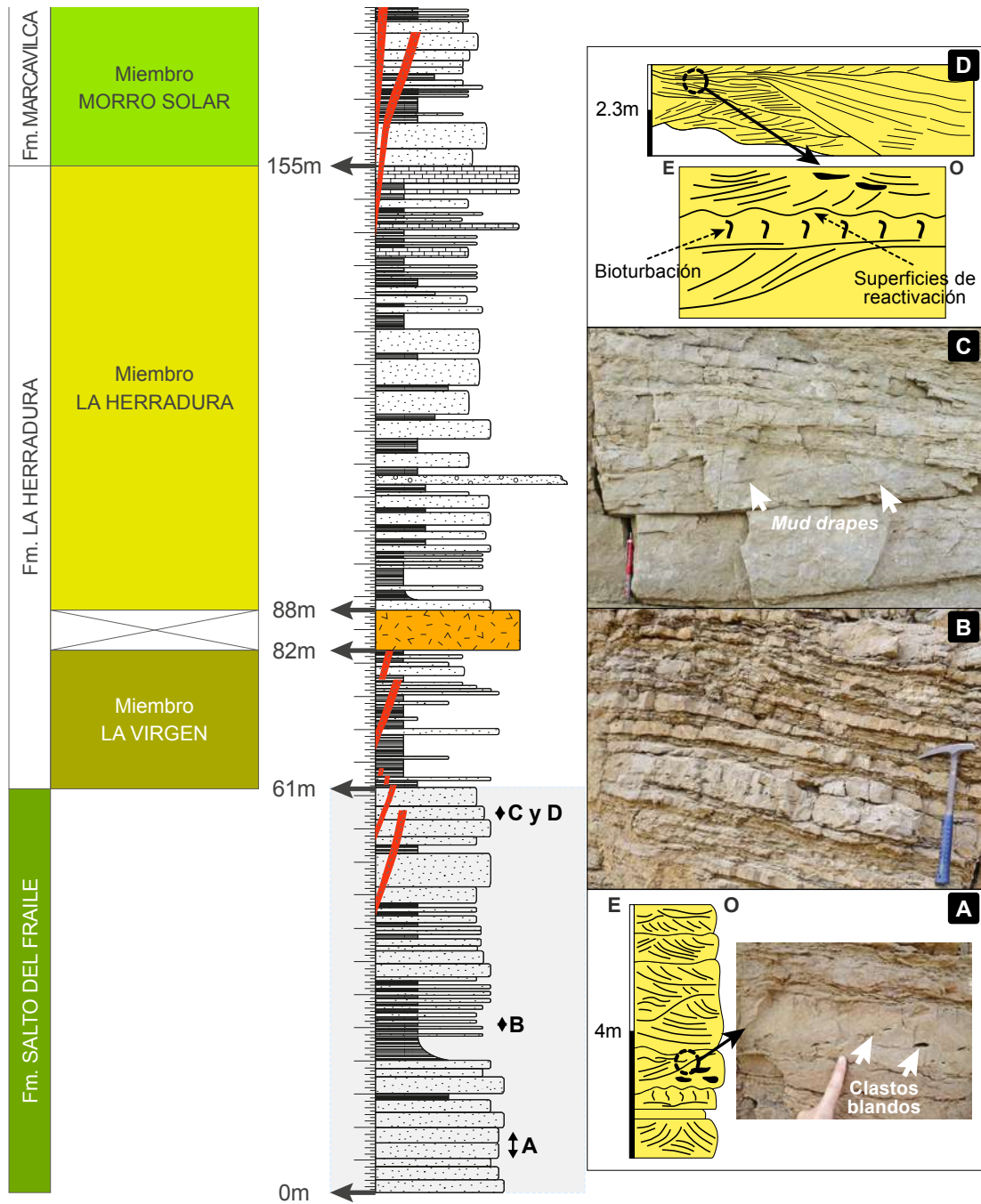


Figura 27. Columna estratigráfica de la Formación Salto del Fraile.

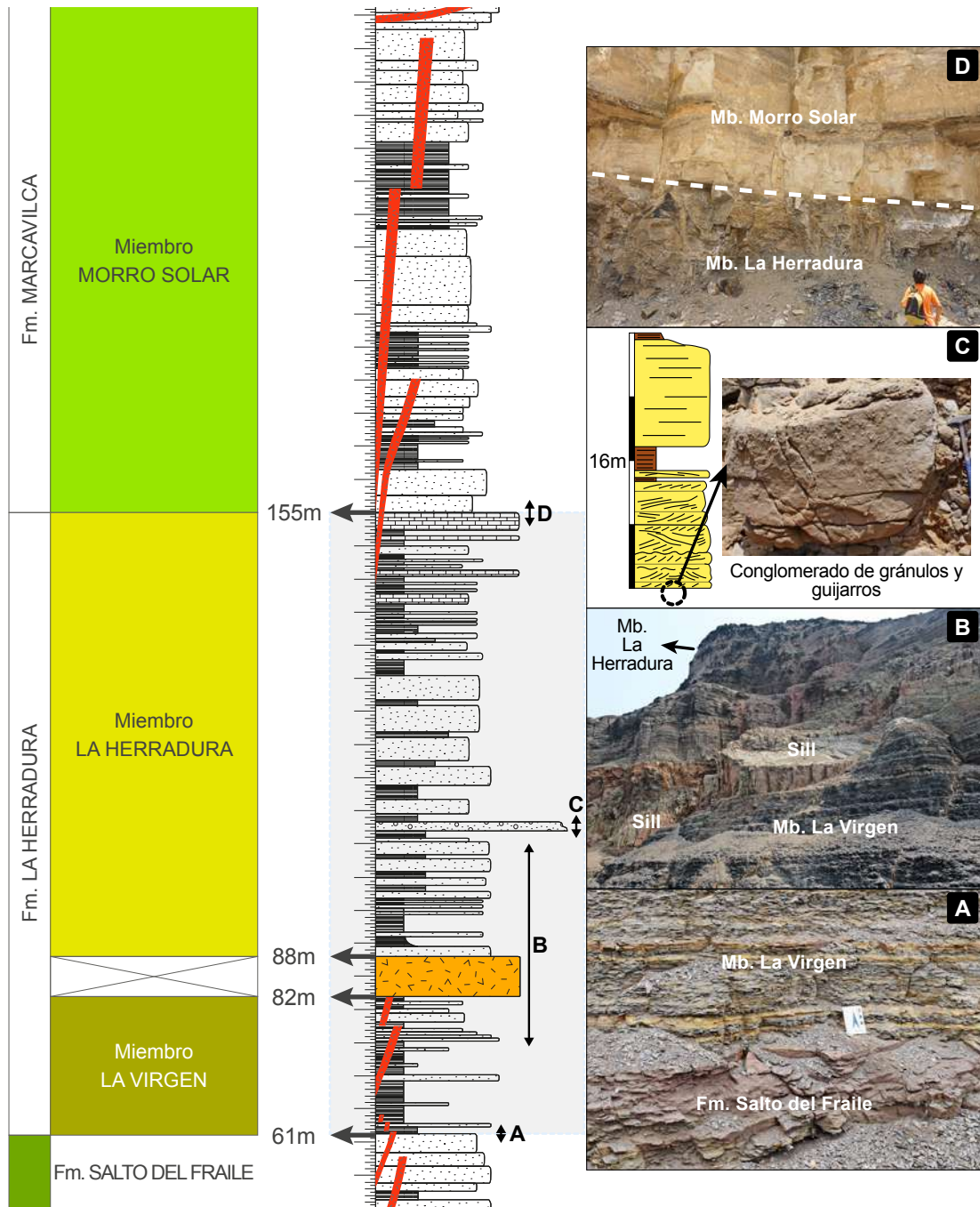


Figura 28. Columna estratigráfica de la Formación La Herradura.

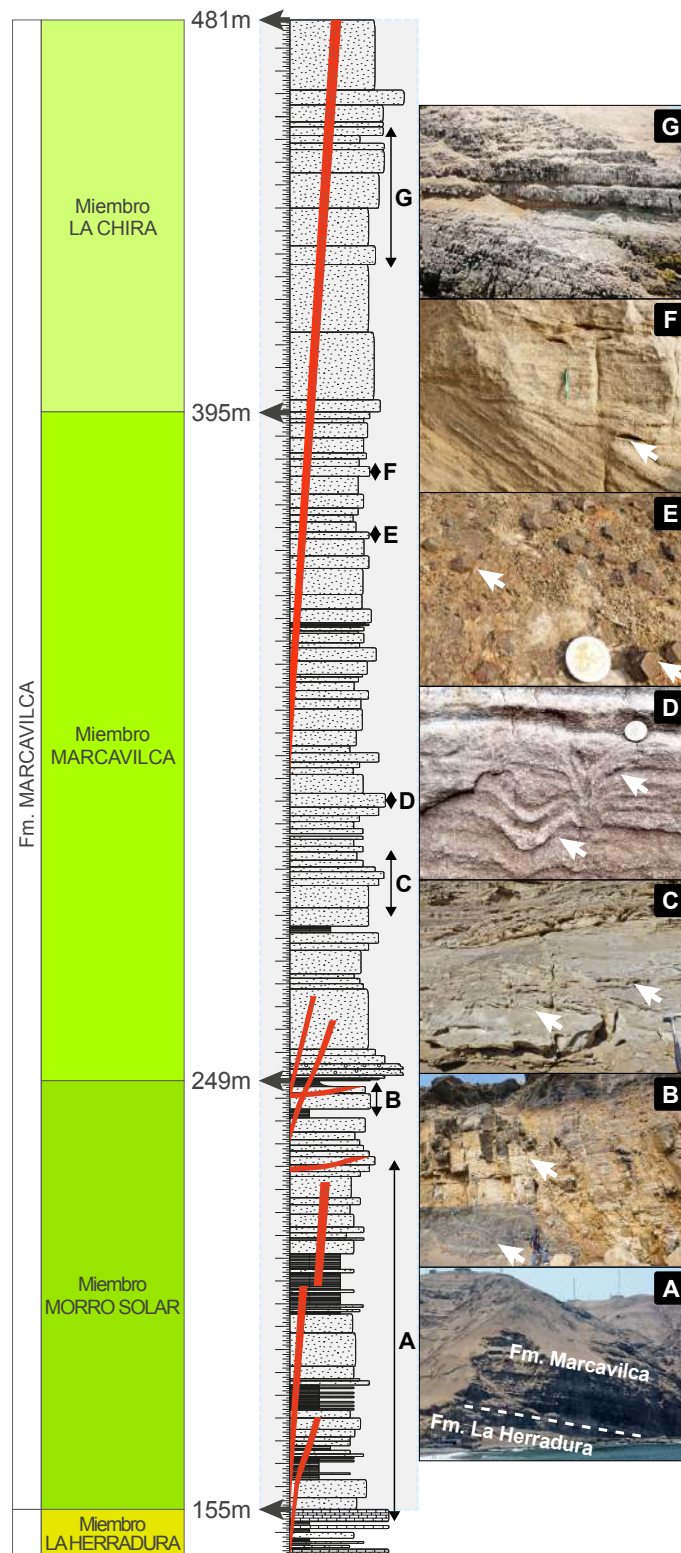


Figura 29. Columna estratigráfica de la Formación Marcavilca.

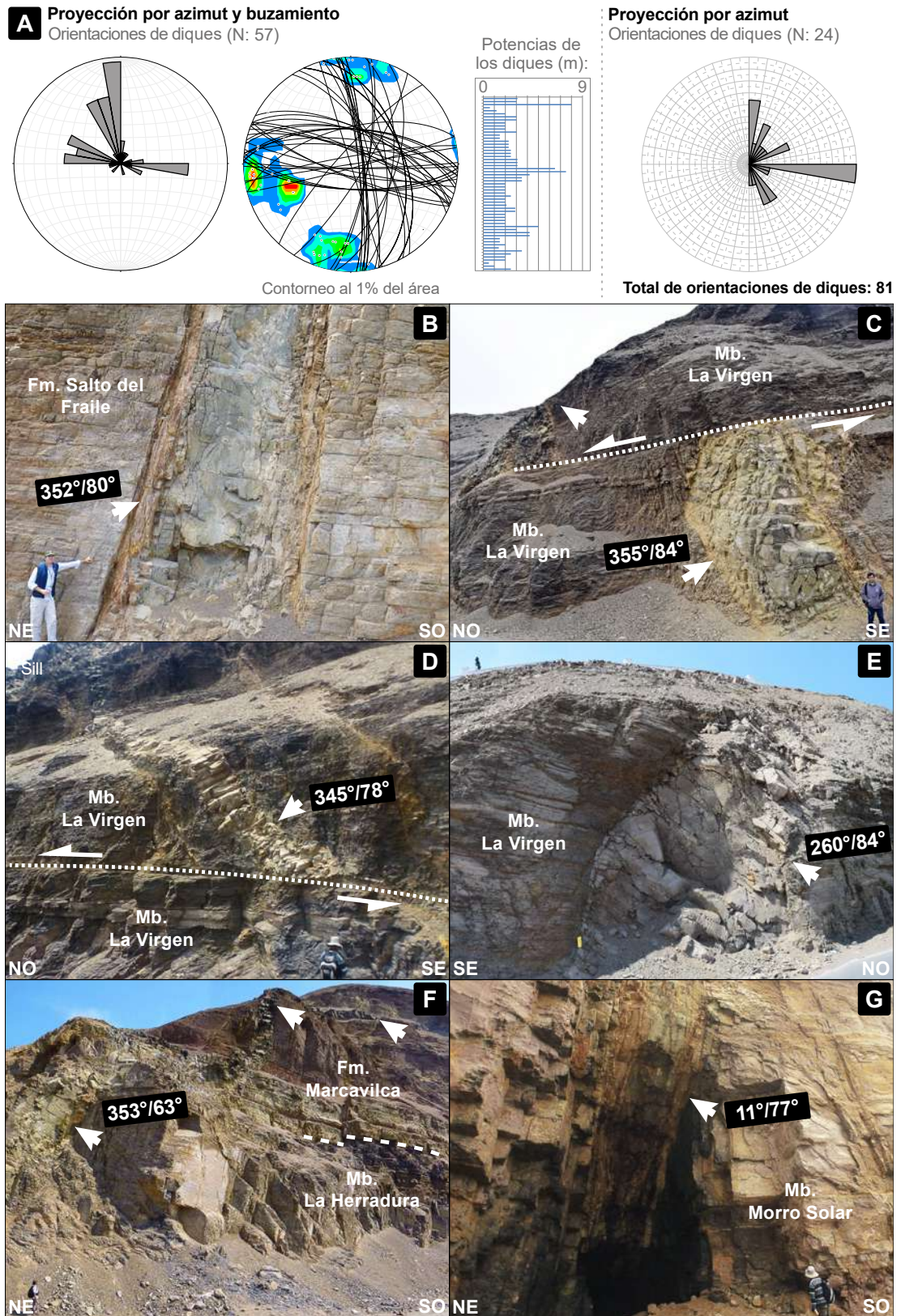


Figura 30. Orientaciones de diques (N: 81). 57 mediciones se obtuvieron en campo y 24 azimuts se extrajeron de la fotointerpretación geológica pre y poscampo (ver Tabla N°1). La ubicación de los diques está señalada por las flechas blancas. “N” representa el número de datos medidos.

5.1.2. Análisis estructural dinámico y origen del mecanismo de deformación del Morro Solar

Las estructuras tectónicas del Morro Solar (N: 427) afloran bien en cuadrículas de 1 km² y afloramientos individuales. Su ocurrencia puede notarse desde la dispersión polar de 161 orientaciones estratales del Grupo Morro Solar (Figura 31A; Tablas N°2 y N°3): el 80% de los estratos buzcan con 5°-15° hacia el suroeste; y el 20% restante lo hace en dirección opuesta con 20°-50° por basculamiento cerca de estructuras extensionales (ver Figura 25 y Anexo N°1).

En principio, se obtuvieron 320 azimuts en fracturas (Figura 31B, Tabla N°4) cuyas tendencias son paralelas a los diques N-S/NO-SE. Adicionalmente, se midieron 107 estructuras tectónicas: 87 extensionales (Figura 31C, Tabla N°5); 15 compresionales (Figuras 31D y 31E, Tabla N°6), y 5 de desgarre (Figura 31F, Tabla N°6). **Las estructuras principales (de orden mayor) son de dirección N-S/NO-SE:** Monumento, Alto Perú, Delfín y La Araña; **y de dirección NE-SO/O-E:** La Virgen, Salto del Fraile, Cruz del Morro, La Herradura, Armatambo, Del Paso, Amanecer, Del Morro y La Chira (ver Figura 25).

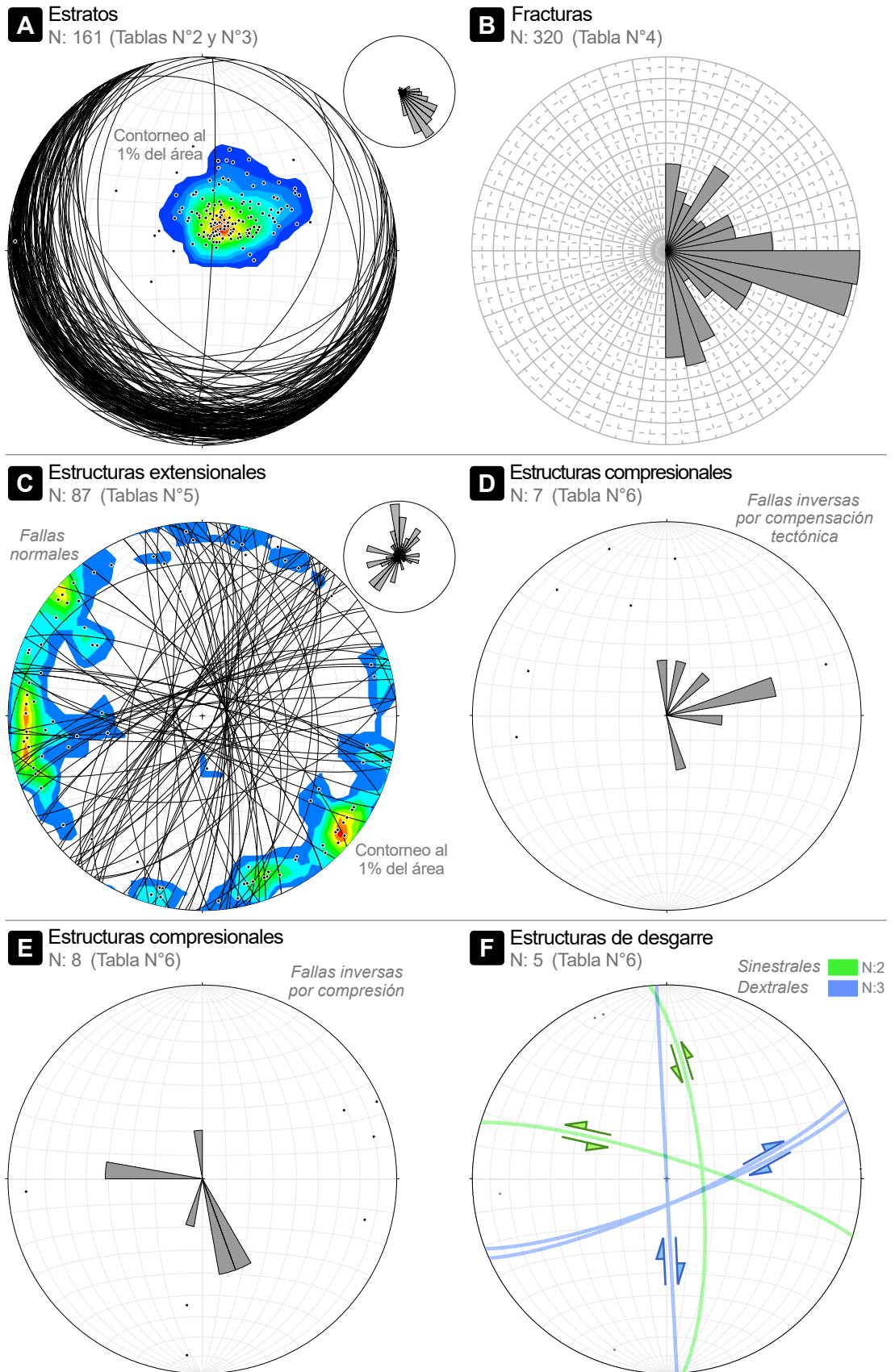


Figura 31. Mediciones estructurales en el Morro Solar (ver Tablas N°2, N°3, N°4, N°5 y N°6). “N” representa el número de datos medidos.

5.1.2.1. Estructuras extensionales N-S/NO-SE

Están registradas en el mapa geológico (ver Figura 25; Tabla N°5). Representan el 8% (N: 35) de 427 estructuras. Son fallas normales desde 350° a 20° de azimut con buzamientos altos (80°-70°), moderados (70°-40°), bajos (~20°) y direcciones de inclinación noreste y sureste.

En el sector norte son cortadas por las estructuras extensionales NE-SO/O-E (Figura 32A), en sus bordes existen estratos basculados hacia el noreste (Figuras 32B, 34A, y 34B), foliaciones (Figuras 32C y 34C), riedels y pliegues de arrastre en la Formación Salto del Fraile. Las estructuras más importantes son: la Falla Monumento 123°/80° pone al Miembro La Herradura contra un sill (Figura 32D); la estructura más occidental (346°/74°) de las fallas normales Alto Perú tiene como bloque techo al Miembro La Virgen (de estratificación 329°/25°) encima de la Formación Salto del Fraile (de estratificación 144°/24°) (Figuras 32E y 34D); a 270m al sureste aflora una falla normal 351°/55° que pone a un sill encima del Miembro La Virgen (Figuras 32E y 34E), y en la playa La Herradura, las fallas normales 190°/75° y 15°/75° (Figura 32F) cortan al Miembro La Herradura. En el Paso de La Araña, las fallas normales 336°/80° y 358°/66° (Figura 32G) y la falla subvertical Delfín de dirección NO-SE (Figuras 32H y 35A) se alinean a fracturas y diques N-S/NO-SE dentro de las formaciones La Herradura y Marcavilca.

En el sector sur, la Falla La Araña 1°/80° atraviesa a los miembros Morro Solar y Marcavilca (Figuras 33A, 35B y 35C), su continuidad hacia la Playa La Chira tiene orientaciones 5°/76° y 4°/80° donde intersecta transversalmente a un *stepover* de orientación 294°/71° (Figuras 33B, 35D y 35E).

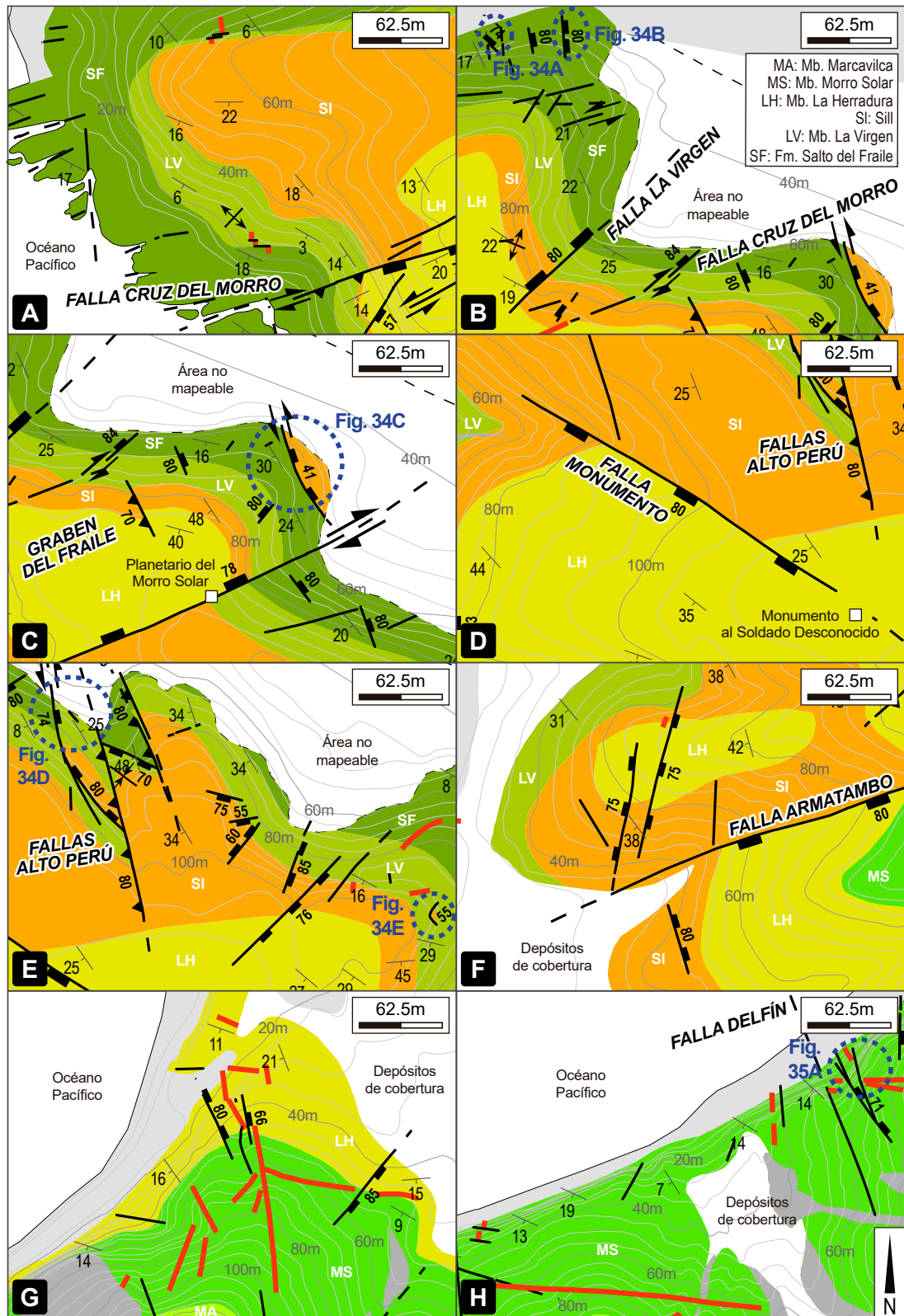


Figura 32. Estructuras extensionales N-S/NO-SE en el sector norte del Morro Solar. Las líneas rojas corresponden a diques.

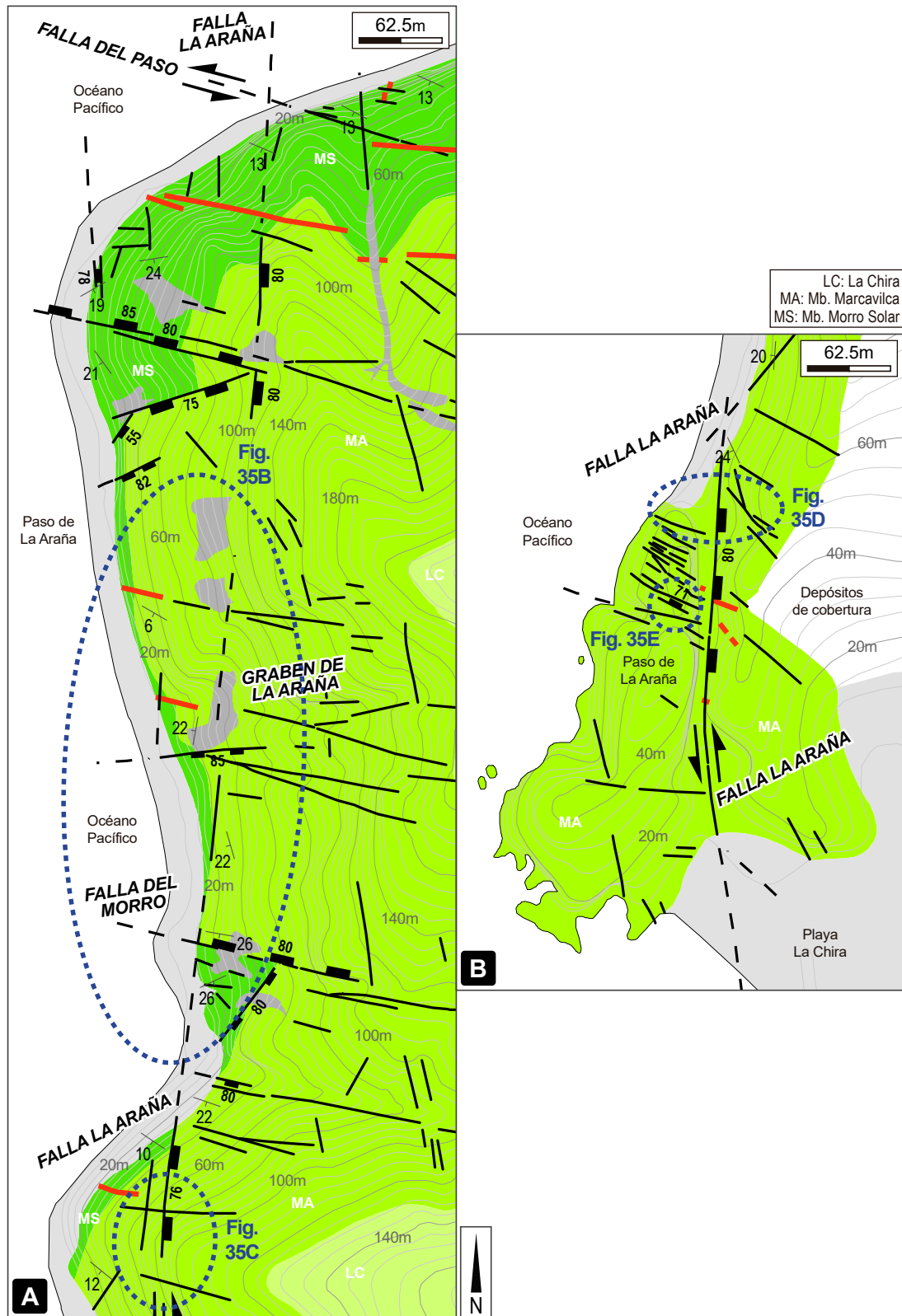


Figura 33. Estructuras extensionales N-S/NO-SE en el sector sur del Morro Solar. Las líneas rojas corresponden a diques.

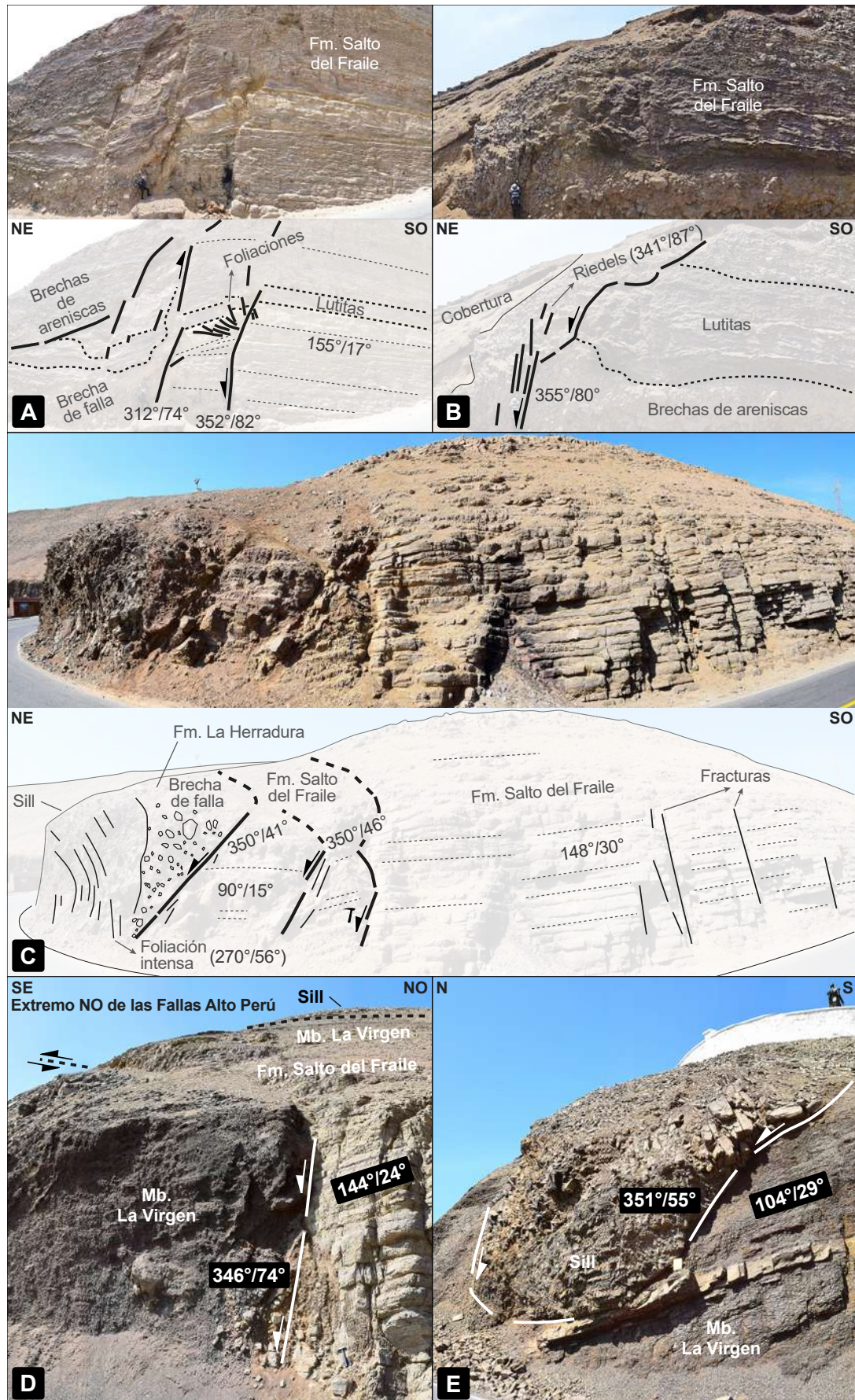


Figura 34. Vistas de campo del mapeo geológico observado en la Figura 32.

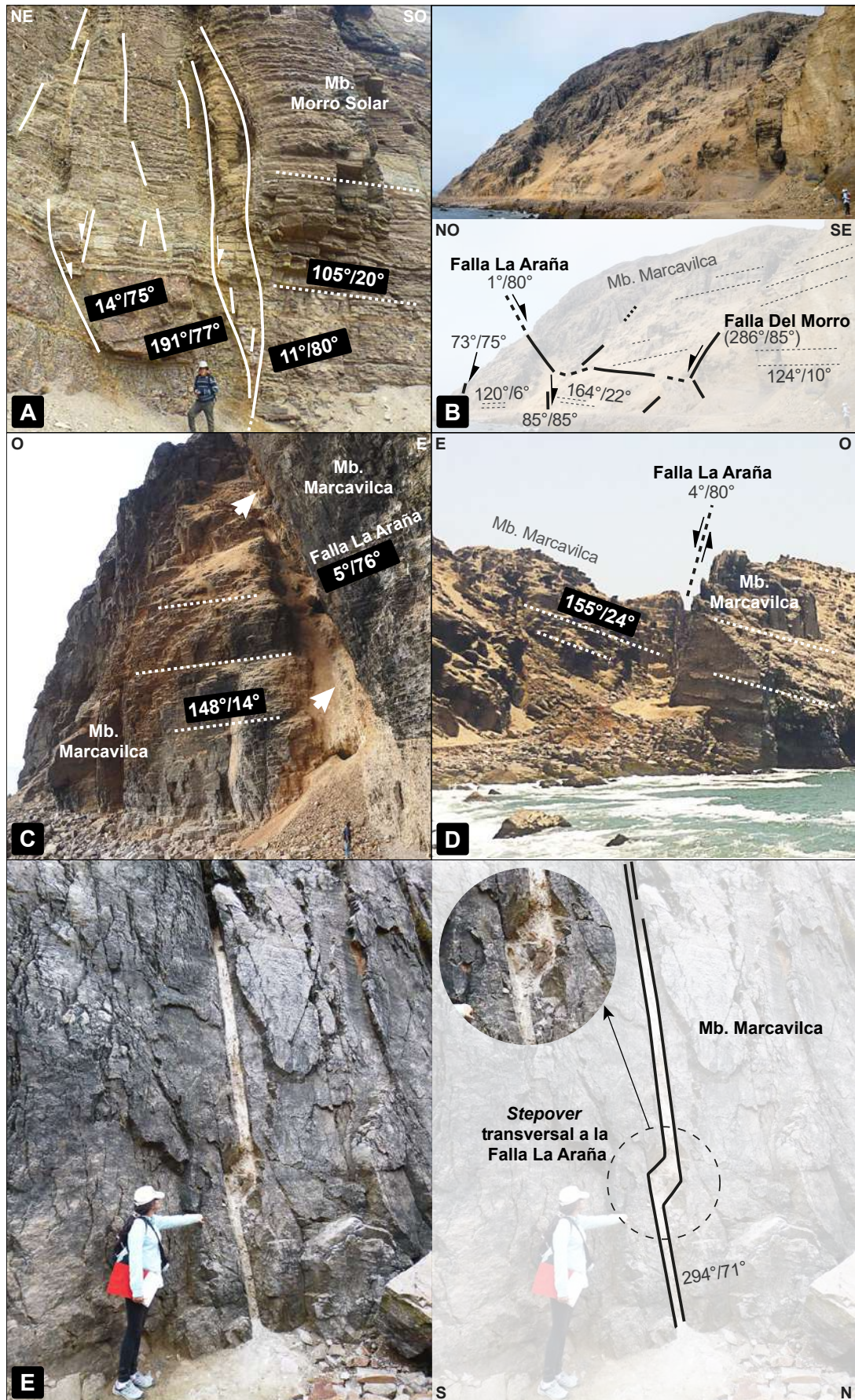


Figura 35. Vistas de campo del mapeo geológico observado en las Figuras 32 y 33.

5.1.2.2. Estructuras extensionales NE-SO/O-E

Están registradas en el mapa geológico (ver Figura 25; Tabla N°5). Representan el 12% (N: 52) de 427 estructuras. Se les observa como fallas normales desde 40° a 80° de azimut con buzamientos altos (90°-70°), moderados (~60°) y direcciones de inclinación noroeste y sureste. Desplazan a las fallas normales y diques N-S/NO-SE, albergan brechas subangulosas de clastos foliados y estriados de areniscas. Tales clastos están envueltos en un panizo rojizo dentro de los núcleos de las fallas normales, y el panizo también se encuentra entre los estratos de areniscas cuarzosas (Formación Salto del Fraile y Miembro La Herradura). Parte de estas estructuras extensionales son lístricas ya que desde ellas se originan superficies de despegue paralelas a la estratificación de las lutitas del Miembro La Virgen.

En el sector norte, la Falla La Virgen 227°/80° pone al tope del Miembro La Virgen contra un sill (Figuras 36A y 38A); las fallas normales 218°/60° y 105°/75° y riedels 241°/72° conforman un graben en el Miembro La Virgen (Figuras 36B y 38B); la Falla Salto del Fraile 249°/78° pone al Miembro La Virgen encima de la Formación Salto del Fraile mediante un desplazamiento normal con componente de desgarre y junto con la Falla Cruz del Morro 69°/87° conforman el “Geben Del Fraile” (Figuras 36C, 38C, 39A y 39B). Por otra parte, la Falla La Herradura 237°/77° pone al Miembro La Herradura sobre un sill (Figuras 36D y 39C), y la Falla Armatambo 87°/80° (Figura 36E) pone al bloque techo del Miembro La Herradura encima de un sill mediante un desplazamiento normal de ~40 m.

En el sector sur, las fallas normales 46°/85° y 24°/80° se alinean a las quebradas de las partes altas del Cerro Marcavilca (Figura 37A); en el Paso de La Araña, la Falla Amanecer 284°/80° desplaza 4-7 m a los miembros Morro Solar y Marcavilca (Figura 37B) y junto con la Falla Del Morro 283°/80° conforman el “Geben De La Araña” (Figura 37C); en el Cerro Marcavilca existen fallas normales, de azimut ~27°, entre los miembros Morro Solar (Figura 37D) y Marcavilca (Figuras 37E y 39D). La prolongación este de la Falla Amanecer 265°/85° atraviesa a la Formación Marcavilca (Figura 37F), y la Falla La Chira 100°/80° pone al bloque techo del Miembro La Chira encima del Miembro Marcavilca (Figuras 37G y 39E).

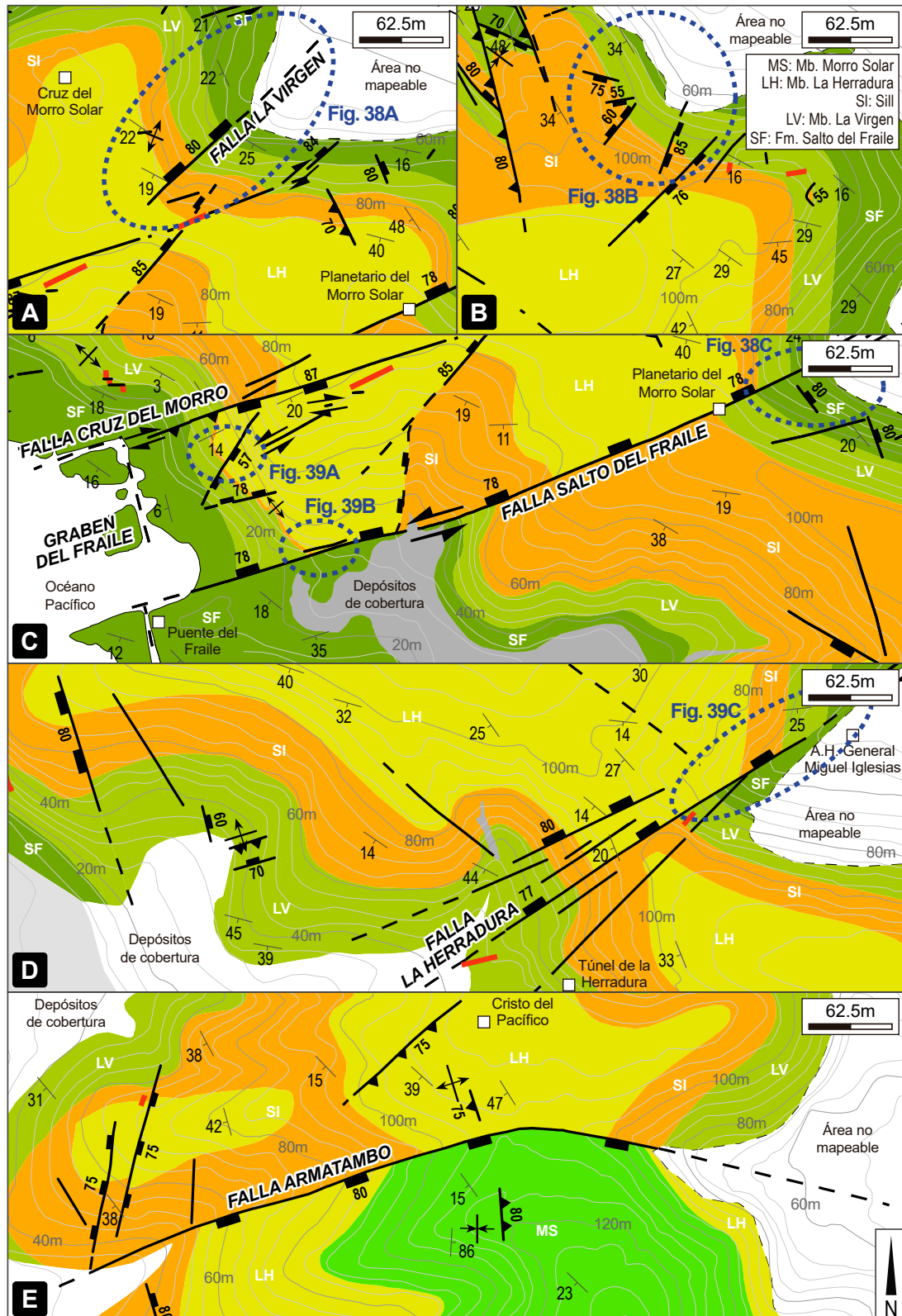


Figura 36. Estructuras extensionales NE-SO/O-E en el sector norte del Morro Solar. Las líneas rojas corresponden a diques.

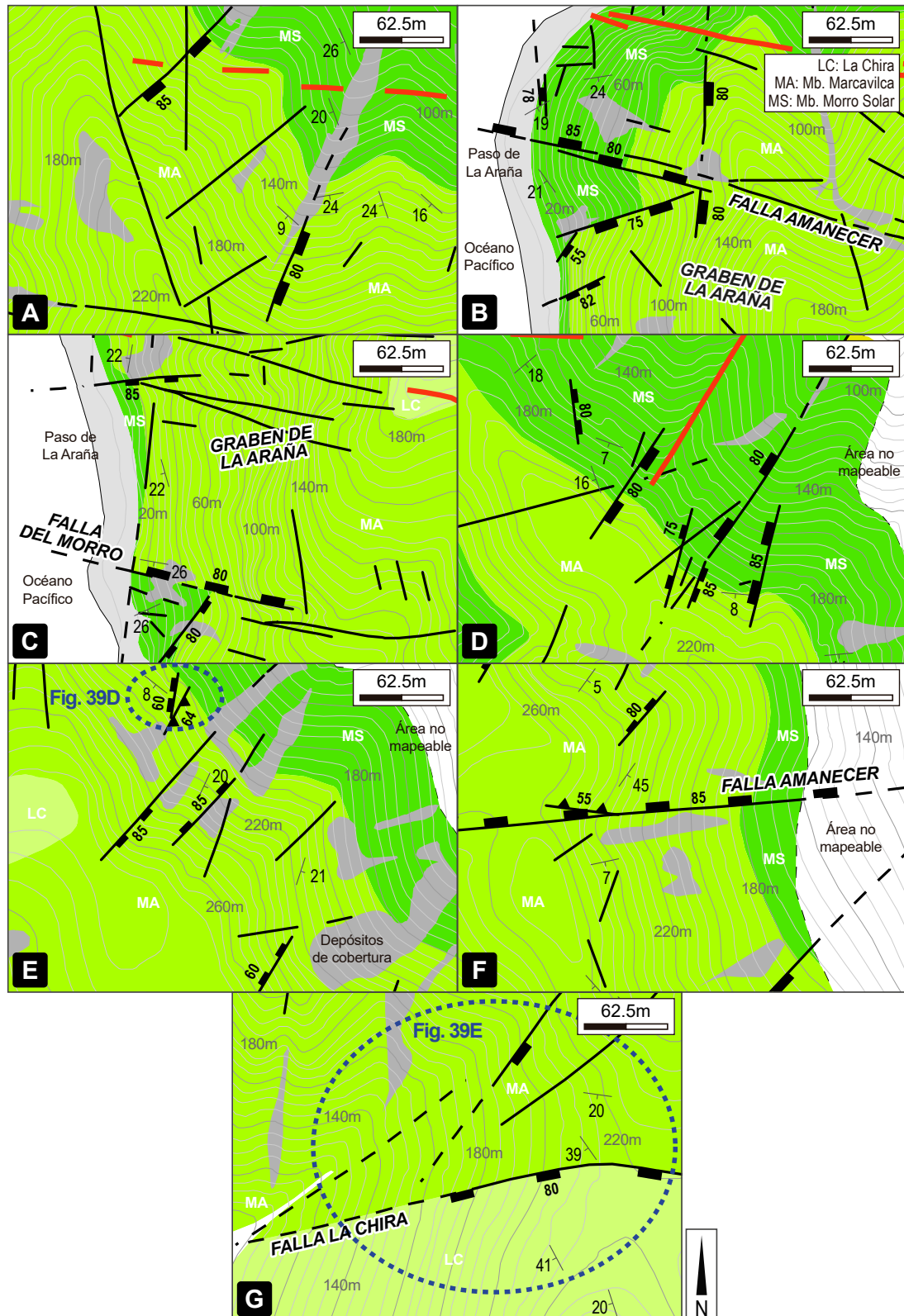


Figura 37. Estructuras extensionales NE-SO/O-E en el sector sur del Morro Solar. Las líneas rojas corresponden a diques.

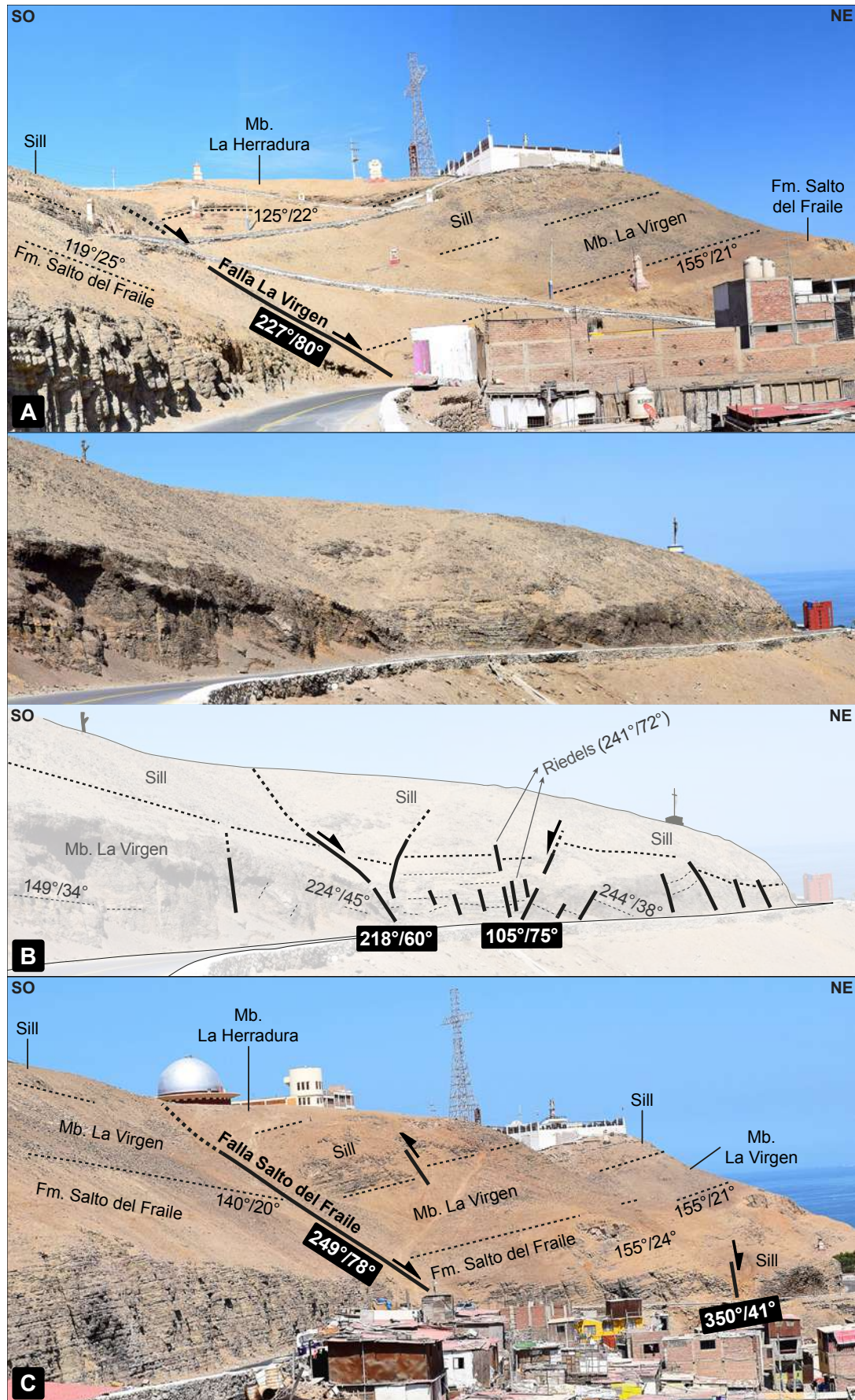


Figura 38. Vistas de campo del mapeo geológico observado en la Figura 36.

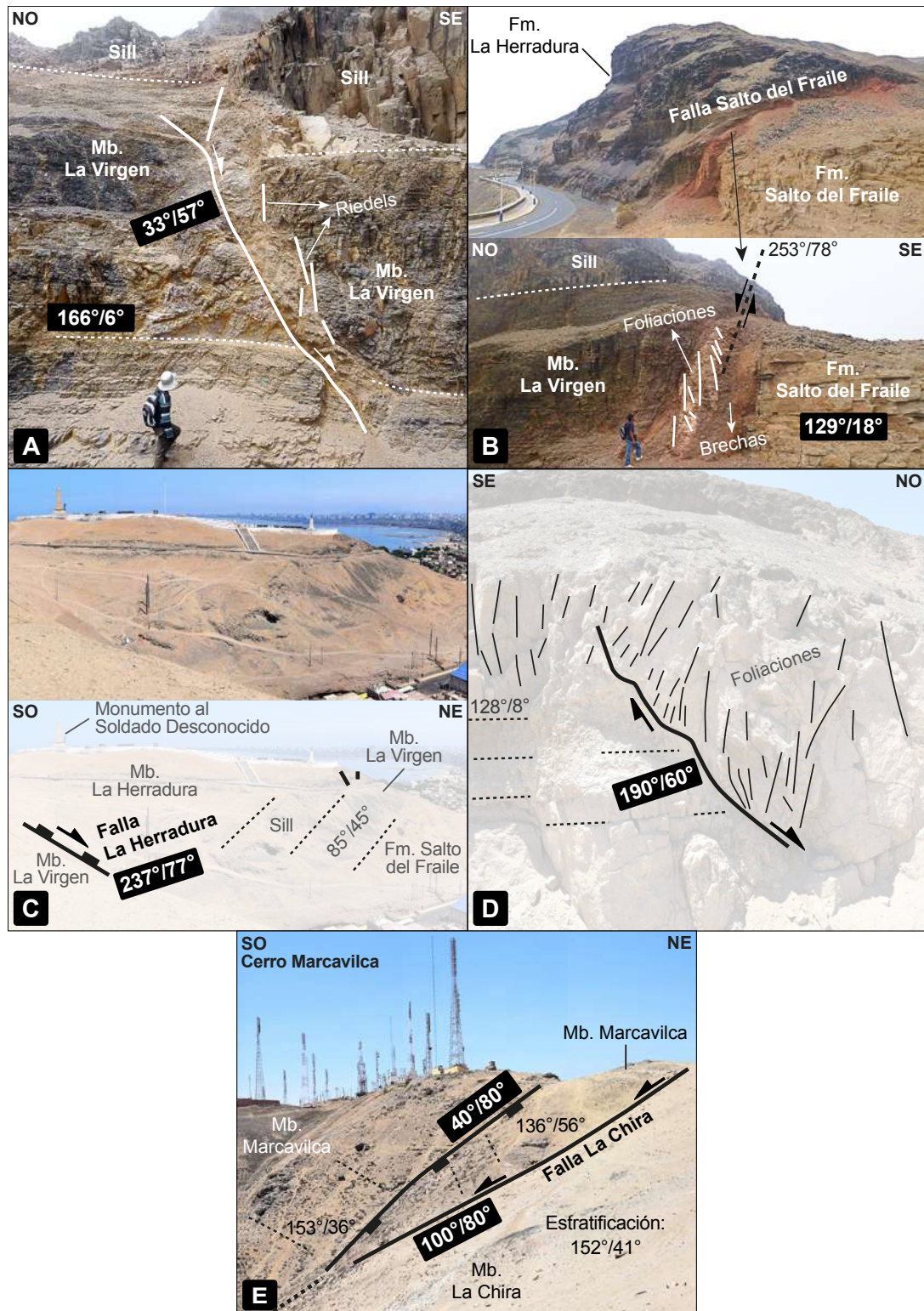


Figura 39. Vistas de campo del mapeo geológico observado en las Figuras 36 y 37.

5.1.2.3. Estructuras compresionales

Están registradas en el mapa geológico (ver Figura 25; Tabla N°6). Representan el 4% (N:15) de 427 estructuras. Fueron clasificadas en dos grupos según su origen tectónico. El primer grupo corresponde a estructuras formadas por compensación tectónica (deformación extensional) y el segundo grupo se vincula con estructuras generadas por compresión en rocas frágiles.

5.1.2.3.1. Pliegues y fallas inversas por compensación tectónica

Aparecen al pie y al frente de las estructuras lítricas extensionales NE-SO/O-E. La compensación tectónica se observa en fallas inversas que parten desde superficies de despegue que son paralelas a la estratificación de lutitas dentro del Miembro La Virgen, donde las fallas inversas infrayacen directamente a pliegues tumbados de areniscas cuarzosas en un arreglo similar al de una deformación por propagación que no supera los 10 m de espesor. La cinemática de los despegues está evidenciada por diques desplazados hacia el noroeste debido a basculamiento.

Los ejemplos más importantes de pliegues y fallas inversas de este tipo son: el anticlinal cerca de la Falla La Virgen tiene un eje promedio 287.4° y un plano axial $285^\circ/82^\circ$ con vergencia ligera hacia el suroeste (Figuras 40A y 41A; Tabla N°7); en los alrededores de las fallas Cruz del Morro y Salto del Fraile aflora un pliegue “en cofre” que posee un eje promedio de 45.8° y un plano axial $45^\circ/75^\circ$ con vergencia ligera hacia el noroeste (Figuras 40A, 41B y 42A; Tabla N°7); un sill en el tope del Miembro La Virgen exhibe un monoclinal de eje NE-SO y vergencia hacia el noroeste cerca de la Falla Salto del Fraile (Figuras 40A, 41C y 42B; Tabla N°7); los pliegues cerca de la Falla La Herradura tienen un plano axial promedio de $57^\circ/88^\circ$ con vergencia ligera hacia el noroeste, asimismo, están asociados a una falla inversa $71^\circ/80^\circ$ dentro de lutitas y areniscas cuarzosas basculadas del Miembro La Virgen (Figuras 40B, 41D y 42C; Tabla N°7), y el anticlinal pequeño cerca de la Falla Armatambo tiene un eje promedio 163.4° y un plano axial $148^\circ/39^\circ$ con vergencia noreste (Figura 40C; Tabla N°7).

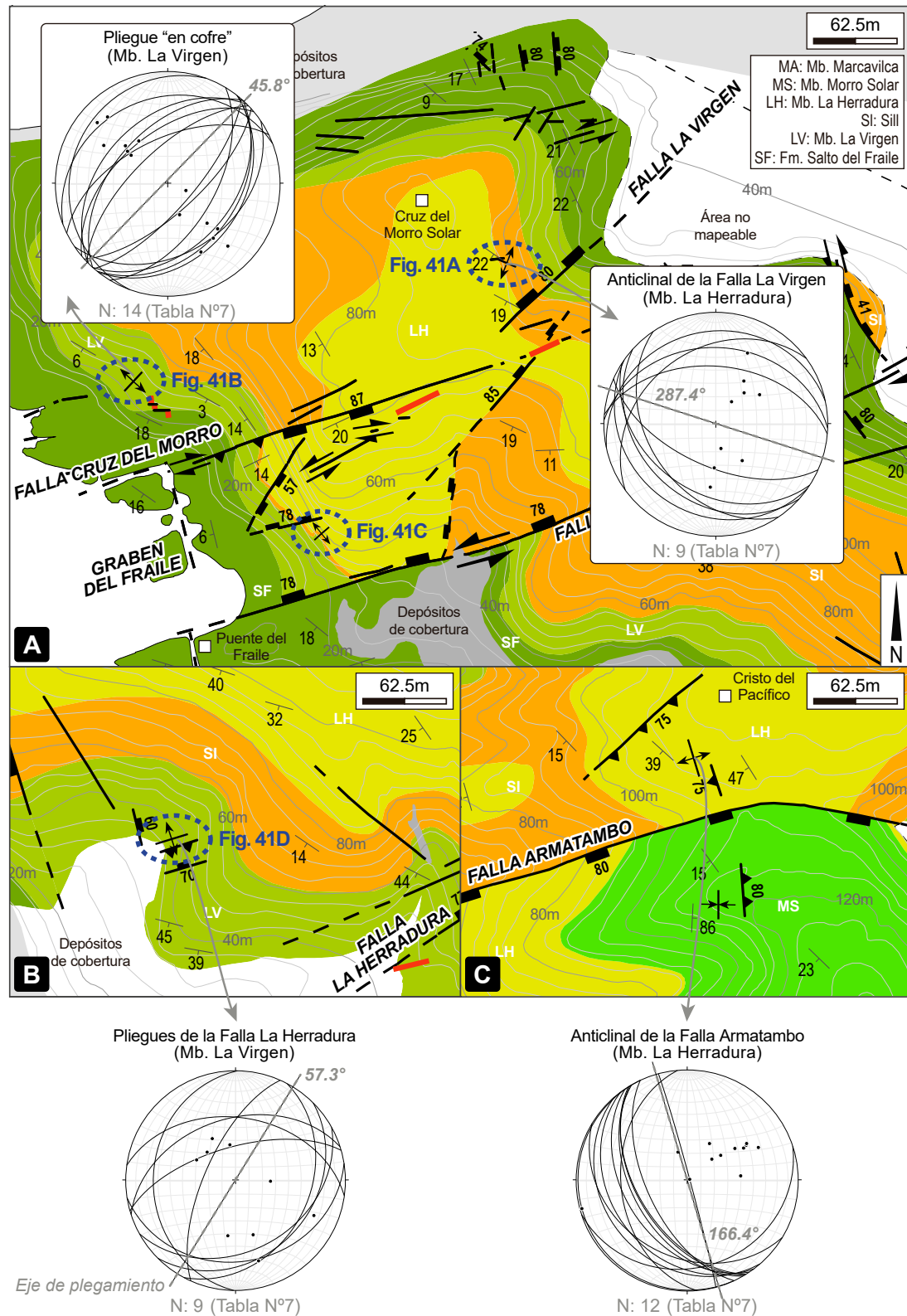


Figura 40. Pliegues y fallas inversas por compensación tectónica en el sector norte del Morro Solar. Las mediciones de los flancos de pliegues (N: 44) están descritas en la Tabla N°7. Las líneas rojas corresponden a diques.

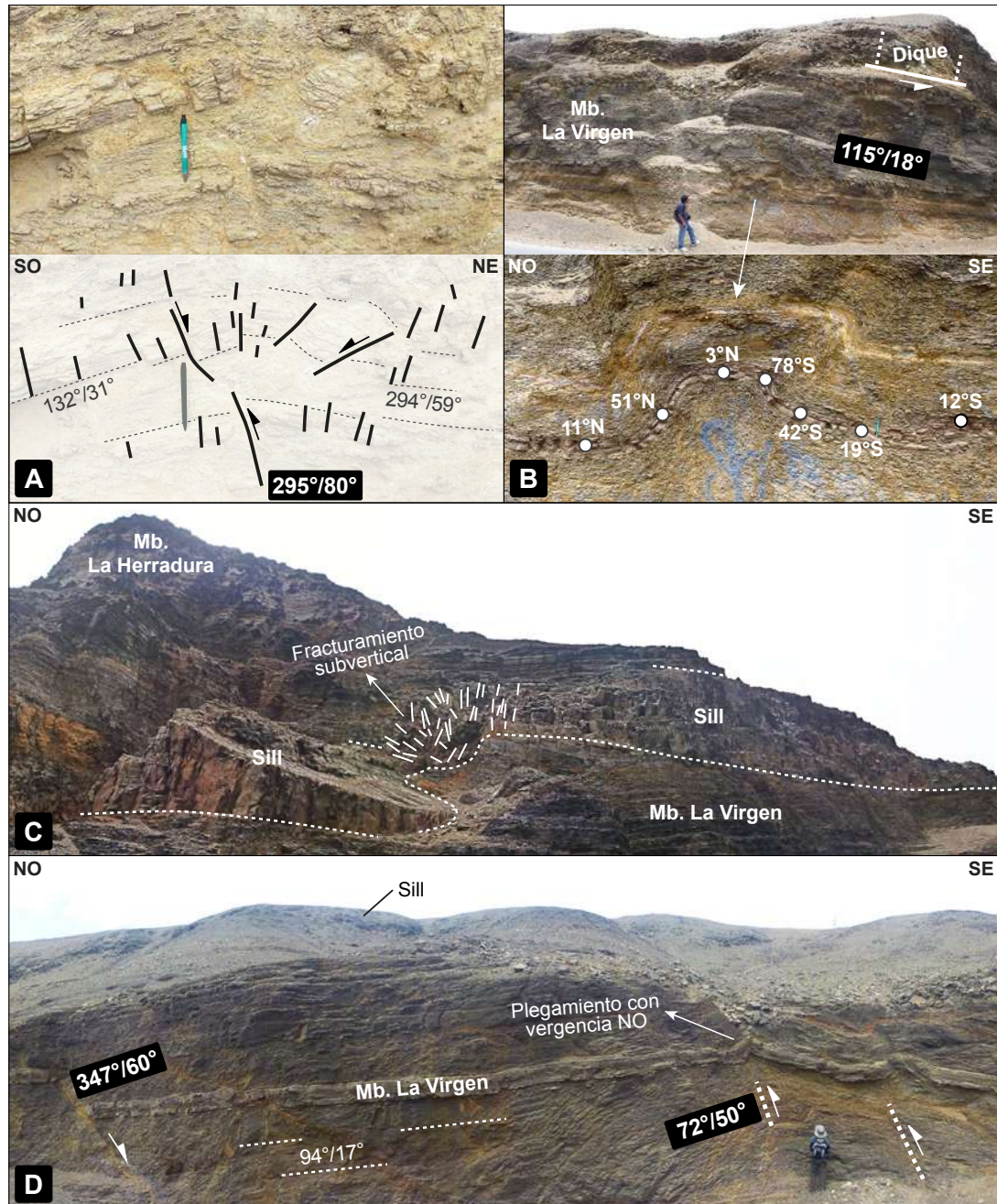
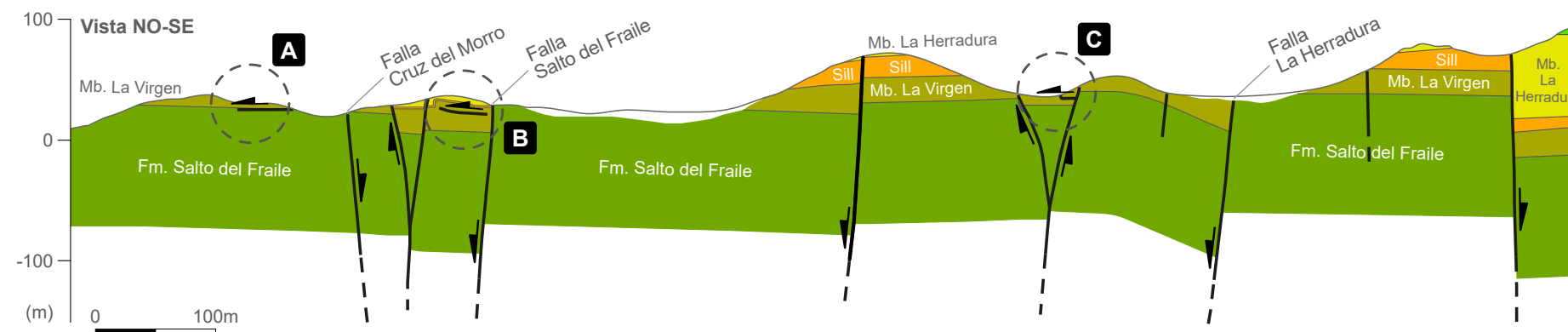
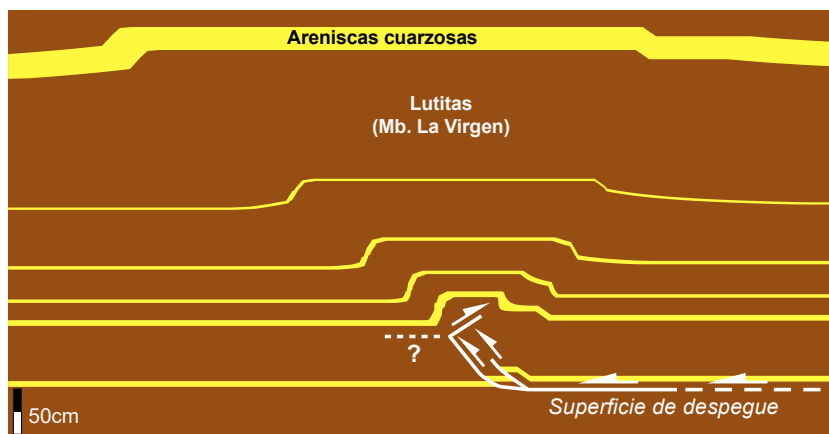


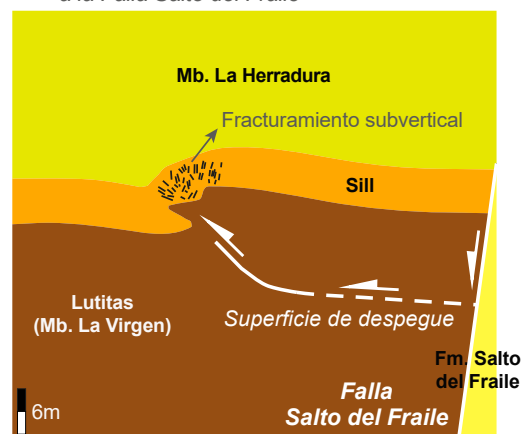
Figura 41. Vistas de campo del mapeo geológico de la Figura 40. A: Anticlinal pequeño en los alrededores de la Falla La Virgen, B: Pliegue “en cofre”, C: Monoclinal en sill que aflora cerca de la Falla Salto del Fraile y D: Alrededores de la Falla La Herradura.



A Pliegue "en cofre" en el Miembro La Virgen



B Anticlinal volcado en sill adyacente a la Falla Salto del Fraile



C Pliegues de la Falla La Herradura en el Miembro La Virgen

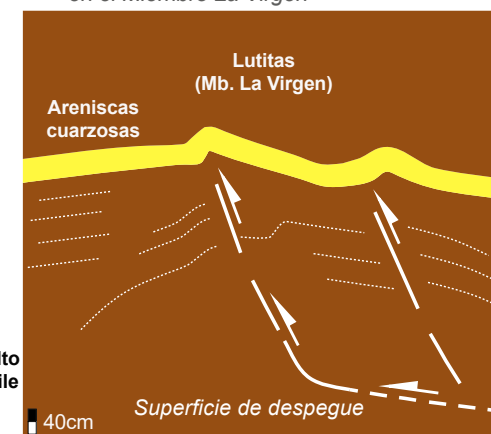


Figura 42. Vistas NO-SE de los pliegues y fallas inversas por compensación tectónica en el sector norte del Morro Solar. Estas estructuras están asociadas a fallas normales lítricas (NE-SO/O-E) y a las lutitas de la Formación La Herradura.

5.1.2.3.2. Fallas inversas por compresión

Son evidencias escasas en el Morro Solar. En el extremo suroeste de la Falla Cruz del Morro (cota 60 mns) el Miembro La Herradura y un sill están basculados mediante una cinemática normal-dextral; unos 30 m hacia abajo, la superficie de dicha falla muestra un desplazamiento inverso de <2 m (por inversión parcial) entre las formaciones Salto del Fraile y La Herradura (Figura 43A). Por otra parte, en el extremo noreste del Graben Del Fraile existe una falla inversa pequeña $154^{\circ}/70^{\circ}$ que tiene un desplazamiento de <3 m entre un sill y el Miembro La Herradura.

La estructura central de las Fallas Alto Perú tiene orientación $166^{\circ}/80^{\circ}$ y muestra indicios de reactivación tectónica, en la carretera que lleva al Monumento del Soldado Desconocido su superficie tiene cinemática normal entre la Formación Salto del Fraile y el Miembro La Virgen; sin embargo, 20 m hacia arriba exhibe un desplazamiento inverso donde el bloque techo (Miembro La Virgen) se posiciona topográficamente encima de un sill. Aquí, dicha estructura central NO-SE se dispone *en-echelon* respecto a fallas inversas y a un sinclinal apretado (en sill) donde no hay evidencias de compensación tectónica (Figuras 43B y 44A; Tabla N°7). Cerca de la Falla Delfín, aflora una falla normal $327^{\circ}/71^{\circ}$ que corta al Miembro Morro Solar, esta cinemática es notoria a partir del arrastre de los estratos aledaños; aunque sobre su superficie existen foliaciones propias de una cinemática inversa posterior (Figuras 43C y 44B).

Cerca de la Falla Armatambo aflora una falla inversa pequeña ($356^{\circ}/80^{\circ}$) junto con un sinclinal N-S dentro del Miembro Morro Solar (Figura 43D; Tabla N°7). Además, en el Cerro Marcavilca, el Miembro Marcavilca presenta una falla inversa $2^{\circ}/69^{\circ}$ junto con otra menor $30^{\circ}/64^{\circ}$ y un replegamiento intenso sin evidencias de compensación tectónica (Figura 44C).

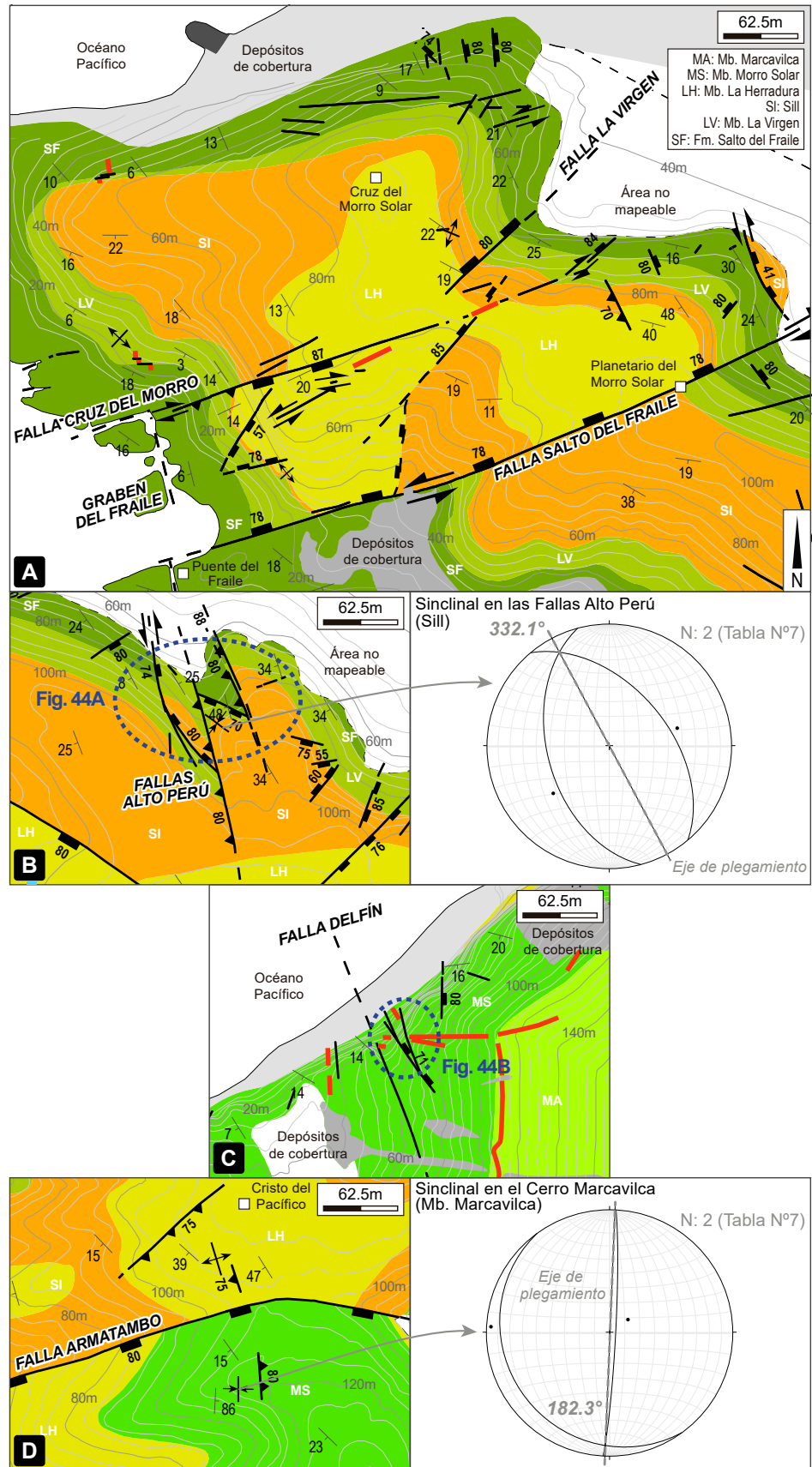


Figura 43. Fallas inversas por compresión en los sectores norte y sur del Morro Solar. Las mediciones de los flancos de los pliegues (N: 4) están descritas en la Tabla N°7. Las líneas rojas corresponden a diques.

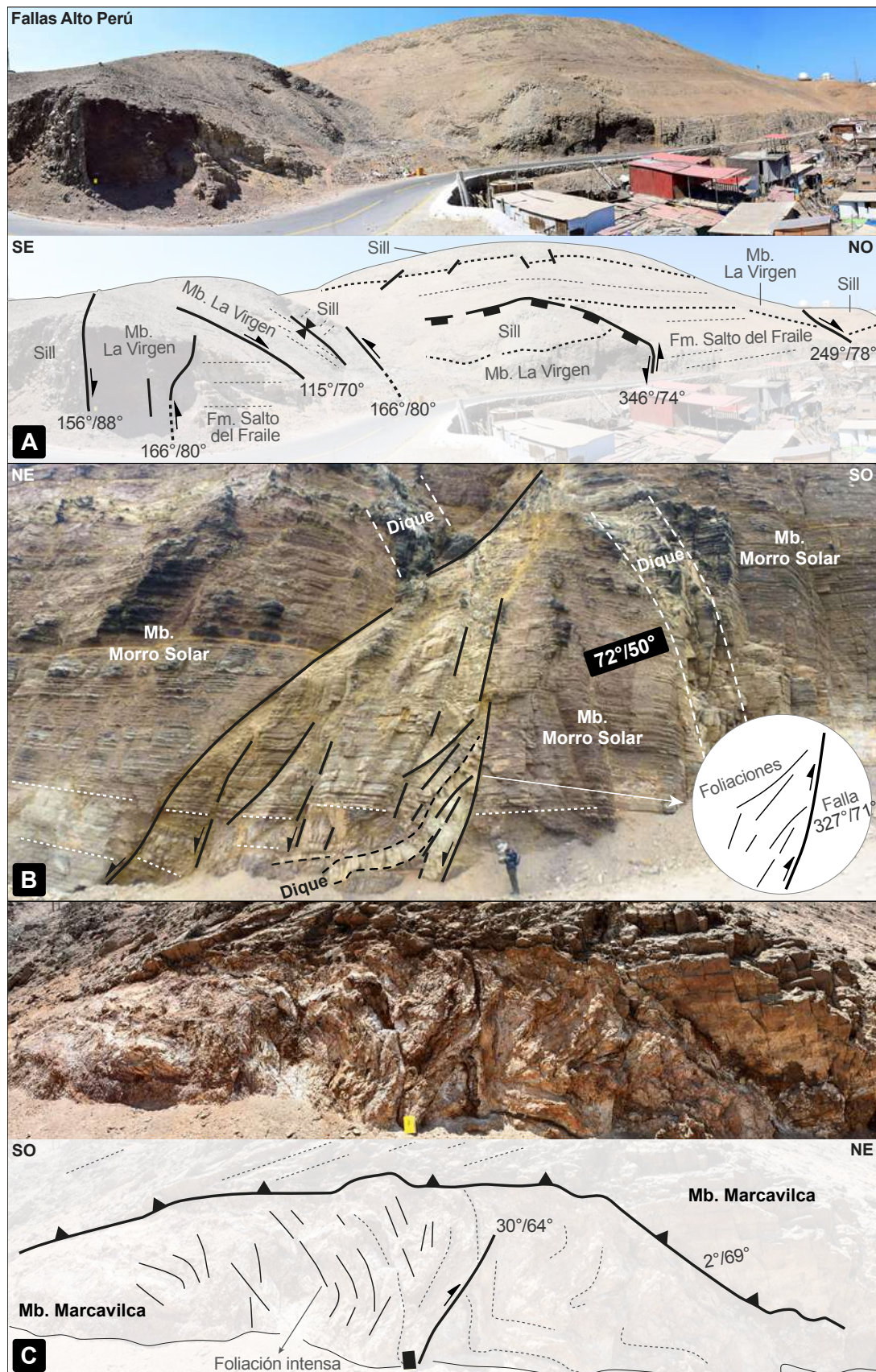


Figura 44. Vistas de campo del mapeo geológico observado en la Figura 43.

5.1.2.4. Estructuras de desgarre

Representan el 1% (N: 5) de 427 estructuras (ver Figura 25 y Anexo N°1), la estructura más importante es la falla sinistral El Paso $287^{\circ}/81^{\circ}$ que atraviesa a la Formación Marcavilca en el Paso de la Araña. Otras estructuras de relevancia son las fallas Salto del Fraile, La Herradura, Armatambo, Amanecer, El Morro, La Araña y La Chira que exhiben cinemáticas secundarias de desgarre con componente extensional.

5.1.2.5. Microestructuras tectónicas

Corresponden a estrías y marcas de arrastre tectónico localizadas sobre las estructuras principales previamente descritas. Se registraron en 15 estaciones microestructurales (desde TOT-01 a TOT-15, ver Anexo N°1) a partir de la medición de 100 *datums* de falla (Tablas N°8, N°9 y N°10). En las observaciones de campo se estableció que las microestructuras de las estaciones TOT (05-08-09-10-12-13-15) están vinculadas con el cizallamiento de las estructuras N-S/NO-SE y las microestructuras de las estaciones TOT (01-02-03-04-06-07-11-14) se relacionan con las estructuras NE-SO/O-E.

El ploteo de los cabeceos versus los buzamientos de las microestructuras en el diagrama de clasificación de fallas de Angelier (1994) permitió validar las cinemáticas en cada superficie cizallada (Figura 45). El 40% de los *datums* corresponden a cinemáticas exclusivamente de desgarre; el 51% a cinemáticas de deslizamiento oblicuo, y el 9% restante a cinemáticas de deslizamiento oblicuo, pero con una componente de extensión. Sumado a que estos *datums* representan las cinemáticas principales de las estructuras extensionales N-S/NO-SE y NE-SO/O-E, entonces los vectores espaciales de los desplazamientos tectónicos en el Morro Solar estuvieron dominados por una deformación transtensional.

45 *datums* compatibles de las estaciones TOT (05-08-09-12-13-15) definen una extensión NE-SO (59.8°) de *plunge* bajo (16.1°) y una zona de cizalla sinistral N-S/NO-SE (Figura 46A); 37 *datums* compatibles de las estaciones TOT (01-03-04-11-14) definen una compresión NE-SO (219.1°) de *plunge* bajo (19.6°) y una zona de cizalla sinistral NE-SO/O-E (Figura 46B), y 18 *datums* compatibles definen una compresión O-E (275.1°) de *plunge* tangencial (10.1°) y una zona de cizalla sinistral N-S/NO-SE (Figura 46C).

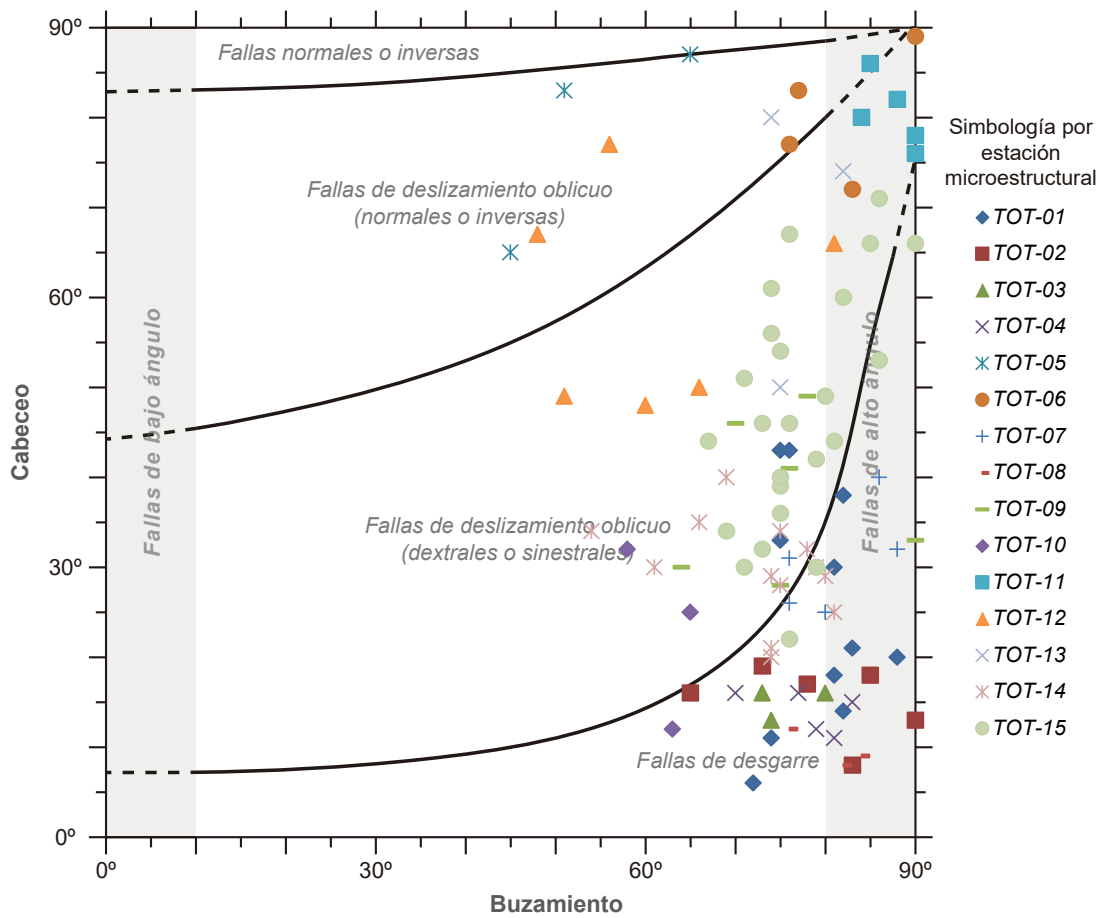


Figura 45. Cinemáticas de las microestructuras tectónicas del Morro Solar según la clasificación de fallas de Angelier (1994). Los *datums* de falla están descritos en las Tablas N°8, N°9 y N°10.

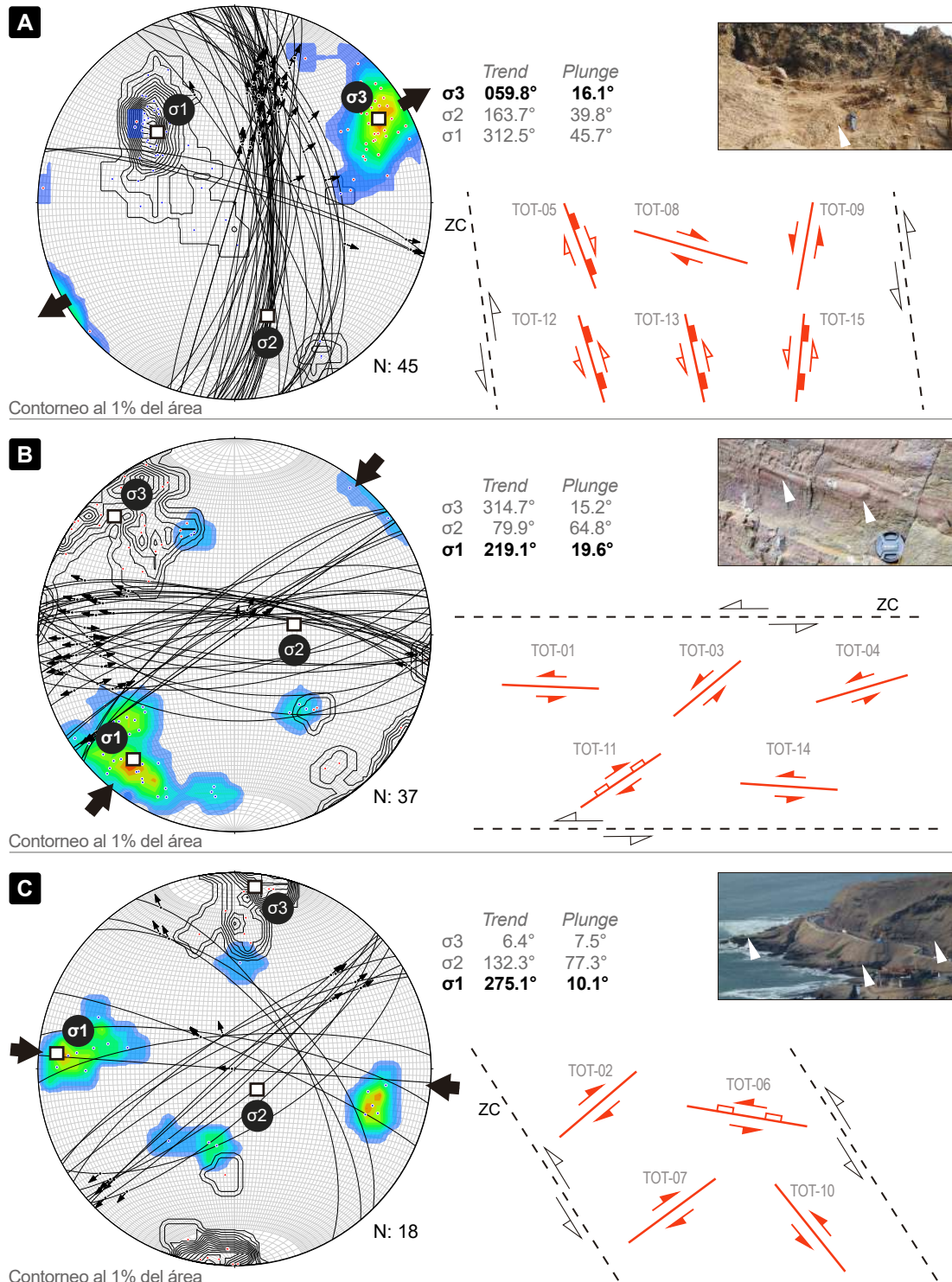


Figura 46. Estados de paleoesfuerzos asociados a las estructuras mesoscópicas y microestructuras tectónicas del Morro Solar (ver *datums* de falla en las Tablas N°8, N°9 y N°10). ZC: Zona de cizalla principal.

5.1.2.6. Arquitecturas tectónicas 2D y 3D

La arquitectura tectónica 2D del Morro Solar se evidencia en 19 secciones estructurales que fueron construidas según los siguientes criterios: (1) Se asumió hasta 100 y 400 m de espesor para las formaciones Salto del Fraile y Marcavilca debido a que ambas unidades no afloran completamente en la superficie de esta localidad (ver Figura 25, Anexo N°1). (2) En las interpretaciones se ha considerado la reducción de las potencias de los sill desde ~6 m en el sector norte y <2.5 m en el sector sur. (3) La profundidad de interpretación fue hasta los -500 mnsnm con el fin de estimar los desplazamientos tectónicos de las estructuras extensionales y compresionales cerca de la superficie.

11 secciones NE-SO (de azimuth 42.0°) (Figura 47; Anexo N°2) muestran geometrías reminiscentes a grábenes y *horsts*. En las primeras diez secciones se observa que los desplazamientos normales varían desde 3 a 70 m, con saltos y rechazos que no superan los 200 m, a excepción de la Falla La Chira donde la base de la Formación Marcavilca tiene un desplazamiento normal de ~180 m (sección N°11). Por otra parte, los desplazamientos inversos sin compensación tectónica en las fallas Alto Perú (sección N°3), La Araña (sección N°5), Amanecer (sección N°6), Del Paso (sección N°7) y Delfín (secciones N°8, N°9 y N°10) están calculadas entre los 2 y 50 m.

8 secciones NO-SE (de azimuth 132.6°) (Figura 48; Anexo N°3) presentan estructuras similares a las vistas en las secciones anteriores. En las primeras seis secciones los desplazamientos normales varían desde 3 a 90 m, a excepción de la Falla La Chira que tiene desplazamientos de ~160 m y ~92 m (secciones N°17 y N°18, respectivamente). Asimismo, las estructuras poseen saltos que no exceden los 200 m y sus rechazos son muy menores a 100 m. Uno de los bloques basculados más notorios se localiza directamente al frente del bloque techo de la Falla La Herradura (sección N°14) donde el tope de la Formación Salto del Fraile posee un desplazamiento normal de ~32m. Por otra parte, las estructuras en los alrededores de las fallas Alto Perú (sección N°12) y Amanecer (secciones N°15 y N°16) poseen desplazamientos inversos de 4-40 m.

Igualmente, el modelamiento estructural en Blender y Photoshop® indica que la arquitectura tectónica 3D del Morro Solar (Figuras 49 y 50) está dominada por desplazamientos normales e inversos que no superan los 200 m. Estos resultados confirman que las cinemáticas extensionales del Morro Solar fueron propias de una transtensión (ver Figura 45), y en menor medida estuvieron asociadas a transpresiones dentro de un modelo de cizalla simple.

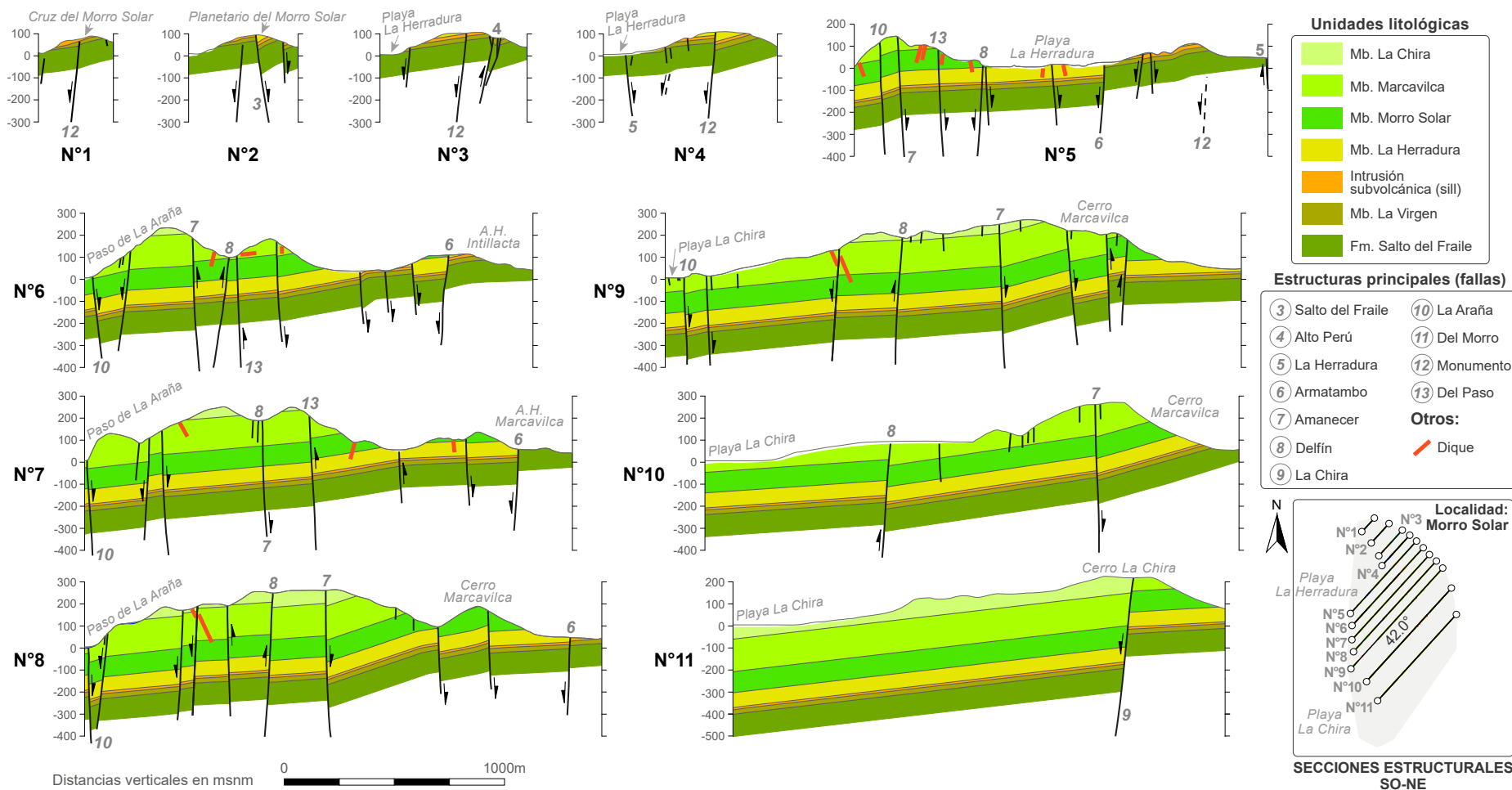


Figura 47. Secciones estructurales SO-NE de azimuth 42.0° en el Morro Solar (ver escala más amplia en el Anexo N°2). Sus longitudes en kilómetros son: N°1=0.34, N°2=0.49, N°3=0.66, N°4=0.79, N°5=1.88, N°6=2.03, N°7=2.22, N°8=2.35, N°9=2.62, N°10=2.40 y N°11=2.22.

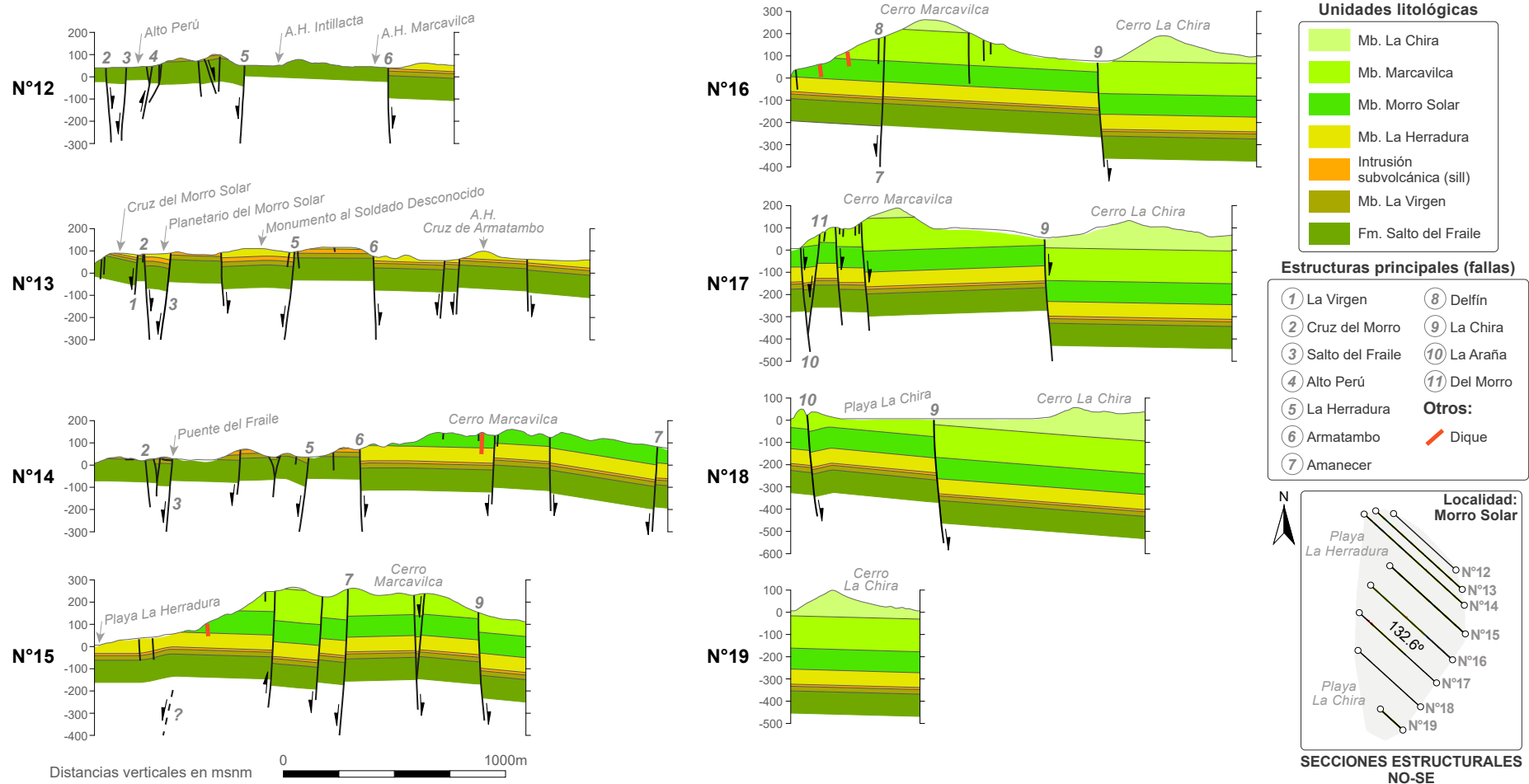


Figura 48. Secciones estructurales NO-SE de azimuth 132.6° en el Morro Solar (ver escala más amplia en el Anexo N°3). Sus longitudes en kilómetros son: N°12=1.62, N°13=2.21, N°14=2.56, N°15=1.94, N°16=2.09, N°17=1.98, N°18=1.59 y N°19=0.57.

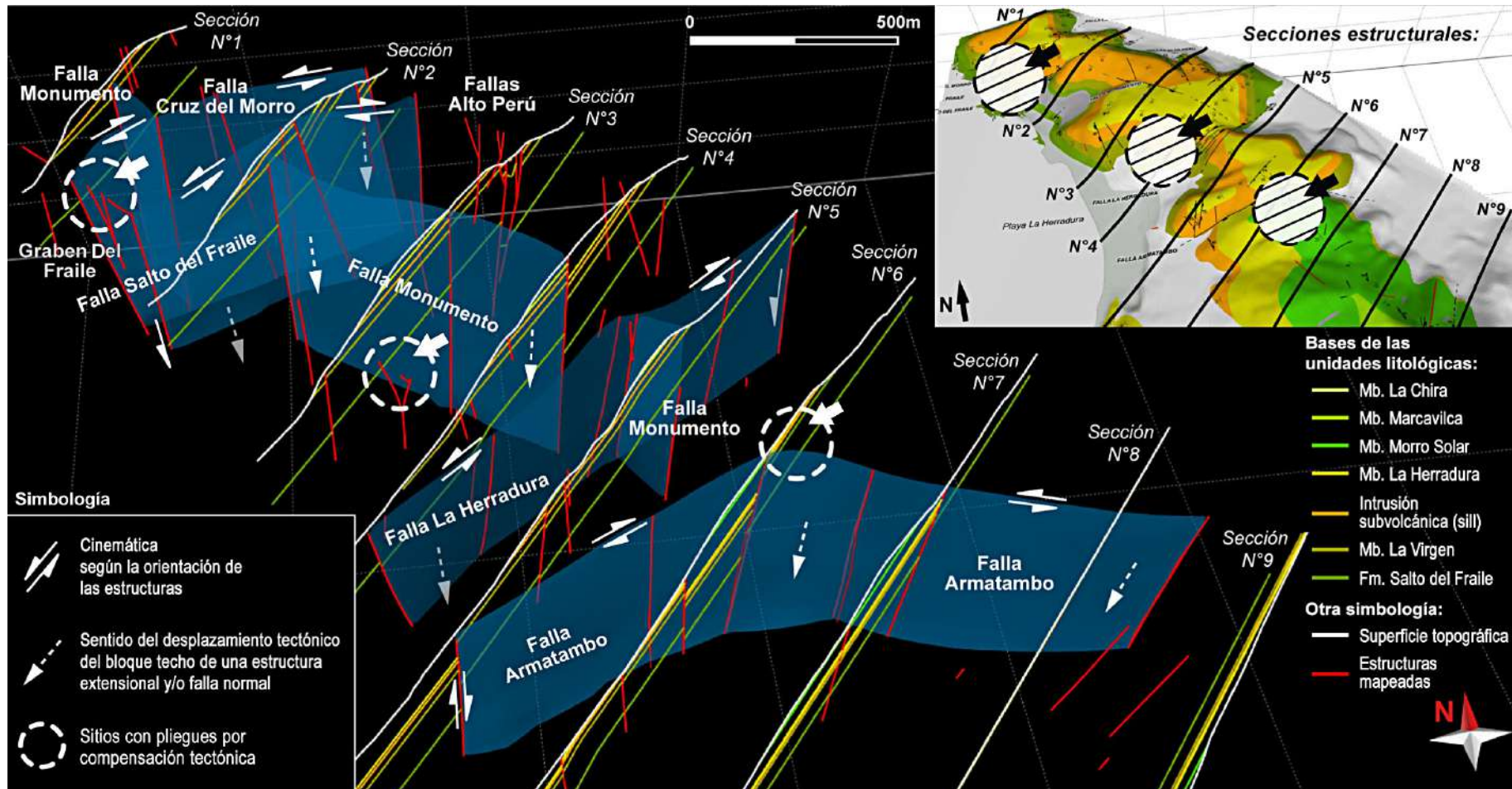


Figura 49. Modelo estructural 3D del sector norte del Morro Solar construido a partir de las secciones SO-NE (42.0°). Las geometrías de las estructuras principales y secundarias están dadas por planos azules y líneas rojas, respectivamente.

Las cinemáticas son principalmente de desgarre. El modelamiento estructural se realizó usando los softwares Blender y Photoshop®.

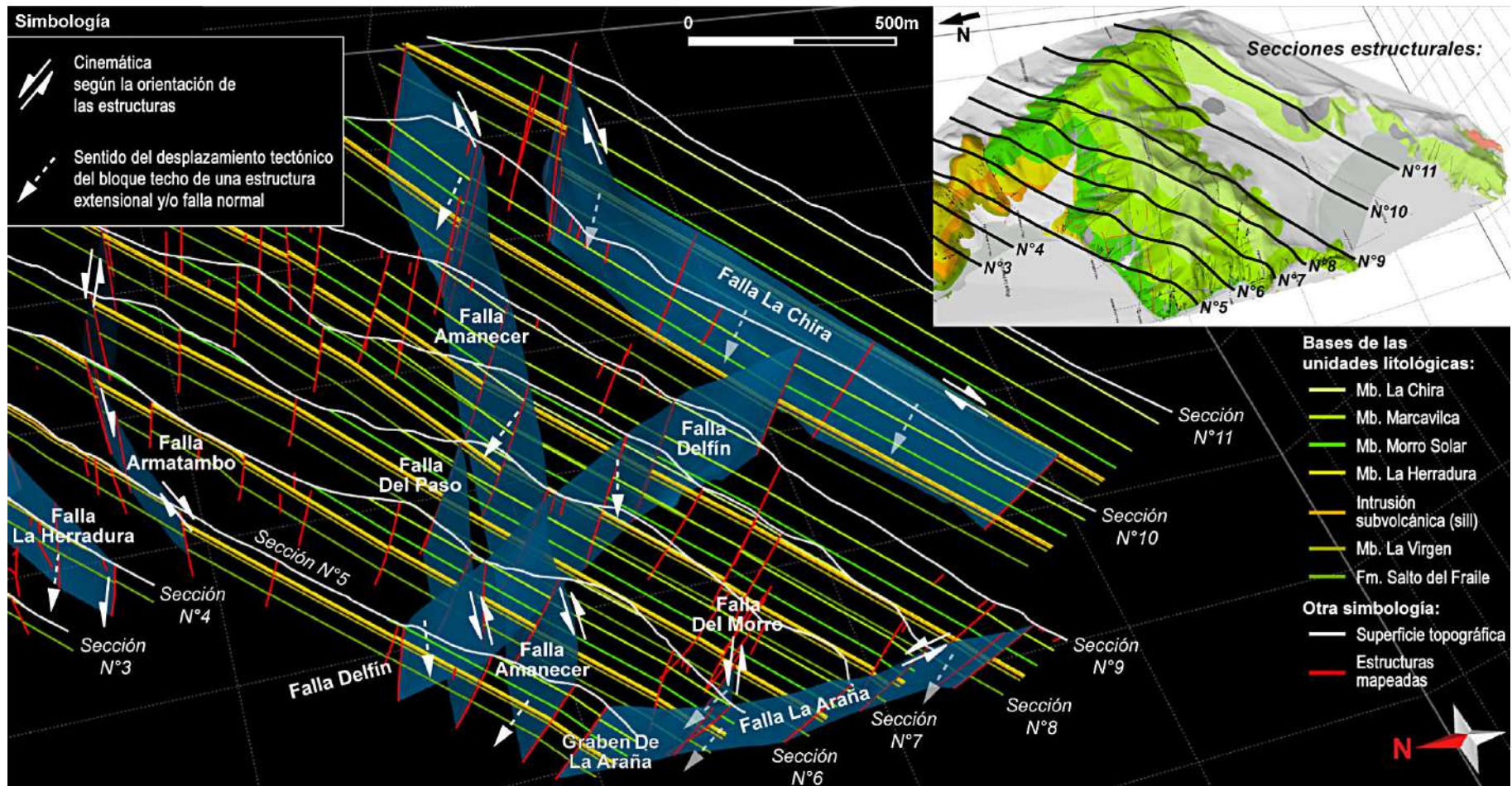


Figura 50. Modelo estructural 3D del sector sur del Morro Solar construido a partir de las secciones SO-NE (42.0°). Las geometrías de las estructuras principales y secundarias están dadas por planos azules y líneas rojas, respectivamente.

Las cinemáticas son principalmente de desgarre. El modelamiento estructural se realizó usando los softwares Blender y Photoshop®.

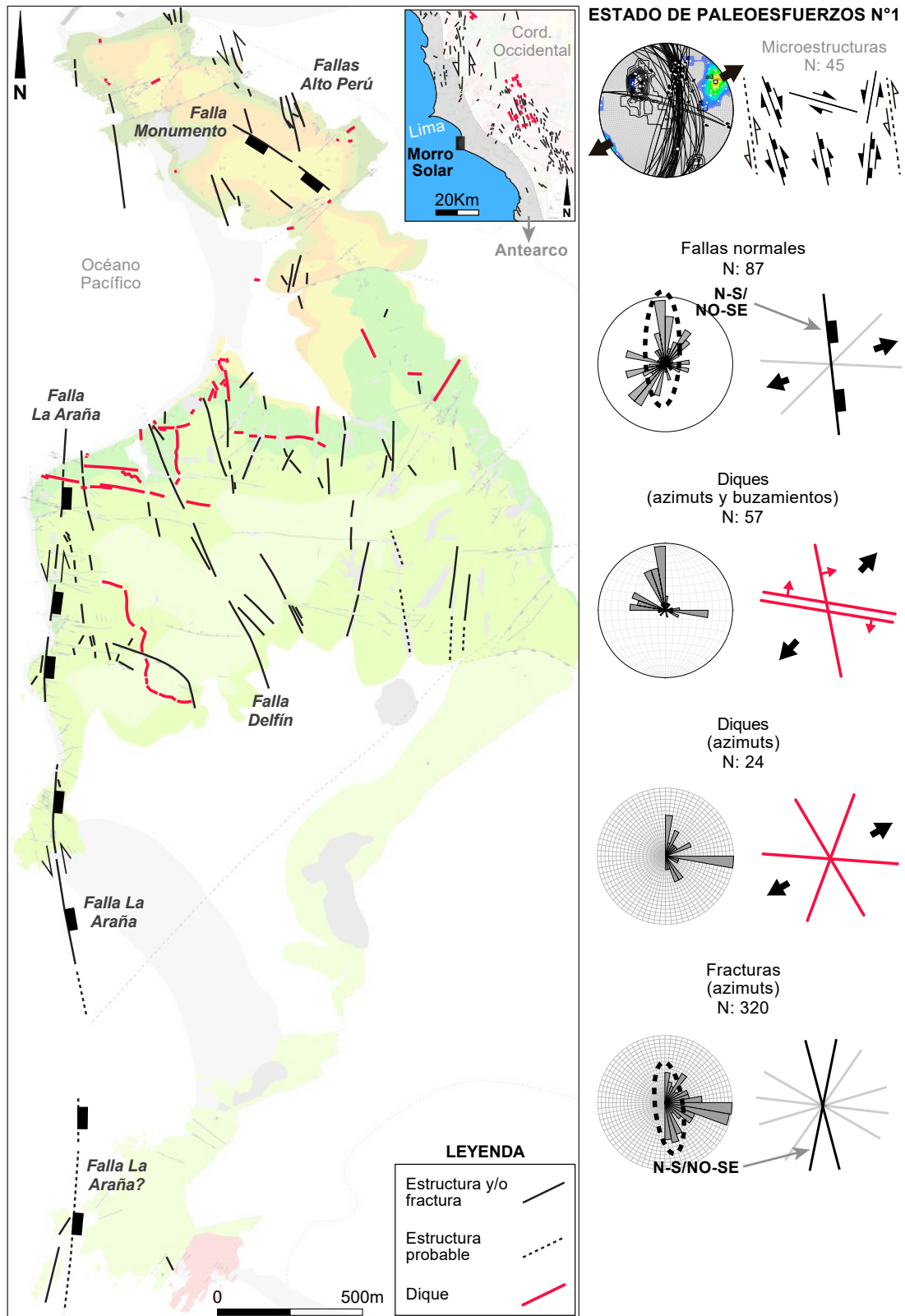
5.1.3. Evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar

A partir de los indicadores del mecanismo de deformación del Morro Solar, es posible establecer una evolución tectónica en orden relativo:

El estado de paleoesfuerzos N°1 (Figura 51) corresponde a una extensión NE-SO de *plunge* bajo ($<20^\circ$). Esta extensión fue perpendicular y ligeramente oblicua respecto a las estructuras N-S/NO-SE; dio lugar a la estratigrafía inclinada (hacia el suroeste) del Grupo Morro Solar por basculamiento, y fue responsable de la generación de fallas normales con componente sinistral (fallas Alto Perú, Monumento, La Araña y Delfín), diques y fracturas.

El estado de paleoesfuerzos N°2 (Figura 52) está involucrado con una compresión NE-SO de *plunge* bajo ($<20^\circ$). Esta compresión controló a las estructuras NE-SO/O-E, y ya que tales estructuras desplazan a las fallas normales, diques y fracturas N-S/NO-SE se considera a este estado como posterior al primero. El *trend* del σ_1 (219.1°) fue paralelo y oblicuo a los rumbos de las estructuras NE-SO/O-E, lo que produjo trantensiones representadas por cinemáticas oblicuas/de desgarre con componente extensional. En este estado se produjeron los basculamientos y geometrías lítricas cerca de las fallas Cruz del Morro, Salto Del Fraile, La Herradura y La Chira. Asimismo, la alineación NO-SE de las extensiones y compresiones locales por compensación tectónica sugiere que ambas deformaciones fueron contemporáneas.

El estado de paleoesfuerzos N°3 (Figura 53) está representado por una compresión O-E de *plunge* tangencial ($<15^\circ$). Su funcionamiento sobre las estructuras N-S/NO-SE y NE-SO/O-E indica que fue en parte contemporánea y posterior al estado de paleoesfuerzos N°2. El *trend* del σ_1 (275.1°) fue oblicuo respecto a las estructuras NE-SO/O-E, lo que hace que este estado sea más compatible con las cinemáticas oblicuas/de desgarre (por transtensión) de las fallas Armatambo, Del Paso y Amanecer; con las fallas inversas y ejes de pliegues menores N-S, e igualmente con la reactivación de las fallas Cruz del Morro y Alto Perú.



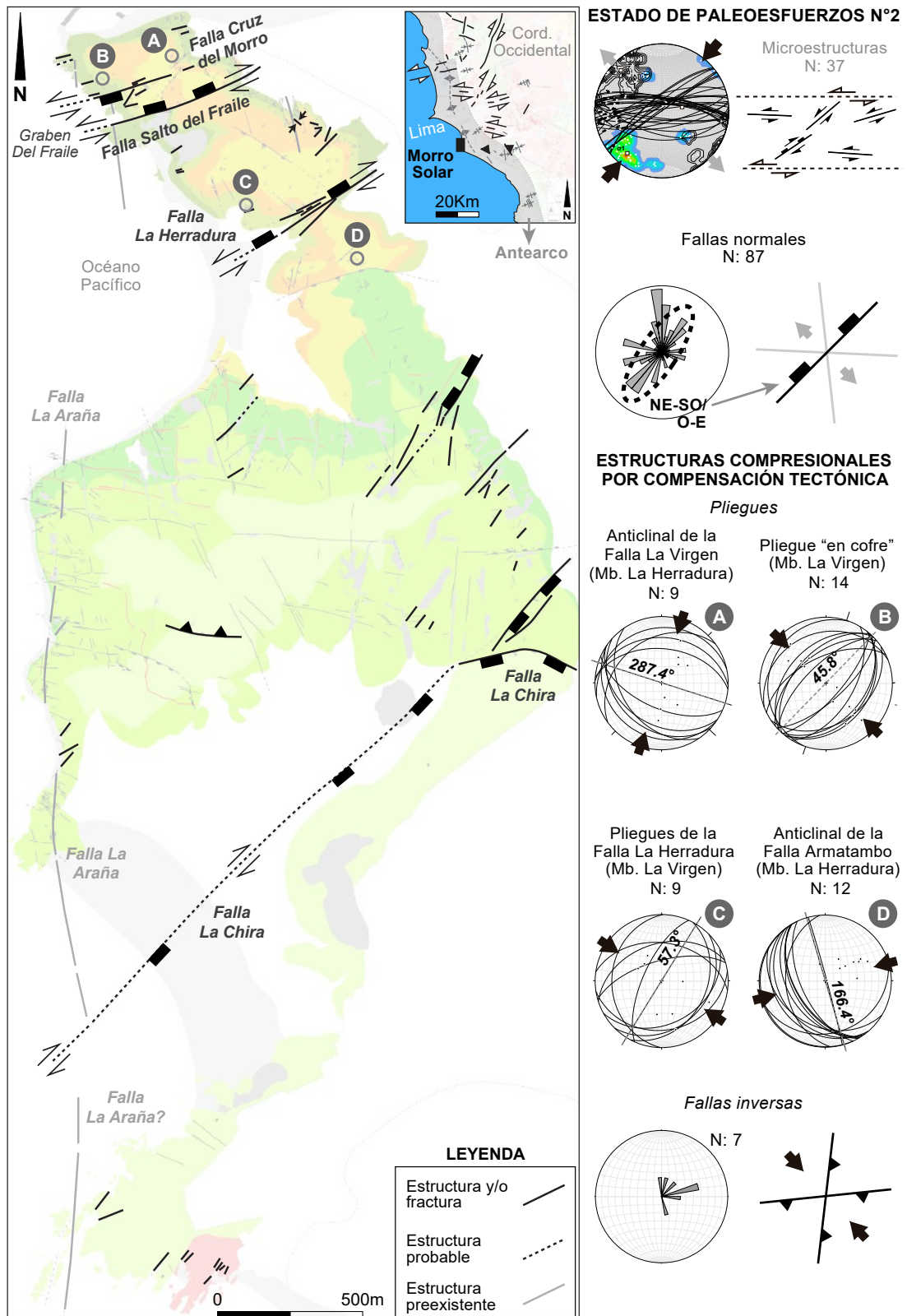


Figura 52. Estado de paleoesfuerzos N°2 en el Morro Solar. Está asociado a una compresión NE-SO que produjo fallas normales, pliegues y fallas inversas NE-SO/O-E (por compensación tectónica).

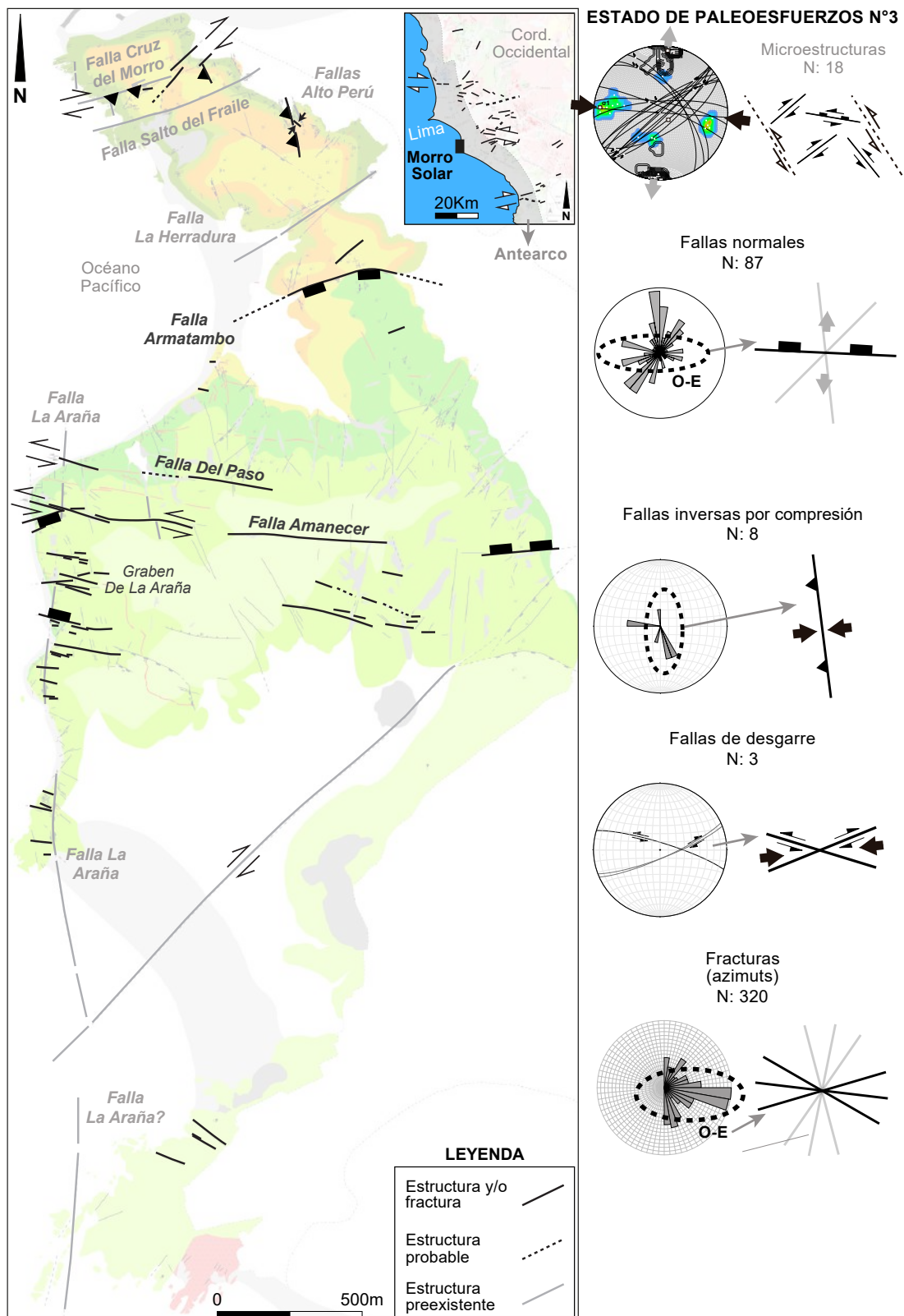


Figura 53. Estado de paleoesfuerzos N°3 en el Morro Solar. Está asociado a una compresión O-E que produjo fallas normales O-E, fallas inversas junto con pliegues menores N-S y fallas de desgarre NO-SE/NE-SO.

5.2. Discusión de resultados

Los estudios geológicos de la región Lima (Palacios et al., 1981; Palacios et al., 1992; León y De La Cruz, 2002; Aleman et al., 2006) no han esclarecido si la tectónica cenozoica del antearco peruano influyó en el mecanismo de deformación de las rocas del Cretácico Inferior en el Morro Solar. A diferencia de las interpretaciones que consideran que el antearco de la región Lima ha estado principalmente sometido a una extensión cortical cenozoica (Thornburg y Kulm, 1981; León y De La Cruz, 2002; Aleman et al., 2006; Sempere y Jacay, 2006; León et al., 2008; Viveen y Schlunegger, 2018), las estructuras extensionales poscretácicas del Morro Solar están más relacionadas a cinemáticas oblicuas/de desgarre con componente extensional dentro de un modelo de cizalla simple (ver Figuras 45, 46, 47, 48, 49 y 50). El análisis estructural de este trabajo permite conocer la evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar por comparación entre estados de paleoesfuerzos y las convergencias de placas en el margen occidental andino durante el Cenozoico.

La dinámica del estado de paleoesfuerzos N°1 (ver Figura 1) concuerda con las extensiones regionales NE-SO del Cretácico Temprano-Tardío que fueron propuestas por Cobbing (1973), Pitcher (1979), Bussell (1983), Vidal (1990), Romero et al. (2005) y Aleman et al. (2006) en la región Lima. Esta dinámica guarda relación con los enjambres de diques N-S/NO-SE de San Bartolo-Pucusana, e igualmente es compatible con la extensión cortical NE-SO y enfriamientos rápidos que Wipf (2006) y Noury et al. (2016) determinaron para el Batolito de la Costa en el Segmento Lima y sur del Perú durante el Cretácico Tardío (~105-60 Ma). En tal sentido, la extensión NE-SO postsedimentaria del Grupo Morro Solar puede correlacionarse con la distensión cortical que Soler (1991) y Jacay et al. (2015) atribuyeron a la cuenca marginal Casma, tiempo en el que, según Müller et al. (2016), la Placa Sudamericana se movía hacia el noroeste entre los 120 y 60 Ma.

La compresión NE-SO de primer orden inferida en el estado de paleoesfuerzos N°2 (ver Figura 52) se relaciona con las estructuras poscretácicas de la región Lima (ver Figura 23). Por ejemplo, es compatible con las fallas normales NE-SO/O-E de componente de desgarre, inversas NO-SE (Falla José Gálvez) y pliegues NO-SE (Anticlinal de Lima?, del Cerro Manzano-Lurín y otros). Asimismo, las extensiones locales NO-SE de dicho estado parecen asemejarse a las transtensiones de las cuencas cenozoicas de antearco de la costa norte, central y sur del Perú (Calderón, 2007; Witt et al., 2011; Decou et al., 2013; Alván

et al., 2014, 2017; Noury et al., 2016; Alvarado et al., 2016; Rustichelli et al., 2016; Genge et al., 2020). Tales extensiones NO-SE son compatibles con las transtensiones del Cretácico Tardío-Oligoceno que Genge et al. (2020) determinaron en la cuenca *offshore* Salaverry; y especialmente son coherentes con los resultados de Wipf (2006) para la región Lima, porque pudieron originarse por cinemáticas de desgarre asociadas a enfriamientos lentos de la corteza superior (60-25 Ma). A la escala de las placas tectónicas andinas, estas interpretaciones concuerdan con una convergencia de alta oblicuidad (~60-26 Ma; Müller et al., 2016; Fennell et al., 2018); exhumaciones lentas (Wipf, 2006), y un fuerte acoplamiento interplaca del Paleógeno (Reutter et al., 1996; Horton, 2018). Además, es probable que la compresión NE-SO del estado de paleoesfuerzos N°2 corresponda a las primeras fases de levantamiento de los Andes tal como Mégard (1984, 1987), Sébrier et al. (1988) y Carlotto et al. (2009) han sugerido para finales del Cretácico Tardío.

Las reactivaciones del estado de paleoesfuerzos N°3 (ver Figura 53) son compatibles con las cinemáticas de desgarre existentes en el Batolito de la Costa (Segmento Lima) y con las fallas de desgarre NE-SO posoligocénicas que Genge et al. (2020) determinó en los límites estructurales de la cuenca *offshore* Salaverry. Tienen similitud geométrica y cinemática con las estructuras de desgarre-extensionales que Calderón (2007), León et al. (2008), Rustichelli et al. (2016) y Alván et al. (2014, 2017) reportaron en la estratigrafía mio-pliocena de las cuencas Pisco, Camaná y Mollendo. Además, tal similitud también se aprecia en las fallas normales sinsedimentarias O-E que Noble et al. (2009) y Macharé (1987) reportaron en sedimentos miocenos y cuaternarios del Abanico Aluvial de Lima. De estas semejanzas, el cambio de una compresión NE-SO a O-E pudo haberse dado desde el Oligoceno Medio-Tardío. Tiempo en el que ocurrió el engrosamiento de la corteza a los ~30 Ma (Isacks, 1988; Garzione et al., 2008); ruptura de la placa Farallón a los ~26 Ma (Somoza y Ghidella, 2005; Kay et al., 2005), y posterior subducción de la Dorsal de Nazca a los ~11 Ma (Pilger, 1981; Hampel, 2002; Clift et al., 2003). No obstante, el número reducido (N: 18) y moderada calidad de las microestructuras de este trabajo hacen que la temporalidad del estado de paleoesfuerzos N°3 sea bastante especulativa en un intervalo amplio entre los ~26 Ma y la época reciente.

En este sentido, el modelo de extensión (transtensión) cenozoica por cizalla simple que se propone en el Morro Solar se reafirma por: (1) Las fallas principales del Morro Solar poseen saltos y rechazos de <200 m que no son propios de hundimientos tectónicos pronunciados (ver Figuras 47, 48, 49 y 50). (2) En el antearco de la región Lima no se han reportado evidencias de adelgazamiento cortical ni provincias basálticas durante el Cenozoico (ver Figuras 21 y 23); es decir, que las deformaciones extensionales no representan subsidencias kilométricas sobre el sustrato mesozoico (ver Figura 23), a excepción de los enfriamientos rápidos (Wipf, 2006; Noury et al., 2016) correspondientes al emplazamiento preorogénico del Batolito de la Costa. (3) El poco acortamiento cenozoico del antearco (Jacay et al., 2002b; Noury et al., 2016) no implica necesariamente ausencia de compresión, por ejemplo, en el antearco del sur del Perú existió una compresión de primer orden que controló extensiones locales mediante una subducción plana entre los 40 y 30 Ma (Reutter et al., 1996; Somoza, 1998; Decou et al., 2013; Horton, 2018). Así, se descarta una “extensión cortical” del antearco para explicar el mecanismo de deformación del Morro Solar durante el Cenozoico. De hecho, esta aseveración es factible en el contexto de las “subsidencias prolongadas” del antearco (Thornburg y Kulm, 1981; Sempere y Jacay, 2006; León et al., 2008; Viveen y Schlunegger, 2018), especialmente porque según Horton (2018), en los Andes las extensiones corticales y transtensiones se han alternado en tiempos distintos debido al grado del acoplamiento interplaca.

A pesar de la falta de información geocronológica, unidades litológicas poscretácicas y discordancias en el Morro Solar; la correlación temporal relativa entre las deformaciones mesoscópicas de este trabajo y las convergencias de placas muestra efectivamente la influencia de una tectónica cenozoica extensional por cizalla simple. Por lo tanto, la integración de las interpretaciones en el contexto regional del antearco peruano permite proponer tentativamente la evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar durante el Cenozoico (Figura 54), de modo que los estados de paleoesfuerzos N°1, N°2 y N°3 se produjeron en el Cretácico Temprano-Tardío, Cretácico Tardío-Paleógeno Tardío y Paleógeno Tardío-época reciente?, respectivamente. Cabe resaltar que los estados interpretados brindan los escenarios propicios para la partición estructural en términos de la Tectónica Andina (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza y Ghidella, 2005; Fennell et al., 2018) desde los ~60 Ma hasta posiblemente la época reciente.

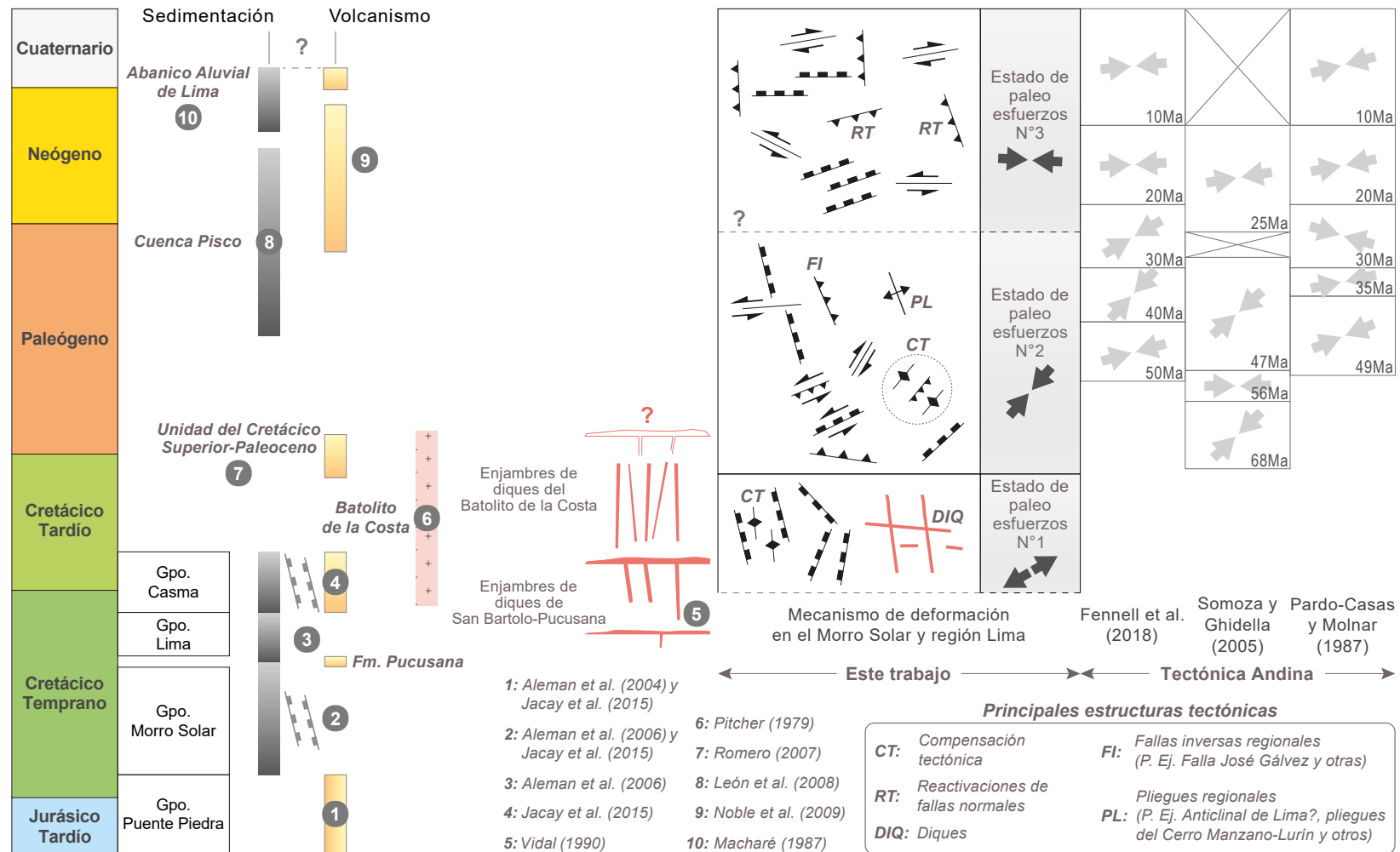


Figura 54. Evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar. Esta interpretación se propone tentativamente comparando los estados de paleoesfuerzos del Morro Solar y las convergencias de placas en el margen occidental andino durante el Cenozoico.

CONCLUSIONES

La información presentada e interpretada en este trabajo permite concluir que el mecanismo de deformación de las rocas del Morro Solar, en efecto, estuvo influenciado por la tectónica cenozoica del antearco peruano.

El Grupo Morro Solar (Valanginiano-Hauteriviano) en su localidad tipo está conformado por las formaciones Salto del Fraile, La Herradura y Marcavilca. A una escala de detalle 1/5,000, se ha evidenciado que unidades litológicas están principalmente afectadas por dos conjuntos estructurales bien diferenciados. El primer conjunto corresponde a fallas normales y diques N-S/NO-SE; y el segundo conjunto está dado por fallas NE-SO/O-E de cinemáticas oblicuas/de desgarre con componente extensional.

El análisis estructural muestra, de forma dinámica, que las estructuras mesoscópicas y microestructuras tectónicas del Morro Solar se produjeron inicialmente por extensiones NE-SO del Cretácico Temprano-Tardío (vinculadas con el primer conjunto estructural). Además, existieron transtensiones cenozoicas controladas por compresión NE-SO/O-E de primer orden (a escala del antearco peruano). Se propone que tal compresión es responsable de la formación del segundo conjunto estructural dentro de un modelo de cizalla simple activo desde el Cretácico Tardío-Paleógeno Tardío hasta posiblemente la época reciente.

La evolución tectónica del mecanismo de deformación del Morro Solar está dada por al menos dos eventos regionales: una extensión cortical preorogénica NE-SO que fue contemporánea con enjambres de diques y el magmatismo del Batolito de la Costa en el Segmento Lima (120-60 Ma). Posteriormente, existió una predominancia de compresión regional NE-SO/O-E asociada a extensiones locales NO-SE a lo largo de la zona de subducción andina; asimismo, dicha compresión es compatible con el desarrollo de las cuencas cenozoicas de antearco en la costa peruana (~60-26 Ma y <26 Ma?). De la metodología abordada, el análisis estructural dinámico en el Morro Solar y la geología del antearco de la región Lima reafirman la influencia de una extensión cenozoica por cizalla simple que hasta ahora no había sido considerada para el área de estudio. Tal modelo de cizalla es consistente con los estudios sobre el grado del acoplamiento interplaca y la partición cortical en los Andes. Por último, el modelo de deformación propuesto ayuda a entender la existencia de las estructuras de antearco (de desgarre-extensionales) de dirección transversal a la zona de subducción andina.

RECOMENDACIONES

La falta información geocronológica en la localidad del Morro Solar representa un incentivo para la realización de futuras integraciones en modelos tectónico-estructurales del antearco peruano. Se recomiendan los siguientes estudios de:

-Geocronología U/Pb y termocronología U-Th/He para establecer el *timing* del emplazamiento de los diques y sills respecto a las épocas de exhumaciones rápidas en la región Lima.

-Geocronología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, en los que se deberían emplear micas (de preferencia illitas autigénicas) que se puedan extraer del núcleo de las fallas NE-SO/O-E con el fin de precisar las edades de la deformación tectónica cenozoica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aleman, A., Benavides, V., León, W. (2006). Excursión geológica "Estratigrafía, sedimentología y evolución tectónica del área de Lima". Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico-Sociedad Geológica del Perú. Guía de campo N°11, 149p.
- Aleman, A., León, W. (2016). The early cretaceous subaqueous volcanism in the Pucusana Formation, central coastal ranges of Peru: a late neocomian slab window. XVIII Congreso Peruano de Geología, 5p.
- Aleman, A., León, W., Rosell, W., De La Cruz, O. (2004). Estratigrafía, ambiente depositacional e implicancia tectónica del Grupo Puente Piedra en el área de Lima. Resúmenes extendidos del XII Congreso Peruano de Geología, Sociedad Geológica del Perú, p: 397-400.
- Allmendinger, R.W. (1987). Técnicas Modernas de Análisis Estructural. Asociación Geológica Argentina. Serie B: Didáctica y Complementaria N°16, 90p.
- Allmendinger, R.W., Cardozo, N.C., Fisher, D. (2012). Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors: Cambridge, England, Cambridge University Press, 289p.
- Alván, A., Ciales, A., von Eynatten, H., Dunkl, I., Gerdes, A., Jacay, J. (2017). Seismic-stratigraphic architecture of the Oligocene-Pliocene Camaná Formation, southern Peruvian forearc (Province of Arequipa). Andean Geology 44 (1), p: 17-38.
- Alván, A., Decou, A., Mamani, M. (2012). Stratigraphic characterization of Arequipa Basin from sedimentary stacking pattern and ammonites biozones. Resúmenes Extendidos del XVI Congreso Peruano de Geología, Sociedad Geológica del Perú, 5p.
- Alván, A., von Eynatten, H., Dunkl, I., Gerdes, A., Jacay, J. (2014). Stratigraphic architecture and zircon U-Pb geochronology of the Cenozoic Camaná. Mollendo basin fill, southern Peruvian forearc (16°25'S to 17°15'S): Insights for basin evolution. VIII INGEPEP GEO-EX-AA-03-E.
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J.M., Jaillard, E., Mothes, P., Jarrín, P., Segovia, M., Rolandone, F., Cisneros, D. (2016). Partitioning of oblique convergence in the Northern Andes subduction zone: Migration history and the present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador. Tectonics, 35, p: 1048-1065.
- Anders, M.H., Wodzicki, K.M., Spiegelman, M. (2002). A critical evaluation of late Tertiary accelerated uplift rates for the Eastern Cordillera, Central Andes of Bolivia. Journal of Geology 110, p: 89-100.
- Anderson, E.M. (1951). The dynamics of faulting and dike formation with application to Britain. Oliver and Boyd, 2nd Edition, Edinburgh, 241p.
- Anderson, E.M. (1905). The dynamics of faulting. Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8, p: 387-402.
- Angelier, J. (1994). Fault Slip Analysis and Paleostress Reconstruction. In: Hancock, P.L., Ed., Continental Deformation, Pergamon Press, Oxford, p: 53-100.
- Angelier, J. (1984). Tectonic analysis of fault slip data sets. Journal of Geophysical Research 89 (B7), p: 5835-5848.
- Angelier, J., 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, p: 1309-1318.

- Ayala, L. (2012). Análisis sin y posdepósito de una secuencia estratigráfica silicoclástica, Pasamayo-Lima, Perú". Resumen extendido del XVI Congreso de Geología y SEG Conference, 5p.
- Ayala, L., Cuipa, E., Rossello, C., López, W., Llamoca, P., Gutiérrez, N., Mendoza, R. (2014). Cartografiado e interpretación estructural del sector norte del Morro Solar, Dpto. de Lima, Perú. XVII Congreso Peruano de Geología, 4p.
- Barazangi, M., Isacks, B.L. (1976). Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 4, p: 686-692.
- Benavides, V. (1956). Cretaceous system in northern Peru. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, v. 108, article 4, p: 352-494.
- Boit, B. (1959). La Gran Formación Porfírica Neocomiana; su edad y su extensión en la Costa Peruana. Museo de Historia Natural "Javier Prado" de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Publicaciones Serie C, Geología N°7, 16p.
- Bosc, E. (1963). Geología de la región comprendida entre la Quebrada Parcca (Chilca) y el valle de Mala. Tesis de Bachiller. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 84p.
- Bott, M.H.P. (1959). The mechanics of oblique slip faulting. *Geol. Mag.*, 96, p: 109-117.
- Bussell, M.A. (1983). Timing of tectonic and magmatic events in the Central Andes of Peru. *Jour. Geol. Soc. London*, 140(2), p: 279-286.
- Caldas, J. (1980). Mapa Geológico. Estudio de Seguridad Física de la Cuenca del Río Chillón, Departamento Lima. Sector Energía y Minas. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Dirección de Geotecnia. Lámina N° 1-2.
- Caldas, J., Palacios, O. (1998). Mapa de geológico del cuadrángulo de Lima (25i), escala 1/100,000. Versión digital. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Carta Geológica del Perú.
- Calderón, Y. (2007). Arquitectura Estructural y Estratigráfica de la Cuenca de Antearco Neógena de Pisco (Perú) sobre la subducción de la Dorsal de Nazca. Master 2 en Sciences de la Terre et de l'Univers, Memoria de Master II 2006-2007, 33p.
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., Mamani, M., Díaz, E., Navarro, P., Jaimes, F., Velarde, T. (2009). Dominios Geotectónicos y Metalogénesis del Perú, Sociedad Geológica del Perú, Boletín 103, p: 1-89.
- Casas Sainz, A.M., Gil Peña, I., Simón Gómez, J.L. (1990). Los métodos de análisis de paleoesfuerzos a partir de poblaciones de fallas: Sistemática y técnicas de aplicación. *Estudios geol.*, 46, p: 385-398.
- Cawood, P.A. (2005). Terra Australis orogen: Rodinia breakup and development of the Pacific and Iapetus margins of Gondwana during the Neoproterozoic and Paleozoic: *Earth-Science Reviews*, v. 69, p: 249-279.
- Chacaltana, B., Romero, D., Hovikoski, J., Salcedo, J., Núñez del Prado, H. (2006). Icnofacies en la base de la Formación Marcavilca: asociaciones icnolíticas y análisis paleoambiental. Resúmenes extendidos del XIII Congreso Peruano de Geología, Sociedad Geológica del Perú, p: 603-606.

- Chew, D., Pedemonte, G., Corbett, E. (2016). Proto-Andean evolution of the Eastern Cordillera of Peru. *Gondwana Research* 35, p: 59-78.
- Childs, C., Holdsworth, R.E., Jackson, C.A.L., Manzocchi, T., Walsh, J., Yielding, G. (2017). Introduction to the geometry and growth of normal faults. Geological Society, London, Special Publications, 439p.
- Clift, P. D., Pecher, I., Kukowski, N., Hampel, A. (2003). Tectonic erosion of the Peruvian forearc, Lima Basin, by subduction and Nazca Ridge collision. *Tectonics*, 22, 1023-1042.
- Cobbing, J. (1973). Geología de los cuadrángulos de Barranca, Ambar, Oyón, Huacho, Huaral y Canta. Servicio de Geología y Minería del Perú. Boletín N°26, 164p.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L., Fan, J.-X. (2013). The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes* 36, p: 199-204.
- Coira, B., Davidson, J., Mpodozis, C., Ramos, V. (1982). Tectonic and Magmatic Evolution of the Andes of Northern Argentina and Chile. *EarthScience Reviews* 18, p: 303-332.
- Cunningham, W.D., Mann, P. (2007). Tectonics of strike-slip restraining and releasing bends. Geological Society, London, Special Publications, 290, p: 1-12.
- Daly, M. (1989). Correlations between Nazca/Farallón plate kinematics and forearc evolution in Ecuador. *Tectonics*, v. 8, p: 769-790.
- Decou, A., von Eynatten, H., Dunkl, I., Frei, D., Wörner, G. (2013). Late Eocene to Early Miocene Andean uplift inferred from detrital zircon fission track and U-Pb dating of Cenozoic forearc sediments (15-18°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 45, p: 6-23.
- Delogkos, E., Childs, C., Manzocchi, T., Walsh, J. (2017). The role of bed-parallel slip in the development of complex normal fault zones. *Journal of Structural Geology* 97, p: 199-211.
- Doblas, M. (1998). Slickenside kinematic indicators. *Tectonophysics* 295, p: 187-197.
- Elger, K., Oncken, O., Glodny, J. (2005). Plateau-style accumulation of deformation: Southern Altiplano. *Tectonics*, 24 (TC4020), p: 1-19.
- Erslev, E. A. (1991). Trishear fault-propagation folding. *Geology* 19, p: 617-620.
- Fennell, L.M., Quinteros, J., Iannelli, S.B., Litvak, V.D., Folguera, A. (2018). The role of the slab pull force in the late Oligocene to early Miocene extension in the Southern Central Andes (27°-46°S): Insights from numerical modeling. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 87, p: 174-187.
- Fernández, J. (1958). Geología del Morro Solar. Sociedad Geológica del Perú, Boletín 33, p: 3-50.
- Fernández, J. (1948). Geología del Morro Solar. Monografía del Ministerio de Fomento y Obras Públicas. República del Perú, 78p.
- Fernández, J., Bellido, J., Castro, L. (1958). Levantamiento geológico de las hojas de Barranco y Villa (6i y 6j), escala 1/20,000. Ministerio de Fomento. Dirección de Minas y Petróleo. Instituto Geológico del Perú.

- Figuerola, A. (1988). Mapa geológico del Departamento de Lima, escala 1/250,000. Dirección de Geología Regional. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET).
- Fossen, H., Tikoff, B. (1998). Extended models of transpression and transtension, and application to tectonic settings. In: Holdsworth, R. E., Strachan, R. A., Dewey, J. E (eds.) 1998. Continental Transpressional and Transtensional Tectonics. Geological Society, London, Special Publications, 135, p: 15-33.
- Garzione C. N., Hoke G. D., Libarkin J. C., Withers S., MacFadden B., Eiler J., Ghosh P., Mulch, A. (2008). Rise of the Andes. *Science*, 320(5881), p: 1304-1307.
- Genge, M. C., Witt, C., Chanier, F., Reynaud, J.-Y., Calderón, Y. (2020). Outer forearc high control in an erosional subduction regime: The case of the central Peruvian forearc (6-10°S). *Tectonophysics*, Volume 789, 43p.
- Geyer, O., Alleman, V. (1984). Sobre algunos icnofósiles de las formaciones fosilíferas del Morro Solar de Lima. *Sociedad Geológica del Perú, Volumen Jubilar Centenario del Dr. George Petersen*, Lima. Fasc. 3, 11p.
- Guevara, C. (1980). El Grupo Casma del Perú Central entre Trujillo y Mala. *Sociedad Geológica del Perú, Boletín* 67, p: 73-83.
- Hampel, A. (2002). The migration history of the Nazca Ridge along the Peruvian active margin: a re-evaluation. *Earth and Planetary Science Letters* 6378, p: 1-15.
- Hess, H.H. (1962). History of ocean basins, in Engel, A.E.J., James, H.L., and Leonard, B.F., eds., *Petrologic Studies: A Volume in Honor of A.F. Buddington*: Geological Society of America, p: 599-620.
- Hippolyte, J-C., Bergerat, F., Gordon, M.B., Bellier, O., Espurt, N. (2012). Keys and pitfalls in mesoscale fault analysis and paleostress reconstructions, the use of Angelier's methods. *Tectonophysics*, v. 581, p: 144-162.
- Holohan, E., van Wyk de Vries, B., Troll, V. (2008). Analogue models of caldera collapse in strike-slip tectonic regimes. *Research Article. Bull. Volcanol.* 70, p: 773-796.
- Horton, B.K. (2018). Tectonic regimes of the central and southern Andes: Responses to variations in plate coupling during subduction. *Tectonics*, 37, p: 402-429.
- Isacks, B. (1988). Uplift of the central Andean Plateau and bending of the Bolivian Orocline. *Journal of Geophysical Research*, 93(B4), p: 3211-3231.
- Isacks, B., Oliver, J., Sykes, L. (1968). Seismology and the new global tectonics. *Journal of Geophysical Research*, Volume 73, Issue 18, p: 5855-5899.
- Jacay, J., Apaza, P., Bedia, C., Calizaya, L., López, W., Mamani, Y., Romero, M., Rossello, C., Sánchez, J. (2015). Desarrollo de secuencias volcánicas y de plataforma del Mesozoico de la paleomargen andina del Perú Central. XIV Congreso Geológico Chileno, ST 4 Estratigrafía, Análisis de Cuencas y Procesos Sedimentarios, p: 711-713.
- Jacay, J., Castillo, J. Reátegui, T., Pari, H. (2002a). Características sedimentológicas del Albiano (Grupo Casma)-Valle del Río Chillón. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. *Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*. Vol. 5, Núm. 9, p: 43-46.

- Jacay, J., Sempere, T., Husson, L., Pino, A. (2002b). Structural characteristics of the Incapuquio fault system, southern Peru in Andean Geodynamics: Extended Abstracts, 5th International Symposium on Andean Geodynamics, IRD eds., Toulouse, p: 319-321.
- Jackson, C.A.L., Gawthorpe, R.L., Sharp, I.R. (2006). Style and sequence of deformation during extensional fault-propagation folding: examples from the Hammam Faraun and El-Qaa fault blocks, Suez Rift, Egypt. *Journal of Structural Geology* 28, Issue 3, p: 519-535.
- Kay, S. M., Godoy, E., Kurtz, A. (2005). Episodic arc migration, crustal thickening, subduction erosion, and magmatism in the south-central Andes. *Geological Society of America Bulletin*, 117(1), 67p.
- Le Pichon X., Francheteau J., Bonnin J. (1973). *Plate Tectonics. Developments in Geotectonics*, 6, Elsevier, 300p.
- León, W., De La Cruz, O. (2002). Actualización del mapa geológico del cuadrángulo de Lima (25i1), escala 1/50,000. Versión digital. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Carta Geológica del Perú.
- León, W., Rosell, W., Aleman, A., Torres, V., 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.
- Lisson, C. (1907). Contribución a la Geología de Lima y sus alrededores. Librería e Imprenta Gil. Lima-Perú, 123p.
- Lisson, C. (1904). Los Tigillites del Salto del Fraile y algunas Sonneratia del Morro Solar. *Cuerpo de Ingenieros de Minas del Perú*, n. 17, p: 1-64.
- Macharé, J. (1987). La marge continentale du Pérou: régimes tectoniques et sédimentaires cénozoïques de l'avantarc des Andes Centrales. Thèse Docteur, Université de Paris XI, Orsay, 391p.
- Mamani, M., Wörner, G., Sempere, T. (2010). Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Bulletin of the Geological Society of America*, 122(1-2), p: 162-182.
- Margirier, A., Audin, L., Robert, X., Pêcher, A., Schwartz, S. (2017). Stress field evolution above the Peruvian flat-slab (Cordillera Blanca, northern Peru). *Journal of South American Earth Sciences*, 77, p: 58-69.
- Marrett, R. A., Allmendinger, R. W. (1990). Kinematic analysis of fault-slip data: *Journal of Structural Geology*, v. 12, p: 973-986.
- Marrett, R., Peacock, D.C.P. (1999). Strain and stress. *Journal of Structural Geology* 21, p: 1057-1063.
- Martínez, M. (1959). Estudio Geológico Preliminar de la Zona de Santa Rosa de Quives (Provincia de Canta). Tesis. Ing. Geol. UNMSM, 52p.
- McClay, K.R. (2000). Tectonic Regimes and Fault Systems: Structural Geology for Petroleum Exploration. Short Course. Volume I, Lecture Notes. Royal Holloway, University of London. 503p.

- McClay, K.R., Bonora, M. (2001). Analog models of restraining stepover in strike-slip fault systems. *AAPG Bulletin*, v. 85, no. 2, p: 233-260.
- Mégard, F. (1987). Structure and evolution of the Peruvian Andes. In: Schaer, J.P., Rodgers, J. (Eds.), *The Anatomy of Mountain Ranges*. Princeton University Press, p: 179-210.
- Mégard F. (1984). The Andean orogenic period and its major structures in central and northern Peru. *J Geol Soc Lond* 141, p: 893-900.
- Meza-Vélez, I., O’Gorman, J.P. (2019). First Plesiosaurian record (Diapsida; Sauropterygia) from the La Herradura formation, (Valanginian-Hauterivian), Morro Solar, Peru. *Cretaceous Research* 106, 5p.
- Moores, E.M., Yikilmaz, M.B., Kellogg, L. (2013). Tectonics: 50 years after the Revolution, in Bickford, M.E., ed., *The Web of Geological Sciences: Advances, Impacts, and Interactions: Geological Society of America Special Paper* 500, p: 321-369.
- Moulin, N. (1988). Facies y ambiente sedimentarios de la Formación Salto del Fraile (Cretáceo Inferior de Lima Perú). *Sociedad Geológica del Perú, Boletín* 78, p: 165-170.
- Müller, R.D., Seton, M., Zahirovic, S., Williams, S.E., Matthews, K.J., Wright, N.M., Shephard, G.E., Maloney, K.T., Barnett-Moore, N., Hosseinpour, M., Bower, D.J., Cannon, J. (2016). Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since Pangea breakup. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44, p: 107-138.
- Myers, J.S. (1974). Cretaceous stratigraphy and structure, Western Andes of Peru between latitudes 10°-10°30'. *AAPG Bulletin*, p: 474-487.
- Noble, D., Wise, J., Zanetti, K., Vidal, C., McKee, E. (2009). Edad Miocena Tardía para los conglomerados y gravas del “cuaternario” en las planicies costaneras del Perú central y otras evidencias concernientes a la evolución Neógena en la vertiente occidental de los Andes Peruanos. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú. Volumen Especial* 7, 90p.
- Noury, M., Bernet, M., Schildgen, T.F., Simon-Labric, T., Philippon, M., Sempere, T. (2016). Crustal-scale block tilting during Andean trench-parallel extension: Structural and geo-thermochronological insights. *Tectonics*, 35, p: 2052-2069.
- Núñez del Prado, H., Chávez, A. (1989). Análisis sedimentológico y evolución vertical de facies de la serie Cretácea en el Morro Solar (OSO, Lima-Perú). *Sociedad Geológica del Perú, Boletín* 80, p: 77-105.
- Oncken O., Hindle D., Kley J., Elger K., Victor P., Schemmann K. (2006). Deformation of the Central Andean Upper Plate System-Facts, Fiction, and Constraints for Plateau Models. In: Oncken O. et al. (eds) *The Andes. Frontiers in Earth Sciences*, p: 3-27.
- Palacios, O. (1992). Mapa geológico del cuadrángulo de Lurín, hoja 25j, escala 1/100,000. Dirección de Geología Regional, Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET).
- Palacios, O., Caldas, J., Montoya, M., Lajo, A., Díaz, G. (1981). Estudio geológico tectónico del área de Lima. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú. Convenio INGENMET-CNDC, Dirección de Geología Regional, 71p.

- Palacios, O., Caldas, J., Vela, Ch. (1992). Geología de los cuadrángulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Boletín N°43, p: 1-62.
- Pardo, A. (1961). Geología del área de las Lomas de Manzano del Valle de Lurín, Depto. de Lima. Thèse Bach. Geol., Univ. Sn. Marcos, Lima, 47p.
- Pardo-Casas, F., Molnar, P. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American Plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, Volume 6, Issue 3, p: 233-248.
- Peacock, D.C.P., Knipe, R.J., Sanderson, D.J. (2000). Glossary of normal faults. *Journal of Structural Geology* 22, p: 291-305.
- Peña, D., Bados, R., Jacay, J., Moreno, I., Rodríguez, B. (2002). Análisis sedimentológico de la Formación Santo del Fraile (Grupo Morro Solar), costa del Perú central. *Sociedad Geológica del Perú, Boletín* 93, p: 89-99.
- Pilger, R.H. (1984). Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: South American Andes. *Journal Geological Society of London* 141, p: 793-802.
- Pilger, R.H. (1981). Plate reconstructions, aseismic ridges, and low-angle subduction beneath the Andes, *Geol. Soc. Am. Bull.* 92 (7), p: 448-456.
- Pitcher, W. S. (1979). Anatomía de un Batolito. *Sociedad Geológica del Perú, Boletín* 60, p: 13-60.
- Ramos, V.A. (2009). Anatomy and global context of the Andes: Main geologic features and the Andean orogenic cycle, in Kay, S.M., Ramos, V.A., and Dickinson, W.R., eds., *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision: Geological Society of America Memoir* 204, p: 31-65.
- Ramsay, J.G. (1967). *Folding and Fracturing of Rocks*. New York, McGrawHill, 567p.
- Reutter K-J., Scheuber, E., Chong, G. (1996). The Precordilleran fault system of Chuquicamata, northern Chile: evidence for tectonic inversion along arc-parallel strike slip faults. *Tectonophysics* 259, p: 213-228.
- Rivera R. (1951). La fauna de los Estratos Puente Inga, Lima. *Sociedad Geológica del Perú. Boletín*, vol. 22, p: 1-53.
- Rivera, R., Petersen, G., Rivera, M. (1975). Estratigrafía de la costa de Lima. *Sociedad Geológica del Perú. Boletín*, vol. 45, p: 159-186.
- Romero, D. (2007). La Cuenca Cretácica Superior-Paleoceno del Perú Central: Un metalotecto para la exploración de SMV, Ejemplo Mina Maria Teresa. Red DESIR, Máster Internacional Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales. Tesis de maestría, 99p.
- Romero, D., De La Cruz, O., Rosell, W. (2005). Nueva datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de la Formación Pucusana como aporte a la interpretación paleogeográfica (Hauteriviano-Albiano Inferior) de la costa del Perú central. *Sociedad Geológica del Perú, Boletín* 100, p: 7-19.
- Rosas, S., Fontboté, L., Tankard, A. (2007). Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucará Basin, central Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 24, p: 1-24.

- Rowland, S.M., Duebendorfer, E.M., Schiefelbein, I. (2007). *Structural Analysis & Synthesis, A Laboratory Course in Structural Geology*. Blackwell Publishing, Third Edition, 301p.
- Royden, L. H. (1993). Evolution of retreating subduction boundaries formed during continental collision. *Tectonics*, 12, p: 629-638.
- Rustichelli, A., Di Celma, C., Tondi, E., 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*, Volume 65, p: 79-100.
- Salazar, H., Landa, C. (1993). Geología de los cuadrángulos de Mala, Lunahuaná, Supe, Conayca, Chincha, Tantará y Castrovirreyna. Bol. N°44. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú-INGEMMET, p: 19-22.
- Sanderson, D., Marchini, R.D. (1984). Transpression. *J. Struct. Geol.* 6, p: 449-458.
- Schildgen, T. F., Hodges, K. V., Whipple, K. X., Pringle, M. S., Van Soest, M., Cornell, K. (2009). Late cenozoic structural and tectonic development of the western margin of the central andean plateau in southwest Peru. *Tectonics*, 28(4), 21p.
- Sébrier, M., Lavenue, A., Fornari, M., Soulas, J.-P. (1988). Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia, and Northern Chile) from Eocene to Present: *Géodynamique*, v. 3, p: 85-106.
- 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), p: 153-181.
- Sempere, T., Jacay, J. (2006). Estructura tectónica del sur del Perú (antearco, arco, y Altiplano suroccidental). *Resúmenes extendidos del XIII Congreso Peruano de Geología*, Sociedad Geológica del Perú, p: 324-327.
- Simkin, T., Tilling, R., Vogt, P.R., Kirby, S.H., Kimberly, P., Stewart, D.B. (2006). *World Map of Volcanoes, Earthquakes, Impact Craters and Plate Tectonics, This Dynamic Planet*, *Geologic Investigations Map I-2800*, Third Edition. USGS/Smithsonian Institution/U.S. Naval Research Laboratory. <https://pubs.usgs.gov/imap/2800/>
- Soler, P. (1991). El volcanismo Casma del Perú central: ¿Cuenca marginal abortada o simple arco volcánico?. *Volumen de Resúmenes del VII Congreso Peruano de Geología*, p: 659-663.
- Somoza, R. (1998). Updated Nazca (Farallon)-South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences* 11, p: 211-215.
- Somoza, R., 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), p: 797-809.
- Suppe, J., Donald. M. (1990). Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae geo. Helv.* 83/3, p: 409-454.

- Sylvester, A. (1988). Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, v. 100, p: 1666-1703.
- Tchalenko, J.S. (1970). Similarities between shear zones of different magnitudes. *Geological Society of America Bulletin*, v. 81, p: 1625-1640.
- Thornburg, T., Kulm, L. D. (1981). Sedimentary basins of the Peru continental margin: Structure, stratigraphy, and Cenozoic tectonics from 6°S to 16°S latitude. *Nazca Plate: Crustal Formation and Andean Convergence*, p: 393-422.
- Thouret, J.-C., Wörner, G., Gunnell, Y., Singer, B., Zhang, X., Souriot, T. (2007). Geochronologic and stratigraphic constraints on canyon incision and Miocene uplift of the Central Andes in Peru. *Earth and Planetary Science Letters*, 263(3-4), p: 151-166.
- Van Der Pluijm, B., Marshak, S. (2004). *Earth Structure, An Introduction to Structural Geology and Tectonics*. Second Edition. W.W. Norton & Company. 656p.
- Vicente, J.C. (1989). Early late Cretaceous overthrusting in the western cordillera of southern Peru. In: In: Ericksen, G.E., Canas Pinochet, M.T., Reinemund, J.A. (Eds.), *Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources*, vol. 11. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series, Houston, Texas, p: 91-117.
- Vidal, C. (1990). El enjambre de diques San Bartolo, Lima. *Sociedad Geológica del Perú, Boletín* 81, p: 55-62.
- Viveen, W., Schlunegger, F. (2018). Prolonged extension and subsidence of the Peruvian forearc during the Cenozoic. *Tectonophysics*, Vol. 730, p: 48-62.
- Waldron, J.W.F. (2005). Extensional fault arrays in strike-slip and transtension. *Journal of Structural Geology* 27, p: 23-34.
- Walsh, J.J., Watterson, J., Yielding, G. (1991). The importance of small-scale faulting in regional extension. *Nature*, 351, p: 391-393.
- Wegener, A. (1912). Die Entstehung der Kontinente: Petermann's Geographische Mitteilungen, v. 58, p. 185-195, 253-256, p: 305-309.
- Wegener, A. (1922). *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* (3rd edition): Braunschweig. Vieweg., 144p.
- Wessel, P., Muller, R.D. (2015). *Plate Tectonics. Treatise on Geophysics*, 2nd edition, vol. 6, p: 45-93.
- Wilson, J. J. (1963). Cretaceous stratigraphy of the central Andes of Perú. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 47, p: 1-34.
- Wipf, M. A. (2006). Evolution of the Western Cordillera and coastal margin of Peru; evidence from low-temperature thermochronology and geomorphology. *Dissertationen, Eidgenoessische Technische Hochschule Zuerich*, 16383, 158p.
- Witt, C.A., Alarcón, P., Valencia, K., Lajo, A., Fuentes, J., Romero, D. (2011). Segmentación tectono-estratigráfica y superposición de cuencas de antearco cenozoicas en la margen andina entre 6°S y 2°S (Norte Perú e Sur Ecuador). 14º Congreso Latinoamericano de Geología, Memorias, Medellín, p: 248-249.

ANEXOS Y TABLAS

-Anexo N°1:

01 Mapa Geológico del Morro Solar a escala 1/5,000 (hoja en tamaño A0).

-Anexo N°2:

11 Secciones Estructurales SO-NE (de la N°1 a la N°11).

-Anexo N°3:

8 Secciones Estructurales NO-SE (de la N°12 a la N°19).

10 tablas (ver a continuación).

Tabla N°1. Orientaciones de diques en el Morro Solar (obtenidas mediante trabajo de campo y fotointerpretación). Los azimuts y buzamientos tienen el formato de la regla de la mano derecha.

Orientaciones de diques (trabajo de campo)				Orientaciones de diques (fotointerpretación)	
N°	Azimut (°)	Buzamiento (°)	Potencia (m)	N°	Azimut (°)
1	92	71	3.1	1	170
2	353	63	3.0	2	92
3	222	80	8.0	3	154
4	276	71	0.6	4	96
5	345	78	1.2	5	65
6	292	80	2.0	6	65
7	286	76	3.0	7	100
8	331	66	3.0	8	117
9	357	81	2.0	9	143
10	357	81	2.0	10	141
11	113	80	2.0	11	177
12	293	78	3.0	12	1
13	286	77	1.5	13	7
14	347	75	1.5	14	100
15	355	84	2.3	15	33
16	352	81	2.3	16	28
17	353	84	2.3	17	21
18	352	80	2.5	18	152
19	354	80	2.5	19	10
20	354	80	2.5	20	41
21	92	71	3.1	21	17
22	96	71	3.1	22	102
23	94	71	3.1	23	96
24	281	63	6.5	24	54
25	283	63	7.5		
26	274	63	4.2		
27	9	77	3.5		
28	11	77	3.5		
29	255	62	2.0		
30	91	87	2.0		
31	89	87	2.0		
32	75	87	2.0		
33	163	90	2.5		
34	334	50	2.0		
35	334	50	2.0		
36	334	50	2.1		
37	334	50	2.9		
38	334	50	2.9		
39	345	50	2.0		
40	345	50	2.0		
41	345	50	2.0		
42	345	50	2.0		
43	297	63	5.0		
44	98	81	3.0		
45	282	63	4.2		
46	282	63	4.2		
47	21	56	1.5		
48	293	62	1.5		
49	111	81	2.0		
50	260	84	1.4		
51	8	58	3.5		
52	291	65	2.5		
53	32	80	2.0		
54	289	79	2.0		
55	81	90	0.5		
56	327	67	1.0		
57	102	85	2.5		

Tabla N°2. Orientaciones de estratos (1/2) en el Morro Solar. El sistema de referencia de coordenadas Este-Norte es el WGS84 UTM Zona 18 Sur. Los azimuts y buzamientos tienen el formato de la regla de la mano derecha.

Orientaciones de estratos (1/2)

N°	Este (m)	Norte (m)	Azimut (°)	Buzamiento (°)	N°	Este (m)	Norte (m)	Azimut (°)	Buzamiento (°)
1	278314.26	8654049.07	138	10	41	278925.14	8653860.31	144	24
2	278370.55	8654053.58	141	6	42	279058.49	8653750.24	149	34
3	278213.75	8653999.50	125	8	43	279100.82	8653796.17	149	34
4	278252.65	8653963.55	118	17	44	279062.51	8653828.35	162	34
5	278322.28	8653991.49	112	16	45	278993.57	8653815.70	149	25
6	278354.46	8654003.56	90	22	46	279026.59	8653798.24	165	48
7	278401.66	8653950.64	140	18	47	279231.30	8653786.00	120	8
8	278324.82	8653950.43	120	6	48	279249.56	8653740.75	152	32
9	278404.41	8653918.05	120	3	49	279240.83	8653703.45	131	16
10	278429.39	8653905.98	146	14	50	279251.15	8653633.20	134	29
11	278437.22	8653878.04	64	14	51	279137.24	8653655.43	130	27
12	278363.35	8653856.87	125	16	52	279167.80	8653655.82	125	29
13	278407.59	8653832.32	166	6	53	279107.48	8653601.85	96	30
14	278378.16	8653748.29	107	12	54	279143.59	8653614.15	155	42
15	278415.84	8653733.90	135	10	55	279199.16	8653665.75	85	45
16	278474.05	8653772.42	129	18	56	279217.81	8653678.05	104	29
17	278503.79	8653749.14	72	35	57	278993.57	8653668.52	145	25
18	278506.65	8653724.79	75	17	58	279010.24	8653561.76	145	25
19	278433.62	8653710.82	83	24	59	278919.36	8653575.65	106	32
20	278600.28	8653900.22	115	19	60	278882.05	8653597.88	109	40
21	278624.36	8653884.88	88	11	61	278918.17	8653632.80	128	35
22	278487.57	8653902.34	65	20	62	279096.37	8653539.94	138	27
23	278477.52	8653953.93	149	13	63	279077.71	8653509.77	130	14
24	278587.58	8654010.55	125	22	64	279096.76	8653563.75	96	14
25	278596.05	8653980.66	118	19	65	279208.68	8653572.08	84	25
26	278639.97	8654046.80	155	22	66	278936.82	8653487.94	124	14
27	278660.08	8653999.97	119	25	67	278848.72	8653437.14	105	45
28	278635.47	8654083.58	155	21	68	278867.77	8653419.29	100	39
29	278550.01	8654114.54	130	9	69	279007.10	8653468.79	117	44
30	278572.17	8654128.59	155	17	70	279132.48	8653414.92	158	33
31	278802.69	8653987.80	148	30	71	279089.98	8653483.58	158	20
32	278759.03	8653995.74	102	16	72	278786.45	8653661.27	138	44
33	278761.68	8653952.88	146	48	73	278609.84	8653659.91	101	36
34	278742.10	8653939.65	105	40	74	278591.58	8653686.90	68	15
35	278818.30	8653946.53	155	24	75	278633.38	8653622.34	97	19
36	278852.96	8653878.79	140	20	76	278660.18	8653558.95	94	17
37	278767.76	8653841.22	98	19	77	278967.14	8653303.80	140	31
38	278728.08	8653819.79	120	38	78	279011.33	8653227.86	143	38
39	278918.95	8653772.06	159	25	79	279083.22	8653282.30	164	42
40	278957.10	8653818.61	152	8	80	279070.00	8653332.24	152	38

Tabla N°3. Orientaciones de estratos (2/2) en el Morro Solar. El sistema de referencia de coordenadas Este-Norte es el WGS84 UTM Zona 18 Sur. Los azimuts y buzamientos tienen el formato de la regla de la mano derecha.

Orientaciones de estratos (2/2)

N°	Este (m)	Norte (m)	Azimut (°)	Buzamiento (°)	N°	Este (m)	Norte (m)	Azimut (°)	Buzamiento (°)
81	279146.72	8653317.03	136	15	121	279736.49	8652487.17	18	21
82	279208.90	8653310.75	132	39	122	279765.70	8652389.17	36	5
83	279263.47	8653300.49	148	47	123	279791.94	8652328.00	35	45
84	279238.67	8653240.96	144	15	124	279776.30	8652271.92	78	7
85	279229.74	8653205.57	3	86	125	279786.86	8652140.26	153	36
86	279308.45	8653178.45	134	23	126	279769.08	8652192.65	138	17
87	279230.07	8653124.88	147	15	127	279807.10	8652007.97	98	20
88	279317.38	8653103.05	155	33	128	279825.42	8652064.88	135	56
89	279371.29	8653010.11	150	48	129	279815.62	8651875.22	162	20
90	279415.94	8652946.94	110	32	130	279779.63	8651904.06	152	41
91	279418.77	8652890.89	50	18	131	279800.00	8651974.44	145	39
92	279471.06	8652839.45	110	7	132	278203.83	8651522.12	155	24
93	279461.53	8652817.01	160	16	133	278229.89	8651583.90	4	20
94	279552.34	8652742.72	95	8	134	278219.44	8651691.45	0	12
95	279042.60	8652995.20	166	31	135	278192.83	8651735.26	176	17
96	279077.00	8653044.42	160	17	136	278146.15	8651818.19	148	14
97	278756.75	8652983.61	110	11	137	278117.83	8651865.31	129	12
98	278724.28	8652892.73	145	16	138	278151.23	8651948.66	124	10
99	278873.89	8652865.08	120	9	139	278186.00	8651973.73	109	22
100	278883.31	8652886.62	85	15	140	278190.92	8652051.85	65	26
101	278913.95	8652620.87	161	24	141	278200.18	8652140.48	164	22
102	278945.70	8652620.87	132	16	142	278194.89	8652082.27	100	26
103	278853.62	8652612.93	132	9	143	278177.69	8652214.90	10	22
104	278881.08	8652625.79	80	24	144	278151.89	8652289.31	120	6
105	278889.60	8652725.65	157	26	145	278118.49	8652451.37	144	21
106	278914.21	8652778.30	130	26	146	278152.55	8652517.51	81	24
107	278937.49	8652778.56	140	20	147	278114.06	8652497.87	60	19
108	278881.93	8652680.40	160	20	148	278221.68	8652588.95	113	13
109	279176.13	8652706.60	112	21	149	278280.55	8652612.10	118	13
110	279245.13	8652761.42	150	26	150	278330.16	8652632.28	114	13
111	279177.19	8652743.22	135	13	151	278361.57	8652649.14	115	19
112	279106.07	8652765.23	126	11	152	278424.08	8652657.08	148	7
113	279206.19	8652780.47	95	6	153	278471.71	8652693.46	121	14
114	279068.61	8652778.81	96	17	154	278515.69	8652716.94	132	14
115	279248.56	8652713.45	148	10	155	278583.49	8652774.16	82	16
116	279196.70	8652851.26	114	12	156	278613.92	8652795.33	105	20
117	279626.21	8652648.88	118	7	157	278671.47	8652843.61	108	14
118	279619.43	8652703.92	85	14	158	278796.78	8652965.94	159	21
119	279640.81	8652606.76	128	8	159	278430.96	8654074.27	157	13
120	279673.62	8652541.99	25	20	160	279174.61	8653718.18	118	16
					161	278367.01	8653904.81	115	18

Tabla N°4. Azimuts de fracturas en el Morro Solar (obtenidos mediante trabajo de campo y fotointerpretación). Por convención, los azimuts tienen valores entre 0° y 180°.

Azimuts de fracturas (trabajo de campo y fotointerpretación)

N°	Azimut (°)	N°	Azimut (°)	N°	Azimut (°)	N°	Azimut (°)	N°	Azimut (°)	N°	Azimut (°)	N°	Azimut (°)
1	86	47	153	93	56	139	100	185	109	231	166	277	116
2	86	48	170	94	40	140	125	186	105	232	125	278	130
3	148	49	109	95	3	141	150	187	99	233	119	279	131
4	55	50	164	96	87	142	155	188	25	234	121	280	118
5	67	51	45	97	106	143	150	189	1	235	38	281	39
6	149	52	45	98	108	144	109	190	166	236	151	282	103
7	70	53	55	99	89	145	111	191	93	237	38	283	101
8	52	54	156	100	118	146	13	192	96	238	45	284	96
9	5	55	20	101	130	147	16	193	114	239	41	285	108
10	130	56	13	102	125	148	97	194	68	240	31	286	178
11	22	57	92	103	107	149	135	195	83	241	36	287	171
12	55	58	34	104	91	150	89	196	91	242	45	288	6
13	20	59	29	105	87	151	88	197	70	243	25	289	38
14	160	60	175	106	173	152	87	198	106	244	112	290	110
15	65	61	0	107	9	153	89	199	93	245	168	291	59
16	75	62	101	108	84	154	28	200	97	246	92	292	138
17	1	63	101	109	104	155	38	201	21	247	92	293	139
18	175	64	89	110	97	156	35	202	109	248	151	294	51
19	18	65	163	111	102	157	107	203	166	249	162	295	93
20	45	66	175	112	38	158	109	204	100	250	153	296	47
21	37	67	169	113	170	159	111	205	37	251	151	297	103
22	27	68	73	114	19	160	6	206	37	252	111	298	108
23	177	69	172	115	161	161	8	207	9	253	103	299	106
24	94	70	4	116	29	162	101	208	143	254	121	300	178
25	175	71	15	117	140	163	1	209	21	255	117	301	115
26	59	72	17	118	157	164	85	210	75	256	118	302	175
27	162	73	95	119	176	165	6	211	97	257	123	303	129
28	165	74	20	120	177	166	98	212	176	258	102	304	101
29	69	75	77	121	175	167	106	213	43	259	124	305	85
30	38	76	83	122	139	168	30	214	91	260	122	306	80
31	128	77	176	123	150	169	166	215	162	261	123	307	160
32	154	78	63	124	137	170	167	216	159	262	165	308	99
33	135	79	72	125	155	171	94	217	104	263	140	309	38
34	154	80	73	126	102	172	167	218	106	264	118	310	65
35	151	81	65	127	98	173	166	219	96	265	123	311	138
36	5	82	70	128	94	174	167	220	94	266	137	312	70
37	7	83	36	129	100	175	94	221	78	267	110	313	3
38	81	84	61	130	104	176	7	222	87	268	117	314	16
39	78	85	61	131	165	177	108	223	179	269	120	315	74
40	155	86	75	132	86	178	106	224	177	270	116	316	78
41	159	87	32	133	100	179	168	225	96	271	124	317	76
42	78	88	31	134	90	180	173	226	83	272	141	318	93
43	158	89	65	135	102	181	174	227	96	273	122	319	73
44	102	90	72	136	100	182	171	228	139	274	120	320	160
45	51	91	73	137	93	183	18	229	94	275	124		
46	167	92	153	138	98	184	104	230	100	276	119		

Tabla N°5. Orientaciones de estructuras extensionales (fallas normales) en el Morro Solar. Los azimuts y buzamientos tienen el formato de la regla de la mano derecha.

Estructuras extensionales (fallas normales)									
N°	Alias	Azim. (°)	Buz. (°)	Despl. (m)	N°	Alias	Azim. (°)	Buz. (°)	Despl. (m)
1	Falla La Virgen	227	80	~5.0	41		34	55	~4.0
2	Falla Monumento	123	80	~30.0-35.0	42		178	78	~0.5
3		220	85	~4.5	43		33	57	~4.0-5.0
4		256	78	~4.0-5.0	44	Falla Salto del Fraile	248	78	~15.0-40.0
5		228	84	<0.3	45	Falla Salto del Fraile	255	78	~15.0-40.0
6		163	80	~1.0	46	Falla Alto Perú	346	74	~15.0
7	Falla La Herradura	237	77	~2.5-38.0	47		351	55	~7.0
8		190	75	~3.0	48	Falla Armatambo	87	80	~16.0-45.0
9		244	80	~2.5	49		15	75	~2.0
10		105	75	~1.0	50	Falla La Araña	1	80	~13.0
11		218	60	~0.5	51	Falla La Araña	7	80	<0.3
12		80	55	~0.5	52	Falla Amanecer	284	80	~6.5
13		20	85	~1.5	53	Falla La Araña	5	76	~4.0
14		43	76	~1.0	54		114	85	~8.0-20.0
15		343	80	<0.3	55		167	80	~8.0-20.0
16		196	75	~5.5	56		358	66	<0.3
17		34	80	~5.0	57	Falla La Chira	100	80	~40.0-180.0
18		221	80	<0.3	58		137	80	~5.0
19	Falla Amanecer	265	85	~4.0	59		85	85	~2.0
20		41	85	<0.3	60		283	80	~40.0
21		190	60	<0.3	61		294	71	<0.3
22		212	60	<0.3	62	Falla La Araña	1	80	<0.3
23		341	80	<0.3	63		283	85	<0.3
24		322	80	<0.3	64		46	85	<0.3
25		350	41	~15.0	65		39	85	<0.3
26		336	80	<0.3	66		24	80	<0.3
27		350	80	~1.0	67	Falla Del Morro	286	85	~40.0
28		355	80	~10.0	68		103	80	<0.3
29		59	80	~1.0	69		37	65	<0.3
30		220	80	<0.3	70		211	80	~5.0
31		259	85	<0.3	71		215	80	~0.5
32		353	80	<0.3	72		53	82	<0.3
33		194	85	~2.0	73		336	80	~0.5
34		223	85	~6.0	74		40	80	~5.0
35		21	85	~2.0	75		118	80	~15.0
36		73	75	~50.0	76		212	80	~7.0
37		253	70	~0.8	77		312	74	~1.0
38		347	60	~0.8	78		355	70	~0.5
39		217	80	~10.0-15.0	79		236	76	<0.3
40	Falla Del Morro	283	85	~40.0	80	Falla Alto Perú	322	80	~15.0
41	Falla La Araña	4	80	<0.3	85	Falla Salto del Fraile	249	78	~15.0-40.0
42		352	82	<0.3	86		265	22	<0.3
43		11	80	<0.3	87		2	43	<0.3
44	Falla Salto del Fraile	253	78	~15.0-40.0					

Tabla N°6. Orientaciones de estructuras compresionales y de desgarre en el Morro Solar. Los azimuts y buzamientos tienen el formato de la regla de la mano derecha.

Fallas inversas por
por compensación tectónica

N°	Azim. (°)	Buz. (°)
1	93	70
2	18	64
3	71	80
4	72	50
5	352	67
6	49	75
7	162	75

Fallas inversas por
por compresión

N°	Azim. (°)	Buz. (°)
1	356	80
2	277	55
3	194	75
4	154	70
5	166	80
6	166	80
7	275	80
8	156	88

Estructuras de
desgarre sinestrales

N°	Azim. (°)	Buz. (°)
1	355	75
2	287	81

Estructuras de
desgarre dextrales

N°	Azim. (°)	Buz. (°)
1	69	80
2	66	80
3	177	90

Tabla N°7. Orientaciones de flancos de pliegues en el Morro Solar. El sistema de referencia de coordenadas Este-Norte es el WGS84 UTM Zona 18 Sur. Los azimuts y buzamientos tienen el formato de la regla de la mano derecha.

Anticlinal de la Falla La Virgen
(Mb. La Herradura)

N°	Este (m)	Norte (m)	Azim. (°)	Buz. (°)
1			125	20
2			132	31
3			258	18
4			272	32
5	278590	8654009	123	38
6			114	59
7			146	39
8			234	33
9			275	47

Pliegue "en cofre"
(Mb. La Virgen)

N°	Este (m)	Norte (m)	Azim. (°)	Buz. (°)
1			222	50
2			230	53
3			48	69
4			56	38
5			249	24
6			225	41
7			244	57
8	278357	8653931	226	66
9			200	14
10			41	72
11			31	56
12			42	42
13			38	34
14			39	38

Pliegues de la Falla La Herradura
(Mb. La Virgen)

N°	Este (m)	Norte (m)	Azim. (°)	Buz. (°)
1			181	26
2			204	67
3			28	33
4			45	30
5	278851	8653492	252	43
6			254	65
7			61	36
8			278	42
9			81	27

Anticlinal de la Falla Armatambo
(Mb. La Herradura)

N°	Este (m)	Norte (m)	Azim. (°)	Buz. (°)
1			72	22
2			345	88
3			146	43
4			121	32
5			149	52
6			175	40
7	279228	8653310	148	53
8			155	2
9			150	49
10			139	24
11			155	60
12			143	31

Sinclinal en las Fallas Alto Perú
(sill)

N°	Este (m)	Norte (m)	Azim. (°)	Buz. (°)
1			165	48
2	279020	8653787	320	50

Sinclinal en el Cerro Marcavilca
(Mb. Marcavilca)

N°	Este (m)	Norte (m)	Azim. (°)	Buz. (°)
1			3	86
2	279244	8653215	144	15

Tabla N°8. Estaciones microestructurales y *datums* de falla del Morro Solar: TOT (01-02-03-04-05-06-07). El sistema de referencia de coordenadas Este-Norte es el WGS84 UTM Zona 18 Sur. Los azimuts y buzamientos tienen el formato de la regla de la mano derecha.

Estación: TOT-01 (E: 278629m, N: 8654083m) / Afloramiento: Fm. Salto del Fraile / N° de datos: 11						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
283	74	11E	Fractura Riedel	Sinestral	Estructuras extensionales NE-SO/O-E	Estrías de moderada a pobre calidad. Sin desplazamiento observable
278	72	6E	Fractura Riedel			
277	86	43O	Fractura Riedel			
274	75	33O	Fractura Riedel			
279	75	43O	Fractura Riedel			
274	82	38O	Fractura Riedel			
273	81	30O	Fractura Riedel			
275	81	18O	Fractura Riedel			
262	88	20O	Fractura Riedel			
264	83	21O	Fractura Riedel			
267	82	14O	Fractura Riedel			
Estación: TOT-02 (E: 278512m, N: 8653899m) / Afloramiento: Mb. La Herradura / N° de datos: 6						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
46	83	8O	Fractura Riedel	Dextral	Estructuras extensionales NE-SO/O-E	Estrías de moderada calidad. Sin desplazamiento observable
49	85	18O	Fractura Riedel			
48	90	13O	Fractura Riedel			
52	78	17O	Fractura Riedel			
59	65	16O	Fractura Riedel			
47	73	19O	Fractura Riedel			
Estación: TOT-03 (E: 278482m, N: 8653878m) / Afloramiento: Mb. La Herradura / N° de datos: 3						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
231	74	13O	Fractura Riedel	Sinestral	Estructuras extensionales NE-SO/O-E	Estrías de moderada calidad. Sin desplazamiento observable
230	73	16O	Fractura Riedel			
231	80	16O	Fractura Riedel			
Estación: TOT-04 (E: 278505m, N: 8653804m) / Afloramiento: Sill andesítico / N° de datos: 5						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
252	70	16O	Fractura Riedel	Sinestral	Estructuras extensionales NE-SO/O-E	Estrías de moderada a pobre calidad. Desplazamiento de ~40m en dirección paralela a la Falla Salto del Fraile
257	81	11O	Fractura Riedel			
249	83	15O	Fractura Riedel			
259	77	16O	Fractura Riedel			
259	79	12O	Fractura Riedel			
Estación: TOT-05 (E: 278538m, N: 8652742m) / Afloramiento: Sill andesítico / N° de datos: 3						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
347	45	65S	Fractura Riedel	Normal-Dextral	Estructuras extensionales N-S/NO-SE	Estrías de moderada a pobre calidad. Sin desplazamiento observable
332	65	87S	Fractura Riedel			
335	51	83S	Fractura Riedel			
Estación: TOT-06 (E: 278265m, N: 8652616m) / Afloramiento: Mb. Morro Solar / N° de datos: 4						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
280	77	83O	Fractura Riedel	Sinestral-Normal	Estructuras extensionales NE-SO/O-E	Estrías de pobre calidad. Sin desplazamiento observable
274	90	89O	Fractura Riedel			
266	86	77O	Fractura Riedel			
293	83	72O	Fractura Riedel			
Estación: TOT-07 (E: 278418m, N: 8653887m) / Afloramiento: Fm. Salto del Fraile / N° de datos: 5						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
235	76	31E	Fractura Riedel	Dextral	Estructuras extensionales NE-SO/O-E	Estrías de moderada calidad. Desplazamiento de ~10m en dirección paralela a la Falla Cruz del Morro por superposición tectónica
227	88	32E	Fractura Riedel			
242	80	25E	Fractura Riedel			
241	76	26E	Fractura Riedel			
238	86	40E	Fractura Riedel			

Tabla N°9. Estaciones microestructurales y *datums* de falla del Morro Solar:
TOT (08-09-10-11-12-13). El sistema de referencia de coordenadas Este-Norte es el
WGS84 UTM Zona 18 Sur. Los azimuts y buzamientos tienen el formato de la regla de
la mano derecha.

Estación: TOT-08 (E: 278110m, N: 8652479m) / Afloramiento: Mb. Morro Solar / N° de datos: 3						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
286	84	9E	Fractura Riedel	Dextral	Estructuras	Estrías de moderada a pobre calidad. Sin desplazamiento observable
285	76	12E	Fractura Riedel		extensionales	
286	82	8E	Fractura Riedel		N-S/NO-SE	
Estación: TOT-09 (E: 278166, N: 8651958m) / Afloramiento: Mb. Morro Solar / N° de datos: 6						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
4	75	28N	Fractura Riedel	Sinestral	Estructuras extensionales N-S/NO-SE	Estrías de moderada a pobre calidad. Desplazamiento de ~4m en dirección paralela a la Falla La Araña
8	64	30N	Fractura Riedel			
8	76	41N	Fractura Riedel			
0	70	46N	Fractura Riedel			
20	78	49N	Fractura Riedel			
16	90	33N	Fractura Riedel			
Estación: TOT-10 (E: 278215, N: 8651675m) / Afloramiento: Mb. Marcavilca / N° de datos: 3						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
320	65	25N	Fractura Riedel	Sinestral	Estructuras extensionales N-S/NO-SE	Estrías de moderada a buena calidad. Con desplazamiento de <0.3m por sobreimposición tectónica
330	63	12N	Fractura Riedel			
315	58	32N	Fractura Riedel			
Estación: TOT-11 (E: 278708, N: 8653997m) / Afloramiento: Fm. Salto del Fraile / N° de datos: 5						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
234	88	82E	Fractura Riedel	Dextral-Normal	Estructuras extensionales NE-SO/O-E	Estrías de moderada a pobre calidad. Desplazamiento de <0.3m
239	85	86E	Fractura Riedel			
235	90	78E	Fractura Riedel			
235	90	76E	Fractura Riedel			
238	84	80E	Fractura Riedel			
Estación: TOT-12 (E: 278812, N: 8653991m) / Afloramiento: Fm. Salto del Fraile / N° de datos: 6						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
346	56	77N	Fractura Riedel	Normal-Sinestral	Estructuras extensionales N-S/NO-SE	Estrías de moderada a pobre calidad. Desplazamiento de ~15m
346	51	49N	Fractura Riedel			
344	66	50N	Fractura Riedel			
340	60	48N	Fractura Riedel			
345	48	67N	Fractura Riedel			
347	81	66N	Fractura Riedel			
Estación: TOT-13 (E: 278976, N: 8653825m) / Afloramiento: Fm. Salto del Fraile / N° de datos: 3						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
346	74	80N	Fractura Riedel	Normal-Sinestral	Estructuras extensionales N-S/NO-SE	Estrías de moderada a pobre calidad. Desplazamiento de ~15m en dirección paralela a las Fallas Alto Perú
355	75	50N	Fractura Riedel			
340	82	74N	Fractura Riedel			

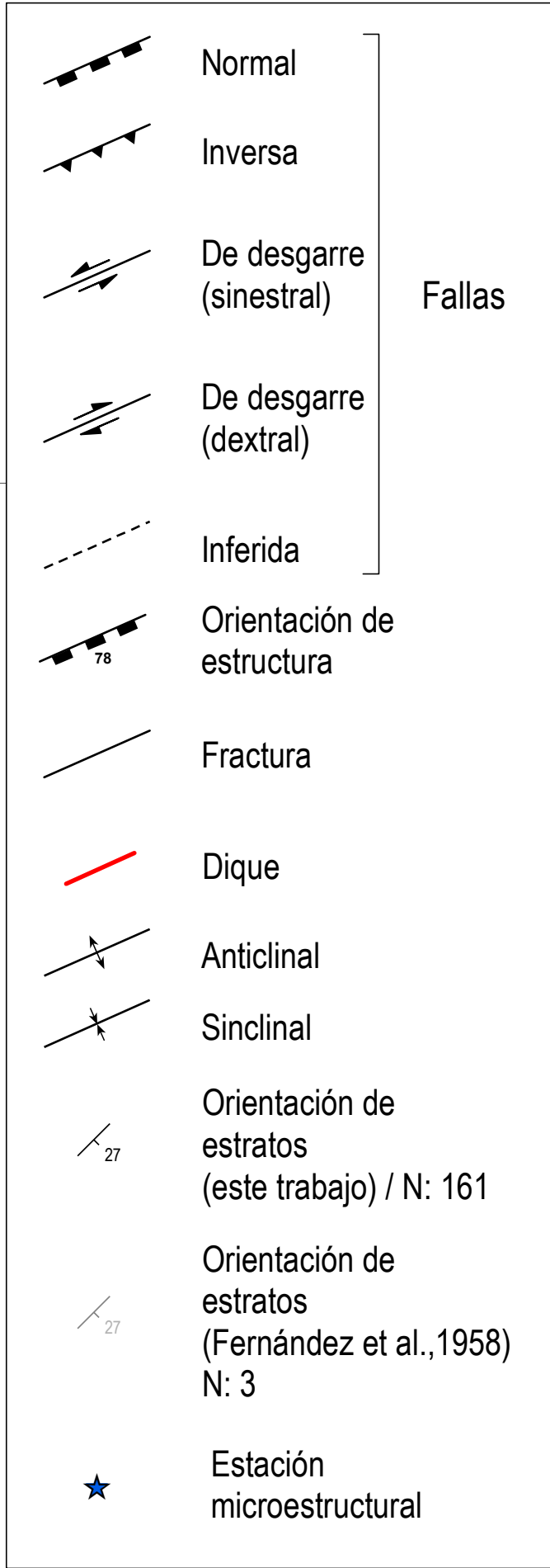
Tabla N°10. Estaciones microestructurales y datums de falla del Morro Solar:
TOT (14-15). El sistema de referencia de coordenadas Este-Norte es el WGS84 UTM
Zona 18 Sur. Los azimuts y buzamientos tienen el formato de la regla de la mano
derecha.

Estación: TOT-14 (E: 278250, N: 8652614m) / Afloramiento: Fm. Mb. Morro Solar / N° de datos: 13						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
279	80	29O	Marcas de arrastre	Sinestral	Estructuras extensionales NE-SO/O-E	Estrías de buena calidad. Sin desplazamiento observable
277	74	20O	Marcas de arrastre			
284	74	21O	Marcas de arrastre			
95	79	30O	Marcas de arrastre			
97	66	35O	Marcas de arrastre			
105	61	30O	Marcas de arrastre			
92	54	34O	Marcas de arrastre			
94	75	28O	Marcas de arrastre			
84	78	32O	Marcas de arrastre			
97	81	25O	Marcas de arrastre			
276	74	29O	Marcas de arrastre			
82	69	40O	Marcas de arrastre			
76	75	34O	Marcas de arrastre			
Estación: TOT-15 (E: 278175, N: 8651336m) / Afloramiento: Fm. Mb. Marcavilca / N° de datos: 24						
Azim. (°)	Buz. (°)	Cab. (°)	Indicador cin.	Cinemática prin.	Vínculo con	Notas
358	74	61N	Fractura Riedel	Normal-Sinestral	Estructuras extensionales N-S/NO-SE	Estrías de buena calidad. Desplazamiento de <0.3m en dirección paralela a la Falla La Araña. Existen estrías de cabeceo de ángulo bajo que se superimponen a cinemáticas normales
359	74	56N	Fractura Riedel			
356	75	54N	Fractura Riedel			
4	71	51N	Fractura Riedel			
16	90	66N	Fractura Riedel			
10	86	53N	Fractura Riedel			
199	85	66N	Fractura Riedel			
6	86	71N	Fractura Riedel			
6	82	60N	Fractura Riedel			
354	76	67N	Fractura Riedel			
3	67	44N	Fractura Riedel			
5	75	39N	Fractura Riedel			
357	75	40N	Fractura Riedel			
356	73	46N	Fractura Riedel			
5	79	30N	Fractura Riedel			
356	69	34N	Fractura Riedel			
0	75	36N	Fractura Riedel			
1	76	46N	Fractura Riedel			
358	81	44N	Fractura Riedel			
330	79	42N	Fractura Riedel			
12	80	49N	Fractura Riedel			
17	76	22N	Fractura Riedel			
0	71	30N	Fractura Riedel			
5	73	32N	Fractura Riedel			

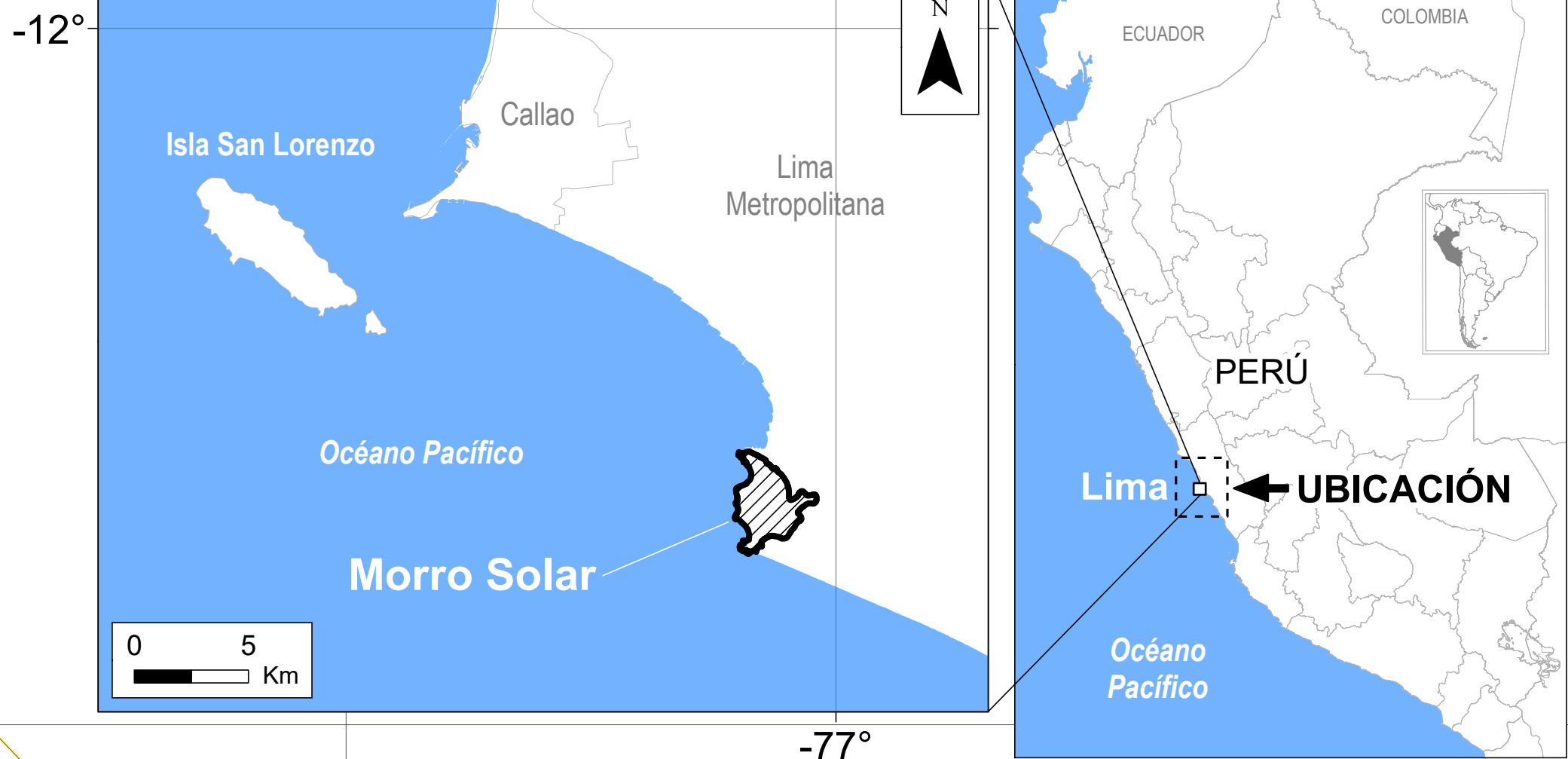
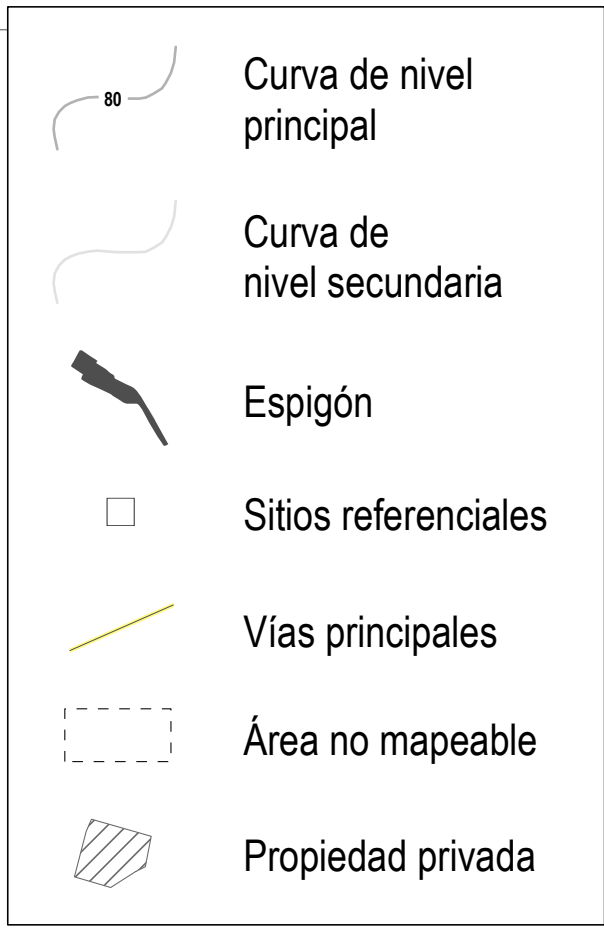
MAPA GEOLÓGICO DEL MORRO SOLAR (1/5,000)

Por: Luis Ayala (2021)

SÍMBOLOS GEOLÓGICOS



SÍMBOLOS CARTOGRAFICOS

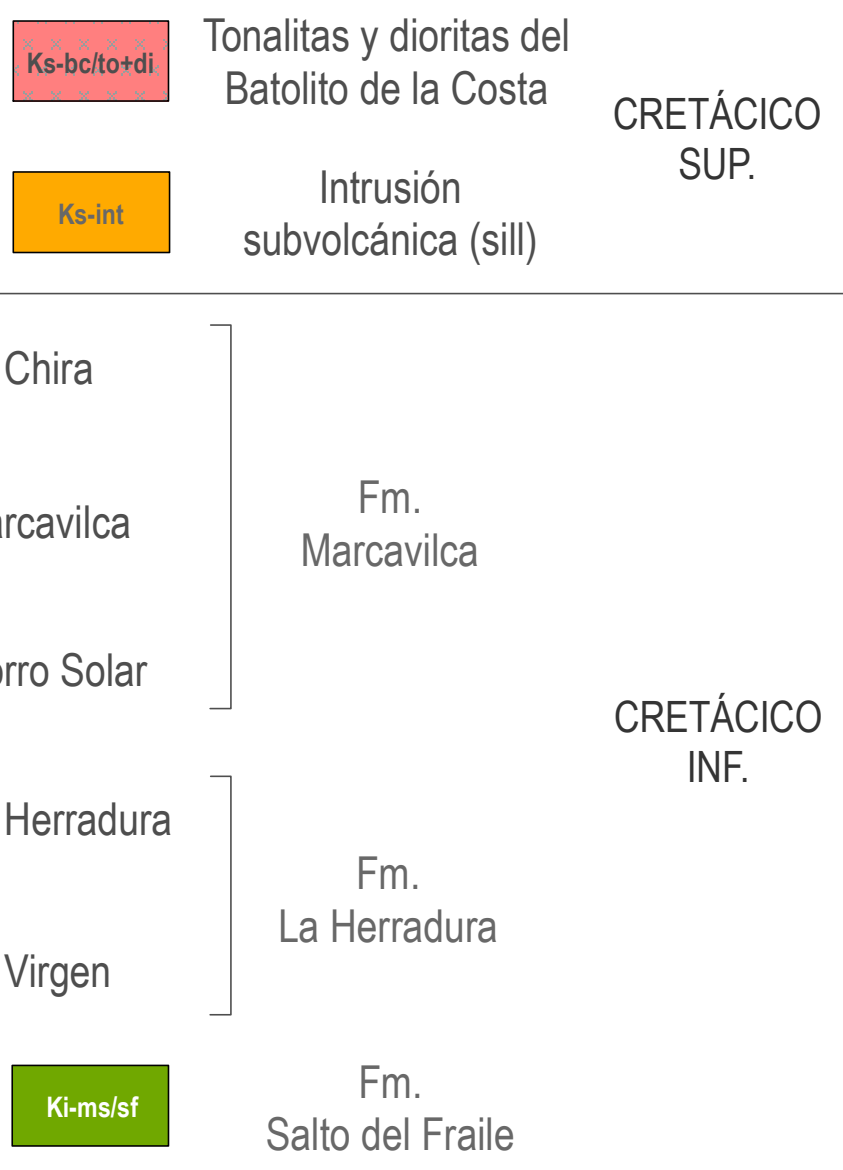


ESTRATIGRAFÍA DEL GRUPO MORRO SOLAR

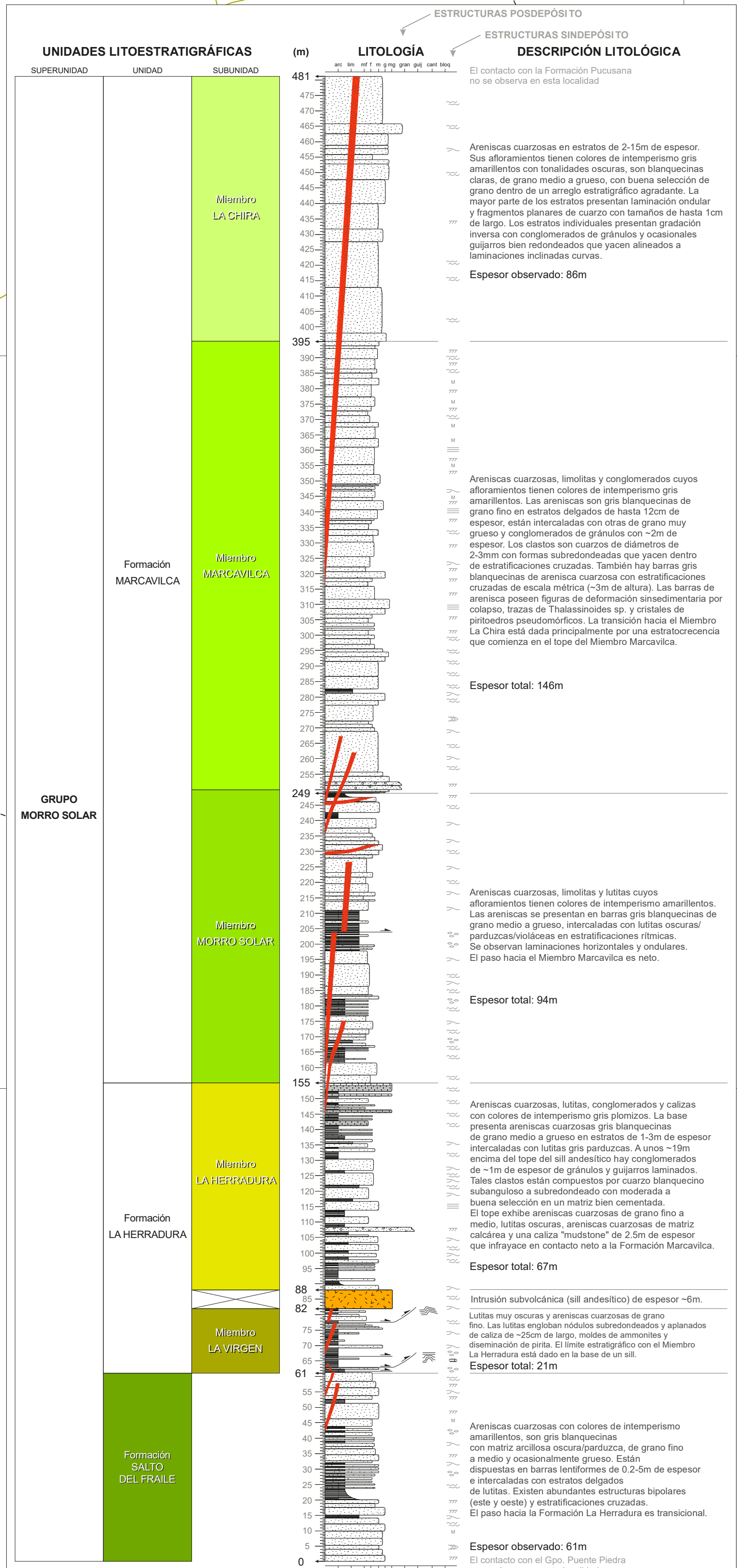
DEPÓSITOS DE COBERTURA:



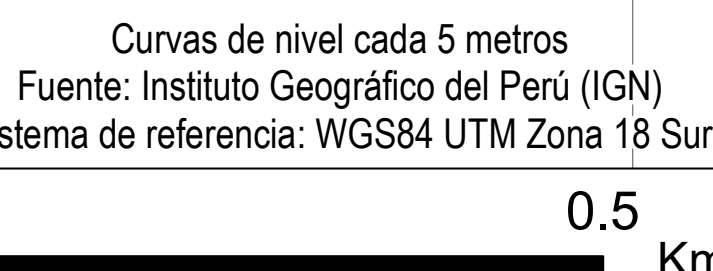
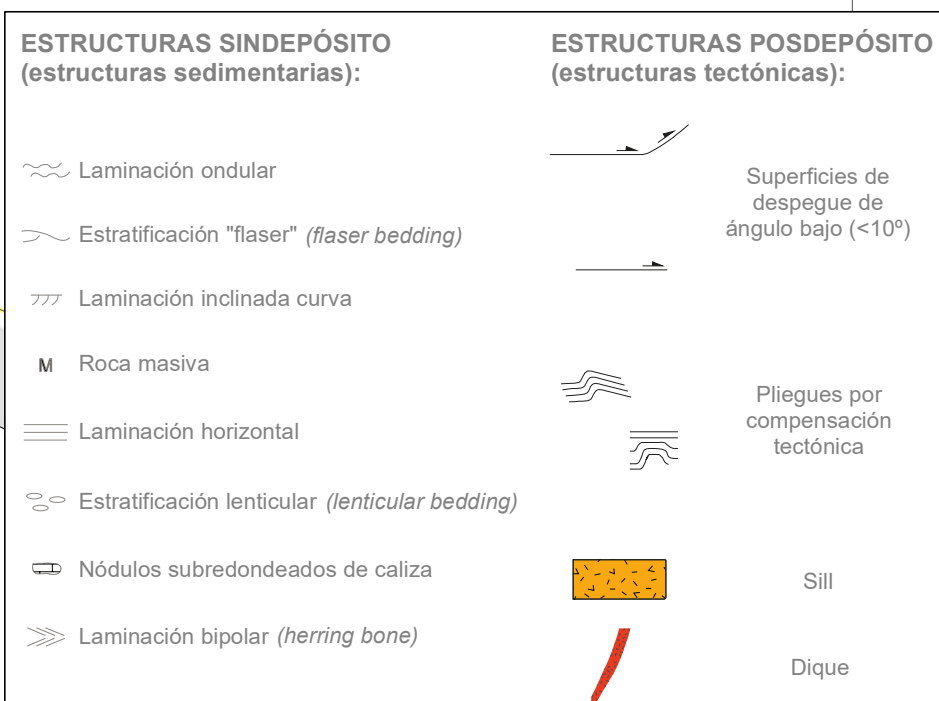
UNIDADES LITOLÓGICAS:



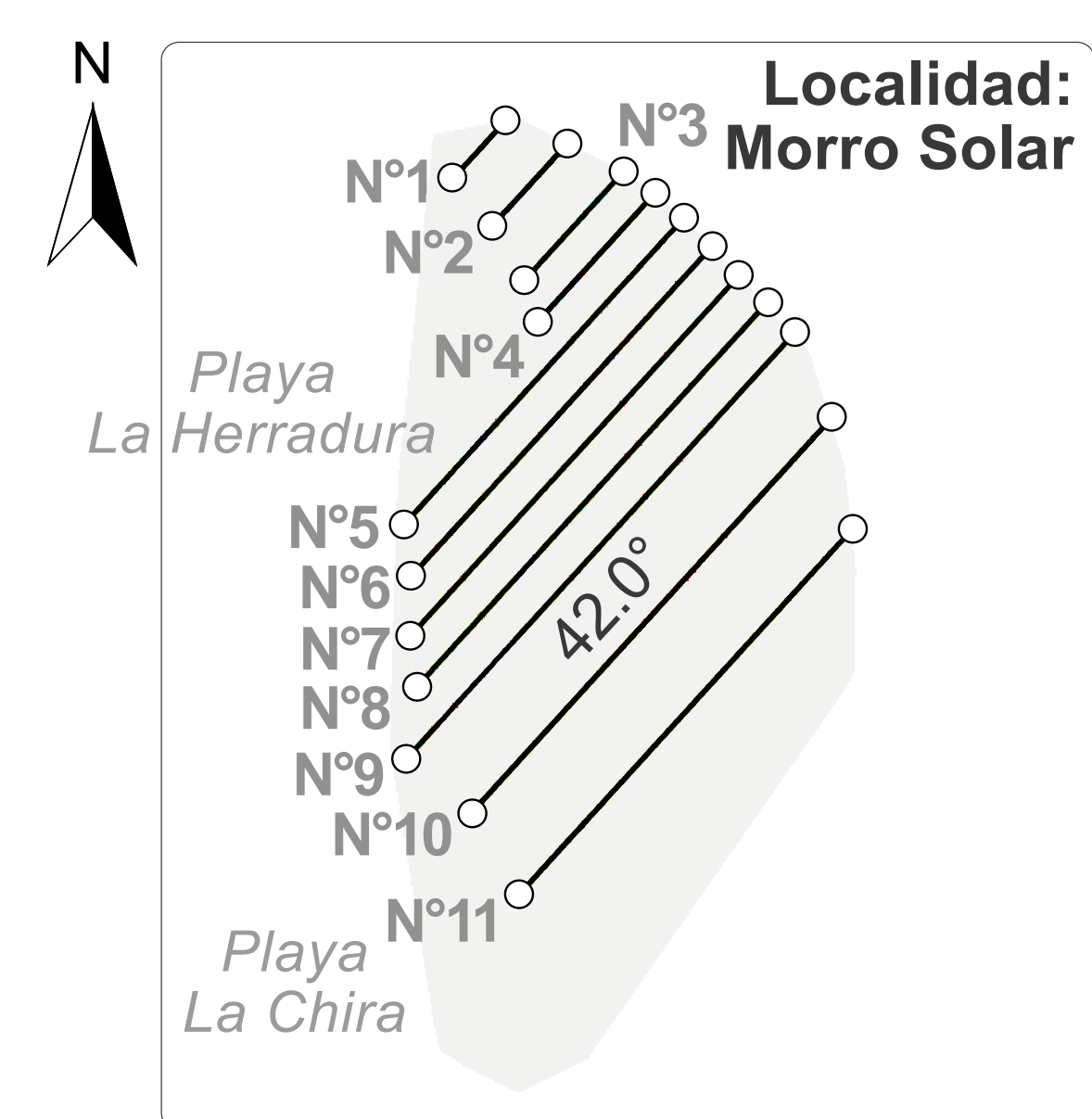
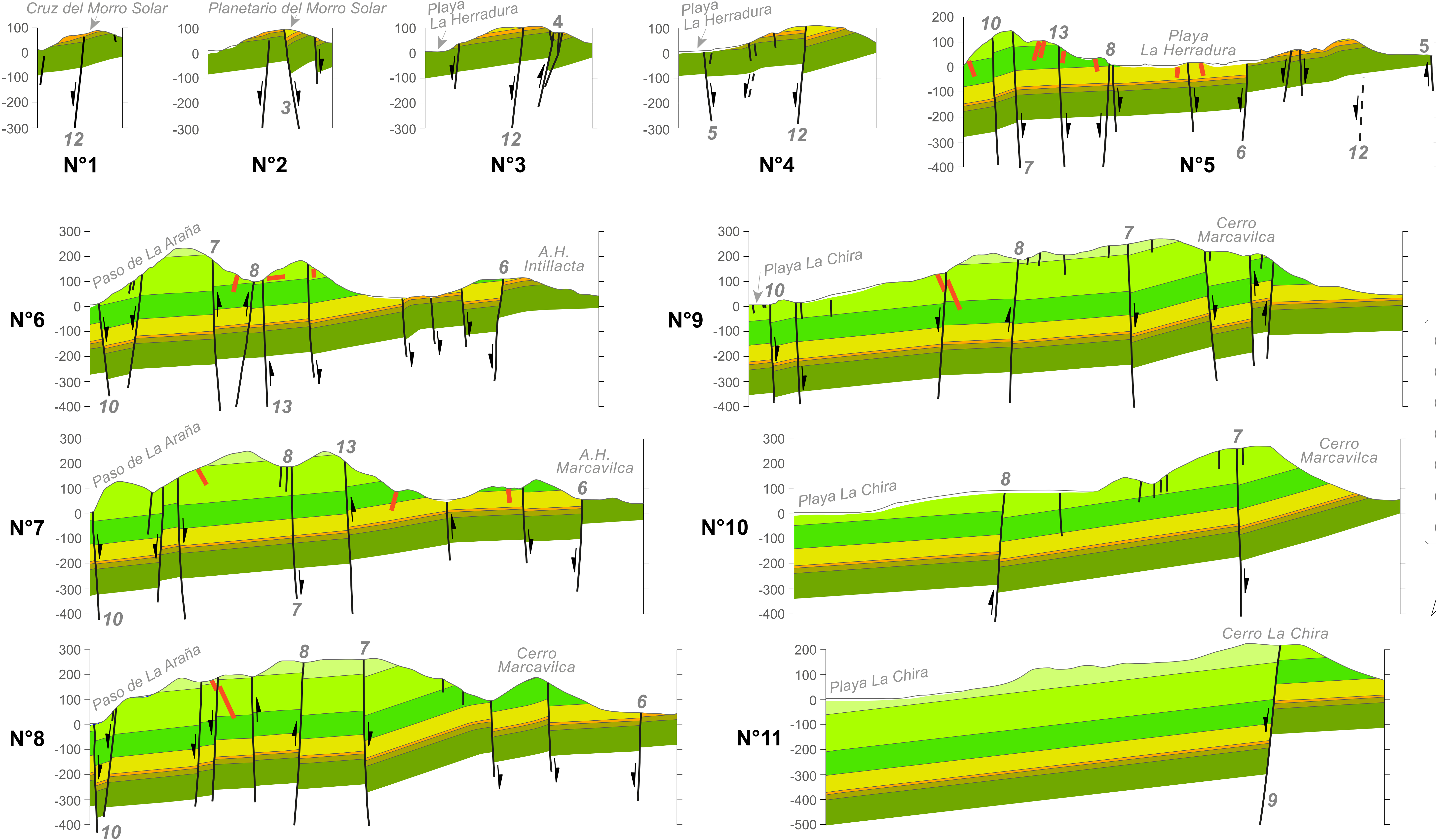
ESTRATIGRAFÍA DETALLADA (Escala: 1/1,200)



SIMBOLOGÍA



Este mapa es parte de la Tesis de Maestría (Universidad Nacional Mayor de San Marcos): "Influencia de la Tectónica Cenozoica del Antearco Peruano en el Mecanismo de Deformación del Morro Solar mediante el Análisis Estructural" (2021)



SECCIONES ESTRUCTURALES SO-NE

