



This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Received: October 24, 2022

Revision received: April 23, 2023

Accepted: May 22, 2023

Published online: June, 19, 2023

Research article

Deformación y procesos tectónicos en la Península de Manta, Ecuador: una mirada a través de la estadística y cinemática de las discontinuidades

Deformation and tectonic processes on the Manta Peninsula, Ecuador: a look through the statistical and kinematic analysis of discontinuities

Hernán Javier Lara-Saavedra¹ , María José Briones Vera²

Departamento de Geociencias, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad Técnica Particular de Loja, San Cayetano Alto s/n, Loja, Ecuador.

²Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, Av. Raúl Gómez Lince s/n, Guayaquil, Ecuador.

Corresponding author: Hernán Lara, hjlara@utpl.edu.ec

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar la orientación de los ejes y campos de esfuerzos y su correlación con el contexto tectónico regional de los afloramientos de la Formación San Mateo, Península de Manta, Ecuador. Se obtuvieron 123 datos estructurales de cuatro secciones, interpretados posteriormente mediante el análisis estadístico y cinemático. El análisis estadístico de discontinuidades fue elaborado mediante la proyección estereográfica de fallas y diaclasas en el Software Dips 5.1 y el Software ioGAS 7.4.2. Las subfeldarenitas y sublitoarenitas demuestran que el área de estudio estuvo sometida a campos de esfuerzo compresivos y distensivos con dirección W-E, SW-NE y NW-SE lo que indica una complejidad en la historia tectónica de la región. La orientación de esfuerzos distensivos y compresivos en la misma dirección indica la intermitencia en los procesos tectónicos generando estructuras distensivas en campos de esfuerzos compresivos. Las discontinuidades de componentes cinemáticos de carácter transcurrente derivados del sistema transcurrente dextral indican la presencia de una deformación horizontal significativa en la región. Los esfuerzos compresivos y distensivos en la Península de Manta se calcularon como la orientación NO-SE representa al esfuerzo principal (σ_1) mientras que la orientación NE-SO representa el esfuerzo menor (σ_3). El gráfico de Roseta muestra claramente la dirección N-S en un rango de 0.0°-20.0° en las diaclasas. Se obtiene como resultado de los controles estructurales, dos eventos estructurales del fallamiento que tienen un buzamiento alto y con orientación NNE-SSO y con orientación NNO-SSE. El buzamiento para ambos eventos varía entre 87.9° y 89.8°. La Península de Manta tiene una colisión con la Cordillera de Carnegie que genera un margen cóncavo hacia el Océano Pacífico similar al sistema de subducción de las Marianas.

Palabras clave: arenitas, análisis cinemático, campos de esfuerzos, esfuerzos compresivos, esfuerzos distensivos, Ecuador

ABSTRACT

The present research aimed to determine the orientation of stress axes and fields and their correlation with the regional tectonic context of the San Mateo Formation outcrops, Manta Peninsula, Ecuador. A total of 123 structural data from four sections were obtained and interpreted through statistical and kinematic analysis. The statistical analysis of discontinuities was elaborated using the stereographic projection of faults and joints in Dips 5.1 and ioGAS 7.4.2 software. The subfeldspathic and sublitharenitic sandstones demonstrate that the study area was subjected to compressive and tensile stress fields with W-E, SW-NE, and NW-SE directions which suggests the complexity of the tectonic history in the region. The orientation of compressive and tensile stresses in the same direction indicates intermittency in tectonic processes generating tensile structures in compressive stress fields. The discontinuities contain transcurrent kinematic components derived from the dextral strike-slip system which indicate the presence of significant horizontal deformation in the region. Compressive and tensile stresses in the Manta Peninsula were calculated as the NO-SE orientation representing the principal stress (σ_1) while the NE-SO orientation represents the minor stress (σ_3). The Rose Plot clearly shows the N-S direction in a range of 0.0° - 20.0° in joints. Two structural events of faulting were obtained as a result of structural controls, both having high dips and orientations of NNE-SSO and NNO-SSE. The dip for both events varies between 87.9° and 89.8° . The Carnegie Ridge collides with the Manta Peninsula generating a concave margin towards the Pacific Ocean similar to the subduction system of the Mariana Trench.

Keywords: arenite, kinematic analysis, stress fields, compressive efforts, tensile efforts.

1. INTRODUCTION

La costa ecuatoriana está ubicada al NW de América del Sur en el límite convergente de las placas Nazca, la placa Caribeña o Bloque Norandino y la placa Sudamericana. El margen activo está marcado por la entrada en subducción de la Cordillera de Carnegie, geoestructura ubicada en la placa de Nazca, frente a la ciudad de Manta, en dirección E-W (Figura 1), asociada con la actividad del punto caliente Galápagos (Gutscher *et al.*, 1999) y que tiene gran influencia en la evolución de la línea costera (Jaillard *et al.*, 1995).

El eje de la fosa de subducción al norte de la Megafalla Guayaquil Caracas tiene una orientación $N20^\circ$ - $40^\circ E$ (Segovia *et al.*, 2009). El régimen estructural regional está controlado por procesos de subducción entre la Placa de Nazca y la Placa Caribeña, frente a las costas ecuatorianas. La megaestructura asociada a este régimen posee localización NNE-SSW y los ejes de esfuerzo compresivos se localizan perpendiculares a esta orientación y en dirección W-E.

La velocidad de convergencia entre las placas de Nazca y el Bloque Norandino es de 78 mm por año con una dirección $N83^\circ E$ (Daly *et al.*, 1989; Trenkamp *et al.*, 2002; Nocquet *et al.*, 2016). En la Costa, se destacan rasgos estructurales con orientación $N25^\circ E$ y en su interior, se encuentran lineamientos tectónicos con direcciones tentativamente $N30^\circ E$ destacándose la falla geológica activa Jama – Quinindé (Núñez, 2003).

En la zona de antearco existe una gran variabilidad en las direcciones de los esfuerzos compresivos y distensivos con orientación $N13^\circ E$ hasta $N130^\circ E$.

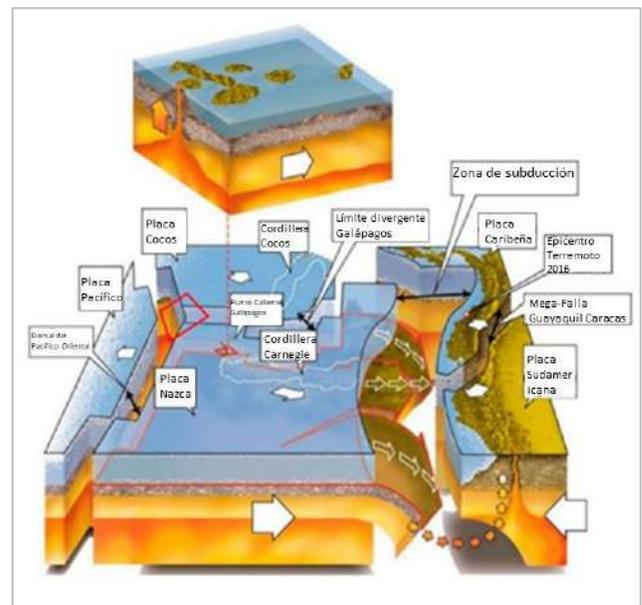


Figura 1. Geodinámica entre la placa de Nazca, Caribeña y Sudamericana influenciada por la subducción de la Cordillera de Carnegie (Chunga *et al.* 2019)

Los sismos subcorticales en el antearco, muestran tensores oblicuos respecto al eje compresivo subvertical (Segovia *et al.*, 2009). Los eventos sísmicos de carácter inverso tienen dirección de esfuerzo máximo 273° y subhorizontal, en concordancia con la dirección de convergencia de la Placa Nazca. Los mecanismos de tipo normal tienen esfuerzo principal subvertical de 261° con extensión similar a la dirección de la compresión (Segovia *et al.*, 2009).

La Península de Manta con una elevación de 360 metros ubicada frente al eje de la Cordillera de Carnegie (Pedoja et al., 2006b) se caracteriza por una zona tectónica de margen costero con tres zonas de fallas: Puerto Libre, Jama, Manabí que determinan las zonas geotectónicas de Galera, Cabo Pasado y Manta (Dumont et al. 2012).

La falla Jama tiene una longitud de falla de 46.25km medidos desde un análisis morfológico (Egüez et al. 2003). La falla Jama presenta un rumbo N37°E $\pm 12^\circ$, una dirección promedio de 40° del deslizamiento y una magnitud promedio de Mw 7.0 calculado de las relaciones derivadas de Well & Coppersmith (1994). La falla Jama puede ser observada desde imágenes satelitales como un lineamiento definido que controlan el drenaje del río El Venado (Egüez et al. 2003).

La falla San Isidro Manabí tiene una longitud de falla de 15.9 km medidos desde un análisis morfológico (Egüez et al. 2003). La falla Jama presenta un rumbo N18°E $\pm 11^\circ$, una dirección promedio de 300° del deslizamiento y una magnitud promedio de Mw 6.4 calculado de las relaciones derivadas de Well & Coppersmith (1994). La falla geológica se observa en terrazas Cuaternarias del Estero Hondo (Egüez et al. 2003).

La costa ecuatoriana en la sección central que no recibe drenaje de la Cordillera de los Andes se encuentra sujeta a levantamiento tectónico debido a esfuerzos compresivos por la curvatura de los bordes de placas (Dumont et al.

2012). La forma convexa hacia el océano Pacífico induce a un levantamiento del margen relacionado a un régimen compresivo mientras que una geometría cóncava induce a una subsidencia del margen relacionado a un régimen extensional (Bonnardot et al. 2008).

La subducción de la Cordillera de Carnegie genera un movimiento hacia el Oeste de entre 40-45km de la línea costera en la Península de Manta desde el Plioceno tardío tomando en consideración la curva de nivel de 300 metros (Dumont et al. 2012). El ancho del margen continental se incrementa debido a la subducción de la Cordillera de Carnegie. La diferencia entre los costados y la parte frontal del ancho de la plataforma continental de la Cordillera de Carnegie representa aproximadamente unos 30-35km (Dumont et al. 2012).

El presente análisis estructural tiene como objetivo principal determinar la orientación de los ejes y campos de esfuerzos y su correlación con el contexto tectónico regional en función de las estructuras existentes caracterizadas cinemáticamente para el área de estudio.

1.1 Área de Estudio. El sector San Mateo está ubicado 10km al Oeste del cantón Manta en la provincia de Manabí, Ecuador. Los afloramientos de roca se encuentran asociados a la Formación San Mateo. El área de estudio está ubicada en el sector San Mateo entre Punta Jome y Cabo San Mateo (Figura 2).

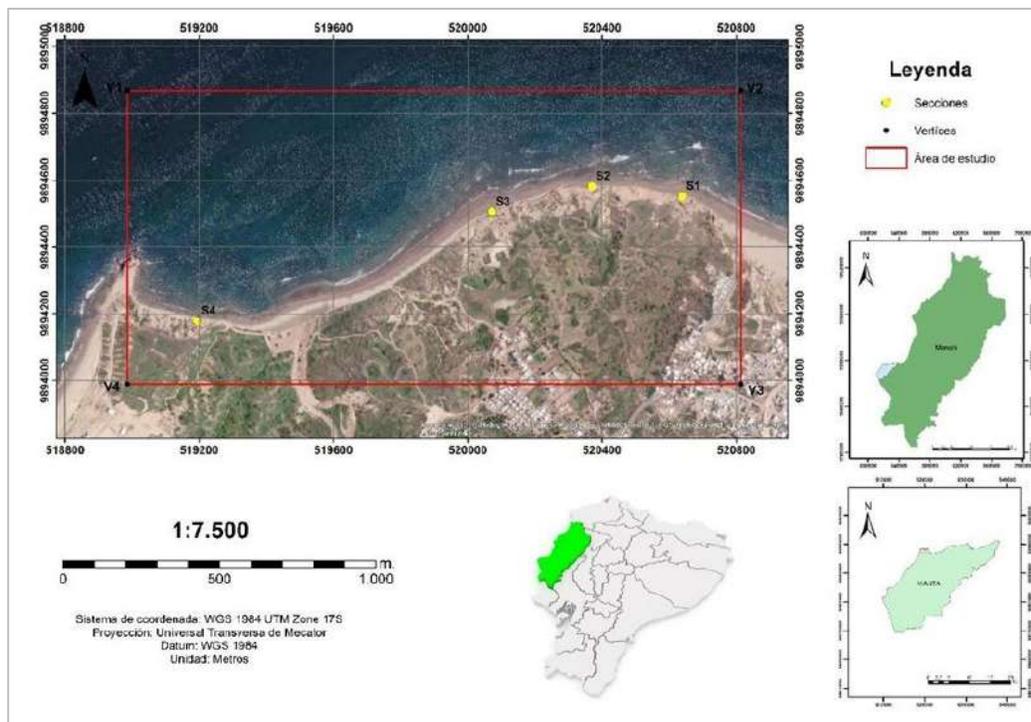


Figura 2. Mapa de ubicación de las secciones del área de estudio. La parroquia rural San Mateo está situada en las laderas occidentales de la cordillera de los Andes y tiene una superficie de alrededor de 219 km²

La formación San Mateo está constituida principalmente por areniscas finas a medias de más de 800m, las cuales exhiben ondulitas, estratificación cruzada, laminación sigmoidea y presencia de lignito (Feininger y Bristow 1980). La formación fue establecida por Olson en 1942 y data del Eoceno Medio al Eoceno Superior mediante la aplicación de técnicas y principios micropaleontológicos, paleológicos y sedimentológicos (Navarrete 1985).

Contreras (1990) señaló que la Formación San Mateo está compuesta por limolitas, arcillolitas, areniscas y conglomerados. Las secuencias muestran un proceso subsidente que hacia la base de la serie es relativamente fuerte dando como resultado una mega secuencia retrogradante hacia el tope. Las capas de conglomerados contienen clastos provenientes del basamento Piñón y areniscas volcanoclásticas de grano grueso y conglomerados de la formación Cayo.

La formación San Mateo sobreyace a la formación Tosagua (Mioceno Inferior-Mioceno Medio) y subyace a las calciturbiditas bien estratificadas de la Formación San Eduardo (Eoceno Medio). Sheppard (1937) definió los depósitos como continentales o de mar somero y determinó que la formación está compuesta por tobas. El ambiente en la parte basal es considerado marino somero, pero la parte superior se vuelve más marina por un incremento en profundidad y no presenta variaciones de nivel estático (Jaillard *et al.*, 2006). El área de estudio se describe como relieves litorales sedimentarios y fluvio-marinos de origen tectónico (Winckell *et al.* 1997).

2. Marco de Referencia

2.1 Modelo Geodinámico. La Formación San Mateo también presenta algunos rasgos estructurales, como fallas y pliegues, que indican la presencia de esfuerzos tectónicos en el pasado. El modelo geodinámico ajustado para el área de estudio parece estar relacionado con la tectónica de placas y la actividad sísmica en la región. La orientación de la fosa en dirección N30°E indica que esta zona se encuentra en un margen convergente, donde una placa tectónica se está hundiendo por debajo de otra. En este caso, se puede inferir que se trata de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Caribeña.

Por otro lado, las orientaciones para el esfuerzo principal (σ_1) en dirección NW-SE y W-E ± 10 indican que la región está experimentando esfuerzos compresivos en estas direcciones. Estos esfuerzos podrían estar relacionados con la actividad sísmica en la zona, ya que las fallas geológicas tienden a ser activadas bajo esfuerzos compresivos. El análisis cinemático según Riedel podría proporcionar información adicional sobre la geometría y la dinámica de las fallas en la región (Figura 3). Este análisis se basa en la observación de las fracturas en el terreno y su relación con los esfuerzos tectónicos en la zona. El resumen del análisis cinemático según Riedel podría indicar la dirección y el tipo de movimiento de las fallas en la región, lo que es útil para entender la sismicidad y la peligrosidad sísmica en el área de estudio.

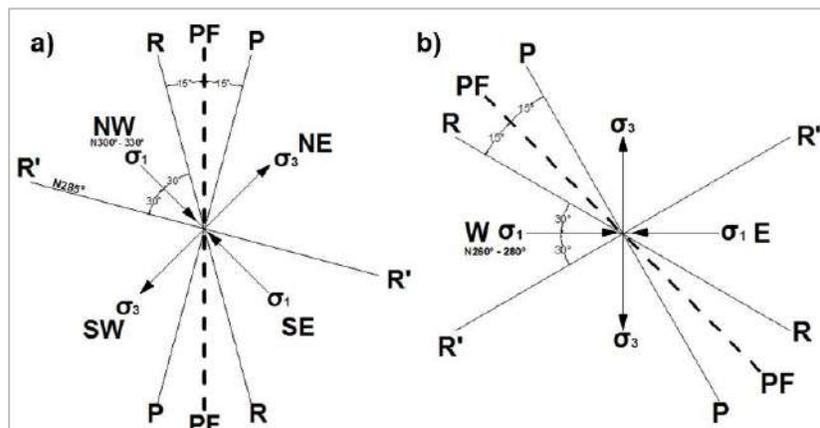


Figura 3. Orientaciones para el esfuerzo principal (σ_1) en dirección NW-SE (300°-330°) (a) y W-E ± 10 (260°-280°) (b) y el resumen del análisis cinemático según Riedel (σ_1) según (a) Segovia y Alvarado, (2009) y (b) Nocquet *et al.*, (2016)

2.2 Estratigrafía. La formación San Mateo está compuesta por arenisca media anguloso a subanguloso en su parte inferior con conglomerado basal y en su parte superior por arenisca fina con capas delgadas (I.E.P.C 1947). Las areniscas son bien estratificadas e interestratificadas

con lutitas delgadas (Shulman *et al.*, 1965). La Formación San Mateo del Eoceno está constituida por areniscas finas a medias de más de 800 m con capas de conglomerados que contienen clastos provenientes de las formaciones Piñón y Cayo.

La Formación San Mateo consiste en una secuencia de 600 m de espesor de conglomerados de grano grueso similares a los de la Formación Zapotal, con clastos polimícticos imbricados. Esta descripción sugiere un ambiente deposicional con alta energía de transporte, posiblemente asociado con procesos fluviales o de tipo deltaico. Generalmente, descansa directamente sobre rocas cretácicas lo cual indica una erosión pre-bartonianiana y una inconformidad basal. El hecho de que la formación repose directamente sobre rocas cretácicas indica que hubo un período de erosión anterior a la deposición de la Formación San Mateo, lo cual sugiere que hubo un cambio en el ambiente deposicional o una pausa en la actividad sedimentaria. Las paleocorrientes en Manabí indican un transporte orientado hacia el noroeste (Egüez, 1985; Santos *et al.*, 1986a; Contreras, 1990). Las paleocorrientes indican que la fuente de los sedimentos se encontraba al sureste de la región, y que fueron depositados por un sistema de transporte fluvial o deltaico que se extendía hacia el noroeste.

3. Método

3.1. Levantamiento estructural

En el levantamiento estructural de cada sección se empleó la notación de círculo completo para dirección de buzamiento y ángulo de buzamiento. Esto se refiere a la representación gráfica de la inclinación de un plano de estratificación o de una discontinuidad. En este caso, se utilizó para caracterizar la estructura de las secciones geológicas estudiadas. La caracterización cinemática de discontinuidades se determinó mapeando la dirección del plano de inmersión (*plunge direction*) y el ángulo correspondiente entre los indicadores cinemáticos respecto al plano horizontal auxiliar (*rake*). Esto proporciona información sobre la orientación y la dirección de movimiento de las discontinuidades, lo cual es importante para entender la deformación y la estructura de las rocas. El muestreo se realizó de manera aleatoria en los afloramientos de roca a lo largo de la línea de costa. Se seleccionaron 16 muestras en las cuatro secciones, tomando en cuenta el nivel de meteorización, fracturas y zonas de falla (Figura 4). Este tipo de muestreo es importante para obtener una muestra representativa de la estructura de las rocas en la zona de estudio y evitar posibles sesgos en los resultados.

3.2 *Descripción macroscópica y microscópica.* La descripción macroscópica de las muestras se realizó en función de las siguientes características: granulometría, color, grado de meteorización y características

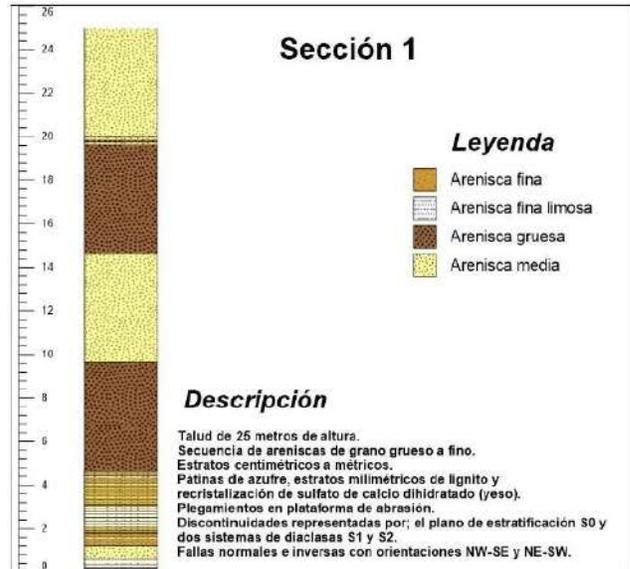


Figura 4. Columna litológica de la Sección Uno donde se muestra la secuencia de areniscas de grano grueso a fino de donde se toma la muestra MB4

mineralógicas. El color se describió empleando el folleto Geological Rock-Color Chart de Munsell y el tamaño del grano se detalló basado en la escala granulométrica de Wentworth. La elaboración de las láminas delgadas se realizó empleando una muestra por cada sección. Se utilizaron las muestras MB4 (sección uno), MB6 (sección dos), MB12 (sección tres) y MB14 (sección cuatro). La elaboración de las láminas delgadas se llevó a cabo mediante un proceso de corte y pulido de la muestra para obtener una lámina con un grosor uniforme de aproximadamente 30 micras. Posteriormente, se aplicó un recubrimiento de resina epoxi para consolidar la muestra y evitar su desintegración durante la observación al microscopio. Las láminas delgadas fueron observadas al microscopio petrográfico en luz transmitida y polarizada para identificar las texturas y minerales presentes en la muestra, así como para determinar la estructura y relaciones entre los diferentes componentes de la roca. La descripción petrográfica se basó en la identificación de los minerales principales y secundarios presentes, la textura y estructura de la roca, así como en la presencia de estructuras sedimentarias.

3.3 *Análisis Estructural.* La interpretación de los datos estructurales se realizó basado en el análisis estadístico de discontinuidades mediante la proyección estereográfica de fallas en el Software Dips 5.1 (Rosciense, 2004) y el Software ioGAS. El análisis cinemático de fallas se realizó para determinar los campos de esfuerzos compresivos y distensivos con sus respectivos ejes de esfuerzos mediante la representación de mecanismos focales en el Software FaultKin (Allmendinger, 2017).

La proyección estereográfica de fallas y diaclasas en el hemisferio sur se basó en la proyección plano-polo según Schmidt. La falsilla de Schmidt conserva las distancias entre los datos, lo cual permite el manejo estadístico de mayor cantidad de datos estructurales. A partir de la proyección estereográfica y el análisis estadístico se obtuvieron los diagramas de contorno que indican la dirección preferencial de las discontinuidades basados en la concentración de los polos.

El análisis cinemático de fallas se basó en los modelos de Anderson (1951) para la orientación de los ejes compresivos y distensivos, así como sus campos de esfuerzos respectivos. El análisis cinemático de los ejes de esfuerzo se basó en el modelo de Riedel (1929) para interpretar los campos de esfuerzos y discontinuidades asociadas a las estructuras Riedel (R, R', PF, P) para la zona de estudio.

4. RESULTADOS

4.1 Descripción litológica

4.1.1 Sección Uno. La Sección Uno (UTM zona 17S x:520724 y:9894514) es un afloramiento de roca con aproximadamente 25m de altura y tiene una orientación E-W. Esta sección corresponde a rocas sedimentarias fuertemente meteorizadas, descritas como una secuencia de areniscas de grano grueso a fino, en estratos que van

desde 12cm hasta aproximadamente 1.5m (Figura 5). Los estratos decimétricos corresponden a areniscas limosas de color grisáceo y las areniscas medias de tonalidad beige tienen interestratificación milimétrica de arenas medias a finas. Se destaca también la presencia de recristalización de yeso, pátinas de azufre y estratos milimétricos de lignito.

La primera sección tiene dos plegamientos notables en la plataforma de abrasión, los cuales se encuentran fracturados. Las discontinuidades se refieren a fracturas o planos de debilidad en la roca que pueden influir en su comportamiento mecánico y su respuesta a los esfuerzos tectónicos. Se reconocen tres tipos de discontinuidades representadas por el plano de estratificación S_0 que representa la superficie de contacto entre dos capas de roca que se formaron en un momento determinado ($267^\circ / 12^\circ\text{NW}$) y dos sistemas de diaclasas S_1 y S_2 que representan fracturas que se forman debido a la acción de fuerzas tectónicas y pueden tener diferentes características en ambos plegamientos ($11^\circ / 32^\circ\text{SE}$; $127^\circ / 32^\circ\text{NE}$). La identificación y caracterización de estas discontinuidades es importante para entender la geometría y el comportamiento mecánico de las rocas en la zona de estudio, así como para la planificación y ejecución de proyectos de construcción o de explotación de recursos minerales.



Figura 5. (a) Sinclinal en plataforma de abrasión, (b) falla normal sinistral (----) en la Sección Uno

Los tres sistemas de discontinuidades tienen los siguientes rasgos estructurales: orientación SW-NE y buzamiento hacia el Oeste para el plano S_0 , orientación NE-SW y buzamiento hacia el Este para el plano S_1 y orientación NW-SE con buzamiento hacia el Este para el plano S_2 .

4.1.2 Sección Dos. La Sección Dos (UTM zona 17S x:520516 y:9894575) tiene una orientación NE-SW con un talud de 36m de altura aproximadamente. Afloran rocas

sedimentarias fuertemente meteorizadas con alternancia de estratos con espesores subcentimétricos a decimétricos de areniscas de grano grueso a medio. Esta sección contiene estratos subcentimétricos de arenisca gruesa, estratos decimétricos de areniscas medias limosas de coloración grisáceo oscuro, estratos decimétricos de lutita de tonalidades grisáceo oscuro. Existen estratos métricos de arenisca media en forma masiva de color beige con

presencia de estratos milimétricos de lignito y pátinas de azufre.

En la Sección Dos, los 3 sistemas de discontinuidades, S_0 , S_1 y S_2 poseen orientación SW-NE con buzamiento hacia el Oeste ($244^\circ / 76^\circ\text{NW}$; $232^\circ / 68^\circ$; $233^\circ / 76^\circ$). Se evidencian fallas normales e inversas con orientaciones NW-SE y NE-SW mostrando una cinemática dextral, además de fallas oblicuas al plano del talud (Figura 6).



Figura 6. Fallas planares oblicuas al Talud - Falla en cuña (----) en la Sección Dos

4.1.3 Sección Tres. La Sección Tres (UTM zona 17S x:519971 y:9894418) posee una orientación NE-SW con un talud de 27m de altura aproximadamente. Se observa una secuencia de rocas sedimentarias, estratos de areniscas de grano grueso a fino con espesores centimétricos a decimétricos. En su base se observan estratos centimétricos

de arenisca gruesa masiva con tonalidades beige y grisáceo oscuro, además de estratos decimétricos de arenisca media de color grisáceo oscuro. En la misma sección se aprecian pátinas de azufre y pátinas de oxidación, indicador de zonas de intemperismo.

Los tres sistemas de discontinuidades presentan los siguientes rasgos estructurales: orientación NE-SW y buzamiento hacia al Este para el plano S_0 , orientación NW-SE con buzamiento hacia el Este para el plano S_1 y orientación SW-NE y buzamiento hacia el Oeste para el plano S_2 . Además, existe la orientación NW-SW y buzamiento hacia el Este para S_0 , orientación E-W con buzamiento hacia el Oeste para S_1 , orientaciones SW-NE y N-S con buzamiento al Oeste para S_2 (Figura 7).

En esta sección se evidenciaron diversos tipos de discontinuidades tales como un plegamiento de baja amplitud, plano de estratificación S_0 y dos sistemas ortogonales S_1 y S_2 con una frecuencia de ≤ 43 centímetros en promedio (Tabla 1).

En la Sección Tres se observaron fallas normales e inversas con orientaciones NW-SE y NE-SW mostrando una cinemática dextral y sinistral.

4.1.4 Sección Cuatro. La Sección Cuatro (UTM zona 17S x:519244 y:9894177) posee una orientación E-W con un talud de aproximadamente 55m de altura. Se describe como areniscas de grano fino a grueso fuertemente meteorizadas con alternancia de estratos de espesores decimétricos a métricos. Esta sección está compuesta por estratos centimétricos de arenisca gruesa masiva y estratos métricos de arenisca gruesa masiva levemente meteorizada de coloración beige. Se destaca también la presencia de estratos milimétricos de lignito y conglomerado basal.

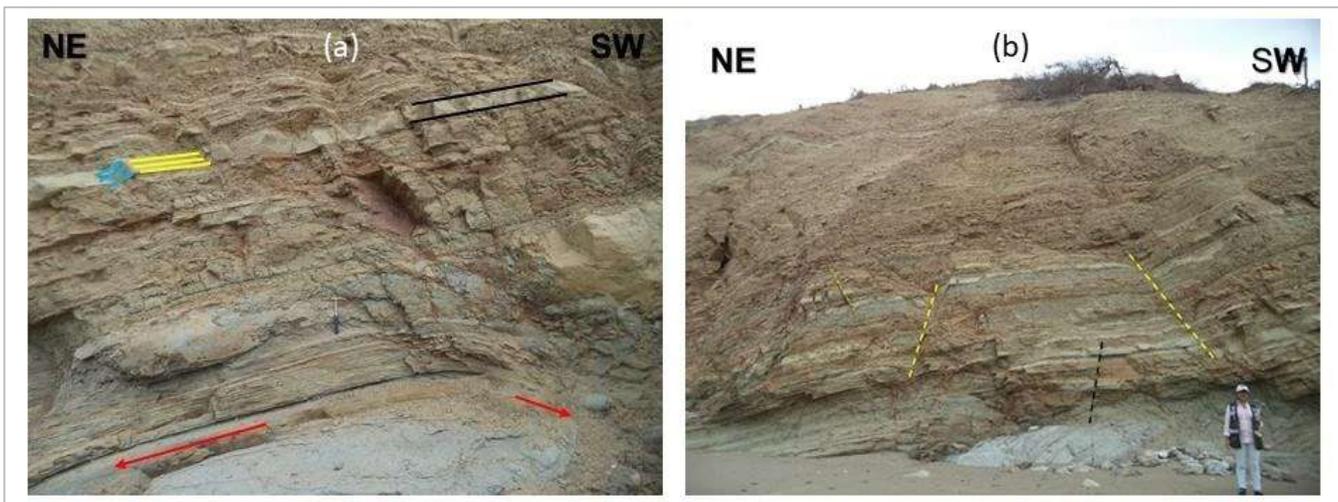


Figura 7. (a) Plano de estratificación S_0 (----), sistema S_1 (----), sistema S_2 (----) y flancos del plegamiento de baja amplitud (\rightarrow) en la Sección 3; (b) fallas normales (----) y falla inversa (----) en la Sección Tres

Tabla 1. Resumen de Sistemas de Diaclasas en la Sección 3

Ubicación		Plano	Strike	Buzamiento
520224	9894553	So	17°	23°SE
		S1	92°	88°SW
		S2	190°	60°NW
520224	9894553	S0	2°	24°SE
		S1	93°	86°SW
		S2	184°	64°NW
520149	9894532	S0	18°	16°SE
		S1	319°	82°NW
		S2	227°	60°SW
520140	9894260	S0	31°	22°SE
		S1	321°	86°NE
		S2	246°	84°NW

En la Sección Cuatro se observan fallas normales e inversas con orientaciones NW-SE y NE-SW, además de fallas oblicuas al plano del talud (Figura 8).



Figura 8. Fallas normales (----) y fallas inversas (----) en la Sección Cuatro

4.2 Descripción petrográfica

La descripción petrográfica se realizó en función de propiedades ópticas de los minerales, para lo cual se

emplearon las muestras MB4 de la Sección 1, MB6 de la Sección 2, MB12 de la Sección 3 y MB14 de la Sección 4. El análisis petrográfico es una herramienta clave en la interpretación de los procesos diagenéticos, los tipos de contactos y los reemplazamientos de minerales en las rocas sedimentarias que permite inferir las condiciones ambientales y tectónicas.

4.2.1 Muestra MB4. En la sección delgada se identifican cuarzo monocristalino y policristalino (75%), micas blancas (5%), feldespatos (5%), fragmentos líticos (5%) y trazas de minerales opacos (10%) (Figura 9). La textura es detrítica con minerales de granulometría entre arena muy fina a fina y aproximadamente 7% de matriz arcillosa de naturaleza microcristalina. En cuanto a los aspectos estructurales, el análisis petrográfico también puede proporcionar información sobre la deformación y la orientación de las estructuras sedimentarias. La orientación de los clastos en una roca puede indicar la dirección del flujo de los sedimentos y la dirección de los esfuerzos tectónicos que deformaron la roca.

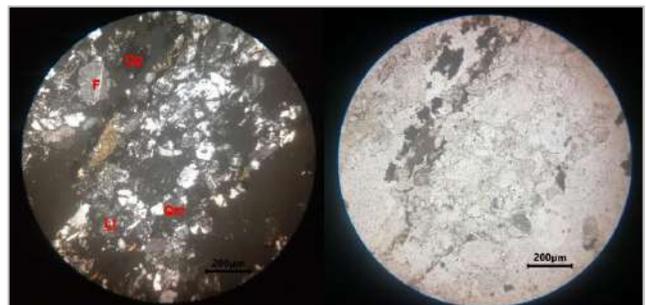


Figura 9. Fotografía en Nícoles Cruzados (Izq.) y Luz Polarizada Plana (Der.) de la muestra MB4

El cuarzo se presenta como granos alotriomorfos y extinción ondulante. Los feldespatos se observan en menor porcentaje, así como cristales alotriomorfos de

birrefringencia baja, usualmente de color gris. El diagrama ternario de clasificación de Folk *et al.* (1970), la roca corresponde a una sublitoarenita. Esta clasificación se basa en la proporción relativa de cuarzo, feldespato y fragmentos líticos, y se utiliza para clasificar areniscas y sublitoarenitas.

4.2.2 Muestra MB6. Petrográficamente, se observa cuarzo monocristalino, biotita, moscovita, sericita, feldespatos y trazas de minerales opacos además de bioclastos (Figura 10). La textura es detrítica con minerales de granulometría de arena muy fina, matriz arcillosa de naturaleza microcristalina con cuarzo. El tamaño y la orientación de los granos minerales en las rocas sedimentarias pueden proporcionar información sobre la intensidad y la dirección de la deformación.

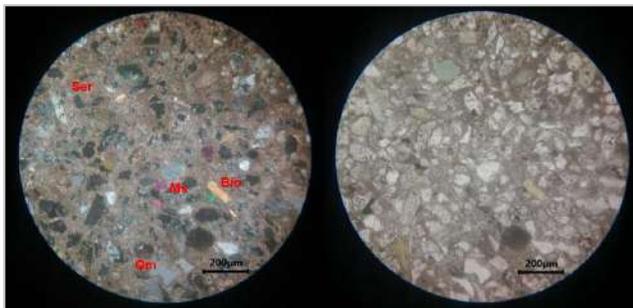


Figura 10. Fotografía en Nícoles Cruzados (Izq.) y Luz Polarizada Plana (Der.) de la muestra MB6

El cuarzo monocristalino predomina con cristales alotriomorfos y extinción ondulante. Los feldespatos son escasos, alotriomorfos a hipidiomorfos y relieve bajo, en algunos casos alterados a sericita. El porcentaje estimado de los componentes esenciales de la arenisca es: cuarzo 60%, sericita 15%, biotita 5%, muscovita 5%, feldespatos 5% y opacos 10%. Según el diagrama ternario de clasificación de Folk *et al.* (1970), la roca corresponde a una subfeldarenita.

4.2.3 Muestra MB12. En descripción petrográfica se identifica cuarzo monocristalino, feldespatos, biotita, moscovita, sericita y trazas de minerales opacos, además de bioclastos (Figura 11). Es importante mencionar que la presencia de bioclastos indica que la roca sedimentaria en cuestión es de origen biogénico, es decir, se formó a partir de restos de organismos. Además de los bioclastos, la presencia de cuarzo monocristalino, feldespatos y minerales opacos sugiere que la roca es de origen clástico, es decir, se formó a partir de la acumulación y compactación de fragmentos de otras rocas preexistentes. La presencia de biotita, moscovita y sericita indica la presencia de minerales arcillosos, lo que sugiere que la roca pudo haber experimentado procesos de alteración hidrotermal. La textura es detrítica, con minerales de granulometría entre

arena muy fina a fina y aproximadamente 15% de matriz arcillosa de naturaleza microcristalina.

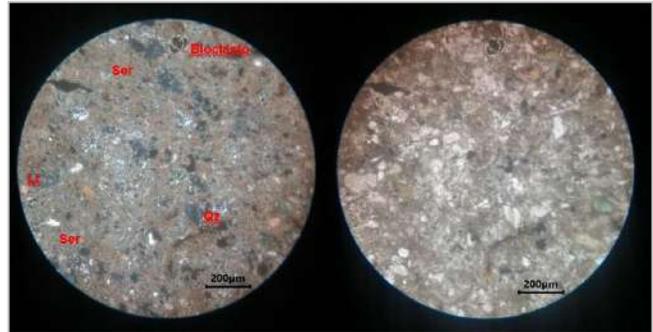


Figura 11. Fotografía en Nícoles Cruzados (Izq.) y Luz Polarizada Plana (Der.) de la muestra MB12

El cuarzo monocristalino se observa como cristales alotriomorfos y extinción ondulante. La biotita es hipidiomorfa, de fuerte birrefringencia y extinción recta. Se observa además moscovita de cristales hipidiomorfos, extinción recta y fuerte birrefringencia. Los valores promedio de los componentes se estiman en: cuarzo 75%, feldespatos 5%, biotita 5%, moscovita 5%, sericita 5% y opacos 5%. Según el diagrama ternario de clasificación de Folk *et al.* (1970), la roca corresponde a una subfeldarenita.

4.2.4 Muestra MB14. Petrográficamente, se observa cuarzo monocristalino y policristalino, biotita, muscovita, feldespatos, fragmentos líticos y trazas de minerales opacos (Figura 12). La textura es detrítica con minerales de granulometría entre arena muy fina a fina y aproximadamente 5% de matriz arcillosa de naturaleza microcristalina. Las tonalidades entre beige y gris oscuro indican que estas areniscas fueron sometidas a procesos de diagénesis, que pueden incluir la compactación y cementación de los granos sedimentarios. La presencia de granos milimétricos de lignito y pirolusita puede indicar la presencia de materia orgánica en el sedimento original, que se ha transformado en lignito por el proceso de diagénesis y ha liberado manganeso en forma de dendritas de pirolusita.

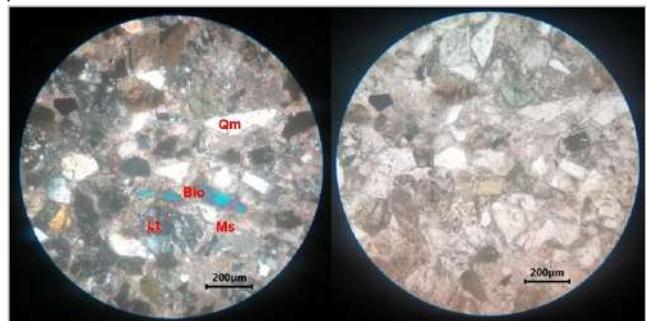


Figura 12. Fotografía en Nícoles Cruzados (Izq.) y Luz Polarizada Plana (Der.) de la muestra MB14

El cuarzo se observa en mayor porcentaje, con cristales alotriomorfos y extinción ondulante, birrefringencia de primer orden y color gris a blanco amarillento. Los feldespatos son escasos, de carácter alotriomorfo a hipidiomorfo, de birrefringencia baja y relieve bajo. La composición mineralógica modal se estima en: cuarzo 70%, biotita 5%, muscovita 5%, feldespatos 10%, fragmentos líticos 5% y opacos 5%. Según el diagrama ternario de clasificación de Folk *et al.* (1970), la roca corresponde a una subfeldarenita (Figura 13).

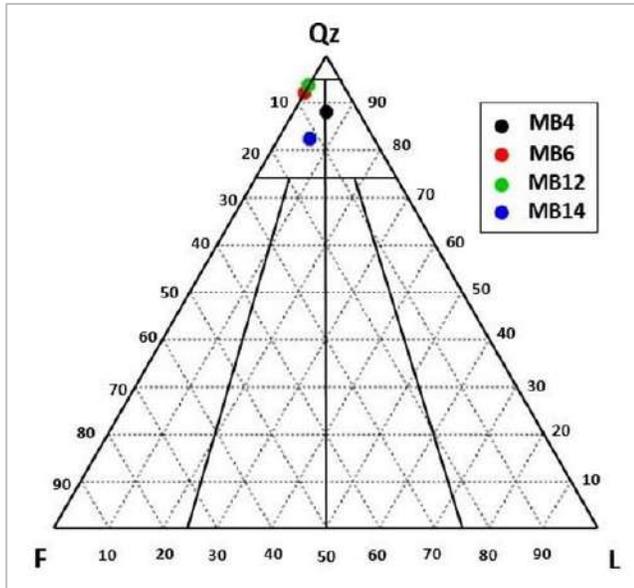


Figura 13. Diagrama de clasificación de areniscas (Folk *et al.*, 1970)

4.3 Análisis Estadístico y Cinemático por sección

El análisis estadístico determinó la mayor concentración de datos estructurales y la dirección preferencial de fallas normales, inversas y transcurrentes, mediante la proyección estereográfica de los datos obtenidos en las diferentes secciones. Se graficaron los datos estructurales de fallas normales, inversas y transcurrentes independientemente para cada sección, con un total de 123 datos de discontinuidades.

4.3.1 Sección Uno. El valor de concentración de datos en la Sección 1 para las fallas normales es 17.56%, fallas inversas 12.47% y falla transcurrente 99.20%. La concentración de datos indica que la falla transcurrente es la más frecuente en esta sección, seguida de las fallas normales y las inversas. Las direcciones preferenciales calculadas son 86°/71°E para las fallas normales, 272°/60°W para las fallas inversas y 228°/85°W para las fallas transcurrentes. Las direcciones preferenciales calculadas para las fallas normales indican que estas fallas tienen un buzamiento hacia el este-noreste y que hubo una tensión de extensión horizontal en dirección E-W y una compresión

vertical. Las Fallas Normales tienen orientación preferencial N-S ± 10° y buzamiento con dirección E-NE. Además, existen fallas con orientación N-S y dirección de buzamiento hacia el Oeste. Se puede interpretar que la presencia de una falla transcurrente con una dirección preferencial 228°/85°W sugiere que los esfuerzos principales estaban orientados en una dirección N-S con un esfuerzo compresivo horizontal y un esfuerzo distensivo vertical. En general, la presencia de fallas normales e inversas indica un régimen tectónico de extensión y compresión en la zona de estudio.

Los campos de esfuerzos de las Fallas Normales están representados por los ejes de esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 . Las orientaciones del campo de esfuerzo compresivo y distensivo están dados por la orientación de los ejes σ_1 y σ_3 respectivamente. Los ejes de esfuerzos son: 356°/ 71°E, 178°/ 48°W, 351°/ 38°E. Las orientaciones de los ejes σ_1 son: 272°, 243°, 288°. Esto indica variabilidad con una media de 267°. Las orientaciones de los ejes σ_3 son: 92°, 94°, 161°. Esto indica variabilidad con una media de 115° (Figura 14).

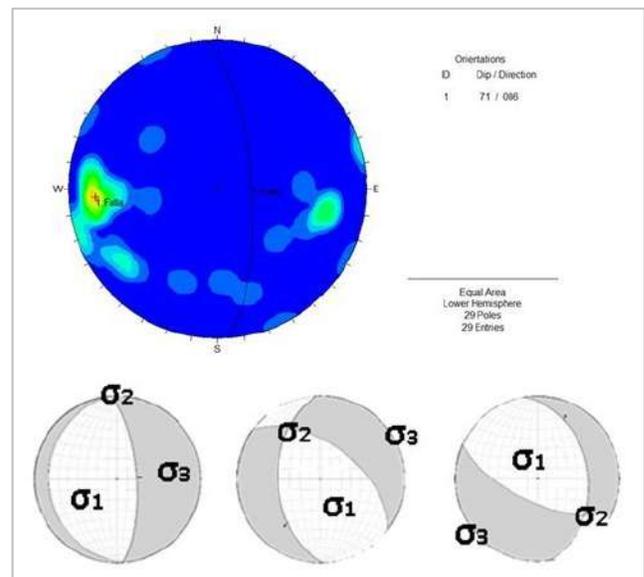


Figura 14. Dirección preferencial y campos de esfuerzos para Fallas Normales en la Sección Uno. Los campos de esfuerzos de las fallas normales están representados por los ejes de esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 . Las orientaciones del campo de esfuerzo compresivo y distensivo están dados por la orientación de los ejes σ_1 y σ_3 respectivamente. La concentración de datos indica que la falla transcurrente es la más frecuente en esta sección, seguida de las fallas normales y las inversas.

Los campos de esfuerzos de las Fallas Inversas están representados por la orientación de los ejes de esfuerzos σ_1 y σ_3 . Los ejes de esfuerzos son: 182°/ 60°W, 164°/ 72°W, 202°/ 48°W. Las orientaciones de los ejes σ_1 son: 266°, 158°, 343°. Esto indica alta variabilidad con una media de 255°. Las orientaciones de los ejes σ_3 son: 86°, 61°, 227°. Esto indica variabilidad con una media de 124° (Figura 15).

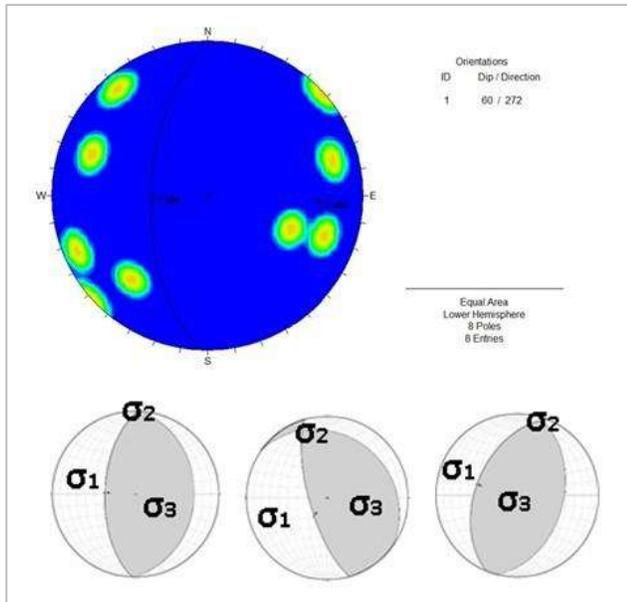


Figura 15. Dirección preferencial y campos de esfuerzos para Fallas Inversas en la Sección Uno. Los campos de esfuerzos de las Fallas Inversas están representados por los ejes de esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 . Las orientaciones del campo de esfuerzo compresivo y distensivo están dados por la orientación de los ejes σ_1 y σ_3 respectivamente. La media de las orientaciones de los ejes σ_1 es 255° y de los ejes σ_3 es 124°

Los ejes de esfuerzos σ_1 y σ_3 para fallamiento transcurrente están orientados 93° y $N3^\circ$ respectivamente (Figura 16).

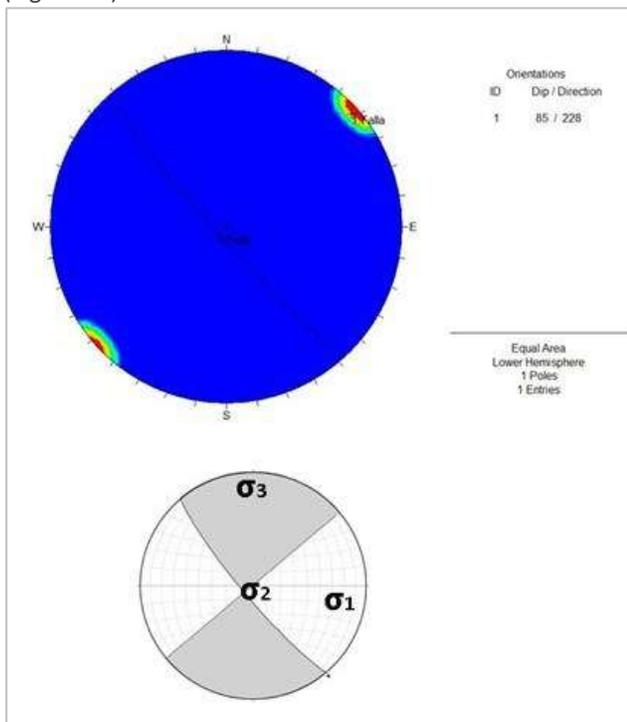


Figura 16. Dirección preferencial y campos de esfuerzos para Falla Transcurrente en la Sección Uno. Los campos de esfuerzos de las Fallas Inversas están representados por los ejes de esfuerzos σ_1 ,

σ_2 y σ_3 . Las orientaciones del campo de esfuerzo compresivo y distensivo están dados por la orientación de los ejes σ_1 y σ_3 respectivamente.

4.3.2 Sección Dos. La distribución porcentual de datos en la Sección Dos para las fallas normales es 9.25% y fallas inversas 48.55%. Las direcciones preferenciales obtenidas para las fallas normales es $250^\circ/53^\circ W$ y fallas inversas $240^\circ/57^\circ W$. Esto sugiere que en la Sección Dos, la deformación estructural predominante está relacionada con fallas inversas, que están orientadas en una dirección WNW-ESE. Además, la presencia de fallas normales sugiere la presencia de procesos de extensión en la región, aunque en menor medida que las fallas inversas. En la Sección 2, se evidencia una mayor concentración de fallas inversas con una dirección preferencial de $240^\circ/57^\circ W$ y una menor concentración de fallas normales con una dirección preferencial de $250^\circ/53^\circ W$. Los ejes de esfuerzos están orientados en dirección N-S con un esfuerzo compresivo horizontal y un esfuerzo distensivo vertical. Esto sugiere que hubo una compresión horizontal en dirección E-W y una extensión vertical.

Las Fallas Normales presentan tres grupos de discontinuidades: (1) orientación NW-SE y buzamiento con dirección Oeste; (2,3) orientación NE-SW y N-S con dirección de buzamiento al Este. Los campos de esfuerzos de las Fallas Normales están representados por la orientación de los ejes de esfuerzos σ_1 y σ_3 . Los ejes de esfuerzos son: $340^\circ/53^\circ W$, $43^\circ/52^\circ E$, $1^\circ/39^\circ E$. Las orientaciones de los ejes σ_1 son: 250° , 335° , 341° . Esto indica una alta variabilidad en la dirección de esfuerzos máximos con una media de 309° . Las orientaciones de los ejes σ_3 son: 70° , 130° , 226° . Esto indica una variabilidad en la dirección de esfuerzos mínimos con una media de 142° . En general, se puede inferir que la zona estudiada presenta una alta variabilidad en la dirección de los esfuerzos máximos y mínimos, lo que sugiere la presencia de un régimen tectónico complejo y variable en el tiempo. (Figura 17).

La Falla Inversa posee orientación NW-SE y buzamiento con dirección Oeste. Los ejes de esfuerzos σ_1 y σ_3 para fallamiento inverso están orientados $N60^\circ$ y $N240^\circ$ respectivamente (Figura 18).

4.3.3 Sección Tres. El valor de concentración de datos en la Sección 3 para las fallas normales es 23.68%, fallas inversas 33.11% y falla transcurrente 64.56%. Las direcciones preferenciales calculadas son $N50^\circ/84^\circ E$ para las fallas normales, $N123^\circ/51^\circ E$ para las fallas inversas y $N186^\circ/84^\circ W$ para las fallas transcurrentes.

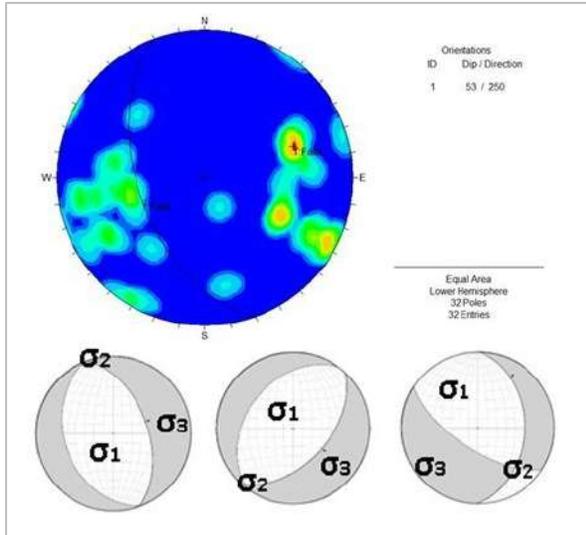


Figura 17. Dirección preferencial y campos de esfuerzos para Fallas Normales en la Sección Dos. Los campos de esfuerzos de las Fallas Inversas están representados por los ejes de esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 . Las orientaciones del campo de esfuerzo compresivo y distensivo están dados por la orientación de los ejes σ_1 y σ_3 respectivamente. La media de las orientaciones de los ejes σ_1 es 309° y de los ejes σ_3 es 142° .

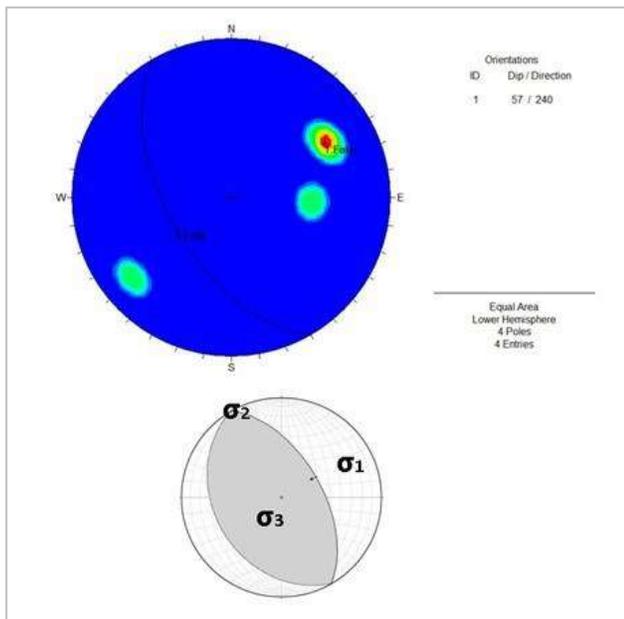


Figura 18. Dirección preferencial y campos de esfuerzos para Fallas Inversas en la Sección Dos. Los campos de esfuerzos de las Fallas Inversas están representados por los ejes de esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 . Las orientaciones del campo de esfuerzo compresivo y distensivo están dados por la orientación de los ejes σ_1 y σ_3 respectivamente.

Las Fallas Normales presentan cuatro grupos de discontinuidades: (1) orientación NW-SE y buzamiento con dirección Este, (2) orientación NE-SW con dirección de buzamiento Este, (3) orientación E-W y buzamiento Sur y (4) orientación N-S con dirección de buzamiento Oeste.

Los campos de esfuerzos de las Fallas Normales están representados por la orientación de los ejes de esfuerzos σ_1 y σ_3 . Los ejes de esfuerzos son: $320^\circ / 84^\circ W$, $12^\circ / 42^\circ E$, $91^\circ / 46^\circ E$, $182^\circ / 58^\circ W$. Las orientaciones de los ejes σ_1 son: 230° , 4° , 92° , 92° . Esto indica una alta variabilidad en la dirección de esfuerzos máximos con una media de 104° . Las orientaciones de los ejes σ_3 son: 50° , 256° , 272° , 272° . Esto indica una variabilidad en la dirección de esfuerzos mínimos con una media de 212° (Figura 19).

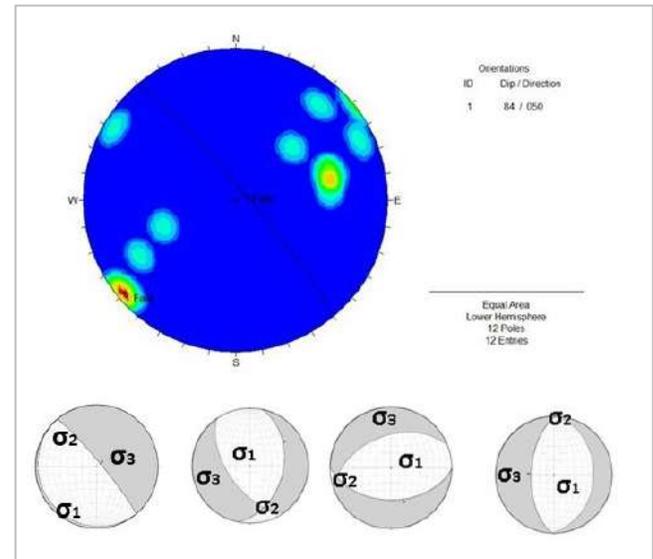


Figura 19. Dirección preferencial y campos de esfuerzos para Fallas Normales en la Sección Tres. Los campos de esfuerzos de las Fallas Inversas están representados por los ejes de esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 . Las orientaciones del campo de esfuerzo compresivo y distensivo están dados por la orientación de los ejes σ_1 y σ_3 respectivamente. La media de las orientaciones de los ejes σ_1 es 104° y de los ejes σ_3 es 212° .

Las Fallas Inversas tienen orientación preferencial NE-SW y buzamiento con dirección Este, además de fallas con orientación NW-SE y dirección de buzamiento Este. Los campos de esfuerzos de las están representados por la orientación de los ejes de esfuerzos σ_1 y σ_3 (Figura 20). Los ejes de esfuerzos son: $212^\circ / 51^\circ E$, $35^\circ / 58^\circ E$, $32^\circ / 47^\circ E$. Las orientaciones de los ejes σ_1 son: 303° , 112° , 125° . Esto indica una alta variabilidad en la dirección de esfuerzos máximos con una media de 180° . Las orientaciones de los ejes σ_3 son: 123° , 347° , 248° . Esto indica una variabilidad en la dirección de esfuerzos mínimos con una media de 239° .

Las Fallas Transcurrentes poseen orientación preferencial tentativamente E-W y buzamiento con dirección S-W. Además, existen fallas con orientación NW-SE y dirección de buzamiento Este. Los campos de esfuerzos están representados por la orientación de los ejes de esfuerzos σ_1 y σ_3 . Los ejes de esfuerzos son: $284^\circ / 70^\circ E$, $95^\circ / 82^\circ W$, $99^\circ / 86^\circ W$. Las orientaciones de los ejes σ_1 son: 149° , 320° , 54° . Esto indica una alta variabilidad en la dirección de

esfuerzos máximos con una media de 174°. Las orientaciones de los ejes σ_3 son: 242°, 51°, 324°. Esto indica una variabilidad en la dirección de esfuerzos mínimos con una media de 206° (Figura 21).

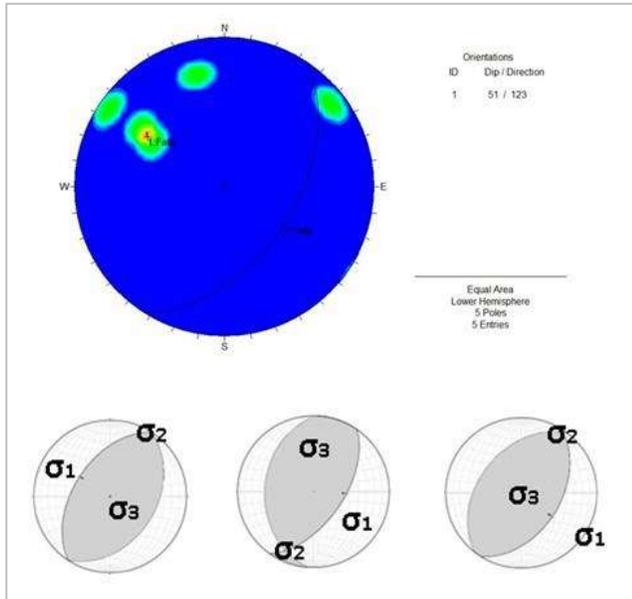


Figura 20. Dirección preferencial y campos de esfuerzos para Fallas Inversas en la Sección Tres. Los campos de esfuerzos de las Fallas Inversas están representados por los ejes de esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 . Las orientaciones del campo de esfuerzo compresivo y distensivo están dados por la orientación de los ejes σ_1 y σ_3 respectivamente. La media de las orientaciones de los ejes σ_1 es 180° y de los ejes σ_3 es 239°.

4.3.4 Sección Cuatro. La distribución porcentual de datos en la Sección 4 para las fallas normales es 19.98% y fallas inversas 33.52%. La dirección preferencial obtenida es N274°/45°W para las fallas normales.

La Falla Normal tiene orientación tentativamente N-S y buzamiento con dirección Oeste. Los ejes de esfuerzos σ_1 y σ_3 para fallamiento normal están orientados N270° y N274° respectivamente (Figura 22).

Las Fallas Inversas presentan tres grupos de discontinuidades: (1) orientación tentativamente N-S y buzamiento con dirección Oeste, (2) orientación NW-SE y dirección de buzamiento Este, (3) orientación SW-NE con dirección de buzamiento Oeste. Los campos de esfuerzos están representados por la orientación de los ejes de esfuerzos σ_1 y σ_3 . Los ejes de esfuerzos son: 185°/ 88°W, 302°/ 68°W, 195°/ 52°W. Las orientaciones de los ejes σ_1 son: 275°, 32°, 285°. Esto indica una alta variabilidad en la dirección de esfuerzos máximos con una media de 197°. Las orientaciones de los ejes σ_3 son: 95°, 212°, 105°. Esto indica una variabilidad en la dirección de esfuerzos mínimos con una media de 137° (Figura 23).

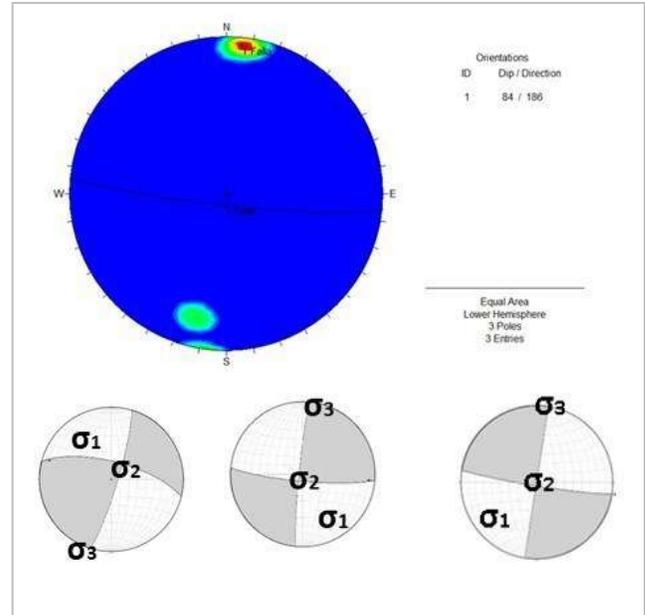


Figura 21. Dirección preferencial y campos de esfuerzos para Fallas Transcurrentes en la Sección Tres. Los campos de esfuerzos de las Fallas Inversas están representados por los ejes de esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 . Las orientaciones del campo de esfuerzo compresivo y distensivo están dados por la orientación de los ejes σ_1 y σ_3 respectivamente. La media de las orientaciones de los ejes σ_1 es 174° y de los ejes σ_3 es 206°.

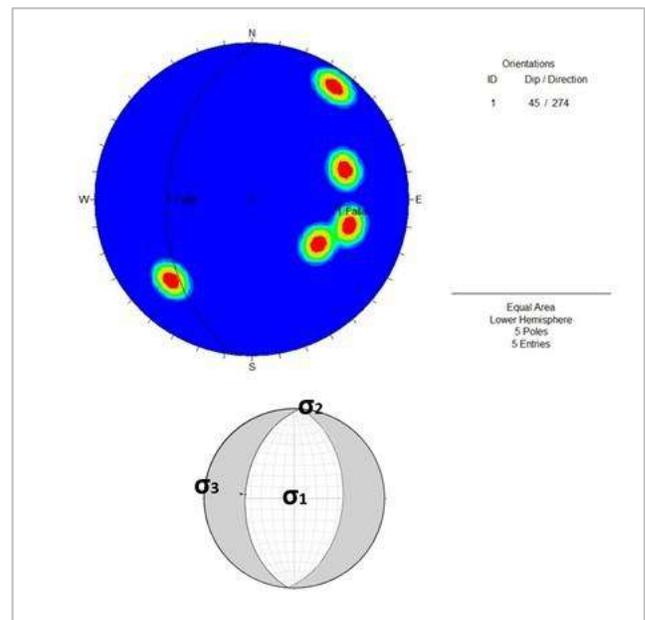


Figura 22. Dirección preferencial y campos de esfuerzos para Fallas Normales en la Sección Cuatro. Los campos de esfuerzos de las Fallas Inversas están representados por los ejes de esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 . Las orientaciones del campo de esfuerzo compresivo y distensivo están dados por la orientación de los ejes σ_1 y σ_3 respectivamente.

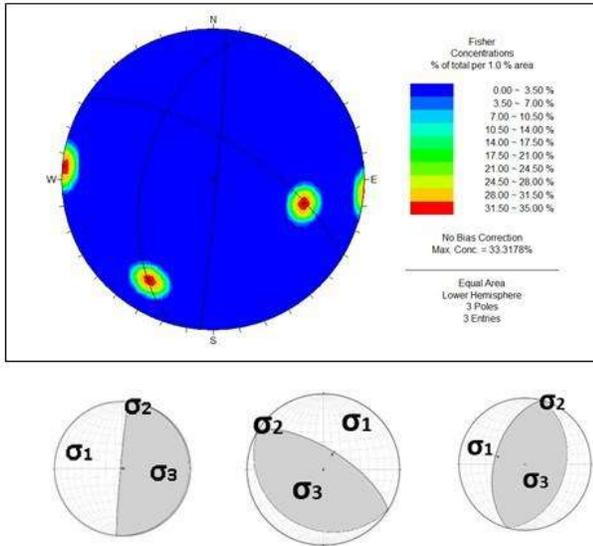


Figura 23. Distribución porcentual de datos y campos de esfuerzos para Fallas Inversas en la Sección Cuatro. Los campos de esfuerzos de las Fallas Inversas están representados por los ejes de esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 . Las orientaciones del campo de esfuerzo compresivo y distensivo están dados por la orientación de los ejes σ_1 y σ_3 respectivamente. La media de las orientaciones de los ejes σ_1 es 197° y de los ejes σ_3 es 137° .

4.4 Análisis Estadístico y Cinemático por evento de deformación

Se obtiene como resultado de los controles estructurales, dos eventos estructurales que tienen un buzamiento alto y con orientación NNE-SSO y con orientación NNO-SSE. El buzamiento para ambos eventos varía entre 87.9 y 89.8 (Figura 24). El hecho de que ambas fallas tengan un buzamiento cercano a la vertical sugiere que la deformación en la zona ha sido muy intensa y que es posible que haya ocurrido un importante levantamiento de la zona. El acimut para el primer grupo de 48 datos estructurales representa 339.2° , mientras que para el segundo grupo de 40 datos estructurales 18.9° . Es importante tener en cuenta que estos resultados para obtener una comprensión más completa de la historia geológica de la zona estudiada.

El gráfico de Roseta es una herramienta para visualizar la distribución de datos en diferentes direcciones. Para las fallas normales, el eje principal (σ_1) suele estar en la dirección vertical y el eje menor (σ_3) en la dirección

horizontal. Las fallas normales se caracterizan por tener un plano inclinado hacia la dirección del esfuerzo principal (σ_1) y por la separación vertical de los bloques.

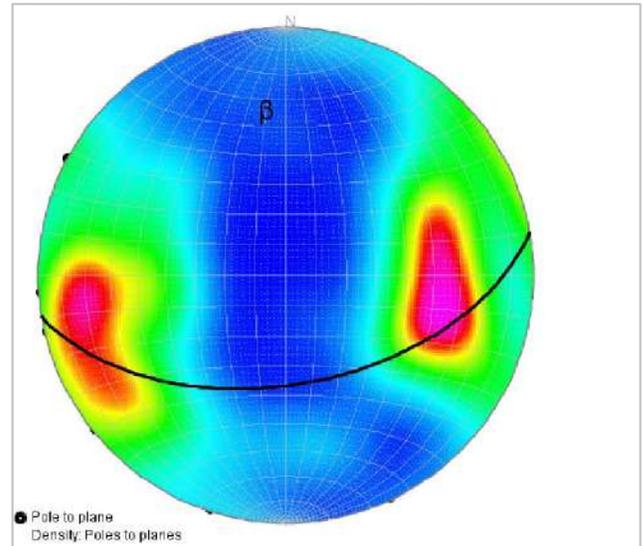


Figura 24. Stereonet de las fallas normales e inversas de la Península de Manta. En el stereonet, las estructuras se representan mediante un sistema de coordenadas polares, donde la dirección de la estructura se representa mediante un ángulo y su buzamiento se representa mediante una distancia desde el centro de la esfera.

Por lo tanto, en el diagrama de Rosetas, las orientaciones de las fallas normales se agruparán alrededor del eje vertical. Por otro lado, las fallas inversas se caracterizan por tener un plano inclinado en la dirección opuesta al esfuerzo principal (σ_1) y por la superposición vertical de los bloques. En el diagrama de Rosetas, las orientaciones de las fallas inversas se agruparán alrededor del eje horizontal.

El primer evento estructural con régimen compresional se encuentra definido por la orientación NNO-SSE. El fracturamiento principal tiene un rango entre 340° - 360° (Figura 25a). El segundo evento estructural con régimen extensional se encuentra definido por la orientación NNE-SSO. El fracturamiento principal tiene un rango entre 20° - 40° (Figura 25b). Es importante tener en cuenta que los datos estructurales obtenidos en la roca pueden ser útiles para comprender la deformación y la historia tectónica de la zona de estudio.

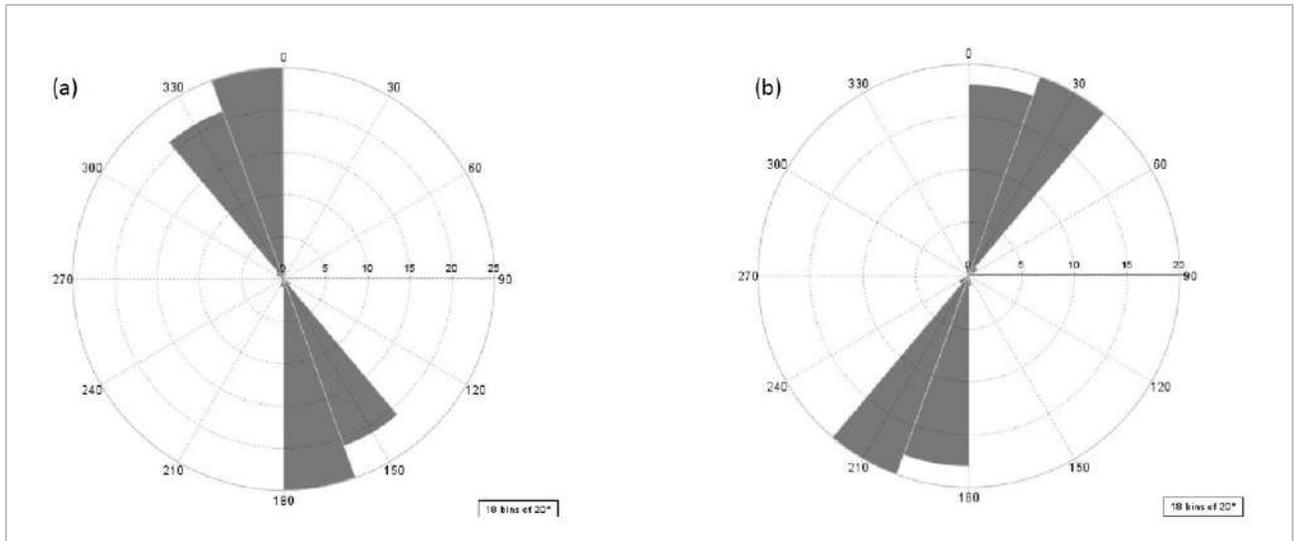


Figura 25. Diagramas de Rosetas para las fallas normales e inversas en la Península de Manta. En este diagrama se utiliza un círculo que representa una sección transversal de una muestra de roca y se marca la orientación de las discontinuidades en la roca. El eje horizontal del círculo representa la dirección perpendicular al plano de la falla, mientras que el eje vertical representa la dirección paralela al plano de la falla

La Estadística de Bingham se utiliza a menudo para analizar la distribución de orientaciones de diaclasas y otros planos de fractura en una roca. Las diaclasas tienen un buzamiento de 84.0° lo que indica que son casi verticales y un rumbo de 148.8° lo que indica que se extienden en una dirección aproximadamente noroeste-sureste. Las 18 muestras tienen un acimut de 58.8° y un cabeceo de 6.0° usando la Estadística de Bingham. Esto indica que las diaclasas están orientadas en gran medida en una dirección aproximadamente este-oeste. La mayor densidad de datos se encuentra en un área con un rumbo de 194.7° y un buzamiento de 70.2° (Figura 26a). La segunda área con densidad de datos se encuentra en un área con un rumbo de 59.3° y un buzamiento de 17.3° . Esto indica que hay otra zona donde las diaclasas están relativamente concentradas.

El gráfico de Roseta se utiliza para mostrar la dirección preferencial de las diaclasas. En este caso, se muestra claramente la dirección N-S en un rango de 0.0-20.0 en las diaclasas lo cual indica que la mayoría de las diaclasas se orientan en esa dirección con un acimut cercano al nort-sur (Figura 26b). En la segunda dirección preferencial, se muestra los rangos de 40.0-60.0 y de 80.0-100.0. En la tercera dirección preferencial, se muestra los rangos de 60.0-80.0 y de 120.0-140.0. En la segunda y tercera dirección preferencial, se observa una distribución en dos rangos de orientación diferentes, lo que puede indicar la presencia de dos conjuntos de diaclasas. El gráfico de Roseta permite identificar patrones de orientación en los datos de las diaclasas y proporciona información importante sobre la deformación y fracturamiento de la roca.

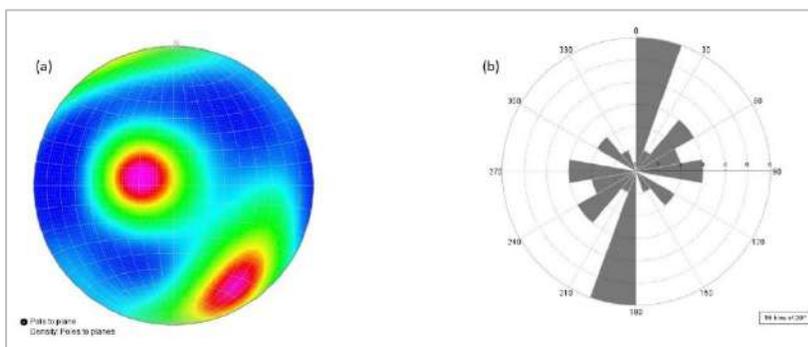


Figura 26. a) Stereonet de las diaclasas, b) Diagrama de Rosetas de las diaclasas de la Península de Manta. En el stereonet, las estructuras se representan mediante un sistema de coordenadas polares, donde la dirección de la estructura se representa mediante un ángulo y su buzamiento se representa mediante una distancia desde el centro de la esfera.

5. Discusión

Los márgenes convexos son zonas de convergencia de placas tectónicas donde ocurre subducción, es decir, donde una placa oceánica se hunde debajo de otra placa, típicamente de tipo continental. En la zona de subducción de las Marianas, se presenta una cuenca de trasarco detrás del arco volcánico, lo cual es contrario al modelo de esfuerzos compresivos que se espera en un margen convexo convexo (Bonnardot et al. 2008). La topografía de las Marianas está influenciada por los esfuerzos inducidos por la subducción del manto viscoso, y las cuencas de trasarco son controladas principalmente por el flujo convectivo del manto (Sdrolias & Muller 2006). Es importante destacar que los procesos tectónicos en las zonas de subducción son muy complejos y están influenciados por múltiples factores, por lo que no siempre se observa un comportamiento tectónico uniforme. Sin embargo, se ha observado una zona de arco y antearco que se encuentra sujeta a una convergencia ortogonal (Stern & Smoot 1998). Por lo tanto, los esfuerzos compresivos y distensivos en la Península de Manta se calcularon mediante el diagrama de Rosetas en el que la orientación NO-SE representa al esfuerzo principal (σ_1) mientras que la orientación NE-SO representa el esfuerzo menor (σ_3), respectivamente.

La presencia de una colisión entre dos placas tectónicas y la formación de una cordillera en la zona de subducción son características comunes en muchos márgenes convergentes. En el caso de la Península de Manta, la colisión con la Cordillera de Carnegie ha generado un margen cóncavo hacia el Océano Pacífico (Collot et al. 1989). Además, se ha observado un levantamiento tectónico a lo largo del Arco Talara en una extensión de 1000 km de la costa ecuatoriana y norte de Perú. La tasa de levantamiento en la Península de Manta es de 0.42 mm/yr (Pedoja et al. 2006), lo que indica una actividad tectónica significativa en la región. Estos autores también realizaron dataciones geomorfológicas de terrazas Cuaternarias con una edad de 187 ± 3.7 ka, lo que sugiere que la actividad tectónica en la región ha estado ocurriendo durante un largo período de tiempo.

El Modelo de Esfuerzos de Anderson establece que el régimen tectónico está controlado por tres tipos de esfuerzos principales: esfuerzo compresivo (σ_1), esfuerzo de cizalla (σ_2) y esfuerzo extensional (σ_3). En el caso del área de estudio, el régimen tectónico corresponde a un sistema distensivo, lo que implica que el esfuerzo principal σ_3 es mayor que los otros dos esfuerzos principales (σ_1 y σ_2). Este tipo de régimen tectónico se asocia a la formación de fallas normales y sistemas de rift. De modo similar, la falla Jama tiene un componente dextral con fallamiento transcurrente

con dirección 45° NE-SO. El 77.24% de discontinuidades corresponden a fallas de tipo normal con componente transcurrente.

La presencia de fallas normales con componente transcurrente (movimiento horizontal y de cizalla) indica que el régimen tectónico predominante en la zona es de extensión. La falla Jama, en particular, presenta un componente dextral que puede estar relacionado con la acomodación de la deformación en una zona de fallamiento transcurrente, donde la placa continental se desplaza en dirección NE-SO. Este tipo de fallamiento puede ser común en zonas donde dos placas continentales se desplazan en sentido contrario, generando una zona de deformación compleja y con múltiples tipos de fallamiento.

La dirección del eje de esfuerzo principal (σ_1) para el área de estudio está orientado en dirección NW-SE. Esto sugiere que los campos de esfuerzos en el área son compresivos en la misma dirección. La orientación de σ_1 está influenciada por la zona de subducción y la convergencia de las placas Nazca y Bloque Norandino en dirección E-W $\pm 10^\circ$. Además, la falla Montecristi tiene una dirección O-E en la Península de Manta, lo cual puede tener relación con el campo de esfuerzos presente en la zona (DGGM 1970).

La orientación del eje de esfuerzo menor (σ_3) sugieren campos de esfuerzos distensivos en las direcciones NE-SW y NW-SE. El eje de esfuerzo σ_3 corresponde al régimen distensivo del área de estudio representadas por su fallamiento normal. La orientación preferencial de las discontinuidades existentes en el área de estudio corresponde tentativamente a las roturas propuestas en el modelo de Riedel. Por último, la falla Portoviejo tiene una dirección 20° NE-SO.

La orientación del eje de esfuerzo menor (σ_3) sugiere un régimen distensivo en las direcciones NE-SW y NW-SE, lo que es consistente con la presencia de fallas normales en el área de estudio. La orientación preferencial de las discontinuidades en el área de estudio se puede identificar tentativamente utilizando el modelo de Riedel, que permite describir la geometría y la distribución de las fallas asociadas a esfuerzos tectónicos. En cuanto a la falla Portoviejo, su dirección de 20° NE-SO sugiere que está orientada en la misma dirección que los campos de esfuerzos distensivos en las direcciones 20° NE-SO y NO-SE (DGGM 1970).

El análisis de mecanismos focales de fallas implica la medición y la interpretación de datos geológicos y sísmicos, incluyendo la dirección y la amplitud del desplazamiento, la orientación de las fracturas, la orientación de los planos de falla y la dirección del esfuerzo principal. Los mecanismos focales se pueden representar gráficamente en un diagrama llamado "focal sphere", que representa la esfera terrestre y muestra la orientación de la fuerza principal y los planos de falla (Figura 27)

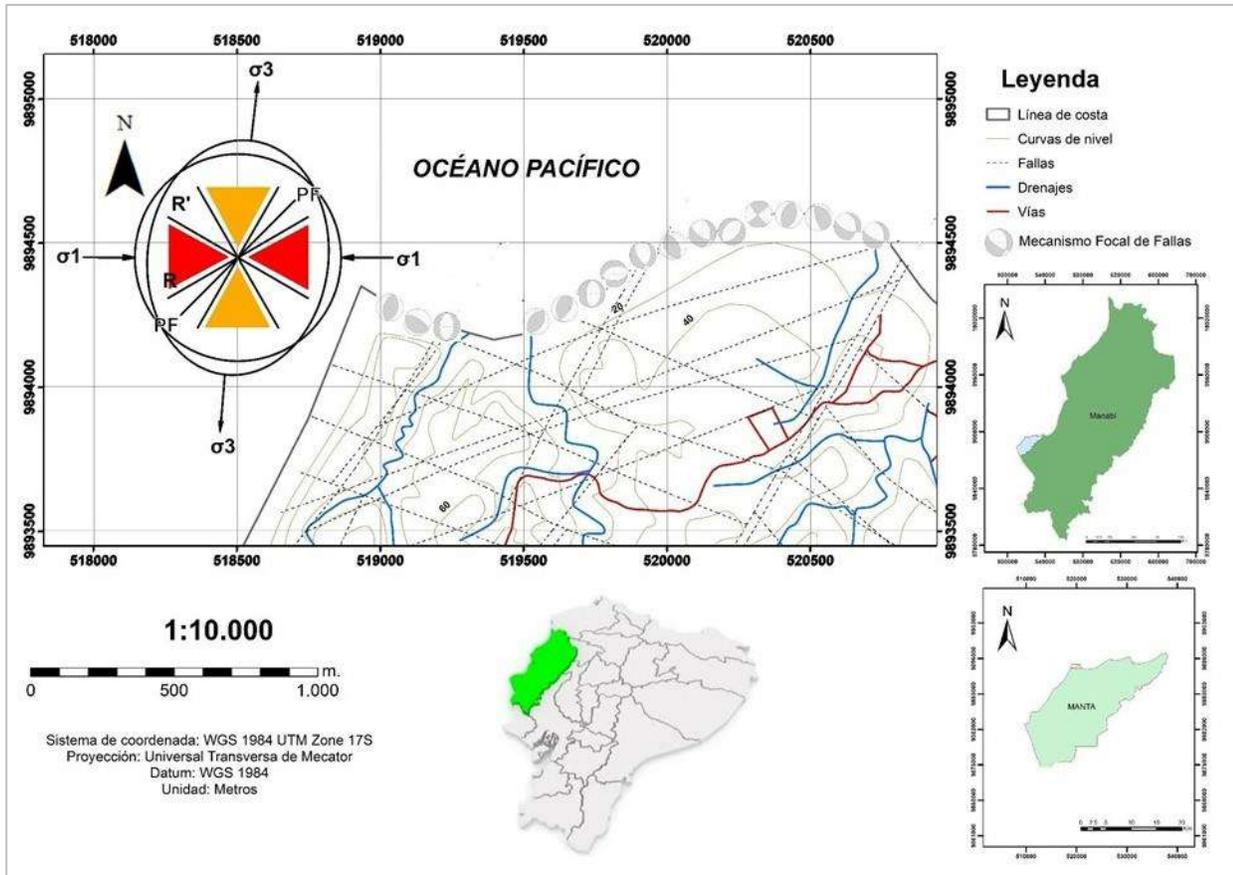


Figura 27. Mecanismos focales del área de estudio que se utilizan para identificar las direcciones y los regímenes de esfuerzos tectónicos para comprender la historia tectónica.

6. CONCLUSIONS

El reconocimiento del área de estudio permitió seleccionar cuatro afloramientos denominados como Sección 1, Sección 2, Sección 3 y Sección 4 con una distancia de 300 metros aproximadamente. Las orientaciones fueron E-W para las secciones 1 y 4 y NE-SW para las secciones 2 y 3.

La presencia de una secuencia de areniscas de grano muy fino a grueso en estratos milimétricos a métricos sugiere que estas rocas fueron depositadas en un ambiente sedimentario fluvial o deltaico. Las tonalidades entre beige y gris oscuro indican que estas areniscas fueron sometidas a procesos de diagénesis, que pueden incluir la compactación y cementación de los granos sedimentarios. La presencia de pátinas de oxidación y de azufre sugieren que estas rocas estuvieron expuestas a la meteorización durante algún tiempo antes de ser enterradas y litificadas. La presencia de granos milimétricos de lignito y pirolusita puede indicar la presencia de materia orgánica en el sedimento original, que se ha transformado en lignito por el proceso de diagénesis y ha liberado manganeso en forma de dendritas de pirolusita.

La clasificación petrográfica mediante el diagrama ternario de Folk et al. (1970) se basa en la proporción de los componentes principales de las rocas sedimentarias, incluyendo cuarzo, feldespatos y líticas. Se clasificó a las muestras MB6, MB12, MB14 como subfeldarenita que se define por su contenido de relación de cuarzo > feldespatos > líticas. Por otro lado, la muestra MB4 se clasificó como una sublitoarenita que se define como una arenisca en la que la proporción de cuarzo está entre el 75 y el 95% respecto al total de elementos terrígenos y la relación de feldespatos a fragmentos de otras rocas es menor que 1. Por lo tanto, en base a la clasificación petrográfica realizada mediante el diagrama ternario de Folk et al. (1970), las muestras MB6, MB12 y MB14 presentan una composición predominantemente cuarzo-feldespática. Mientras que la muestra MB4 presenta una composición predominantemente cuarzo-lítica.

La orientación de los esfuerzos principales (σ_1) en dirección NO-SE sugiere campos de esfuerzos compresivos en esa dirección. Mientras que la orientación del esfuerzo menor (σ_3) en dirección NE-SO sugiere campos de esfuerzos distensivos en esa dirección. Además, el alto porcentaje (77.24%) de fallas de tipo normal con componente

transcurrente indica que la extensión de la corteza terrestre se está produciendo en esa dirección. Estos datos son consistentes con el régimen tectónico de sistemas distensivos asociados a fallamiento transcurrente identificado mediante el Modelo de Esfuerzos de Anderson en el área de estudio.

El buzamiento alto de los eventos estructurales (entre 87.9° y 89.8°) sugiere un régimen tectónico de compresión en la dirección N-S, lo que es consistente con la orientación del eje de esfuerzo principal (σ_1) en el área de estudio. Además, la presencia de fallas normales con componente transcurrente sugiere que la corteza terrestre en la zona está siendo sometida a esfuerzos de extensión en la dirección NNE-SSO y NNO-SSE, lo que también es compatible con la orientación del eje de esfuerzo menor (σ_3) en la zona.

Los resultados del análisis cinemático sugieren que el área de estudio ha experimentado una compleja historia tectónica que involucra tanto esfuerzos compresivos como distensivos en diferentes direcciones. Los esfuerzos compresivos de dirección O-E, SO-NE son consistentes con la presencia de procesos subductivos relacionados con la convergencia de las placas Nazca y Bloque Norandino. Por otro lado, los esfuerzos distensivos de dirección O-E, SO-NE, NO-SE pueden ser el resultado de la intermitencia en los procesos tectónicos, que generan estructuras distensivas en campos de esfuerzos compresivos. Es importante destacar que la complejidad de la historia tectónica en el área de estudio puede estar influenciada por la presencia del sistema transcurrente dextral, que puede actuar como una fuerza tectónica adicional que afecta la orientación y distribución de los esfuerzos en el área.

Es posible que la falla Jama esté asociada al sistema transcurrente dextral mencionado previamente en el análisis cinemático de los datos estructurales. Dado que la falla tiene un componente dextral con fallamiento transcurrente, es posible que esté actuando como una zona de cizalla en la que la deformación se produce principalmente por desplazamiento horizontal en dirección de aproximadamente 40° NE-SO. Esto sugiere que la falla Jama puede ser un elemento importante en el sistema tectónico regional y que podría estar contribuyendo a la deformación en el área de estudio.

REFERENCIAS

- Bonnardot, M.-A., Hassani, R., Tric, E., Ruellan, E. and Régnier, M., 2008. Effect of margin curvature on plate deformation in a 3-D numerical model of subduction. *Geophysical Journal International*, 173(3): 1084-1094.
- Chacón, D. (2018). *Geología del Cuaternario de la Ciudad de Portoviejo y su Zona de Influencia (escala 1:20000)* (tesis de grado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Chunga, K. (2013). Análisis estructural de fallas geológicas y potenciales deslizamientos en Anconcito, provincia de Santa Elena. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 1(2):39-46.
- Chunga, K., Livio, F. A., Martillo, C., Lara-Saavedra, H., Ferrario, M. F., Zevallos, I., & Michetti, A. M. (2019). Landslides triggered by the 2016 Mw 7.8 Pedernales, Ecuador earthquake: Correlations with ESI-07 intensity, lithology, slope and PGA-h. *Geosciences*, 9(9), 371.
- Chunga, K., Michetti, A.M., Mulas, M., Besenon, D., Livio, F., Ferrario, M.F., Garcés, D., Ochoa, F., (2017). Intensidad microsísmica ESI-07 y efectos geológicos del terremoto de Pedernales del 16.04.2016 (Mw 7.8). *VIII Jornadas en Ciencias de la Tierra, Quito*, 8(14):207-211.
- Collot, J. Y., Pelletier, B. E., Boulin, J., Daniel, J., Eissen, J. P., Fischer, M. A. & Monzier, M. (1989). Premiers résultats des plongées de la campagne SUBPSO 1 dans la zone de collision des rides d'Entrecasteaux et de l'arc des Nouvelles-Hébrides. *Comptes Rendus de L'Académie des Sciences*, Paris, Série B, 309, 1947-1954.
- Contreras, F. (1990). *Estudio estratigráfico detallado de la Formación San Mateo en la localidad Tipo, Manabí – Ecuador* (tesis de grado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Coronel J. (2001). *Análisis de morfoestructuras en imágenes radar, fotos aéreas, red de drenaje y modelos numéricos para la observación de deformaciones de una margen activa: Ejemplo de Manta* (tesis de grado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Daly, M. C. (1989). Correlations between Nazca/Farallon plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador. *Tectonics*, 8(4): 769-790.
- DGGM, 1970. Mapa Geológico Detallado del Ecuador, hoja Montecristi. *Ministerio de Recursos Naturales y Turismo*, Quito.
- Doblas, M., Mahecha, V., y Hoyos, M. (1997). Slickenside and fault surface kinematic indicators on active normal faults of the Alpine Betic cordilleras, Granada, southern Spain. *Journal of Structural Geology*, 19(2):159-170.
- Dumont, J. F., Santana, E., Bonnardot, M. A., Pazmiño, N., Pedoja, K., & Scalabrino, B. (2014). Geometry of the coastline and morphology of the convergent continental margin of Ecuador. *Geological Society, London, Memoirs*, 41(1), 327-338.
- Egüez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Machette, M. N., Costa, C., Dart, R. L., & Bradley, L. A. (2003). Database and map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions. *US Geological Survey Open-File Report*, 3, 289.

- Félix, L., (2017). *Geocronología de la Formación Cayo (K2) en Cerro Guayabal Provincia de Manabí* (tesis de grado). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Gutscher, M. A., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J. Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(3-4): 255-270.
- Husson, L. (2006). Dynamic topography above retreating subduction zones. *Geology*, 34(9), 741-744.
- Hernández, M. (2012). *El Sistema de Fallas de Jama en La Plataforma Continental (off-shore) del Margen Ecuatoriano* (tesis de grado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Jaillard, É., Ordoñez, M., Benítez, S., Berrones, G., Jiménez, N., Montenegro, G., y Zambrano, I. (1995). Basin development in an accretionary, oceanic-floored fore-arc setting: southern coastal Ecuador during late Cretaceous-late Eocene time, En: Tankard, A. J., Suárez, R. y Welsink, H. J. Petroleum basins of South America: *AAPG Memoir* 62:615-631.
- Laínez, G. (2009). *Relevamiento y correlación geológica del sector oriental del Puerto de Manta, provincia de Manabí, Ecuador* (tesis de grado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Nocquet, J. M., Mothes, P., & Alvarado, A. (2009). Geodesia, geodinámica y ciclo sísmico en Ecuador. *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador*, 83-95.
- Núñez del Arco, E. (2003). *Geología del Ecuador*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL Guayaquil.
- Pedoja, K., Dumont, J. F., Lamothe, M., Ortlieb, L., Collot, J. Y., Ghaleb, B. & Labrousse, B. (2006). Plio-Quaternary uplift of the Manta Peninsula and La Plata Island and the subduction of the Carnegie Ridge, central coast of Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 22(1-2), 1-21.
- Pedoja, K., Ortlieb, L., Dumont, J. F., Lamothe, M., Ghaleb, B., Auclair, M., & Labrousse, B. (2006). Quaternary coastal uplift along the Talara Arc (Ecuador, Northern Peru) from new marine terrace data. *Marine Geology*, 228(1-4), 73-91.
- Navarrete Cuesta, E. M. (1985). *Estudio estratigráfico de la formación San Mateo en corte Puerto López Salango*. Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Niemeyer, H. (1999). *Apuntes De Geología Estructural*, Primera Parte: Estructuras Frágiles.
- Segovia, M., Alvarado, A., Collot, J. Y., Sallares, V., y Pazmiño, N. (2009). Breve análisis de la sismicidad y del campo de esfuerzos en el Ecuador. *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador: Desde la costa continental hasta las Islas Galápagos*, 131-149.
- Schulman, N., Flexer, A., y Wakshal, E. (1965). *Geology and groundwater possibilities of central Manabí, Ecuador*. State of Israel, Ministry for Foreign Affairs, Department for International Cooperation.
- Sdrolias, M., & Müller, R. D. (2006). Controls on back-arc basin formation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(4).
- Stern, R., & Smoot, N. C. (1998). A bathymetric overview of the Mariana forearc. *Island Arc*, 7(3), 525-540.
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., & Mora, H. P. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), 157-171.
- Vaca, S., Régner, M., Bethoux, N., Álvarez, V., y Pontoise, B. (2009). Sismicidad de la región de Manta: Enjambre sísmico de Manta-2005. *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador Desde la Costa Continental Hasta las Islas Galápagos*, 151-166.
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.
- Winckell, A., Marocco, R., Winter, T., Huttel, C., Pourrut, P., Zebrowski, C., & Sourdat, M. (1997). Los grandes rasgos del relieve en el Ecuador. Los paisajes naturales del Ecuador. Volúmen, 3-13