



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“Análisis Estructural de la zona oriente del anticlinorio de Huayacocotla del área de Calnali-  
Texcaco del estado de Hidalgo.”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEÓLOGO

**P R E S E N T A N:**

FLORES ARADILLAS LAURA DANIELLA

PINO CONTRERAS PEDRO ALBERTO

**DIRECTOR DE TESIS**

ING. JOSÉ LUIS ARCOS HERNÁNDEZ



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



***“La duda suele ser el principio de la sabiduría”***

***M. Scott Peck***

## *Agradecimientos*

*A mi madre. Por darme la vida, preocuparte por mí y darme todo el apoyo incondicional siempre, porque sin tí, no estuviera terminando mis estudios y este trabajo, en verdad te agradezco de corazón ma. Te amo.*

*A Adriana Contreras y Miguel Robles. Mis tíos que son como mis segundos padres, por todo su cariño y apoyo incondicional para culminar este sueño.*

*A mi director de tesis. Ing. José Luis Arcos, por la paciencia para guiar esta tesis, su apoyo, sus consejos y conocimientos dentro y fuera del aula como profesor y amigo.*

*A mis sinodales. Al Maestro Noé Santillán Piña, Ing. Gabriel Salinas Calleros Dra. Patricia Velasco y al Maestro Emiliano Campos Madrigal, que con sus valiosas aportaciones esta tesis es lo que es.*

*A Patricia Contreras y Andrés Rivas. Por su apoyo siempre.*

*A la Universidad. Por haberme albergado en sus aulas desde el bachillerato y todos los recursos que pone a tu alcance para poder crecer personal y académicamente.*

*A mis profesores. Que compartieron su tiempo y conocimientos dentro y fuera de las aulas y que todo lo que se, es por ellos.*

*Al proyecto PAPIIT IN115417. Por el apoyo en las salidas de campo*

*Y a toda la gente que me motivo siempre a seguir adelante y que creyeron en mí, que aunque no los menciono, saben que se les agradece.*

*Porque querer es poder...*

*Pedro*

## *Agradecimientos*

*Al profesor e ingeniero José Luis Arcos Hernández por la confianza brindada en nosotros, la constancia en el trabajo, por la motivación y la paciencia en nuestras debilidades al momento de este trabajo. De no ser por él no se hubiera logrado el objetivo de esta tesis en tan poco tiempo. Gracias*

*A los sinodales, comenzando por el Ing. Noé Santillán Piña por siempre darnos de su tiempo y espacio laboral, al Ing. Gabriel Salinas Calleros por resolver dudas y darnos sus consejos para lograr un mejor desarrollo en el trabajo, a la Dra. Patricia Velasco por permitirnos formar parte de este proyecto y al Maestro Emiliano Campos Madrigal por tomarse el tiempo de revisar nuestro trabajo, por sus correcciones y buenos consejos.*

*A la UNAM por otorgarme el privilegio de obtener mis conocimientos en sus aulas, con sus maestros y alumnos. Por enseñarme todo lo que se hasta el momento, confiando en que me obsequió lo mejor, las armas necesarias para salir a laborar y desempeñarme de la manera correcta.*

*A mis padres Martha Aradillas y Fausto Flores por impulsarme a luchar siempre por mis sueños y nunca rendirme ante alguna adversidad, por estar ahí en los momentos donde más los necesité, pero sobre todo por el simple hecho de ser quienes me llevaron por el camino del bien, siempre de la mano de Dios. Gracias*

*A mis hermanos Fausto, Alicia y Martita por siempre darme ánimos y estar unidos cuando más se ha necesitado. Los amo*

*Y por último a mis familiares y amigas MAIRA VEGA y MELISSA BALDIT por nunca dejarme sola.*

*Laura Daniëlla*

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	6
<b>ABSTRACT</b> .....	7
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCION</b> .....	8
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL</b> .....	9
<b>1.2 ANTECEDENTES</b> .....	9
<b>1.3 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO</b> .....	12
<b>CAPÍTULO 2. GEOGRAFÍA Y MORFOLOGÍA</b> .....	14
<b>2.1 FISIOGRAFÍA Y RELIEVE</b> .....	14
<b>2.2 CLIMA Y VEGETACIÓN</b> .....	15
<b>2.3 HIDROGRAFÍA</b> .....	16
<b>CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA REGIONAL Y TECTÓNICA</b> .....	18
<b>3.1 ESTRATIGRAFÍA</b> .....	18
<b>3.1.1 PRECÁMBRICO GNEIS HUIZNOPALA</b> .....	18
<b>3.1.2 PALEOZOICO FORMACIONES TUZANCOA Y GUACAMAYA</b> .....	19
<b>3.1.3 TRIÁSICO FORMACIÓN HUIZACHAL</b> .....	22
<b>3.1.4 JURÁSICO INFERIOR FORMACIÓN HUAYACOCOTLA</b> .....	23
<b>3.1.5 JURÁSICO MEDIO FORMACIONES CAHUASAS Y TEPEXIC</b> .....	24
<b>3.1.6 JURÁSICO SUPERIOR FORMACIONES SANTIAGO, CHIPOCO Y PIMIENTA</b> .....	25
<b>3.1.7 CRETÁCICO INFERIOR FORMACIONES TAMAULIPAS INFERIOR Y SUPERIOR</b> .....	26
<b>3.1.8 CRETÁCICO SUPERIOR FORMACIONES AGUA NUEVA, SAN FELIPE Y MÉNDEZ</b> .....	27
<b>3.1.9 CENOZOICO GRUPO EL MORRO, FORMACIONES TLALNICHOL Y ATOTONILCO EL GRANDE</b> .....	29
<b>3.2 TECTÓNICA</b> .....	29
<b>CAPÍTULO 4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL</b> .....	34
<b>4.1 ANÁLISIS DESCRIPTIVO</b> .....	34
<b>4.1.1 ANÁLISIS DE FOURIER</b> .....	71
<b>4.2 ANÁLISIS CINEMÁTICO</b> .....	81
<b>4.3 ANÁLISIS DINÁMICO</b> .....	96
<b>4.4 RESULTADOS</b> .....	127
<b>CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN</b> .....	133
<b>CONCLUSIONES</b> .....	138
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	139



## RESUMEN

La Sierra Madre Oriental es una provincia fisiográfica con más de 800 km de longitud y alrededor de entre 80-100 km de amplitud, cuyo relieve se debe a la deformación de rocas sedimentarias depositadas durante la apertura del Golfo de México, principalmente de edad Jurásica-Cretácica, y al complejo basal en que esta descansa, los cuales fueron levantados, comprimidos y transportados hacia el noreste, formando pliegues y cabalgaduras durante lo que se conoce como Orogenia Laramide.

Este trabajo se desarrollo en el sector Huayacocotla en la estructura conocida como anticlinorio de Huayacocotla, en la zona nororiente entre los poblados de Calnali y Texcaco del estado de Hidalgo. Redefinida como un conjunto de pliegues y cabalgaduras (Suter, 1990; Ochoa Camarillo, 1996) esta mega estructura está limitada al norte por el lineamiento Talamaya-Huichihuayán, al este por la cuenca Tampico-Misantla, al oeste por las cabalgaduras de la plataforma de San Luis-Valles y al sur por la Faja Volcánica Transmexicana hasta Huayacocotla, Veracruz.

El análisis estructural que conforma este estudio, verifica una deformación por cizalla regional de tipo derecha, se comprueba que el modelo para esta zona es el básico de deformación finita de “cizalla simple progresiva y heterogénea” donde el plano de cizalla no es paralelo a los ejes de los pliegues, esto se confirma con la similitud de pliegues en toda la zona de trabajo y con el análisis descriptivo y de Fourier realizados en la parte de geología estructural.

No solo las rocas del Jurásico-Cretácico participan en la deformación sino también las de edad del Paleozoico Superior teniendo fallas inversas con ángulo casi horizontal con un dominio de intensidad del esfuerzo principal  $\sigma_1$  en la dirección SW-NE para fallas y pliegues estudiados, así también con datos estructurales tomados a lo largo de terracerías, veredas y ríos comprueban la dirección NW-SE de los estratos, ejes de pliegues y planos de falla perpendiculares a la dirección que lleva este esfuerzo de deformación.



## ABSTRACT.

The Sierra Madre Oriental is a physiographic province with more than 800 km in length and around 80-100 km of amplitude, whose relief is due to the deformation of sedimentary rocks deposited during the opening of the Gulf of Mexico mainly of Jurassic-Cretaceous age, and to the basal complex in which it rests, which were lifted, compressed and transported to the northeast, forming folds and thrust during what is known as Laramide orogeny.

This work was developed Huayacocotla sector in the structure known as anticline of Huayacocotla in the northeastern area between the towns of Calnali and Texcaco in the state of Hidalgo. Redefined as a set of folds and thrusts (Suter, 1990; Ochoa Camarillo, 1996) this mega structure is limited to the north by the Talamaya-Huichihuayán line, to the east by the Tampico-Misantla basin, to the west by the thrusts of the platform of San Luis-Valles and to the south by the Faja Volcanic Transmexicana to Huayacocotla, Veracruz.

The structural analysis that make up this study, verify a deformation by regional shear of right type, it is verified that the model for this zone is the basic one of finite deformation of "simple heterogeneous progressive shear" where the plane of shear is not parallel to the axis of the folds, this is confirmed with the similarity of folds in the whole work area and with the descriptive and Fourier analysis realized in the part of structural geology.

Not only the rocks of the Jurassic-Cretaceous are involved in the deformation but also the Paleozoic upper-age rocks having inverse faults with almost horizontal angle with a main force intensity domain  $\sigma_1$  in the SW-NE direction for faults and folds studied, as well as structural data taken along slopes, paths and rivers verify the NW-SE direction of the strata, folding axis and fault planes perpendicular to the direction that this deformation stress takes.



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### METODO DE TRABAJO.

Lo primero que se realizó fue una búsqueda de material bibliográfico, con el fin de obtener información del área a estudiar, así como saber de los trabajos ya elaborados y tomarlos en consideración. Se revisaron y analizaron fotografías de la zona obtenidas de GoogleEarth® para realizar fotogeología a una escala aproximada de 1:75,000 y reconocer litologías, visualizar contactos y estructuras mayores. Se programaron salidas de campo en primera instancia para reconocimiento de la zona de estudio. El trabajo de campo se llevó a cabo realizando caminamientos sobre veredas, terracerías, carreteras y arroyos debido a lo abrupto de la topografía, para obtener datos estructurales y observar algunas estructuras secundarias que no son visibles en los afloramientos, las cuales nos puedan servir para realizar el estudio cinemático, dinámico y el análisis descriptivo programado para este trabajo, con el fin de contribuir con un estudio estructural de la zona y un mapa geológico ya que son contados los trabajos sobre esta área.

En cuanto a las limitantes que se han enfrentado, es que la zona cuenta con un relieve muy escabroso, además de poseer una vegetación bastante densa con lo cual ha generado casi los tres perfiles de suelo y no es posible ver los afloramientos en condiciones ideales para un buen análisis, además los que se han encontrado están en situaciones muy meteorizadas.

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto de investigación PAPIIT cuya clave es: IN115417, donde la responsable es la Dra. Patricia Velasco.



## 1.1 Objetivo General

Caracterizar estructuralmente una porción de la carta Calnali de INEGI escala 1:50 000 con clave F-14-D-52, que corresponde simultáneamente a parte del estado de Hidalgo y Veracruz, con lo cual se ampliará la zona de trabajo a una escala de 1: 25,000.

Objetivos específicos:

- Cartografía de la zona de trabajo
- Realizar el análisis descriptivo de las estructuras presentes
- Realizar el análisis Cinemático
- Construir el análisis Dinámico
- Elaborar la evolución tectónico-estructural

## 1.2 Antecedentes

El primero en estudiar las rocas pérmicas de la zona noreste del estado de Hidalgo fue Martínez-Pérez (1962), quien las relacionó con la Formación Guacamaya que se encuentra localizada en ciudad Victoria, Tamaulipas. Posteriormente Carrillo-Bravo (1965) basándose en este trabajo, publicó un mapa geológico regional de la zona destacando el anticlinorio de Huayacocotla y agrupando toda la secuencia paleozoica como la Formación Guacamaya.

Ochoa-Camarillo (1996) y Arellano Gil et al. (1998) hicieron descripciones posteriores de la estratigrafía y geología estructural de la Formación Guacamaya.



En su tesis de maestría Ochoa-Camarillo (1996), reporta que re-cartografió lo elaborado por Moreno-Cano y Patiño-Ruíz (1981), y lo que ellos consideraron como Formación Guacamaya, Ochoa-Camarillo lo representa como la Formación Huayacocotla (jurásica) en base a la litología y contenido faunístico. En este mismo trabajo de maestría de Ochoa-Camarillo (1996) menciona que encontró fósiles de plantas bien conservados cerca de Calnali, los cuales no son indicativos de ningún rasgo estratigráfico específico y no se pueden correlacionar, ya que pueden ser de edad pérmica o triásica.

Rosales-Lagarde (2002) en su trabajo menciona la cronoestratigrafía de la zona desde el Precámbrico (gneis Huiznopala) y todo el Paleozoico tomando en cuenta la Formación Vicente Guerrero (Misisípico superior). Rosales-Lagarde modifica el nombre de Formación Guacamaya a Tuzancoa, debido al origen vulcanosedimentario asociado a un arco continental submarino, basándose en trabajos de descripciones de litofacies detalladas tomadas a lo largo del río Tlacolula.

Centeno-García (2005) menciona la Formación Guacamaya como parte del terreno de la Sierra Madre; es una secuencia turbidítica de areniscas de grano fino intercaladas con lutitas y limolitas, los cuales tienen unos pocos conglomerados con clastos de rocas volcánicas, donde para el intervalo del Misisípico realizó petrografía de areniscas y observó que había mayor contenido de cuarzo metamórfico, así mismo, para las capas del Pérmico es más abundante el cuarzo volcánico (Centeno García et al., 1998).

En este mismo trabajo se menciona la Formación Tuzancoa Centeno-García (2005) como la parte sur del terreno Sierra Madre, la cual se refiere como una unidad compuesta de lutitas y cuarzo-arenita con cambios hacia arriba de brechas andesíticas y flujos de lava masivos, entrelazados con tobas, conglomerados volcánicos y turbiditas vulcanosedimentarias (intercalaciones de lutitas y areniscas) con algo de bloques calcáreos que contienen abundantes crinoideos, corales solitarios y fusulínidos.



Las rocas vulcanoclásticas contienen lentes de conglomerado depositados como relleno de canal, compuestas por granitos, gneis y clastos de limolitas (Rosales-Lagarde, 2002).

Firmas geoquímicas e isotópicas realizadas para las rocas volcánicas de la Formación Tuzancoa son muy similares a las que se reportan por López en 1997 que van del Misisípico al Pérmico en rocas del terreno Coahuila (Rosales-Lagarde 2002).

Aparentemente (Rosales-Lagarde, 2002; Centeno-García, 2005; Rosales-Lagarde et al., 2005) reportan que las rocas del Pérmico están en discordancia angular con las secuencias del Jurásico (Formación Huayacocotla). Estas rocas del Noreste del estado de Hidalgo las relacionan con la Formación Guacamaya como un ensamble de Flysch orogénico asociado con la colisión del Sur y Norte de América durante la formación de Pangea, sin embargo reportan que es otra secuencia y la Formación Tuzancoa comprende intervalos submarinos de andesitas basálticas, flujos de lava y turbiditas vulcanoclásticas y siliciclásticas, flujos de debritas calcáreas y lentes de conglomerados depositados en un intra-arco y probablemente se relacionen con las rocas de la Formación Las Delicias en Coahuila y las de la Formación Guacamaya están relacionadas con las del estado de Tamaulipas (Rosales-Lagarde et al., 2005)

Los fósiles reportados del Pérmico inferior son crinoideos, fusulínidos y braquiópodos, pero algunos taxa que encontraron (Carrillo Bravo, 1965; Arellano Gil et al., 1998) dan rangos para el Pensilvánico Inferior.

En cuanto a los estudios paleontológicos que se han realizado en la zona, se encuentra los de Buitrón-Sánchez et al., 1987 con un trabajo de crinoideos del Paleozoico del área central de Calnali basado en trabajos de Moreno-Cano y Patiño-Ruiz (1981) pero no se encontró los fósiles in-situ reportados por ellos. Silva-Pineda en 1987 describió plantas pérmicas a las afueras de Calnali, basándose en la tesis de Moreno-Cano y Patiño-Ruiz (1981).



En la Formación Tuzancoa en el estado de Hidalgo, describen la primera conífera pérmica “walchiana” con base en varias compresiones e impresiones fósiles. Se identificó como *Calnalia hidalguensis* gen. nov. et sp. nov. un nuevo morfotaxón de coníferas basado en ramas laterales y hojas. Esta nueva conífera tiene unas de las ramas más pequeñas descritas hasta ahora para los miembros “walchianos” en el registro fósil, esta cuenta con dos tipos de ramas: ovoide y deltoide. Estas portan hojas simples con filotaxia helicoidal, donde las hojas son ligeramente triangulares a lineales (Hernández-Castillo et al., 2014).

### 1.3 Localización y vías de acceso.

El área de estudio se localiza en el estado de Hidalgo, el cual se encuentra en la porción central de la República Mexicana, en las inmediaciones del Eje Volcánico Transmexicano, aproximadamente a 80 km al norte de la capital del país, entre los paralelos 19° 36' y 21° 24' de latitud norte y en los meridianos 98° 00' y 99° 45' de longitud oeste.

Para este trabajo se utilizó la carta topográfica F-14-D-52 Calnali del INEGI, la cual representa la zona noreste del estado de Hidalgo. El área de estudio está limitada al norte con los poblados Tecueyaca y San Andrés y en la porción sur con el pueblo de Texcaco (figura 1.1).

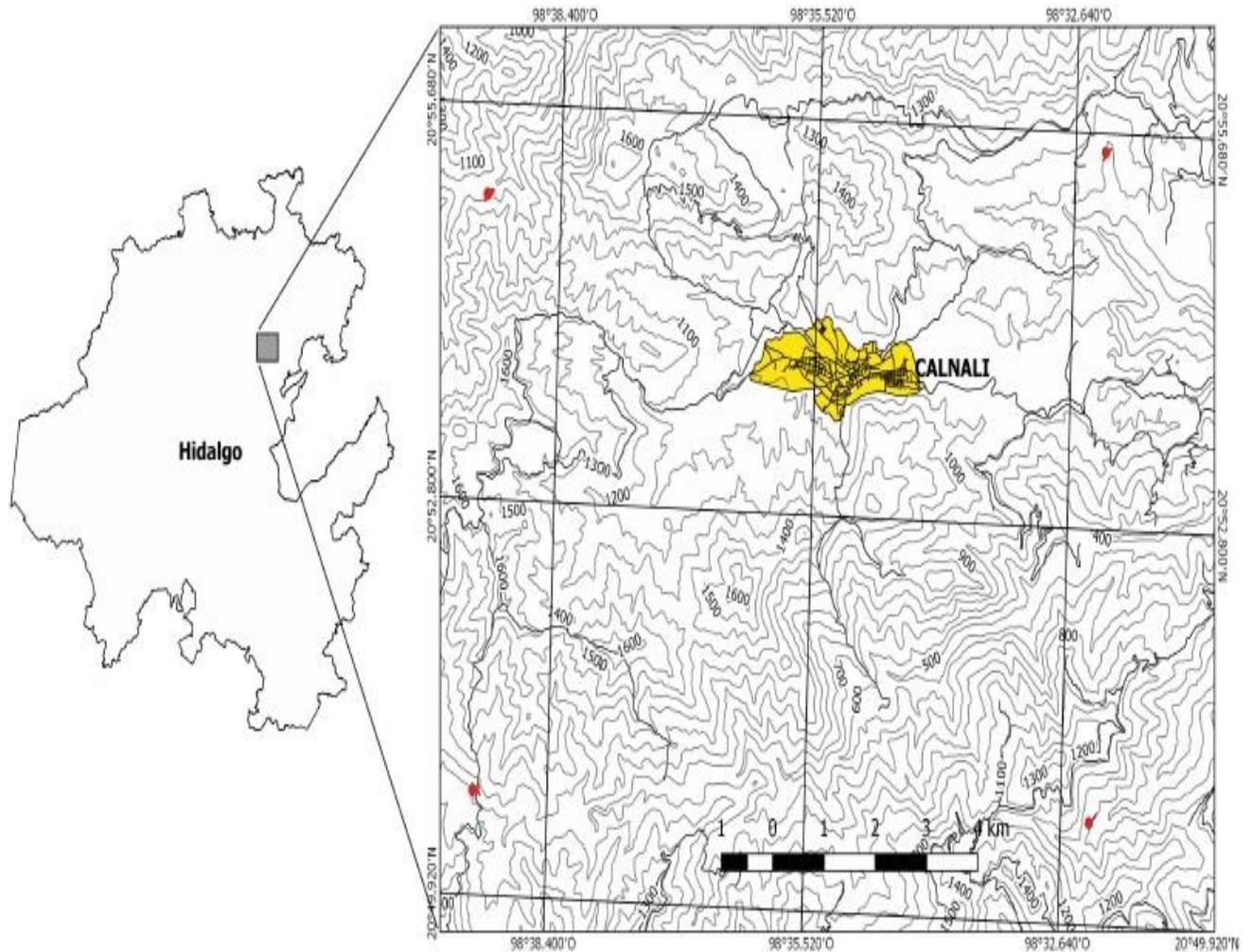


Figura 1.1 Localización del área de estudio en el estado de Hidalgo, los puntos rojos delimitan la zona trabajo (base topográfica tomada de la carta INEGI F-14-D-52).

Las vías de acceso desde la Ciudad de México son por la carretera federal Méx-Pachuca 85D hasta llegar a Pachuca de Soto, donde la carretera se vuelve la federal 105 Pachuca-Zacuatlipán entrando en lo que se conoce como la Sierra Alta de Hidalgo (SGM, 2014), y después se toma la desviación hacia Calnali, la cual es la carretera Lolotla-Atlapexco.



## CAPÍTULO 2. GEOGRAFÍA Y MORFOLOGÍA.

### 2.1 Fisiografía y Relieve.

Fisiográficamente esta área se encuentra en la parte meridional de la Provincia Sierra Madre Oriental, en la subprovincia de Carso Huasteco, con un sistema de topofomas de Sierra. Geológicamente esta región forma parte del anticlinorio de Huayacocotla del cinturón de pliegues y cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental (Carrillo-Bravo, 1965). Tomando el punto de vista tectónico (Campa y Coney, 1983; Centeno-García, 2005) se localiza en el Terreno Sierra Madre y en términos de geología económica se le conoce como el Distrito Minero Molango-Nonoalco donde se produce manganeso (SGM, 2014).

El estado de Hidalgo cuenta con 10 regiones fisiográficas conocidas como La Huasteca, La Sierra Alta, La Sierra Baja, La Sierra Gorda, La Sierra de Tenango, Valle de Tulancingo, Comarca Minera, Altiplano, cuenca de México y Valle del Mezquital (Figura 2.1).

El relieve que predomina en la zona es en general escabroso, que oscila entre 400 y 1600 msnm. La zona de estudio se encuentra localizada en lo que se conoce como la Sierra Alta, donde se encuentran barrancas muy estrechas debido a la erosión de los ríos como el Pochula, el Huachichinco y el Tenango.

Tres cadenas montañosas son las que conforman la región serrana y atraviesan todo el territorio del estado por el centro con un rumbo NW-SE. La primera cadena montañosa es la Sierra Madre Oriental, que cubre la mayor parte del estado de Hidalgo y donde se localizan las Sierras de Zimapán, Jacala, Zacualtipán y Pachuca. La segunda cadena montañosa se inicia en Tulancingo y se le une al núcleo centro en el cerro de Agua Fría. La tercera va de Real del Monte a Pachuca continuando hacia el noreste.



Figura 2.1 Las 10 regiones fisiográficas del estado de Hidalgo (tomado de SGM, 2014)

## 2.2 Clima y Vegetación.

Los climas del estado ofrecen marcados contrastes desde climas calurosos y húmedos hasta climas semicálidos, templados y húmedos con lluvias todo el año, donde la temperatura promedio es de 18° C con precipitaciones anuales de 640 mm.



En el área de estudio la temperatura promedio oscila entre los 16° a 24°C, con un rango de precipitación que va desde los 1900 a 2100 mm, el clima que predomina es semicálido húmedo con lluvias todo el año (84%) y templado húmedo con lluvias todo el año (16%) (INEGI, 2009). Esto se debe a los vientos cargados de humedad provenientes del Golfo de México, que al llegar a la región serrana se enfrían, condensándose en vapor de agua provocando una zona con mucha neblina y pequeñas lloviznas. La mayor cantidad de lluvia cae durante el mes de agosto y septiembre debido a la temporada de huracanes del golfo.

En cuanto a la vegetación el estado es rico particularmente en la zona norte y noreste, donde debido a las condiciones climáticas que se tiene, el tipo de roca y la humedad hace que se tenga un 37% de bosque y 9.5% de Selva (INEGI, 2009) donde en las partes más altas de la zona de estudio se encuentra bosque de coníferas y encinos.

### 2.3 Hidrografía.

El área esta drenada de norte a sur por los ríos Pochula, Calnali y Tlacolula, que corresponden a la cuenca del Panuco. La carretera federal 105 pasa directamente por el parte aguas de la cuenca del Río Moctezuma hacia el poniente en donde sobresalen los ríos Jalpa y Pilapa y en el oriente se encuentra la cuenca del río Tempoal, donde destacan los ríos Huachichinco y Chinameca (Figura 2.2).

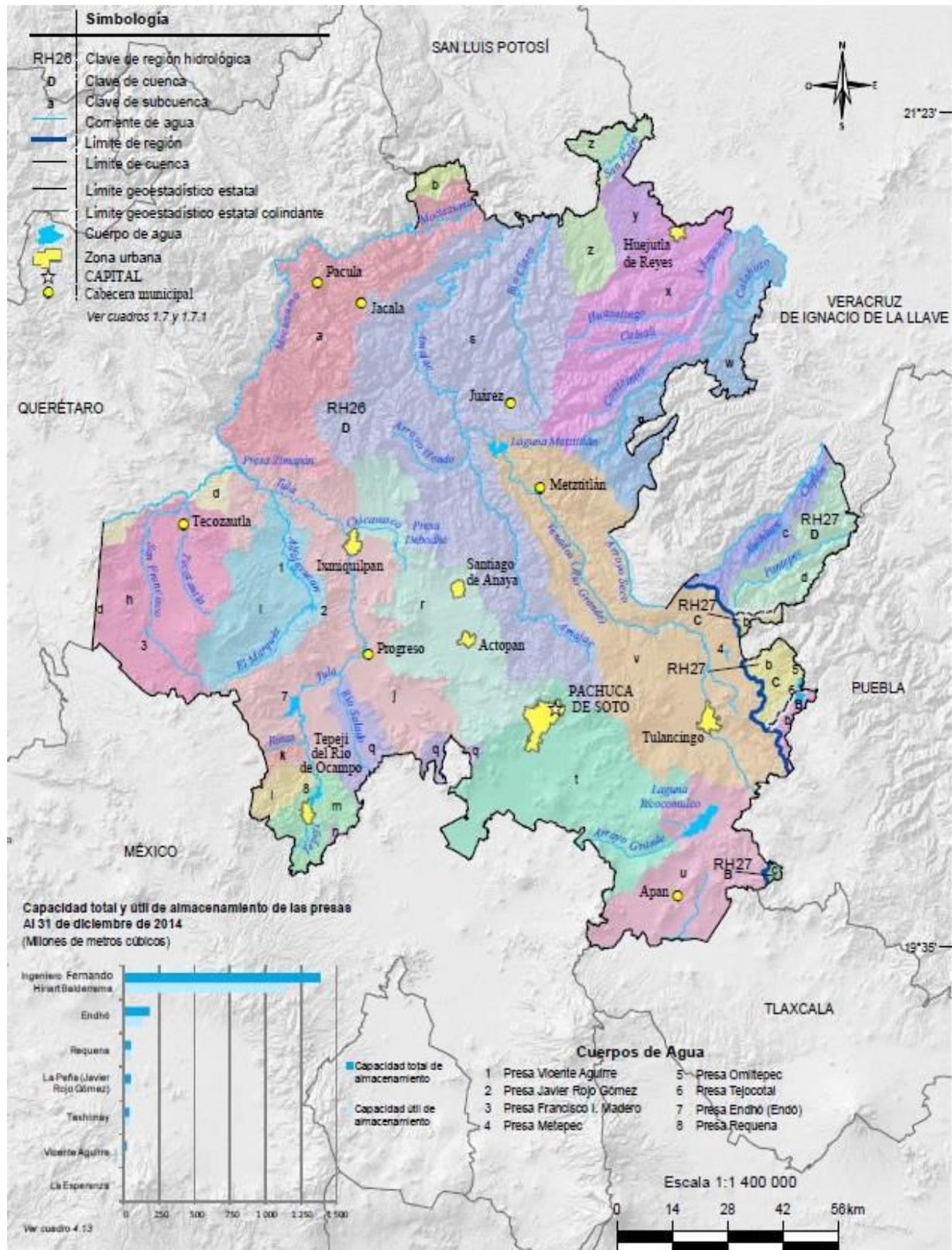


Figura 2.2 Mapa de red Hidrográfica del estado de Hidalgo (Tomado de INEGI-CONAGUA, 2007)



## CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA REGIONAL Y TECTÓNICA.

En este capítulo se describirán las rocas que se encuentran en la región desde el Precámbrico hasta el Cenozoico, las cuales varían de secuencias metamórficas y como ya se han mencionado hay lutitas, areniscas, secuencias vulcanosedimentarias, derrames de andesitas y basaltos, así como rocas calcáreas y conglomerados; se definirán las principales características de las formaciones expuestas en el anticlinorio de Huayacocotla con base en el trabajo realizado por Ochoa-Camarillo et al. (1999) y Rosales-Lagarde et al. (2005), abundaremos un poco más en las rocas paleozoicas, ya que son las que más afloran en el área de estudio y se hablará sobre la tectónica que ocurría a nivel regional.

### 3.1 ESTRATIGRAFÍA.

#### 3.1.1 Precámbrico. Gneis Huiznopala

Situado en el núcleo del anticlinorio de Huayacocotla, se encuentran las rocas expuestas más viejas de esta secuencia definidas por primera vez por Von Kuegelgen en 1958, refiriéndose como “un basamento cristalino”, posteriormente es nombrado Gneis Huiznopala por Fries Carl y Rincón-Orta en 1965. Fueron descritos como Gneises bandeados de facies de granulita, Ortega-Gutiérrez et al. (1997) menciona que es una serie de charnokita-gabro-anortosita, así como una secuencia calcárea y cuarzo-feldespática con granate; menciona que para estas rocas se tiene una edad Grenviliana que puede correlacionarse con el Gneis Novillo de la región de ciudad Victoria Tamaulipas.

Este gneis está cubierto por la Formación Huayacocotla del Jurásico temprano en donde se unen los ríos Agua de Sal y Pilapa; para la Formación Tepexic del Jurásico



Medio está cerca del pueblo de Otongo; para las rocas del Jurásico tardío y Cretácico se encuentra en los alrededores de la mina Tezintla y para las rocas paleozoicas está cerca del pueblo de Otlamalacatla.

El Gneis Huiznopala (Ortega-Gutiérrez et al., 1997) su localidad tipo es en el río Claro en la comunidad de Huiznopala y consta de dos litofacies que sufrieron deformación dúctil y metamorfismo de facies de granulita, aproximadamente hace unos 900 Ma y una retrogresión posterior a facies de esquisto verde.

Ortega-Gutiérrez et al. (1997) reportan que hay dos tipos de Gneis; cerca del río Agua de Sal como paragneis, debido a la presencia de grafito en este y ortogneis en el río Chipoco que consiste en anortositas de andesina asociada a gneis gabroicos y charnokita. El gneis en general presenta una textura cataclástica la cual tal vez sea responsable de la retrogresión de los minerales máficos, con desarrollos ocasionales de zonas miloníticas y ultramiloníticas (Ortega-Gutiérrez et al., 1997).

### **3.1.2 Paleozoico. Formaciones Tuzancoa y Guacamaya**

Los primeros en describir los afloramientos paleozoicos de esta área fueron Martínez-Pérez (1962) y Carrillo-Bravo (1965), los cuales consideraron como Formación Guacamaya de edad pérmica definida por una secuencia de areniscas y lutitas marinas intercaladas con algunos intervalos de conglomerados y calizas con fósiles de la misma edad. Sin embargo Ochoa-Camarillo (1996) considera que existe la Formación Otlamalacatla situada cerca del pueblo con dicho nombre y estas rocas están constituidas principalmente por areniscas y lutitas que contienen trilobites, equinodermos y braquiópodos en afloramientos representados en escamas tectónicas. Rosales-Lagarde (2002) menciona que las rocas de Hidalgo son distintas a lo que describen los pioneros ya que también contienen rocas volcánicas y no se parecen a la



localidad tipo de la Formación Guacamaya además de hallar en los afloramientos en los que trabajó intercalaciones de las dos formaciones, pero al no encontrar diferencias marcadas y claras todo lo considera como la Formación Tuzancoa y propone que la sección tipo es sobre el río Tlacolula.

En una de las visitas a campo el Ing. Javier Arellano Gil comentó que efectivamente eran dos formaciones distintas; por su parte la Tuzancoa se diferenciaba de la Guacamaya por tener turbiditas, en su trabajo Arellano-Gil et al. (1998) realizaron una sección sobre el río Tlanguistengo al sur de nuestra zona de estudio y describen una secuencia turbidítica que varía desde un flysch caótico (debritas) de facies de pendiente, hasta un flysch pelítico-arenoso de facies distales con la presencia de bloques exóticos calcáreos y de clastos de andesitas y de rocas metamórficas en los conglomerados, pero no mencionan los derrames andesíticos intercalados en la secuencia.

La Formación Tuzancoa su localidad tipo se encuentra 1 km al sur del pueblo con el mismo nombre, Ochoa-Camarillo (1996); como ya se ha mencionado anteriormente esta formación consta de andesitas basálticas, flujos de lava y turbiditas vulcanoclásticas y siliciclásticas, flujos de debritas calcáreas y lentes de conglomerados. Rosales-Lagarde (2002), redefine la Formación Tuzancoa mencionando que desde la base a la cima hay rocas siliciclásticas, derrames y brechas andesíticos en varios niveles de la columna, areniscas vulcanosedimentarias alternadas con lutitas que presentan estructuras primarias características de ambientes turbidíticos como pliegues sinsedimentarios, laminaciones, intraclastos así como flujos de detritos calcáreos y rellenos de canal los cuales se depositaron en un ambiente de cuenca de intra arco (Rosales-Lagarde et al., 2005).

Rosales-Lagarde et al. (2005) consideran que tiene 5 litofacies principales, las cuales se repiten de forma rítmica en toda la columna estratigráfica excepto para la facies 2, la cual solo la encontraron en la parte más baja de esta. La secuencia está interrumpida por fallas y pliegues y se tiene un espesor aproximado de 700 metros.



La Facies 1 “Flujos y brechas volcánicas”. Consiste en flujos andesítico-basálticos y en algunas zonas de composición dacítica, estos tienen textura afanítica a porfirítica con fenocristales de plagioclasa y con algunas bandas de anfíboles y pirita. Las texturas son muy variables en algunos casos son masivas, otras son pseudo almohadilladas con fracturamiento radial, algunas capas están brechadas con textura de hialoclastita debido al enfriamiento rápido por el contacto con el agua. Estos flujos submarinos de lava también contienen capas de depósitos piroclásticos y vulcanosedimentarios.

Para la Facies 2 “Turbiditas siliciclásticas”. La caracterizan intervalos de lutitas, areniscas y areniscas conglomeráticas. Las lutitas presentan laminación y las areniscas presentan intraclastos de lutita y su base ligeramente erosionada. En las areniscas y areniscas conglomeráticas dominan los granos de clastos y en menor abundancia plagioclasa, micas, gneis y líticos. Las areniscas van de grano fino a grueso (cuarzoarenita a sublitarenita). Los clastos en las areniscas conglomeráticas varían de redondeados a subredondeados y las estructuras primarias sugieren depósito de turbiditas (secuencia Bouma). Rosales-Lagarde et al. (2005) mencionan que no contiene flujos de lava pero que si hay líticos volcánicos en las areniscas sin embargo el alto porcentaje de cuarzo y mica sugieren que el basamento estaba abasteciendo también a la cuenca.

Para la Facies 3 “Turbiditas Vulcanoclásticas”. Rosales-Lagarde et al. (2005) consideran que es la más común en la formación, la cual comprende intervalos de lutitas, limolitas y areniscas que van de color negro a verde olivo. Las areniscas contienen más del 50% de líticos volcánicos, feldespatos y cuarzo en menor proporción. Esta facies muestra características y estructuras primarias de un ambiente turbidítico. Las capas de areniscas son paralelas a las capas lenticulares además de contener intraclastos de varios tamaños de lutitas. Las lutitas y limolitas localmente contienen láminas de limolita negra o lutita calcárea. En las partes bajas de la secuencia hay areniscas masivas con intraclastos de lutitas de tamaño considerable intercalados con capas rítmicas de lutitas y areniscas (secuencia Bouma), esta facies menciona que contiene todas las demás facies



y varían de espesor de unos pocos metros hasta 400 metros. Esta secuencia contiene escasos fósiles y los que aparecen están hacia la base de la secuencia.

La facies 4” Debitas Calcáreas”. Está caracterizada por flujos de debitas calcáreas que contienen abundantes crinoideos, fusulínidos y fragmentos de otros fósiles. La litología es muy variada; wackstone, rudstone, lutitas calcáreas y calcarenitas. En la base de los estratos se observa erosión y contiene intraclastos de lutitas y areniscas. Su espesor varía de 50 cm a 8 metros.

Facies 5 “Conglomerática” Esta facies consiste principalmente de cuerpos lenticulares de conglomerado y areniscas conglomeráticas, estos muestran base erosiva y una gradación normal, mal clasificada y matriz soportada. Presentan intraclastos y exoclastos. Los exoclastos son de distintos tipos de roca; limolitas, fragmentos volcánicos de andesitas hasta riolitas, tobas, cuarzo y gneis. Los intraclastos son de areniscas vulcanosedimentarias, lutitas con fusulínidos, esta facies es interpretada como relleno de canal y tiene un espesor de 1 a 8 metros.

### **3.1.3 Triásico. Formación Huizachal.**

Según Ochoa-Camarillo et al. (1999) no existe a escala regional ninguna unidad de lechos rojos debajo de la Formación Huayacocotla, los que se encuentran son reportados como horizontes dentro de la misma Formación Huayacocotla. Martínez-Pérez (1962) describió como Formación Huizachal a la secuencia formada hacia la base por conglomerados con fragmentos de cuarzo lechoso y gneis subredondeados a subangulares intercalados con lutitas y areniscas. Martínez-Pérez (1962) le asigna una edad de Triásico Superior al encontrar abundantes restos de plantas cerca de una comunidad llamada San Mateo. Esta unidad subyace discordante a la Formación Huayacocotla y suprayace a rocas del Paleozoico superior.



### 3.1.4 Jurásico Inferior. Formación Huayacocotla.

Esta formación se encuentra definida por intercalaciones de lutitas con areniscas de color pardo a gris, conglomerados y pocos lentes de caliza; la localidad tipo se ubica al sur del poblado de Huayacocotla, a lo largo del río Viznaco (Imlay et al., 1948; Ochoa-Camarillo et al., 1999). Ochoa-Camarillo (1996) se basa en Erben (1956) mencionando que la Formación Huayacocotla se clasifica en nueve unidades en base a su litología y contenido faunístico sin embargo él solo describe tres.

Ochoa-Camarillo también menciona que en la región de Molango son reconocibles 3 de las 9 unidades de la Formación Huayacocotla; la primera unidad que se encuentra en la base y consiste de conglomerados, areniscas, lutitas y limolitas con algunos intervalos de brecha, se caracteriza por la falta de fósiles autóctonos, ya que solo hay restos retrabajados, los clastos de las brechas son de rocas volcánicas, calizas y de limolitas que presentan fusulínidos y crinoideos del Paleozoico. La segunda unidad consiste en secuencias rítmicas de lutitas y areniscas con intervalos de conglomerados y arenas bien estratificados. La característica de esta unidad es que presenta amonitas en los horizontes de lutitas y en algunas concreciones arenosas. La tercera unidad está formada por limolitas y lutitas ligeramente verdosas con restos de plantas fósiles y algunas intercalaciones de areniscas y conglomerados con clastos de alrededor de 3cm. Al final de la columna se reportan rocas volcánicas que van de intermedias a félsicas, así como algunos basaltos almohadillados.

La Formación Huayacocotla sobreyace discordante al gneis Huiznopala y al Triásico Superior (Ochoa-Camarillo, 1996), está cubierta mediante una discordancia por las formaciones del Jurásico Superior y en algunas zonas por derrames volcánicos.



### 3.1.5 Jurásico Medio. Formaciones Cahuwasas y Tepexic.

Definida por primera vez por Carrillo-Bravo en 1965 la Formación Cahuwasas consta de una secuencia de areniscas, conglomerados y limolitas de color rojo (lechos rojos), la localidad tipo está ubicada en el valle del río Amajac, en la ranchería de Cahuwasas. Ochoa-Camarillo et al. (1999) reconoce tres miembros cerca de Molango; el primero consta de brechas y conglomerados polimícticos bien consolidados dentro de una matriz arenosa rojiza, los clastos constan de areniscas, gneis, limolitas y fragmentos volcánicos predominando estos últimos. El segundo es una secuencia de lutitas y areniscas. El tercer miembro son lutitas. Todos los miembros tienen tonos rojizos a violetas aunque también se observan tonos verdes.

La Formación Cahuwasas sobreyace en discordancia angular sobre la Formación Huayacocotla y su contacto superior es concordante con la Formación Tepexic, este contacto es el límite entre las rocas clásticas y las carbonatadas de la Formación Tepexic (Ochoa-Camarillo et al., 1999). Se le asigna una edad de Jurásico Medio basándose en las amonitas estudiadas en la Formación Huayacocotla y en base a su posición estratigráfica (Ochoa-Camarillo, 1996; Carillo-Bravo, 1965).

La Formación Tepexic fue descrita por Erben en 1956, y su localidad tipo se encuentra a lo largo del río Necaxa en el estado de Puebla. En algunas áreas la Formación Tepexic el contacto inferior es concordante y abrupto sobre la Formación Cahuwasas, en otras áreas donde hay ausencia de la Formación Cahuwasas, descansa sobre la Formación Huayacocotla en discordancia angular mientras el contacto superior es transicional con la Formación Santiago, pero donde la Formación Santiago no existe el contacto sigue siendo transicional con la Formación Chipoco (Ochoa-Camarillo et al., 1999).

La Formación Tepexic se caracteriza porque a la base de la secuencia está representada por conglomerados de cuarzo con matriz calcárea, conforme se sube estratigráficamente hay intercalaciones de caliza arenosa (Calcarenita), marga y lutitas,



presenta una abundancia de fósiles con los cuales se le dio una edad más precisa del Calloviano dominando el género *Gryphaea* (amonitas) (Ochoa-Camarillo, 1996).

### 3.1.6 Jurásico Superior. Formaciones Santiago, Chipoco y Pimienta.

La Formación Santiago fue definida formalmente por Cantú Chapa en 1971, el cual considera que la localidad tipo esta sobre la carretera federal 85D al occidente de Tamán. La litología de la Formación Santiago está compuesta por estratos de limolita negra calcárea, con algunas intercalaciones de estratos negros de caliza que se encuentran de forma aislada (Ochoa-Camarillo, 1996).

La parte superior de la Formación Santiago presenta abundantes concreciones negras calcáreas, donde se pueden hallar amonitas así como pirita diseminada por toda la formación, el contacto inferior de la Formación Santiago es concordante con el de la Formación Tepexic y discordante con el Precámbrico y Paleozoico, la edad en base a las amonitas es de Calloviano-Oxfordiano (Ochoa-Camarillo 1996).

La Formación Chipoco fue descrita por primera vez por Hermoso de la Torre y Martínez Pérez en 1972 y su localidad tipo se encuentra en el área del tajo Tetzintla ubicada a un costado el pueblo con el mismo nombre. Ochoa-Camarillo (1996) describe que son 4 unidades las que integran esta formación; la manganesífera constituida por caliza manganesífera arcillosa negra con intercalaciones de lutitas calcáreas negras, la segunda unidad son areniscas calcáreas de color gris, la tercera unidad son intercalaciones de lutitas calcáreas, limolitas y calizas arcillosas negras y la cuarta es una secuencia de caliza negra recristalizada interestratificada de forma rítmica con lutitas negras.



Los contactos inferior y superior son concordantes con las formaciones Santiago y Pimienta respectivamente (Ochoa-Camarillo, 1996) y la edad de esta formación reportada por Cantú Chapa en 1971 basándose en amonitas es del Kimeridgiano-Tithoniano.

La Formación Pimienta fue definida formalmente por Heim en 1926, descrita como una caliza de color negro con capas de pedernal del mismo color y su localidad tipo se encuentra a 1 km al norte del pueblo de Pimienta, sobre el río Moctezuma. En 1972 Suter la describe como tres unidades; caliza micrítica negra con nódulos de pedernal, caliza arcillosa con concreciones esféricas y lutitas de color rojizo a verdoso.

Lo reportado por Ochoa-Camarillo (1997) es que en el anticlinorio de Huayacocotla la Formación Pimienta presenta las dos primeras litologías descritas por Suter en 1972 pero agrega que la formación está constituida por caliza negra con intercalaciones de lutita negra y que presenta nódulos y lentes de pedernal de color gris a negro así como concreciones esféricas y debido a su incompetencia litológica se encuentra muy plegada (pliegues tipo chevron). Los contactos inferior y superior son transicionales con las formaciones Chipoco y Tamaulipas (Ochoa-Camarillo, 1996), la edad para esta formación es de Tithoniano reportado por Cantú Chapa en 1971.

### **3.1.7 Cretácico Inferior. Formaciones Tamaulipas Inferior, Superior.**

La Formación Tamaulipas Inferior fue definida por Stephenson en 1921 y descrita más ampliamente por Muir en 1936 y la localidad tipo se encuentra en el Cañón de la Borrega en la Sierra de Tamaulipas, aquí consiste en una secuencia de calizas de grano fino de color crema.



La litología está compuesta por calizas wackstone y mudstone de color gris y gris oscuro, con microfósiles planctónicos; incluye lentes y bandas de pedernal gris oscuro a negro además de presentar lutitas negras laminares. La Formación Tamaulipas Inferior en la zona del anticlinorio de Huayacocotla descansa en contacto transicional con la Formación Pimienta y su contacto superior es un contacto concordante con un Horizonte arcilloso que la separa de la Tamaulipas Superior (Ochoa-Camarillo, 1996).

La Formación Tamaulipas Superior fue descrita informalmente por Stephenson en 1921, después por Belt en 1925 y definida formalmente por Muir en 1936 y la localidad tipo se encuentra en el Cañón de la Borrega en la Sierra de Tamaulipas en donde se define como una secuencia de calizas arcillosas grises con pedernal blanco y negro. La edad para esta secuencia reportada por Soto en 1981 basada en foraminíferos planctónicos es de Albiano-Cenomaniano.

En el área del anticlinorio de Huayacocotla, el contacto superior de la Formación Tamaulipas superior es transicional con la Formación Agua Nueva (Ochoa-Camarillo, 1996).

### **3.1.8 Cretácico Superior. Formaciones Agua Nueva, San Felipe y Méndez.**

La Formación Agua Nueva fue descrita por primera vez por Stephenson en 1921 y estudiada ampliamente por Muir en 1934, aflora en el frente oriental de la Sierra Madre Oriental, al noreste de la Cuenca Mesozoica del centro de México y al sur de la Península de Tamaulipas y la localidad tipo se encuentra en el Cañón de la Borrega en la Sierra de Tamaulipas.

En la zona del anticlinorio de Huayacocotla aflora cerca del río Quetzalongo, donde la litología consiste en caliza arcillosa laminar con intercalaciones de lutita y bandas de



pedernal negro (Ochoa-Camarillo, 1996). La edad para esta formación con base a su contenido faunístico descrito por Soto en 1981 es del Turoniano.

La Formación San Felipe fue descrita por Jeffreys en 1910, presenta una amplia distribución, ya que, se le reporta al sur de la Paleo-Península de Tamaulipas, en las cuencas de: Burgos, Veracruz y las del Sureste; aflora en el este de la Sierra Madre Oriental y en la cuenca Mesozoica del centro de México. En 1936 Muir la define como una alternancia de calizas con lutitas y la localidad tipo se encuentra al occidente del poblado de San Felipe en San Luis Potosí.

En la zona del anticlinorio de Huayacocotla, está constituida principalmente por intercalaciones de lutita de color verde olivo con calizas arcillosas de color pardo, el contacto es concordante y transicional con la Formación Agua Nueva y el contacto superior es tectónico (Ochoa-Camarillo, 1996). La edad asignada para esta formación de acuerdo a Muir en 1936 es de Coniaciano-Santoniano.

La Formación Méndez definida por primera vez por Jeffreys en 1910 y descrita más ampliamente por DeGolyer en 1916. Su localidad tipo se encuentra al oriente de la estación Méndez en el Km 629 del ferrocarril de San Luis Potosí a Tampico; su litología se caracteriza por margas grises con fracturamiento concoidal.

Al poniente de la zona de estudio la litología está constituida por marga y lutita verde a amarilla y gradualmente hacia la cima el contenido de arcilloso domina sobre los carbonatos; en ambas sucesiones es común encontrar horizontes de bentonita y sus contacto inferior es concordante con la Formación San Felipe (Ochoa-Camarillo, 1996). La edad reportada por Passagano en 1969 es de Campaniano-Maestrichtiano.



### 3.1.9 Cenozoico. Grupo el Morro, Formaciones Tlalchinol y Atotonilco el Grande.

El Grupo el Morro está formado por conglomerados con material proveniente de las formaciones Pimienta, Tamaulipas Inferior y Tamaulipas Superior y su contacto inferior es mediante una discordancia sobre las formaciones del Cretácico Inferior.

Las formaciones Tlalchinol y Atotonilco el Grande están compuestas por una suite de rocas ígneas extrusivas que van desde basaltos a ríolitas. Estas rocas se encuentran en discordancia angular sobre el Gneis Huiznopala, rocas del Paleozoico y Mesozoico (Ochoa-Camarillo, 1996).

## 3.2 TECTÓNICA.

De acuerdo a lo ya mencionado en la introducción de este trabajo, el área de estudio se encuentra en el terreno Sierra Madre (Centeno-García, 2005) y en el sector Huayacocotla, el cual es el extremo SE de la cadena plegada de la Sierra Madre Oriental que está limitado al sur por Tamazunchale y Tezuitlán, Puebla (Eguiluz et al., 2000).

Ochoa-Camarillo propone eventos Pre-laramídicos por extensión lo cual abarca una serie de fallas normales que forman altos y bajos estructurales en el sector poniente de nuestra área de estudio; estas fosas y pilares tectónicos son evidencia de una etapa de extensión durante el Jurásico Inferior y Medio las cuales forman parte de la fosa de Huayacocotla y solo están afectando a las formaciones depositadas antes que la Formación Tepexic, lo cual quiere decir que la fase de extensión finalizó con el depósito de la Formación Cahuascalas (Ochoa-Camarillo, 1996; Rosales-Lagarde, 2002).

Las deformaciones que generaron la Sierra Madre Oriental, que modificaron al sector Huayacocotla entre el Cretácico Inferior y Eoceno es lo que se conoce como orogenia Laramide, los pliegues mayores, las orientaciones de los flancos de los pliegues y fallas;



así como, las rosetas de fracturamiento que más adelante se presentaran en el capítulo de geología estructural tienen una orientación preferencial NNW-SSE el cual concuerda con la dirección de la deformación.

El anticlinorio de Huayacocotla es una mega estructura compleja de pliegues y cabalgaduras, esta complejidad en gran parte fue causada por la tectónica ocurrida durante el Jurásico (Horst y Grabens) en esta región, Ochoa-Camarillo (1996) describe una serie estructuras mayores (pliegues y cabalgaduras) formadas durante la etapa Laramídica y que el despegue basal se encuentra en la Formación Huayacocotla, pero en el sureste de la zona de trabajo al sur del poblado de Tuzancoa, Rosales-Lagarde, (2002) reporta que el despegue también ocurre en rocas paleozoicas (Formación Tuzancoa), en la figura 3.1 se pueden apreciar los rasgos estructurales mayores considerados por estos autores. Eguiluz et al. (2000) reporta que los despegues ocurren en varios niveles estratigráficos tanto en rocas carbonatadas como clásticas del Jurásico Superior e Inferior y del Cretácico Superior, pero él considera que la Formación Huayacocotla sea la que defina el estilo estructural y la deformación es considerada de tipo “cobertura delgada (*thin skinned*)” (figura 3.2) por la reactivación de fallas normales antiguas.

La deformación más importante de este sector está representada por fallamiento inverso de ángulo bajo, con vergencia hacia el noreste. La deformación interna de los estratos es intensa localmente, pero generalmente esta no es obvia en otros lugares, los estratos buzcan con suavidad pero también presentan plegamiento métrico alojado en capas delgadas de sedimentos de grano fino, estos pliegues de escala métrica son recumbentes, vergentes con preferencia al NE, estas observaciones concuerdan si se considera cizalla regional a lo largo de planos subparalelos a la estratificación, que son típicos de deformación sobre láminas de despegue (Eguiluz et al., 2000), estos análisis son consistentes sobre fallas de ángulo bajo que exceden la longitud de la rampa y con una geometría *fault bend-fold* (figura 3.3, 3.4 y 3.5) lo que resultan en relaciones paralelas (*flat on flat*).

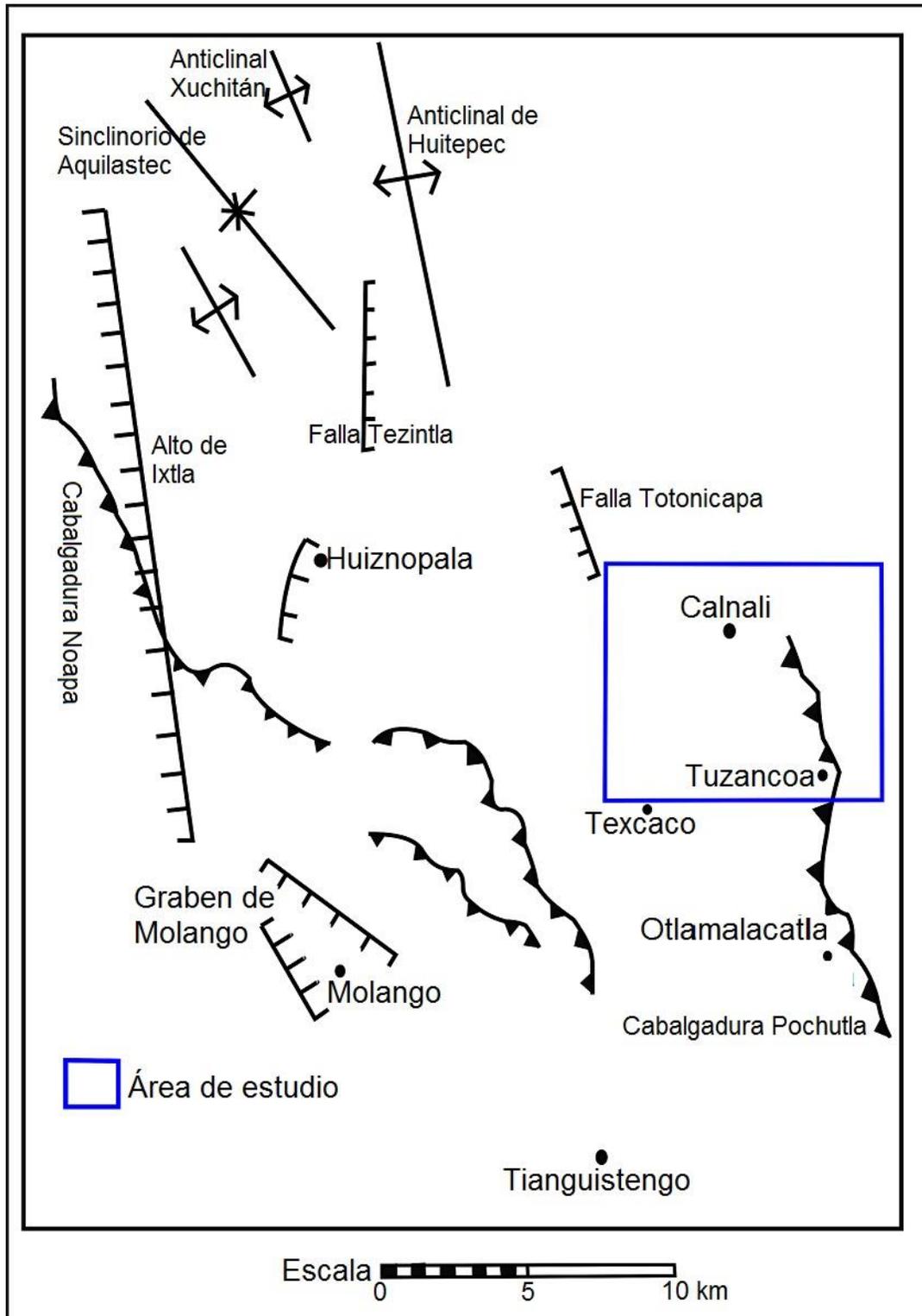


Figura 3.1 Rasgos Estructurales más sobresalientes de la región Molango-Calnali (modificado de Rosales-Lagarde, 2002)

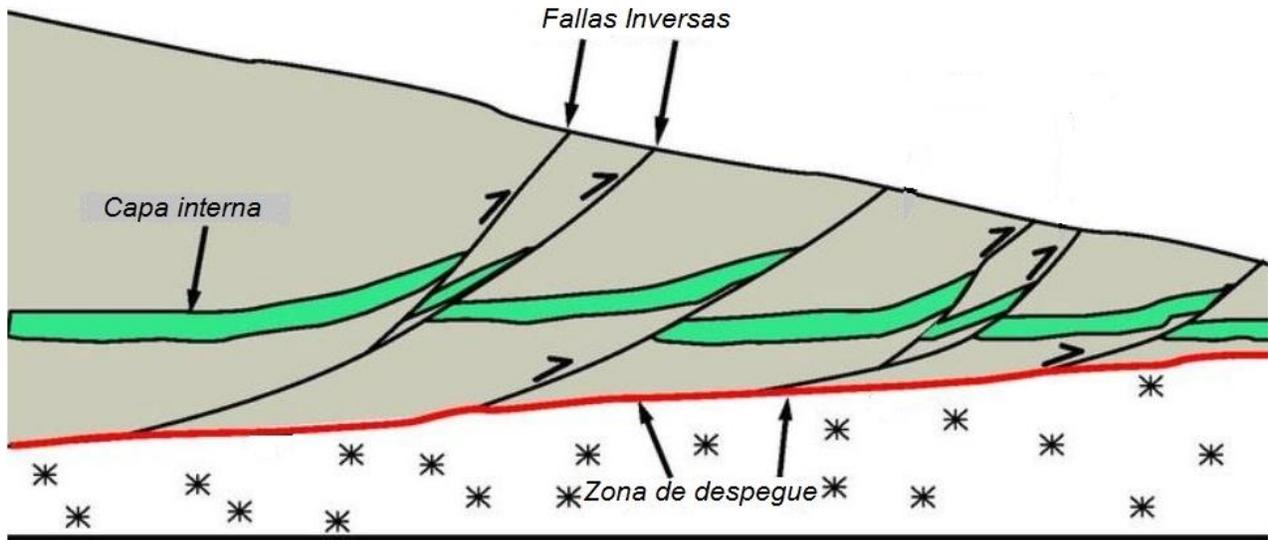


Figura 3.2 Deformación tipo "Thin skinned". Se observa una capa de color verde el cual es el marcador donde se observa varias fallas inversas dejando capas delgadas. Modelo propuesto (Eguiluz et al., 2000) para el sector Huayacocotla de la Sierra Madre Oriental.

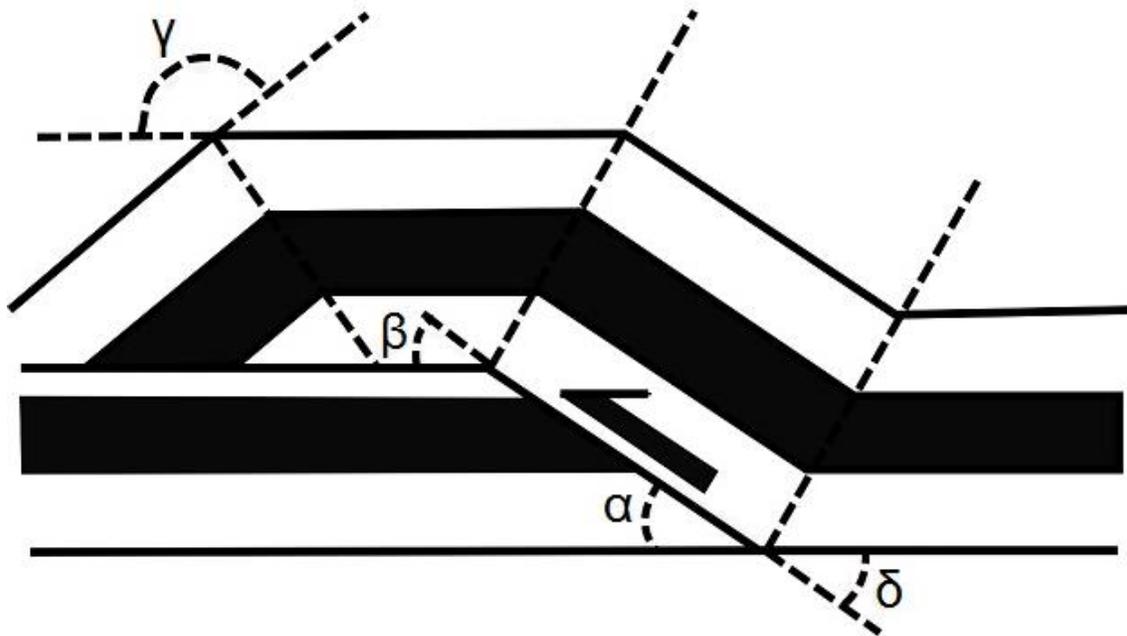


Figura 3.3 Características geométricas de pliegues asociados a fallas del tipo "Fault Bend-Fold". Estos pliegues se desarrollan en la parte superior de una falla inversa y son transportados a favor de una rampa. "γ" representa el ángulo interflancos, "α" el ángulo de la rampa, que está definido por los ángulos superiores e inferiores "δ" y "β". Esta es la formación de pliegues propuesta para el sector Huayacocotla por Eguiluz et al. (2000), (Modificado de Babín-Vich, 1996).

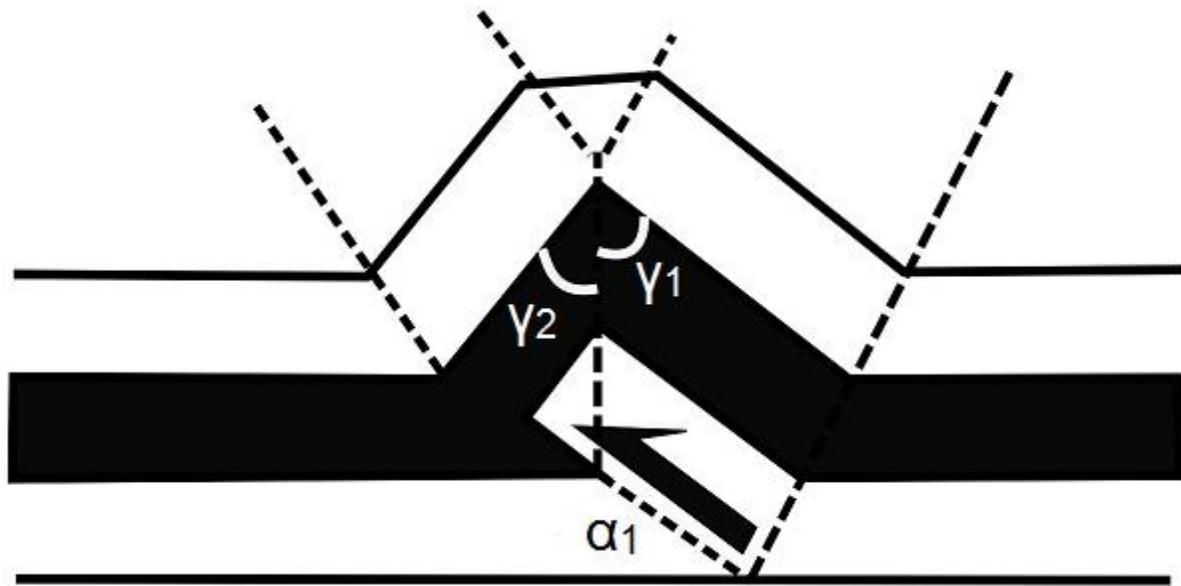


Figura 3.4 Características geométricas de pliegues asociados a "propagación de fallas". Estos pliegues se forman al mismo tiempo que la rampa quedando el pliegue sobre la misma, donde  $\gamma_1$  &  $\gamma_2$  son el ángulo interflancos,  $\alpha_1$  es el ángulo de la rampa (Modificado de Babín-Vich, 1996).

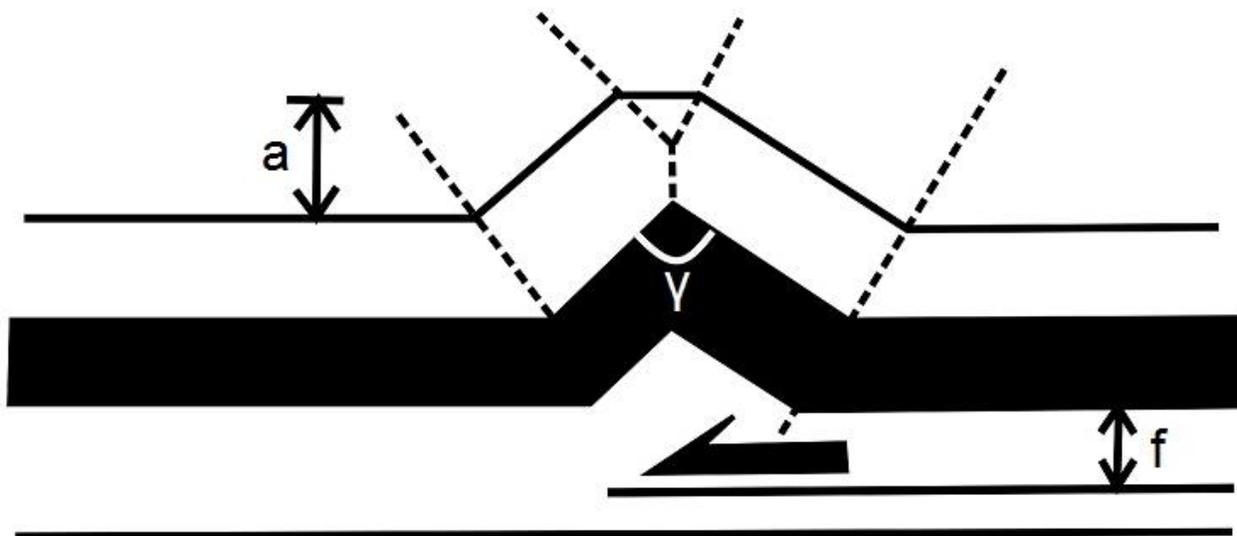


Figura 3.5 Características geométricas de pliegues tipo "Decollement". Estos pliegues se desarrollan en la terminación de una falla inversa, pero este caso no se asocia a ninguna rampa sino con la existencia de una superficie de "Decollement" por debajo del pliegue."  $\gamma$  es el ángulo interflancos y el pliegue se define por la relación  $a/f$ , (modificado de Babín-Vich, 1996)



## CAPÍTULO 4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El nombre de anticlinorio de Huayacocotla fue presentado por primera vez por Erben en 1956 y descrito por Carrillo Bravo en 1965. Redefinida como un conjunto de pliegues y cabalgaduras (Suter, 1990; Ochoa-Camarillo, 1996), esta mega estructura está limitada al norte por el lineamiento Talamaya-Huichihuayán, al este por la cuenca Tampico-Misantla, al oeste por las cabalgaduras de la plataforma de San Luis-Valles y al sur por la Faja Volcánica Transmexicana hasta Huayacocotla, Veracruz.

El sector Huayacocotla y en particular el anticlinorio se formaron por una compresión en dirección suroeste-noreste durante la orogenia Laramide. Como ya se ha mencionado en el capítulo pasado Eguiluz et al. (2000) y Ochoa-Camarillo (1996) mencionan que el despegue es en rocas de la Formación Huayacocotla y en algunos carbonatos de formaciones del Jurásico Superior y Cretácico Inferior sin embargo en el caminamiento realizado en la terracería rumbo al poblado de Tula, se encontró que efectivamente el paleozoico también está cabalgando a calizas de la Formación Tamaulipas lo cual concuerda lo dicho por Rosales-Lagarde (2002) que en rocas de la Formación Tuzancoa hay despegue.

### 4.1 Análisis Descriptivo.

Se comenzará con los pliegues y fallas que conforman la zona de estudio dentro del anticlinorio de Huayacocotla. Elaboraremos el análisis tanto en rocas carbonatadas (Formación Tamaulipas) como en rocas clásticas (Formación Tuzancoa).

Se esquematizará con el programa DIPS<sup>®</sup> los planos de las fallas y de los flancos de cada pliegue junto con su plano axial, se clasificará con base a su ángulo interflancos y en la orientación y posición de la línea de charnela y plano axial, así como se elaborará diagramas  $\pi$  y  $\beta$ .

Se iniciará con los pliegues de la Formación Tamaulipas que se encuentran en el camino de terracería de Tostlamantla a Calnali al Norte del área de estudio.

En la figura 4.1 las ciclográficas con el número 2 y 3 son los flancos del pliegue y la ciclográfica con el número 5 P.A. es el plano axial, a un costado se observa el rumbo y echado de cada plano por mano derecha (Strike/DipRight).

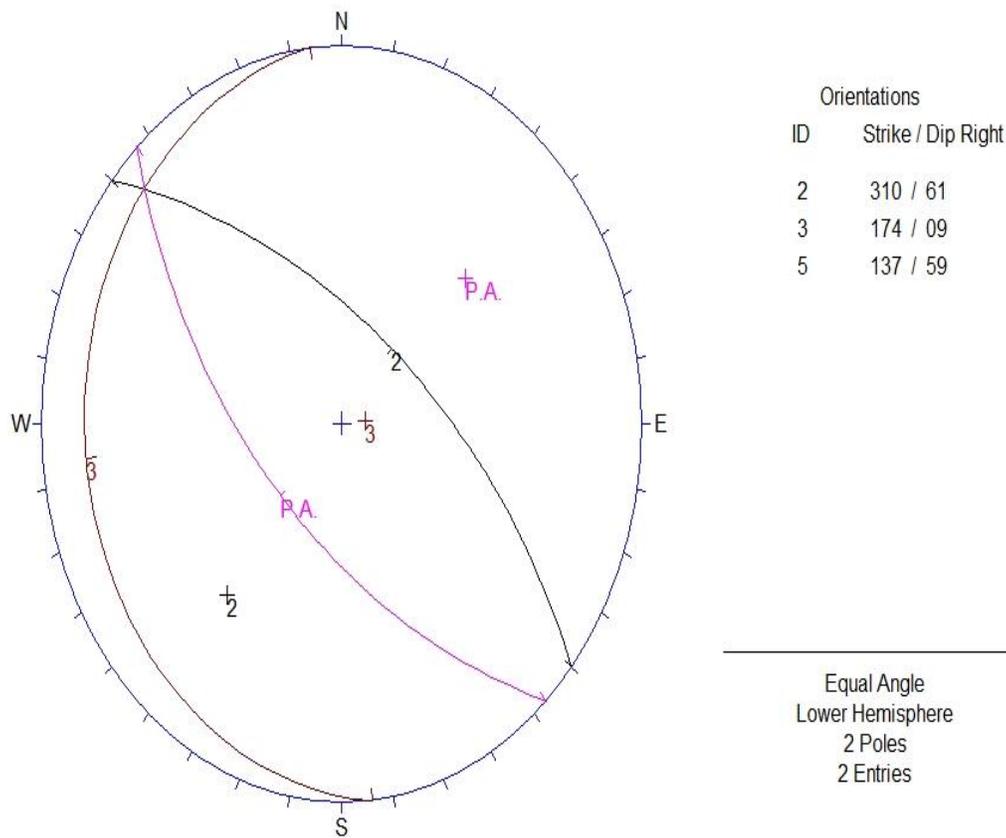


Figura 4.1 Esquema de pliegue sinforme en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, flanco 2: N50°W, 61°, flanco 3: S08°E, 09°, 5: P.A S43°E, 59°.

El ángulo interflancos es 112° por tanto se clasifica como un pliegue “abierto”.

Con base a la línea de Charnela y el plano axial; se clasifica como “Buzante Inclinado”, debido a que la charnela tiene una orientación de 7° al N46°W y el plano axial está inclinado 59°.

En la figura 4.2 se presenta las ciclográficas de los flancos con número 1 y 2. El plano axial está representado como P.A. con el número 4, a un costado se visualiza sus orientaciones (Strike/DipRight).

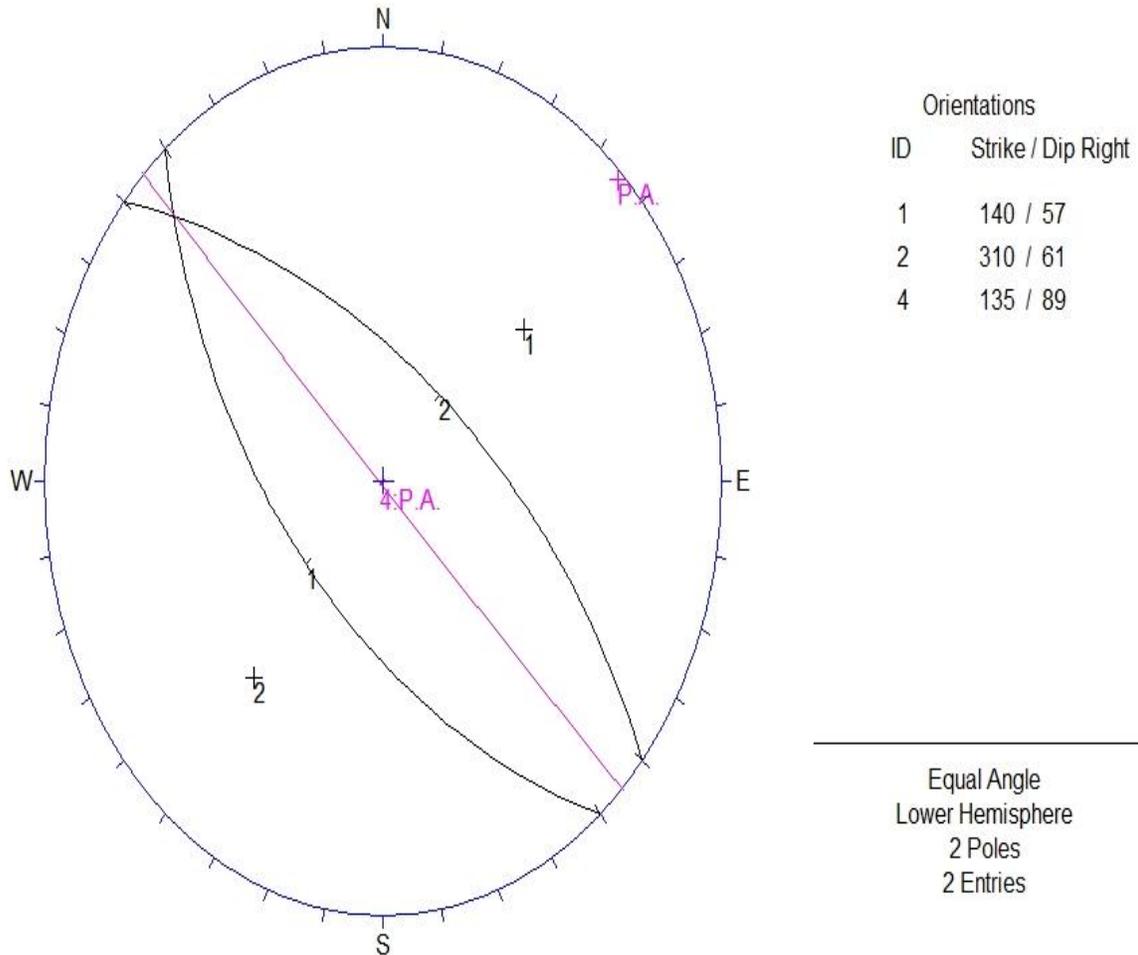


Figura 4.2 Esquema de pliegue antiforme en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, flanco 1: S40°E, 57°, flanco 2: N50°W, 61°, 4: P.A S45°E, 89°.

El ángulo interflancos es de 64° por tanto este pliegue se clasifica como “cerrado”.

Con base en la orientación y posición de línea de charnela y el plano axial este pliegue se clasifica como “Buzante Normal” debido a la inclinación del plano axial es casi vertical (89°) y la línea de charnela se encuentra inclinada 8° al N45°W.

En la figura 4.3 se representa con los números 1 y 2 los flancos del pliegue y con el número 4 P.A. de color rojo el plano axial con su respectivo rumbo y echado a un costado derecho (Strike/DipRight).

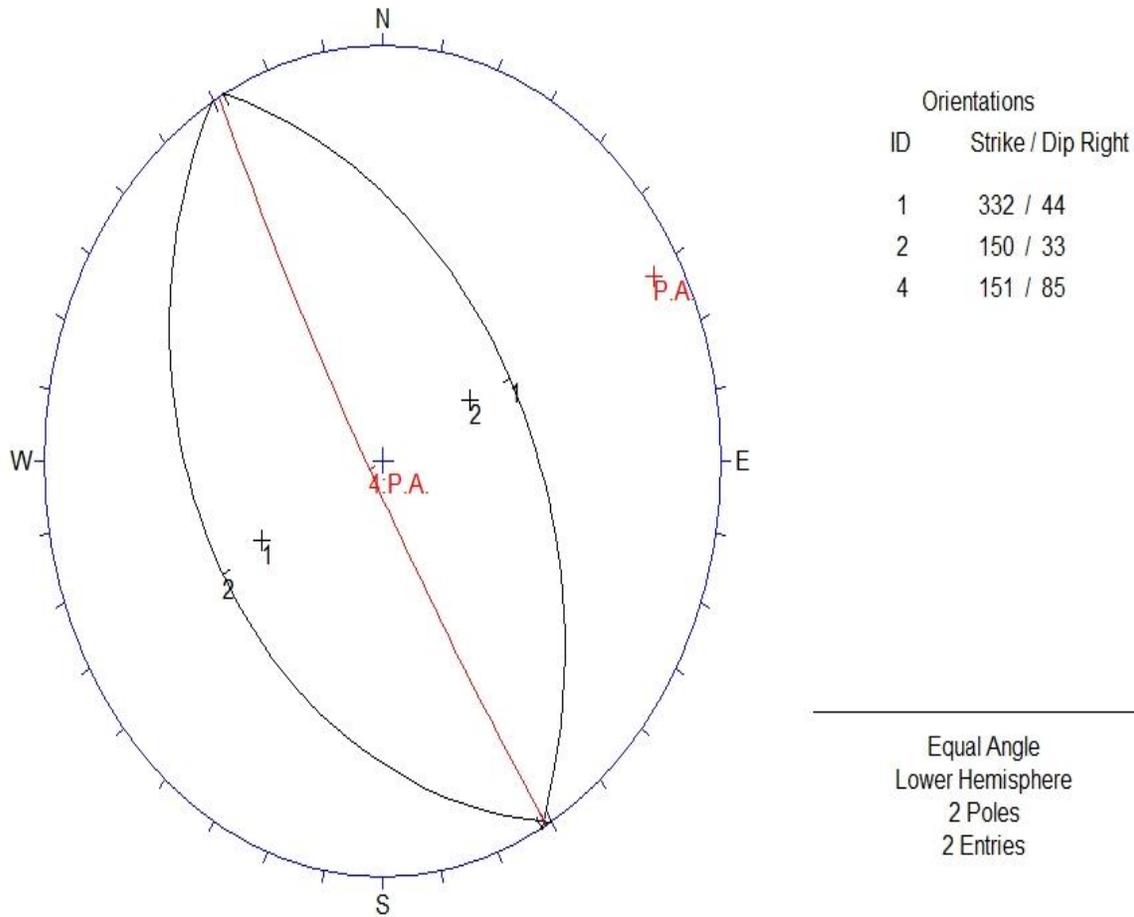


Figura 4.3 Esquema de pliegue sinforme en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, flanco 1: N28°W, 44°, flanco 2: S30°E, 33°, 4: P.A S29°E, 85°.

El ángulo interflancos es de 103° por tanto se trata de un pliegue abierto.

Teniendo como orientación de la charnela 1° al S29°E y el plano axial casi vertical (85°) se consideró como charnela horizontal y plano axial inclinado por tanto es un pliegue Horizontal Inclinado.

En la figura 4.4 se visualiza los flancos del pliegue (color negro) y su plano axial P.A. (color rosa) y a un lado los respectivos rumbos y echados (Strike/DipRight).

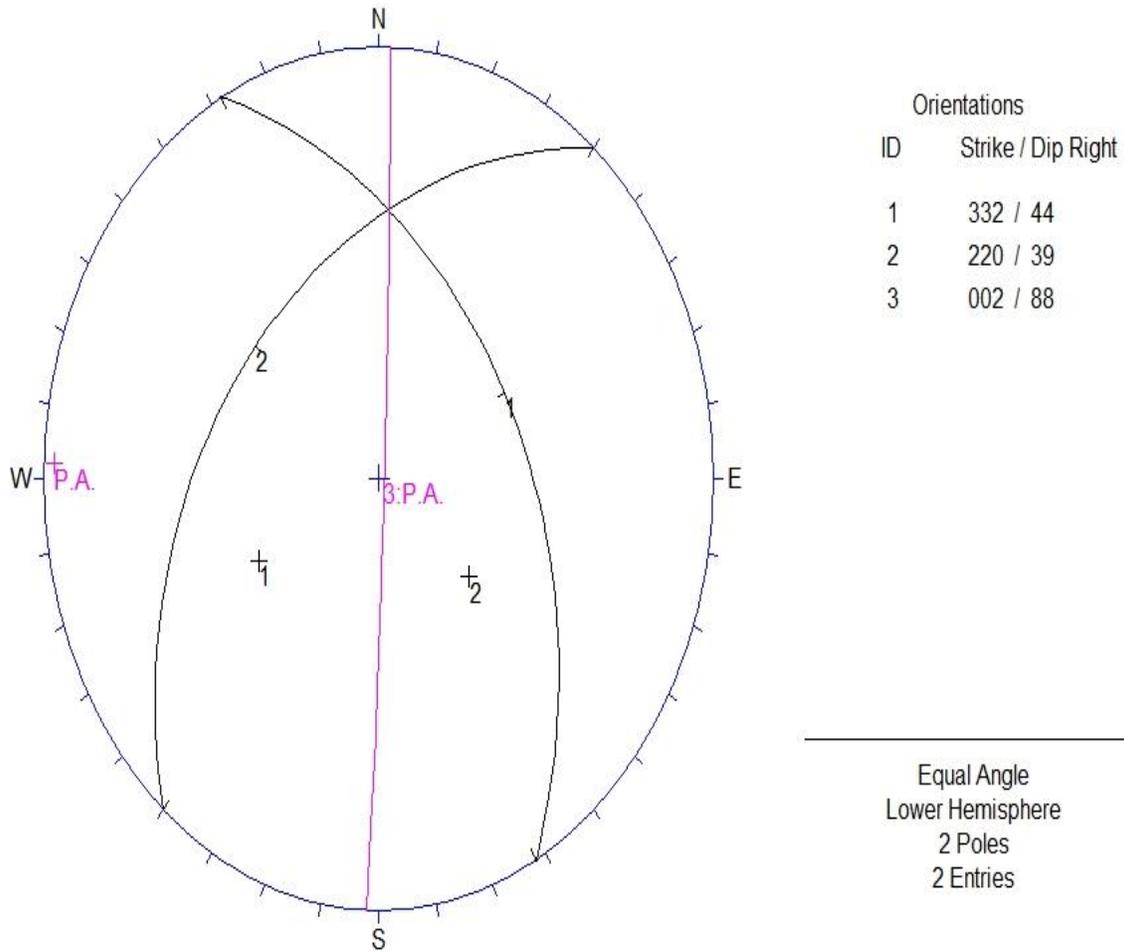


Figura 4.4 Esquema de pliegue antiforme en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, flanco 1: N28°W, 44°, flanco 2: S40°W, 39°, 3: P.A N02°E, 88°.

El ángulo interflancos es de 114° por lo que se clasifica como un pliegue “abierto”.

Se observa que la inclinación del plano axial es casi vertical (88°) y la charnela tiene una orientación de 27° al N2°E, este pliegue se clasifica como “Buzante Inclinado”.

Los flancos del pliegue de la figura 4.5 se visualizan con el número 1 y 2, el plano axial esta dibujado de color rosa y se observa con el numero 3 P.A. y a un lado los respectivos rumbos y echados (Strike/DipRight).

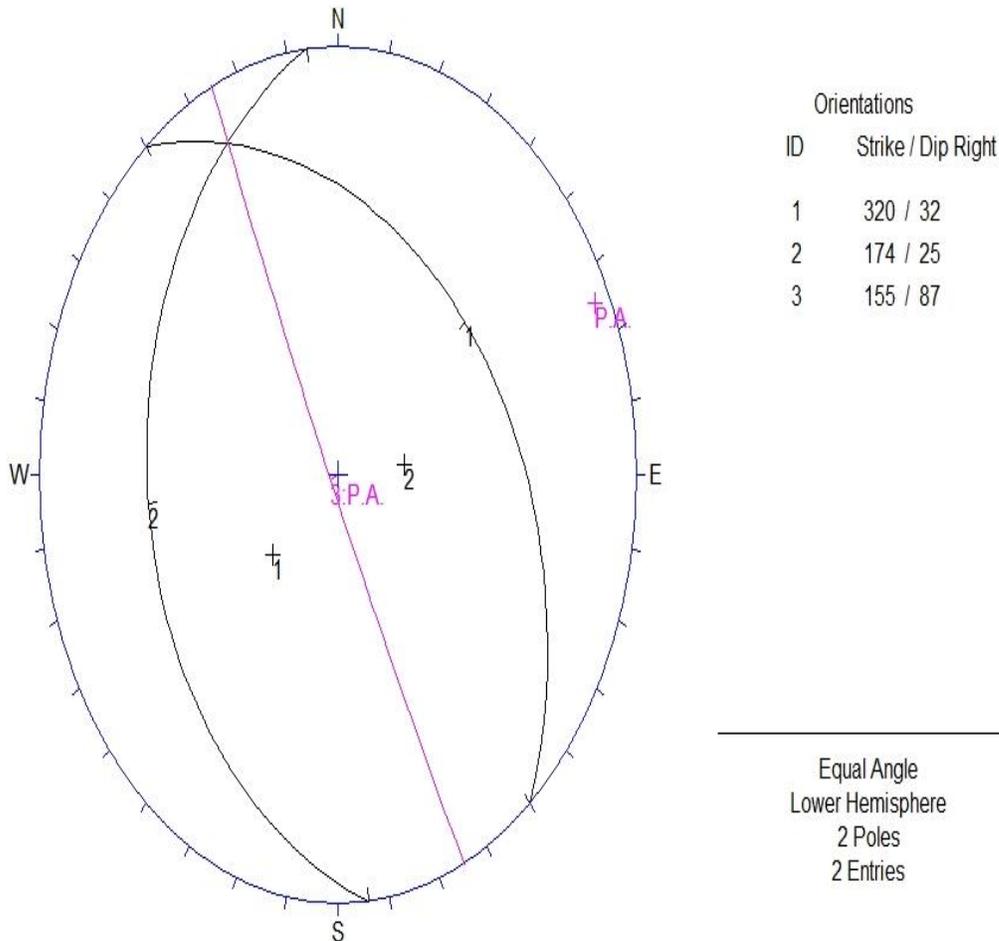


Figura 4.5 Esquema de pliegue Sinforme en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, Flanco 1: N40°W, 32°, flanco 2: S06°E, 25°, 3: P.A S25°E, 87°.

El ángulo interflancos es de 123° por lo cual se considera como un pliegue “suave”.

Se observa que el plano axial tiene un buzamiento de 87° y la charnela se encuentra orientada 10° al N25°W, este pliegue se clasifica como “Buzante Inclinado”.

En la figura 4.6 se puede ver la concentración de polos de los datos de estratificación (diagrama  $\pi$ ) de las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de la zona de estudio, el color más oscuro simboliza mayor densidad de polos.

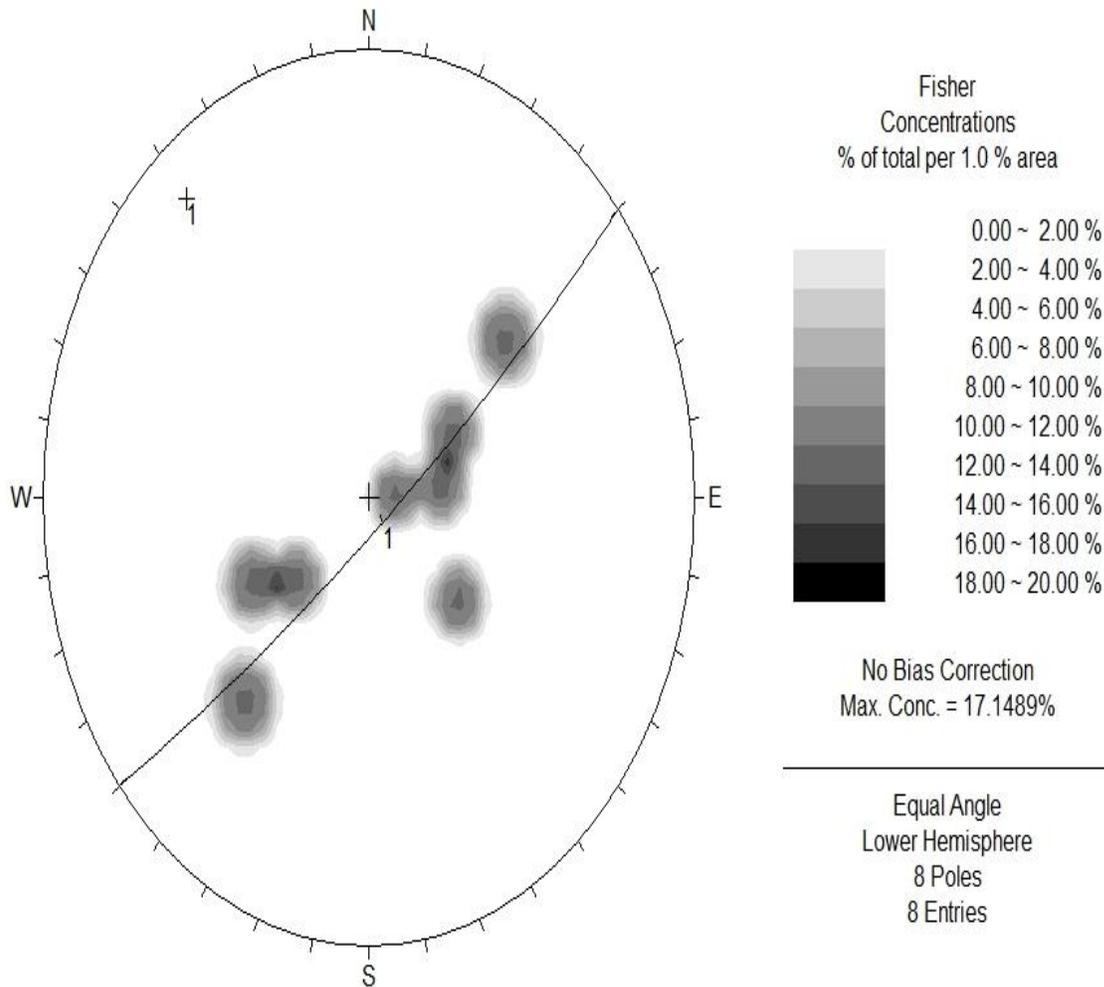


Figura 4.6 Diagrama  $\pi$  promedio de polos de los flancos analizados de los pliegues de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, la ciclográfica 1:  $N50^{\circ}E, 82^{\circ}SE$  representa el diagrama  $\pi$ , el polo con orientación  $8^{\circ}$  al  $NW40^{\circ}$  es el eje de los pliegues analizados.

Se observa una ciclográfica promedio que representa el diagrama  $\pi$  ( $N50^{\circ}E, 82^{\circ}SE$ ). La orientación de su polo es  $8^{\circ}$  al  $N40^{\circ}W$  que es interpretada como la orientación principal de los ejes de los pliegues.

En la Figura 4.7, se muestra el diagrama  $\beta$ , que es otra forma de observar el eje principal de los pliegues analizados.

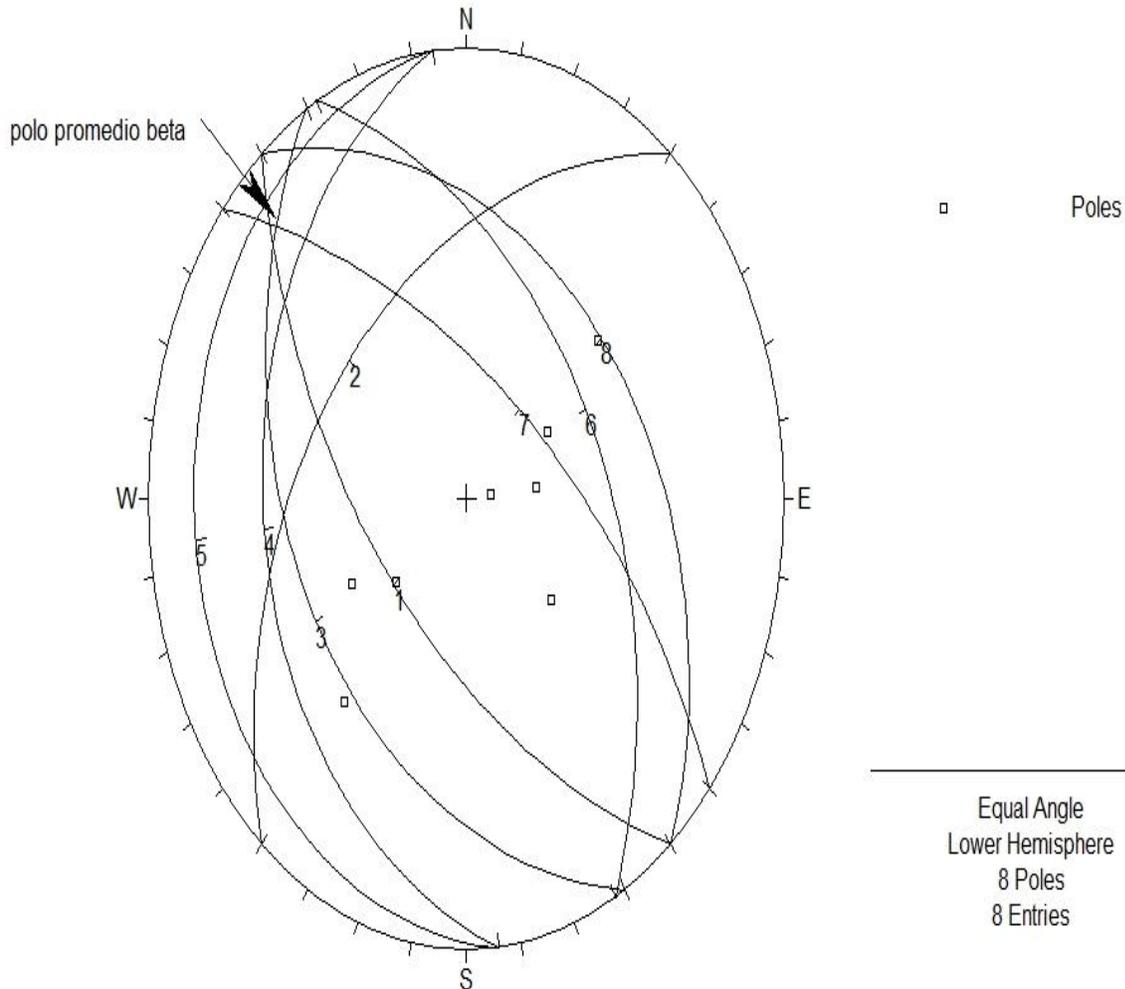


Figura 4.7 Esquema de diagrama  $\beta$  de los pliegues analizados en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, el cual dio una orientación de  $7^\circ$  al  $NW44^\circ$  para el eje promedio de los pliegues.

La flecha indica el promedio del diagrama  $\beta$  de los flancos de los pliegues analizados, el cual tiene una orientación de  $7^\circ$  al  $N44^\circ W$ , que es casi similar al resultado que arroja el diagrama  $\pi$  ( $8^\circ$  al  $N40^\circ W$ ), por tanto, se comprueba que la solución que se obtuvo es la correcta y que los ejes de los pliegues de las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali pasan en dirección  $N42^\circ W$  en promedio con un buzamiento muy leve de  $8^\circ$ .

Los diagramas que a continuación se presentan son de pliegues de rocas clásticas de la Formación Tuzancoa que se tomaron en el caminamiento de Tostlamantla al poblado de Chiquitla. En el diagrama 4.8 se muestra los flancos del pliegue en color negro, de color rosa el plano axial y a un lado los respectivos rumbos y echados (Strike/DipRight).

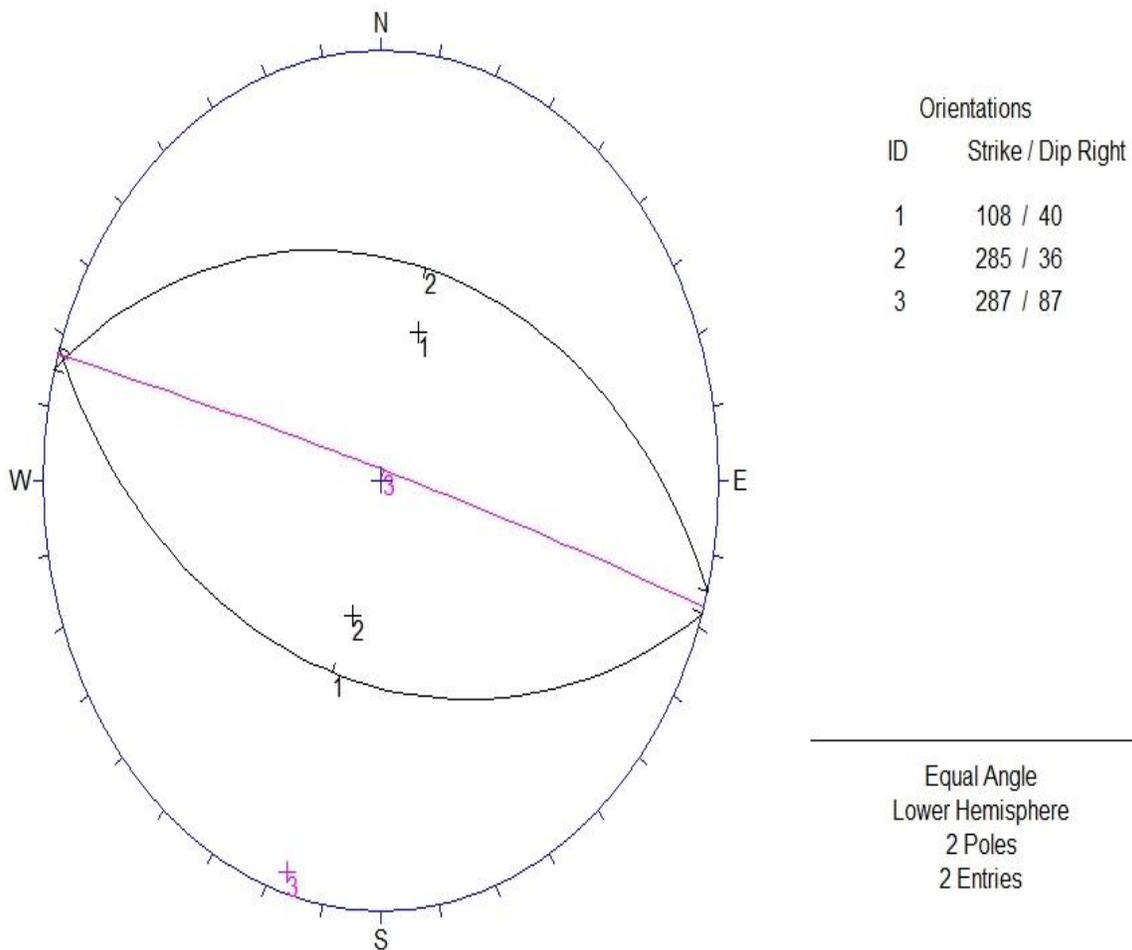


Figura 4.8 Esquema de pliegue Sinforme en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa del poblado de Tostlamantla a Chiquitla, flanco 1: S72°E, 40°, flanco 2: N75°W, 36°, 3: P.A N73°W, 87°.

El ángulo interflancos es de 103° y se clasifica como “abierto”.

La orientación de la charnela es de 1° al N73°W, el plano axial buza 87° por tanto es un pliegue “Horizontal Inclinado”.

En la figura 4.9, se visualiza los flancos del pliegue antiforme de color negro y su plano axial de color rosa, a lado derecho se muestra su rumbo y echado en azimutal (Strike/DipRight).

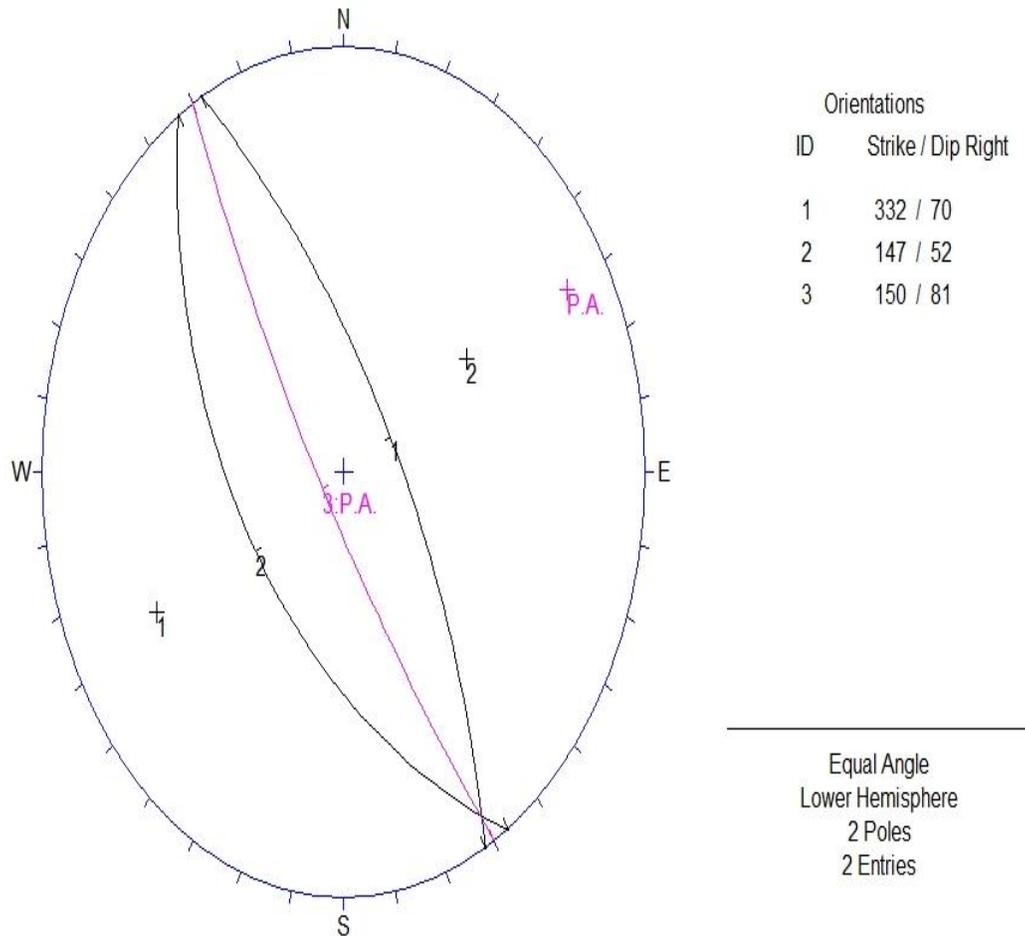


Figura 4.9 Esquema de pliegue Antiforme en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa entre el poblado de Tostlamantla y Chiquitla, flanco 1: N28°W, 70°, flanco 2: S33°E, 52°, 3: P.A S30°E, 81°.

El ángulo interflancos es de 56° por lo cual se clasifica como un pliegue “cerrado”.

La dirección de la charnela es 4° al S30°E y el plano axial tiene una inclinación de 81° por tanto se considera un pliegue “Buzante Inclinado”.

Los gráficos posteriores son del caminamiento sobre la carretera que va al poblado de Ahuacatlán y la terracería que se dirige al cerro Teacal al poniente de Calnali (Formación Tuzancoa). En la figura 4.10 se observa los flancos del pliegue de color negro y su plano axial de color rosa, del lado derecho sus respectivas orientaciones (Strike/DipRight).

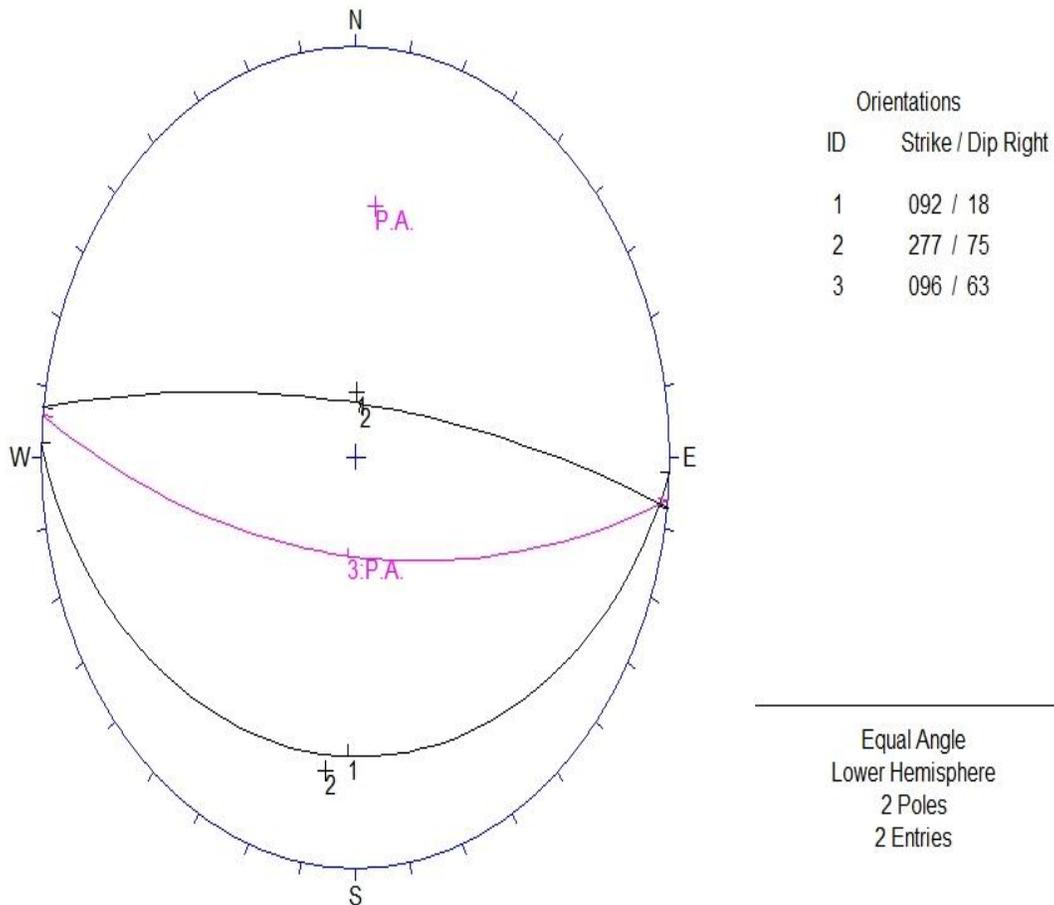


Figura 4.10 Esquema de pliegue Sinforme en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa sobre la carretera al poblado de Ahuacatlán al poniente de Calnali, flanco 1: S88°E, 16°, flanco 2: N83°W, 75°, 3: P.A S84°E, 63°.

El ángulo interflancos es de 85° por tanto es un pliegue “abierto”.

La orientación de la línea de charnela es 2° al S83°E, se tomará como horizontal y el plano axial tiene un echado de 63° por lo cual se clasifica como un pliegue “Horizontal Inclinado”.

Los flancos del pliegue de la figura 4.11 están simbolizados de color negro y el plano axial de color rosa, a lado derecho se muestra sus respectivas orientaciones en azimutal (Strike/DipRight).

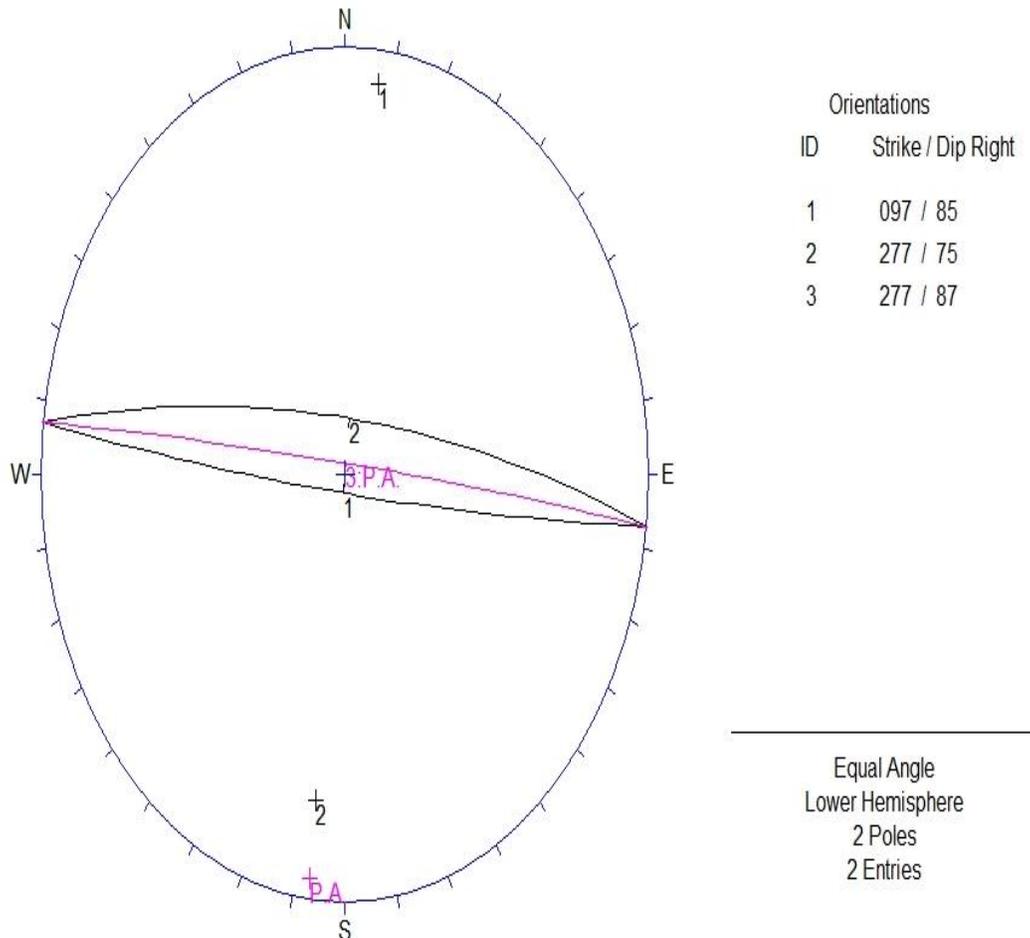


Figura 4.11 Esquema de pliegue Antiforme en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa en la terracería que va al cerro Teacal, al poniente de Calnali, flanco 1: S83°E, 85°, flanco 2: N83°W, 75°, 3: P.A N83°W, 87°.

El ángulo interflancos es de 20° por lo cual es un pliegue “apretado”.

Si se considera la inclinación del plano axial (87°) y que la línea de charnela tiene una orientación de 1° al S82°E, la cual se tomo como horizontal, este pliegue se clasifica como “Horizontal Inclinado”.

En la figura 4.12 se muestran los flancos de los pliegues de color negro y el plano axial de color rosa y a un costado sus respectivas orientaciones en azimutal (Strike/DipRight).

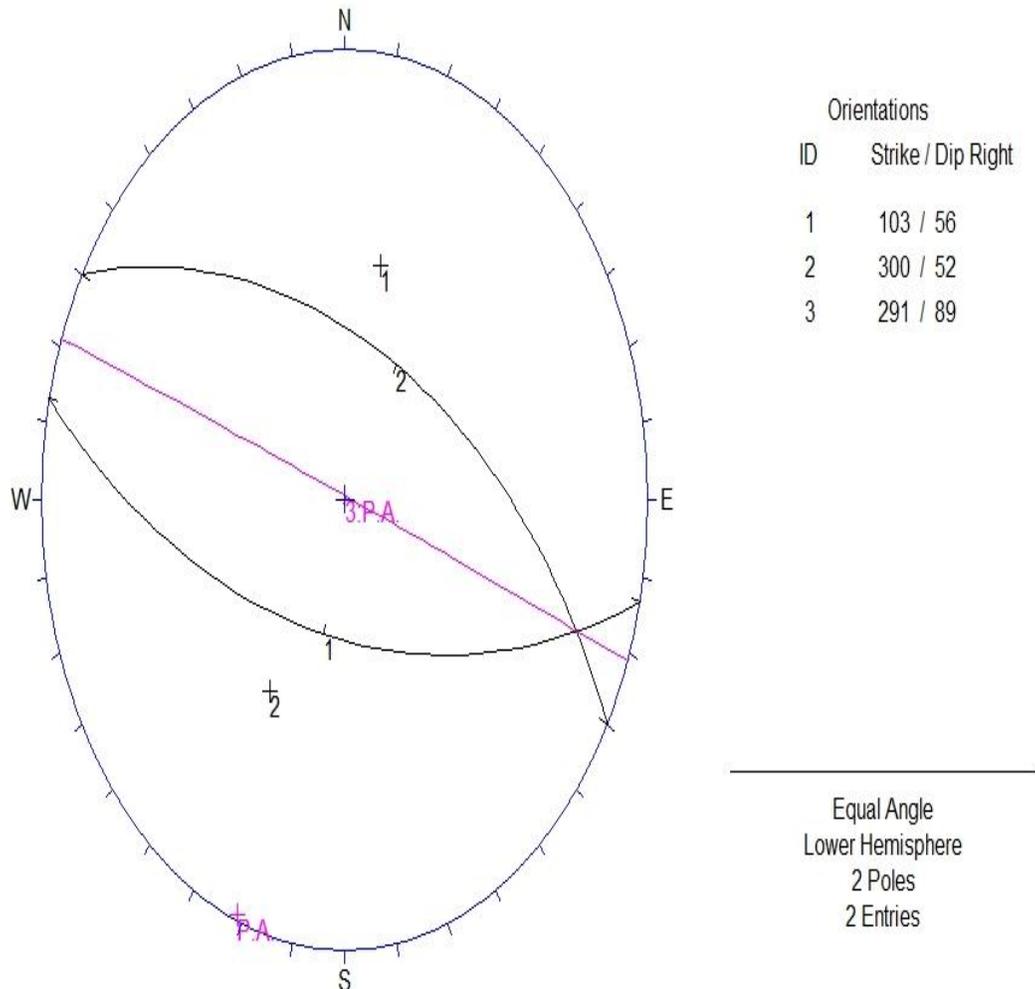


Figura 4.12 Esquema de pliegue Sinforme en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa en la terracería que va al cerro Teacal al poniente de Calnali, flanco 1: S77°E, 56°, flanco 2: N60W°, 52°, 3: P.A N69°W, 89°.

El ángulo interflancos es de 73° por tanto se considera como un pliegue “abierto”.

El plano axial se inclina 89° por lo que se tomo como vertical, la charnela tiene una orientación de 12° al S69°E, con estos datos el pliegue se clasifica como “Buzante Normal”.

En la figura 4.13 se observa los flancos de los pliegues de color negro y el plano axial de color rosa, sus respectivas orientaciones en azimutal se encuentran a la derecha (Strike/DipRight).

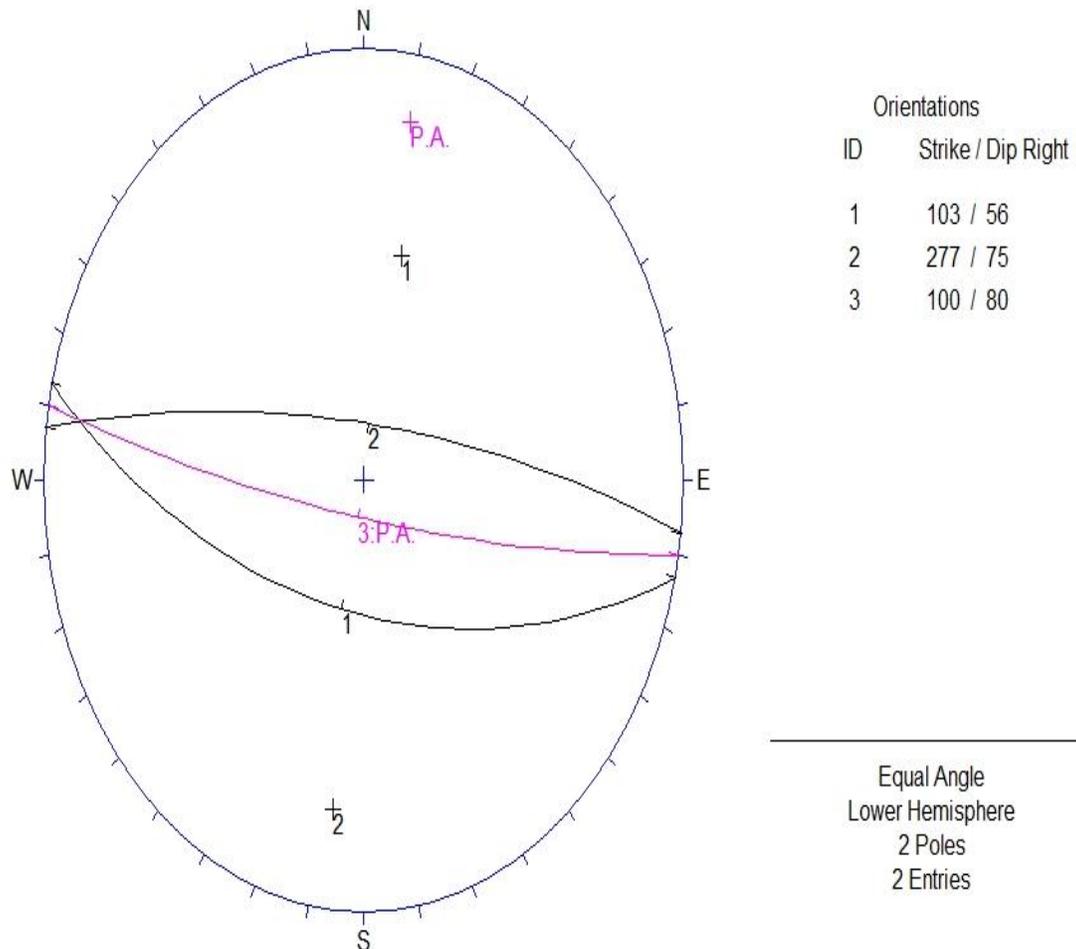


Figura 4.13 Esquema de pliegue Antiforme de lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa en la terracería que va al cerro Teacal al poniente de Calnali, flanco 1: S77°E, 56, flanco 2: N83°W, 75°, 3: P.A S80°E, 80°.

El ángulo interflancos es de 52° por tanto se considera como un pliegue “cerrado”.

La orientación de la charnela es 6° al N81°W, tomando en cuenta que el plano axial buza 80° este pliegue se clasifica como “Buzante Inclinado”.

En la figura 4.14 se muestra la concentración de polos de los flancos (diagrama  $\pi$ ) de los pliegues analizados de la alternancia de lutitas y areniscas encontradas al poniente de Calnali, el color más oscuro representa mayor densidad.

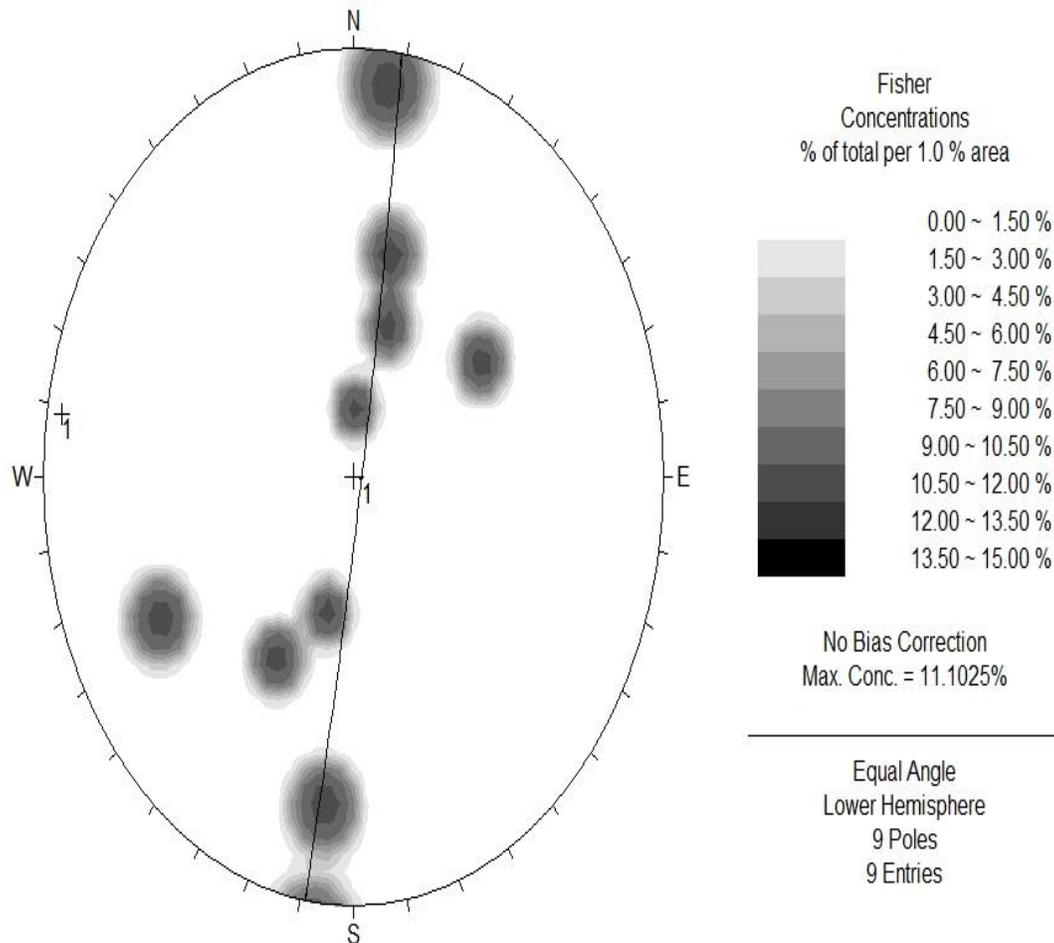


Figura 4.14 Diagrama  $\pi$  promedio de los polos de cada flanco de los pliegues de las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa de la carretera que va a Ahuacatlán y la terracería al cerro Teacal al poniente de Calnali, diagrama  $\pi$  1:  $N09^{\circ}E$ ,  $87^{\circ}$  su respectivo polo tiene una orientación de  $3^{\circ}$  al  $NW80^{\circ}$  el cual es el eje promedio de los pliegues.

La ciclográfica con el número 1 en la figura 4.14 simboliza el diagrama  $\pi$  promedio ( $N09^{\circ}E$ ,  $87^{\circ}SE$ ), la orientación principal de los ejes de los pliegues de la Formación Tuzancoa es el polo del diagrama  $\pi$  de  $3^{\circ}$  al  $N80^{\circ}W$ .

En la figura 4.15 se esquematiza el diagrama  $\beta$ , con el cual se comprueba el resultado del diagrama  $\pi$ , a un costado se simboliza con cuadros los polos.

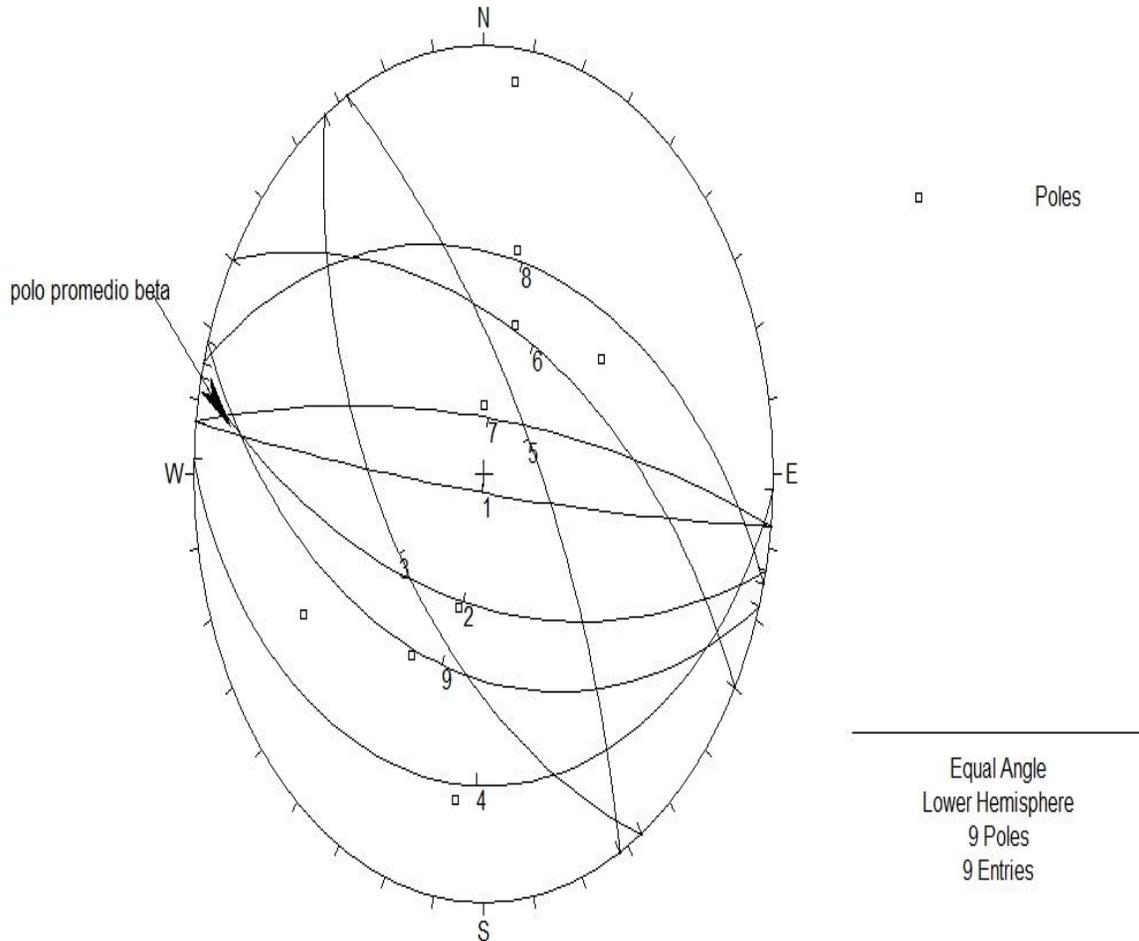


Figura 4.15 Diagrama  $\beta$  para los pliegues analizados de la Formación Tuzancoa sobre la carretera a Ahuacatlán y la terracería al cerro Teacal al poniente de Calnali, con una orientación del eje de los pliegues de  $7^\circ$  al  $NW83^\circ$ .

La flecha muestra la orientación general de los ejes de pliegue que dio como solución  $7^\circ$  al  $N83^\circ W$ , si se compara con el diagrama  $\pi$  arrojan casi el mismo resultado por tanto el eje de los pliegues de la Formación Tuzancoa tienen un buzamiento muy leve, casi horizontal de  $3^\circ$  a  $7^\circ$  con un rumbo NW de aproximadamente de  $80^\circ$ , lo cual concuerda con lo analizado por Rosales-Lagarde (2002) en las facies siliciclásticas y vulcanoclásticas sobre el río Tlacolula, así como en las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali que se explico con anterioridad.

En la figura 4.16, se observa los flancos del pliegue de color negro y de color rosa el plano axial, a un costado derecho se encuentra los rumbos y echados de cada plano en azimutal (Strike/DipRight). Este pliegue se interpretó en calizas de la Formación Tamaulipas al suroriente de la ciudad de Calnali.

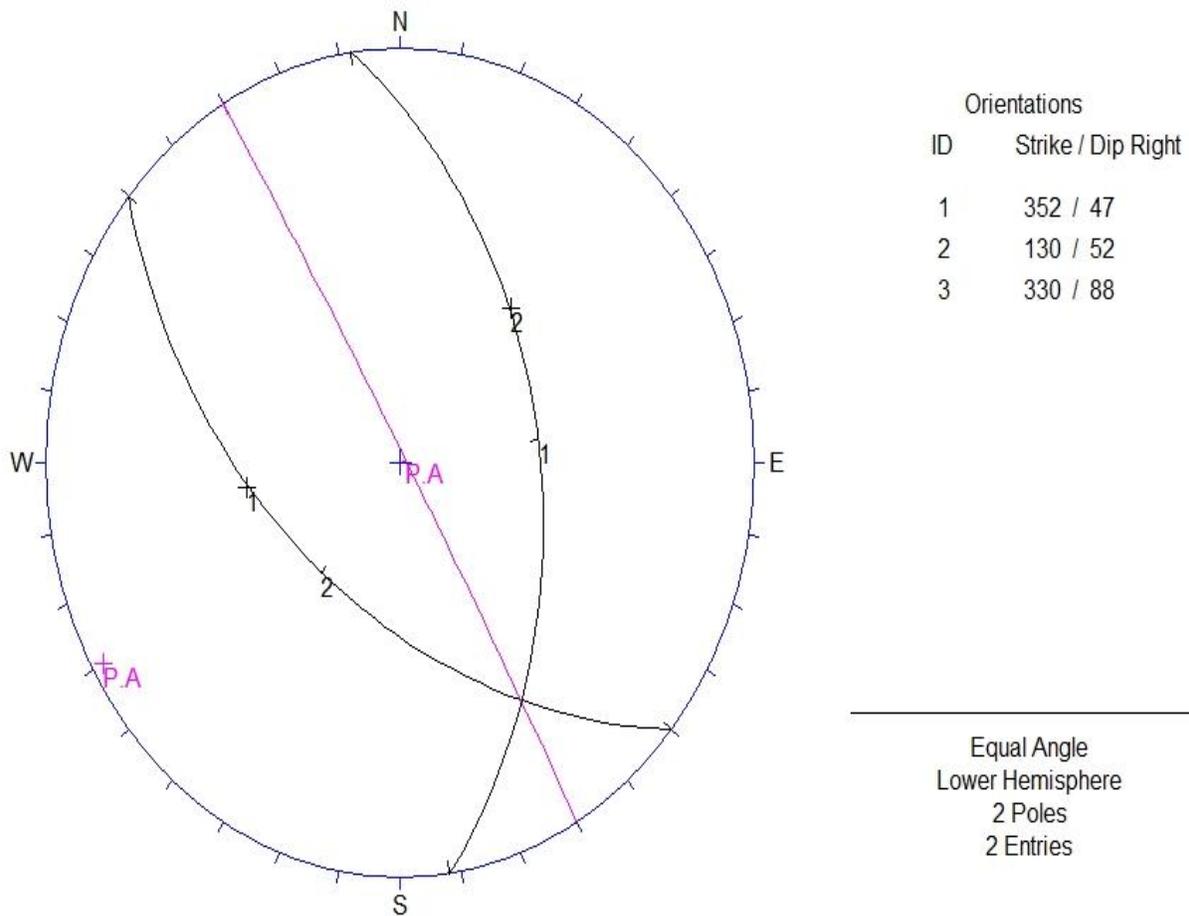


Figura 4.16 Esquema de pliegue Antiforme interpretado en calizas de la Formación Tamaulipas en suroriente de Calnali, flanco 1: N08°W, 47°, flanco 2: S50°E, 52°, 3: P.A N30°W, 88°.

El ángulo interflancos es de 90°, por lo que se clasifica como un pliegue “abierto”.

El buzamiento del plano axial es de 88° y la línea de charnela tiene una orientación de 23° al S30°E, por tanto se clasifica como “Buzante Inclinado”.

En la figura 4.17 se muestra los flancos de un pliegue antiforme interpretado al sureste de Calnali en lutitas de la Formación Tuzancoa, el plano axial esta de color rosa y a un costado derecho se observa sus respectivas orientaciones en azimutal (Strike/DipRight).

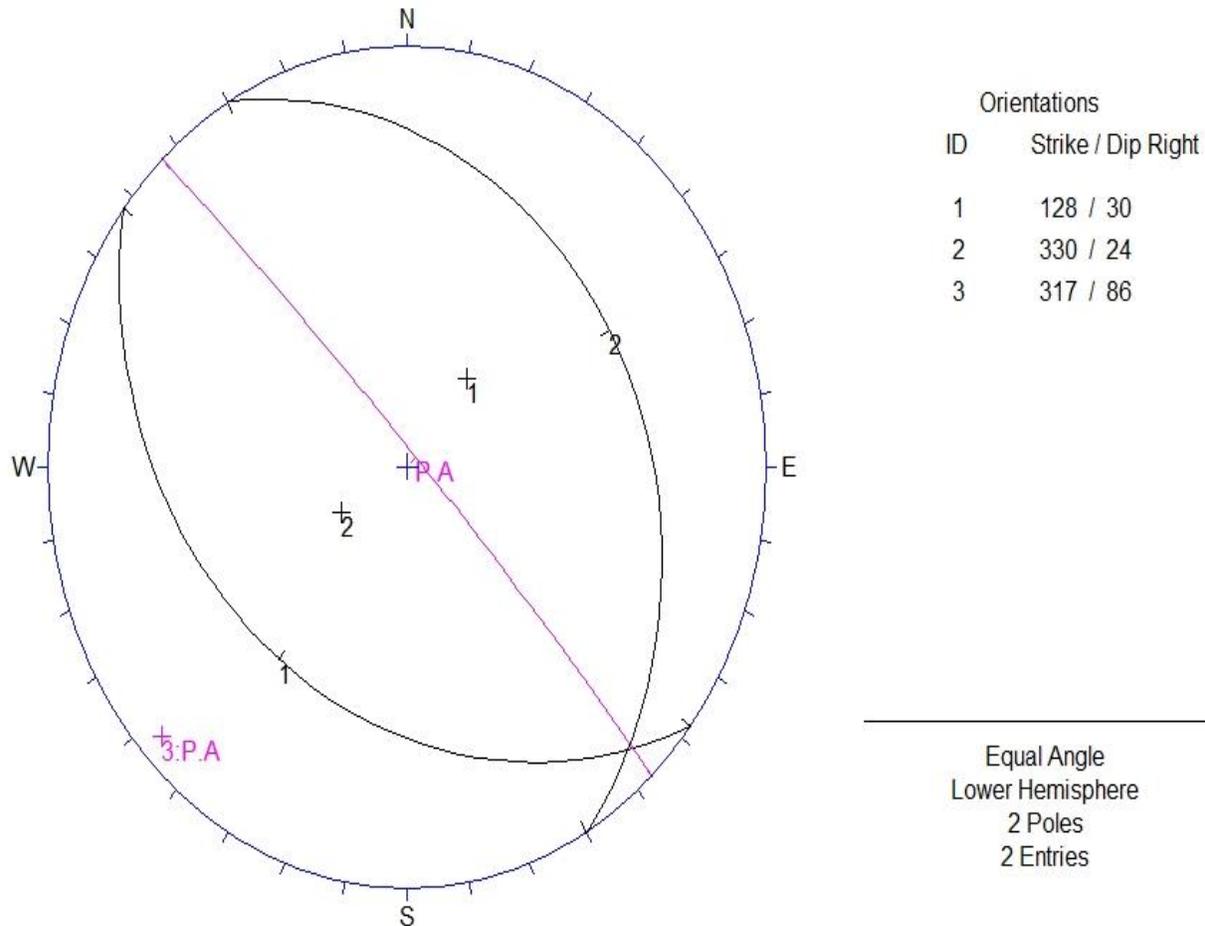


Figura 4.17 Esquema de pliegue Antiforme interpretado en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa al suroriente de Calnali, flanco 1: S52°E, 30°, flanco 2: N30°W, 24°, 3: P.A N43°W, 86°.

El ángulo interflancos es de 128°, por tanto es un pliegue “Suave”.

Con base a la línea de charnela que tiene una orientación de 5° al S42°E, y el plano axial una inclinación de 86°, este pliegue se clasifica como “Buzante Inclinado”.

En la figura 4.18 se muestran los perfiles y contornos correspondientes de varios tipos de diagrama  $\pi$  promedio.

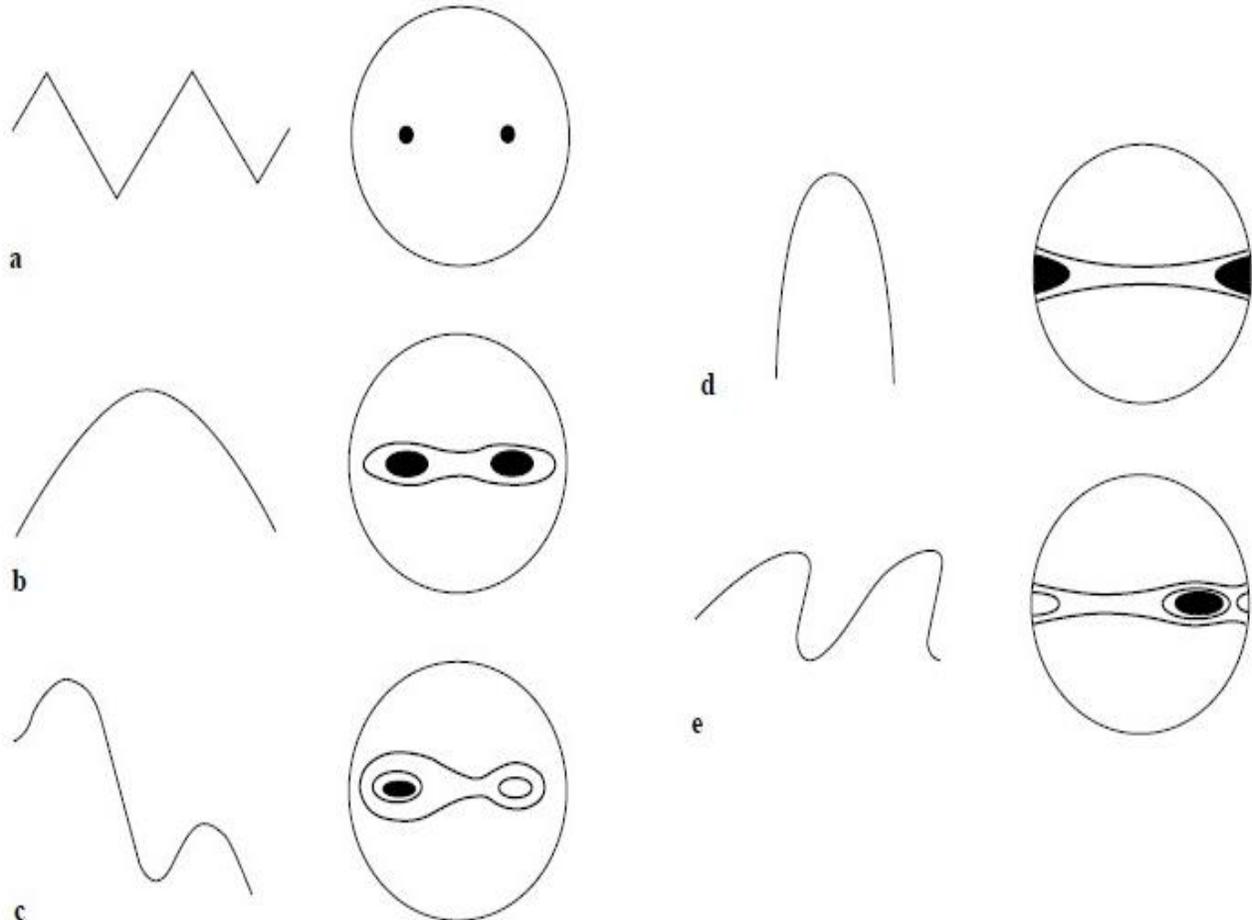
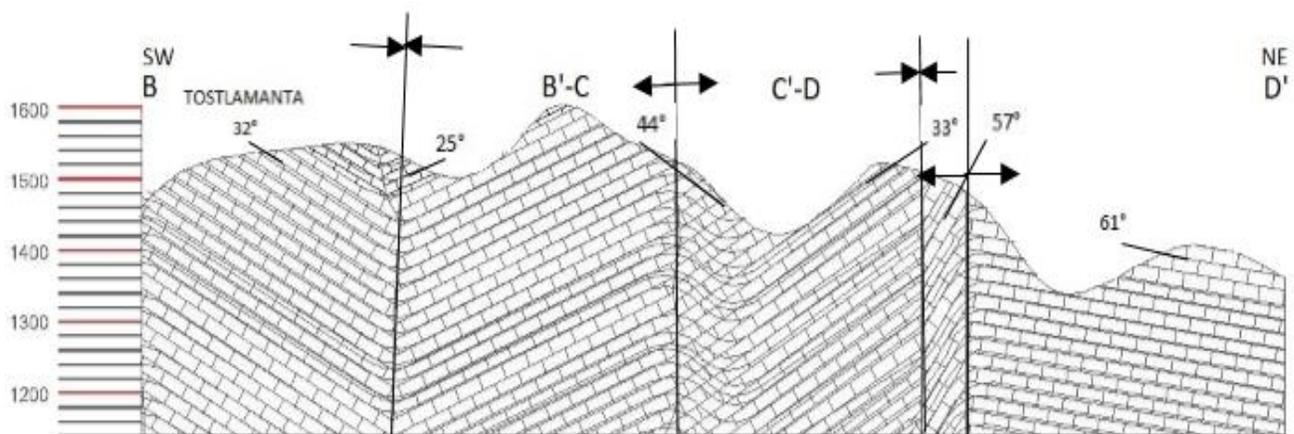


Figura 4.18 Perfiles y contornos correspondientes a diagramas  $\pi$  de varios tipos de pliegues, "a" del tipo chevron, "b" parabólicos, "d" semi elípticos y "e" asimétricos. (Tomado de Rowland, *Structural Analysis & Synthesis*. C, D y E después de Ragan, 1985).

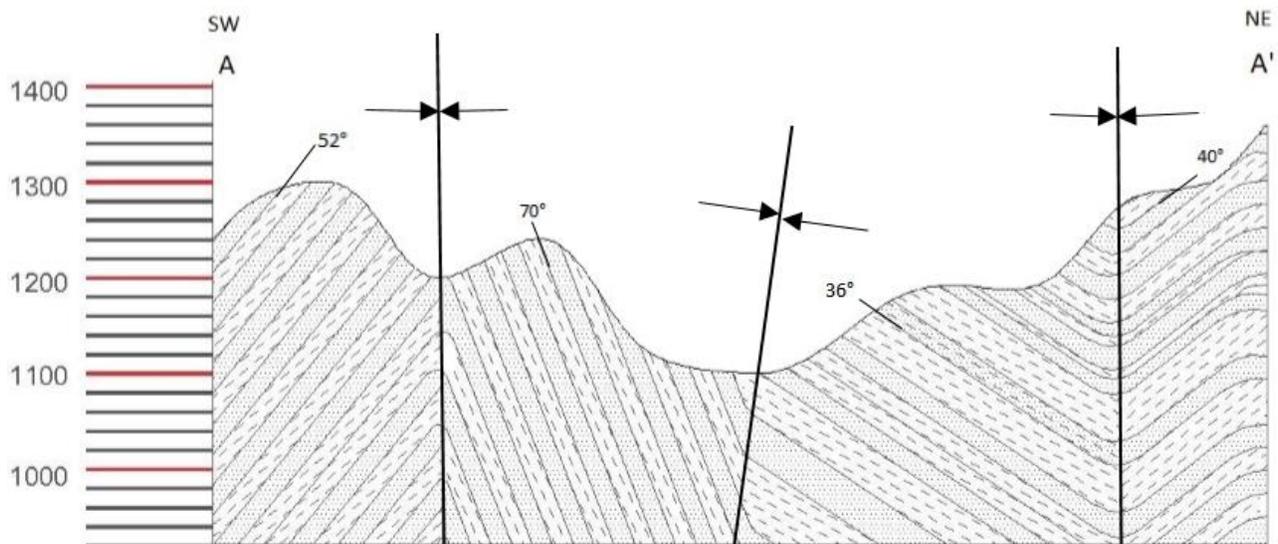
Usando el diagrama  $\pi$  de las calizas de la Formación Tamaulipas (figura 4.6) y comparándolo con los esquemas observados de los promedios de diagramas  $\pi$  (Figura 4.18) se asume que los pliegues de la zona norte *tienen una forma del tipo "B"* ya que su concentración de polos es casi central.

El diagrama  $\pi$  obtenido para los pliegues de la Formación Tuzancoa (Figura 4.14) el cual muestra una amplia distribución de polos a lo largo de la ciclográfica  $\pi$  y comparándolo con los de la figura 4.18 *se asemeja al del tipo "E"*.

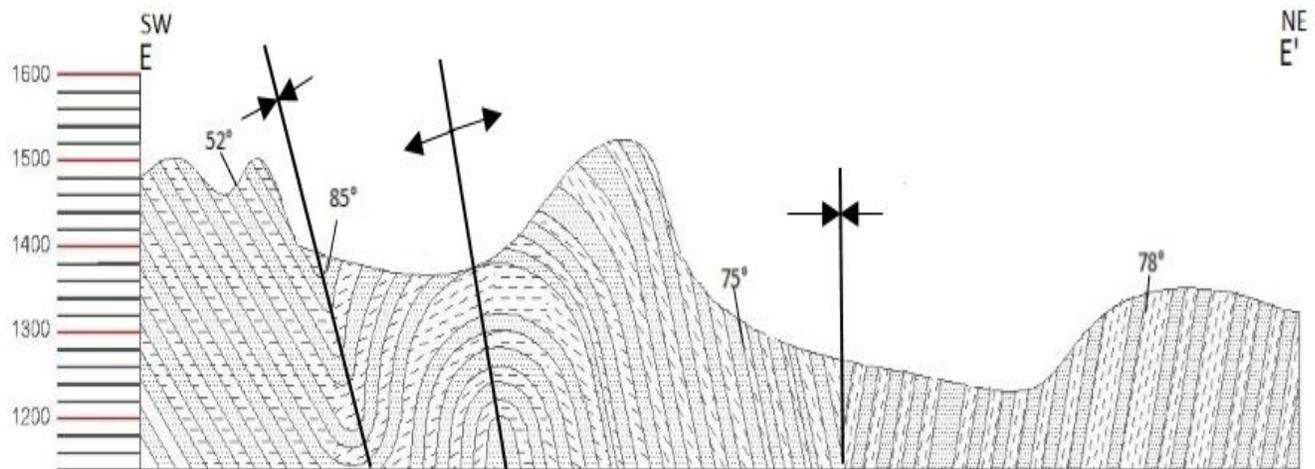
Se realizaron 3 secciones perpendiculares a los ejes de los pliegues para poder representarlos y obtener una imagen mas clara de como se visualizan y conseguir un segmento de curvatura que se requiere para el análisis de Fourier que se presentará más adelante.



Sección 4.1 Sección esquemática geológica que representa los pliegues en las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali (Zona NNW del mapa), escala vertical igual que la horizontal.



Sección 4.2 Sección esquemática geológica que representa los pliegues en las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa entre el poblado de Chiquitla y Tostlamantla al poniente de Calnali (Zona NW del mapa), escala vertical igual a la horizontal.



Sección 4.3 sección esquemática que representa las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa en la terracería hacia el cerro Teacal (Zona SW del mapa), escala vertical igual a la horizontal.

A continuación, se presenta el análisis descriptivo de las fallas encontradas al oriente de Calnali, sobre la carretera que va hacia el poblado de Pezmatlán y la terracería que llega al pueblo de Tula (zona E y SE del mapa).

En la figura 4.19 se muestra una falla inversa en calizas de la Formación Tamaulipas Superior, este afloramiento se encuentra sobre la carretera rumbo a Pezmatlán en las coordenadas UTM en X: 544422 en Y: 2310677.



Figura 4.19.- Falla inversa en calizas de la Formación Tamaulipas Superior sobre la carretera a Pezmatlán, donde se midieron los estratos y se identificaron lentes de perdernal color crema.

En la figura 4.20 se muestra el esquema idealizado de la falla inversa en calizas encontrada sobre la carretera a Pezmatlán (Figura 4.19).

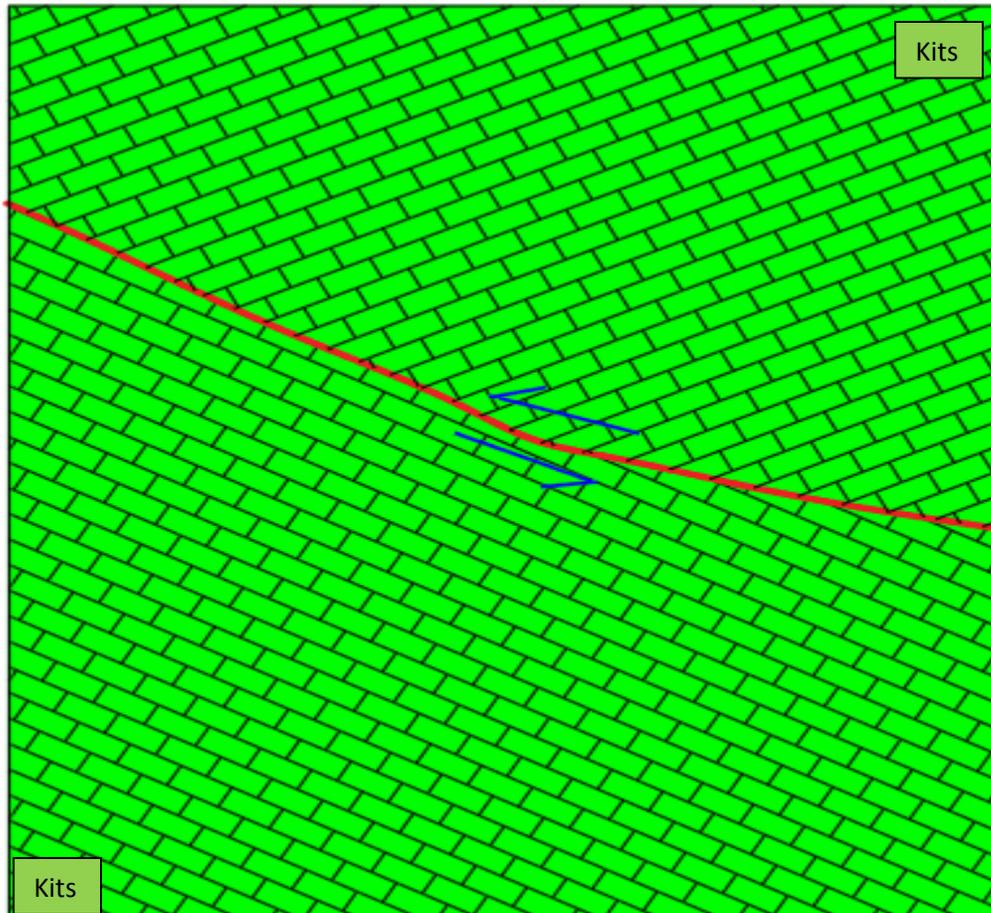


Figura 4.20 Esquema de interpretación idealizado de falla inversa encontrada en las calizas de la Formación Tamaulipas Superior sobre la carretera hacia el poblado de Pezmatlán.

En la figura 4.21 se muestra la ciclográfica del plano de falla inversa de la figura 4.19 y la orientación del plano de falla en azimutal (Strike/DipRight), el cual corresponde al análisis descriptivo.

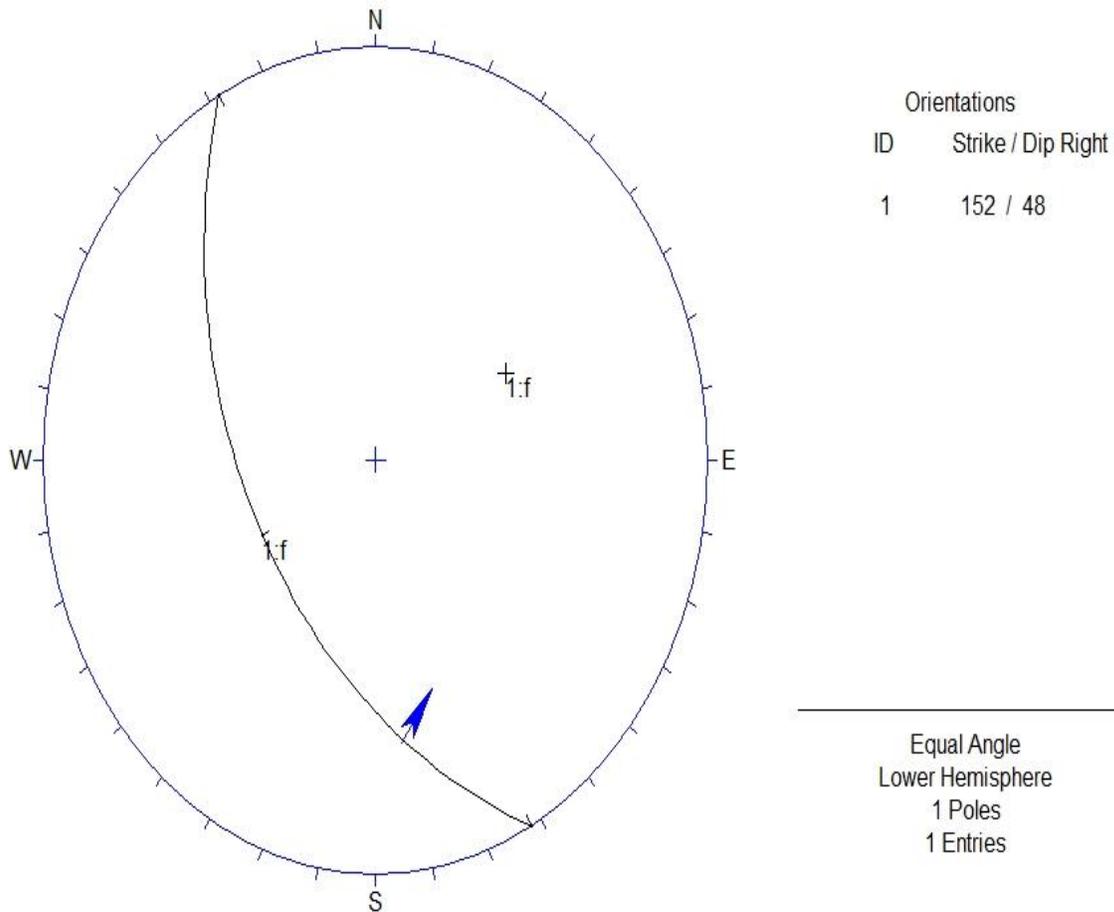


Figura 4.21 Esquema de Falla inversa en calizas de la Formación Tamaulipas Superior sobre la carretera al poblado de Pezmatlán (figura 4.19), plano de falla 1: S28°E, 48°, la flecha azul indica el pitch: 35° en sentido horario.

Se observa una flecha de color azul la cual indica el tipo de falla y está situada en el pitch, que es de 35° en sentido horario. Se reconoció en el afloramiento bandas de pedernal de 25 a 10 cm a la base de los estratos de color crema claro, por lo que se identificó como calizas de la Formación Tamaulipas Superior.

En la figura 4.22 se identificaron lutitas de la Formación Tuzancoa con algunos horizontes conglomeráticos en la terracería hacia el poblado de Tula, con coordenadas UTM en X: 546123, Y: 2309902, la orientación de los estratos es  $S34^{\circ}E$ ,  $54^{\circ}SW$ .

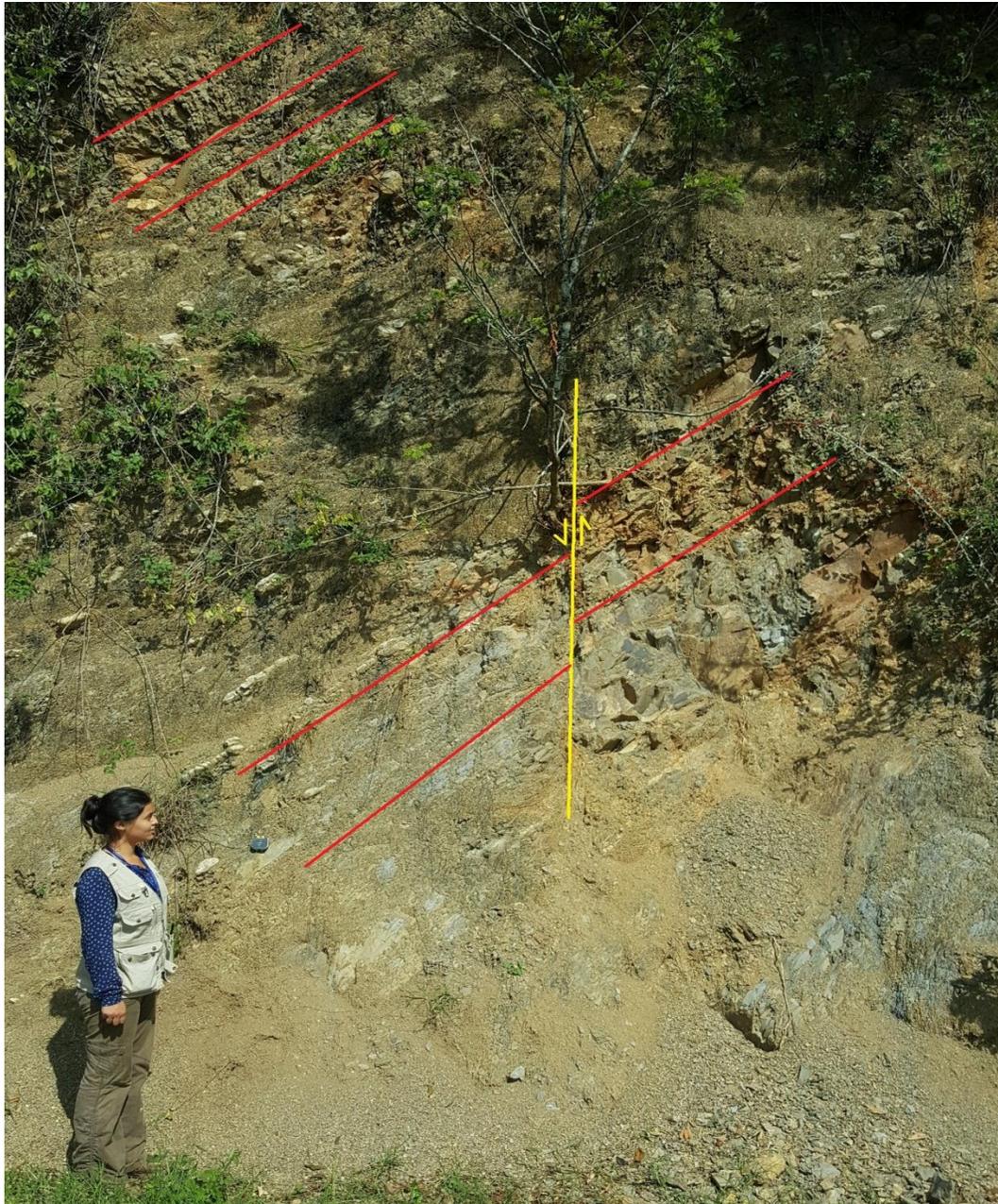
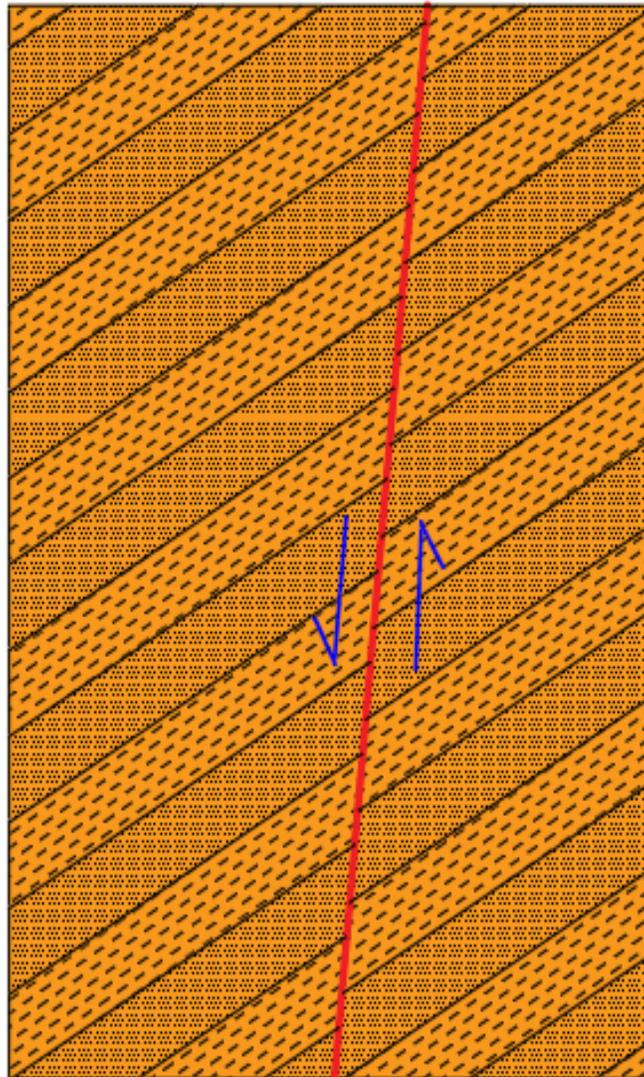


Figura 4.22.- Plano de falla normal (línea amarilla) en lutitas de la Formación Tuzancoa en la terracería al poblado de Tula, algunos estratos seguidos de color rojo con un rumbo de  $S34^{\circ}E$ ,  $54^{\circ}$ , se reconoció en el afloramiento la facies 3 de "Turbiditas Siliciclásticas".

En la figura 4.23 se muestra el esquema idealizado de la falla normal en lutitas-areniscas encontrada sobre la terracería al poblado de Tula (Figura 4.22).



*Figura 4.23 Esquema de interpretación idealizado de falla normal en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa en la terracería hacia el poblado de Tula.*

En la figura 4.24 se observa una ciclográfica de color negro que representa el plano de falla de la figura 4.22, a lado derecho se mira su rumbo y echado en azimutal (Strike/DipRight).

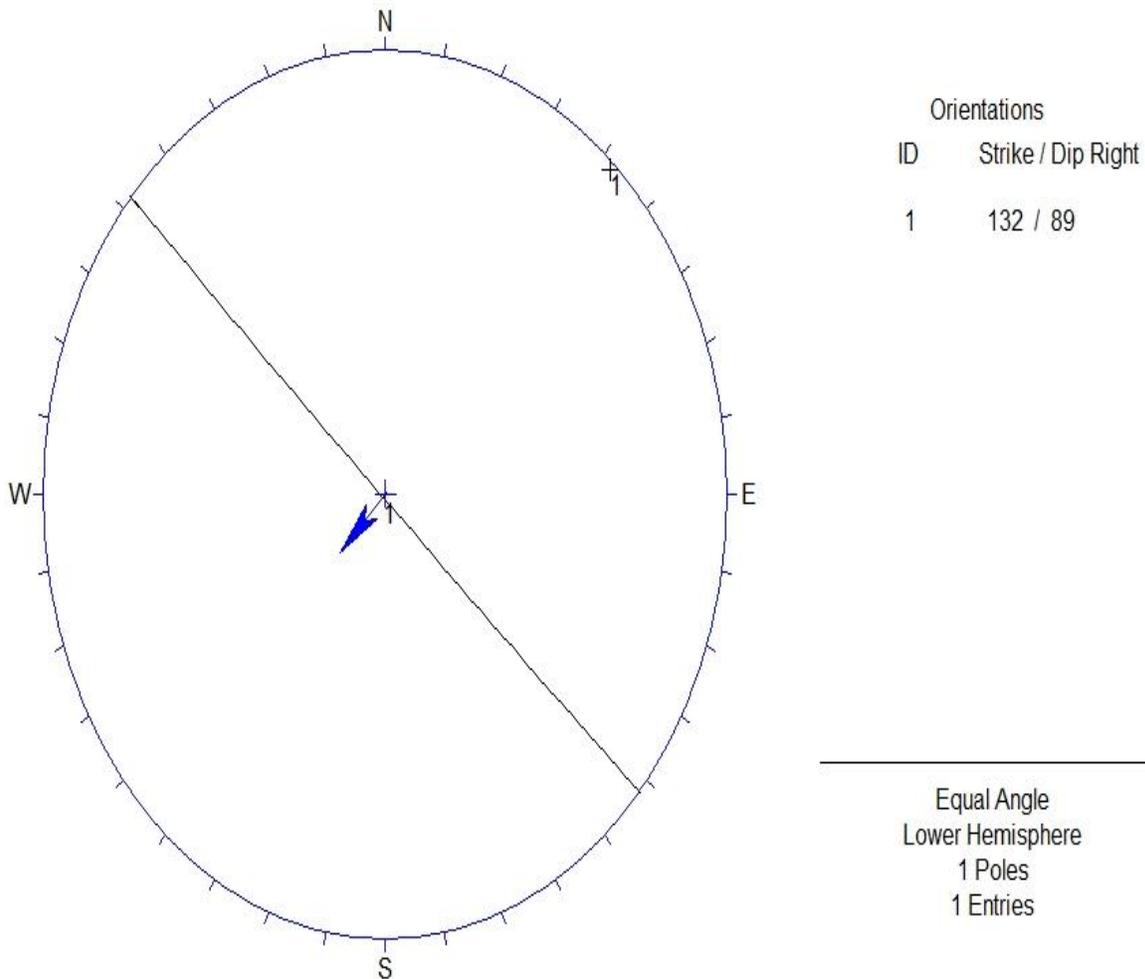


Figura 4.24 Esquema de Falla normal en lutitas de la Formación Tuzancoa en la terracería hacia el poblado de Tula, plano de falla 1: S48°E, 89°, la flecha azul está situada en el pitch de 90°.

La flecha de color azul representa el tipo de falla (normal) y está situada en el pitch que en este caso fue de 90°.

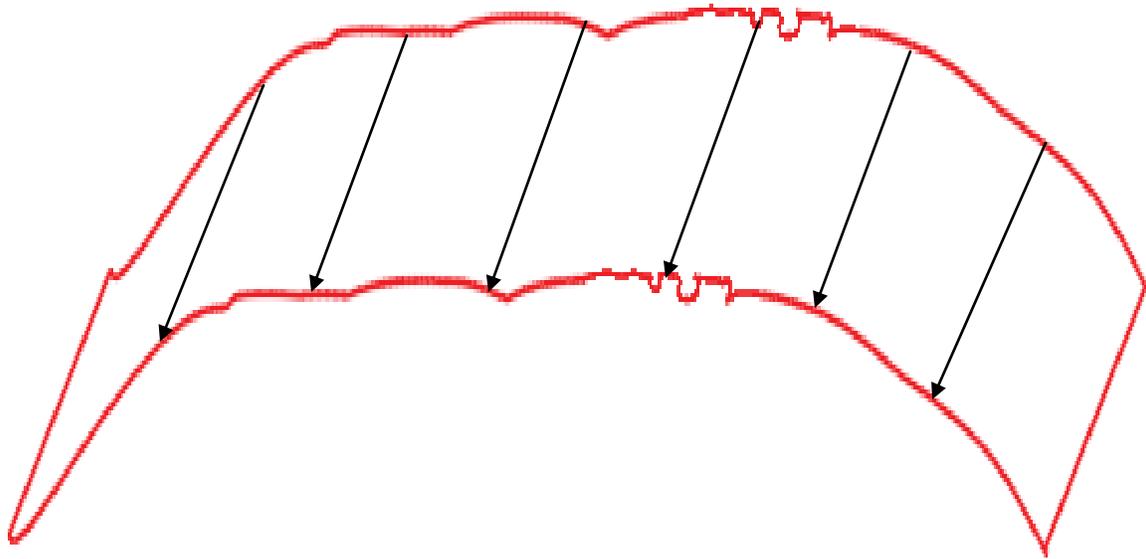
En la figura 4.25, se observa la superficie de falla (color rojo) en la terracería hacia el poblado de Tula con coordenadas UTM en X: 546553 en Y: 2308658, lutitas de la Formación Tuzancoa cabalgando a Calizas de La Formación Tamaulipas.



*Figura 4.25 Falla inversa sobre la terracería al poblado de Tula, se muestra la superficie de falla de color rojo, la litología de abajo son calizas de la Formación Tamaulipas y la de arriba son lutitas de la Formación Tuzancoa.*

Se midió el plano de falla que dio 18 metros los cuales pueden ser cartografiables y se identificaron estrías y escamas de calcita en la zona como indicadores cinemáticos (figura 4.28).

En la figura 4.26 se observa la superficie de falla completa de la figura 4.25.



*Figura 4.26 Superficie idealizada de la falla encontrada en la terracería hacia el poblado de Tula, que pone en contacto tectónico a Calizas de la Formación Tamaulipas con rocas de la Formación Tuzancoa, las flechas negras representan las estrías del movimiento asociado.*

Esta falla inversa pone en contacto tectónico a calizas de la Formación Tamaulipas con las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa en el área de estudio, la cual controla la estratigrafía de la zona.

En la figura 4.27 se observa la ciclográfica del plano de falla de lutitas de la Formación Tuzancoa sobre Calizas de la Formación Tamaulipas en la terracería hacia el poblado de Tula (figura 4.25), su orientación se muestra de lado derecho en azimutal (Strike/DipRight).

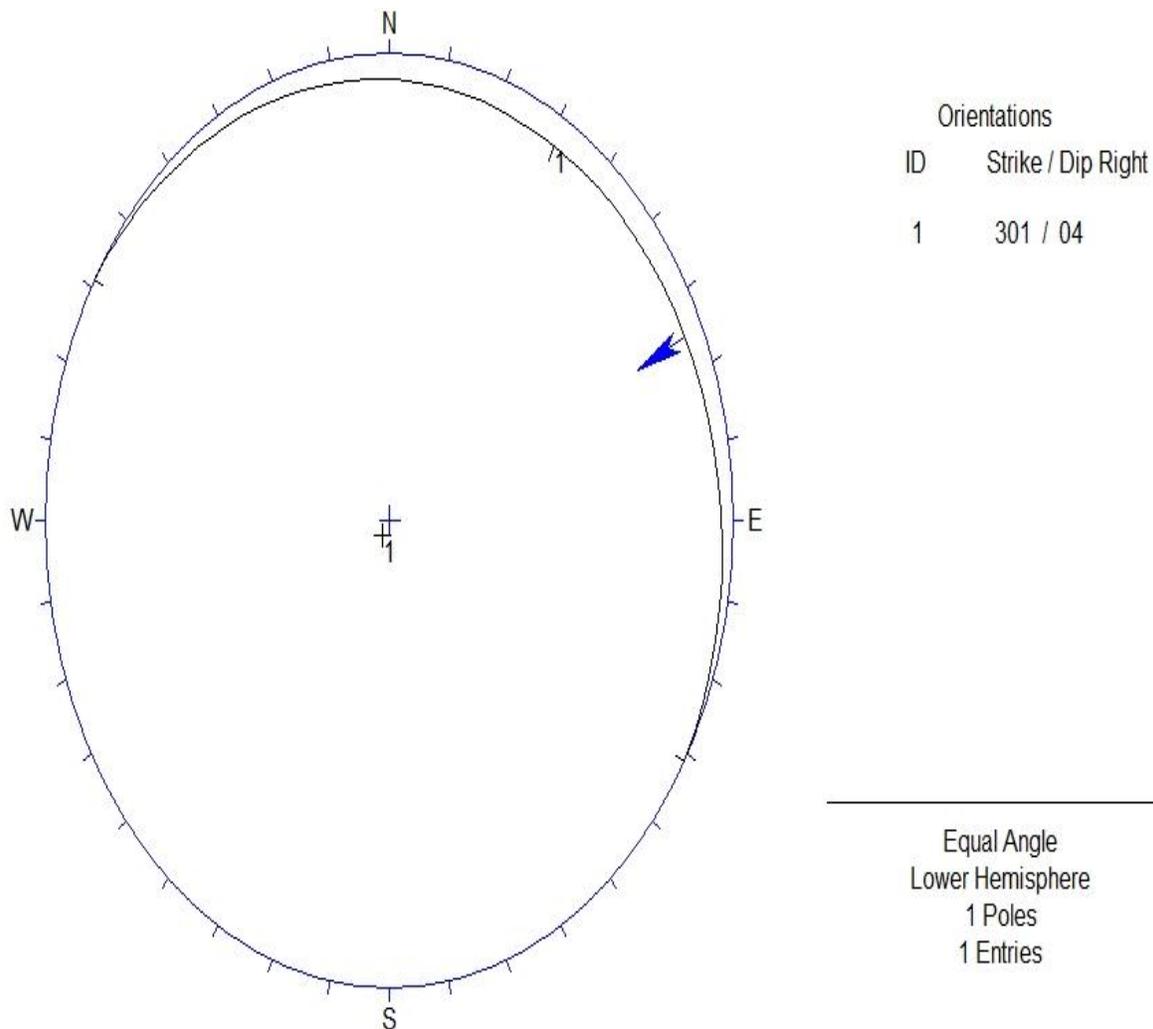


Figura 4.27 Esquema de falla inversa de lutitas de la Formación Tuzancoa sobre Calizas de la Formación Tamaulipas en la terracería hacia el poblado de Tula, plano de falla 1: N59°W, 04°, la flecha azul está situada en el pitch de 56° en sentido anti horario.

La flecha de color azul indica el tipo de falla (inversa) y está colocada en el pitch que dio como resultado 56° en sentido anti horario.

En la figura 4.28 se observa al costado izquierdo de la brújula los indicadores cinemáticos (Estrías) las cuales dan la dirección del movimiento hacia el suroeste.



*Figura 4.28 Estrías y escamas de calcita encontradas sobre el plano de falla los cuales son indicadores cinemáticos del movimiento correspondiente de la falla inversa encontrada sobre la terracería hacia el poblado de Tula.*

Esta falla fue cartografiada y se utilizó el método de patrón de interferencia con el rumbo del plano, para poder trazarlo en el mapa debido a la escasas de afloramientos y la densidad de la vegetación. Está se muestra en el mapa del área de trabajo, la cual se considera que es la cabalgadura “Pochutla” que Ochoa-Camarillo y Rosales-Lagarde interpretan en sus respectivos trabajos.

En la figura 4.29 se observa el plano de falla ideal dibujado del cabalgamiento de la Formación Tuzancoa sobre la Formación Tamaulipas en el camino de terracería hacia el poblado de Tula.



Figura 4.29 Plano de Falla ideal (Líneas negras) y plano de falla real (Color amarillo) de la falla inversa encontrada en la terracería que se dirige al poblado de Tula (Figura 4.25), la flecha roja indica la dirección del movimiento hacia el SW.

Las personas en la foto están parados en donde se encontraron las estrías y escamas de calcita como indicadores cinemáticos, junto con la flecha roja señalan la dirección de movimiento del bloque hacia el SW.

En la Figura 4.30, se observa la ciclográfica del plano de falla en lutitas de la Formación Tuzancoa con coordenadas UTM X: 547300 Y: 2308705, de lado derecho se muestra su rumbo y echado en azimutal (Strike/DipRight).

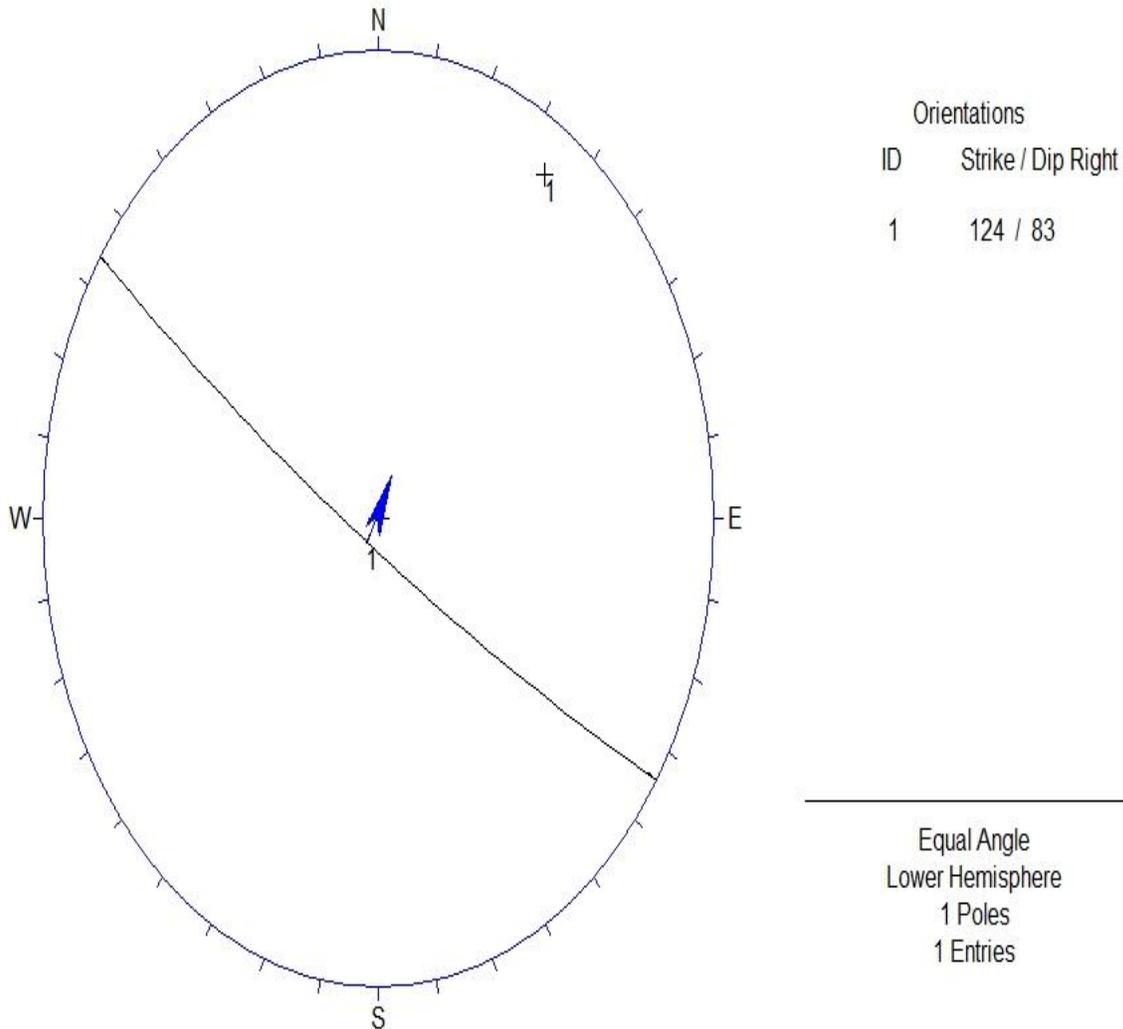


Figura 4.30 Diagrama de Falla inversa en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa sobre la terracería al poblado de Tula, plano de falla 1: S56°E, 83°, la flecha azul está situada en el pitch de 90°.

La flecha de color azul indica el tipo de falla (Inversa) y está situada en el pitch el cual dio 90°.

En la figura 4.31 se observa el plano de una pequeña falla inversa en un afloramiento cercano al poblado de Tula con coordenadas UTM en X: 547415 en Y: 2308823.

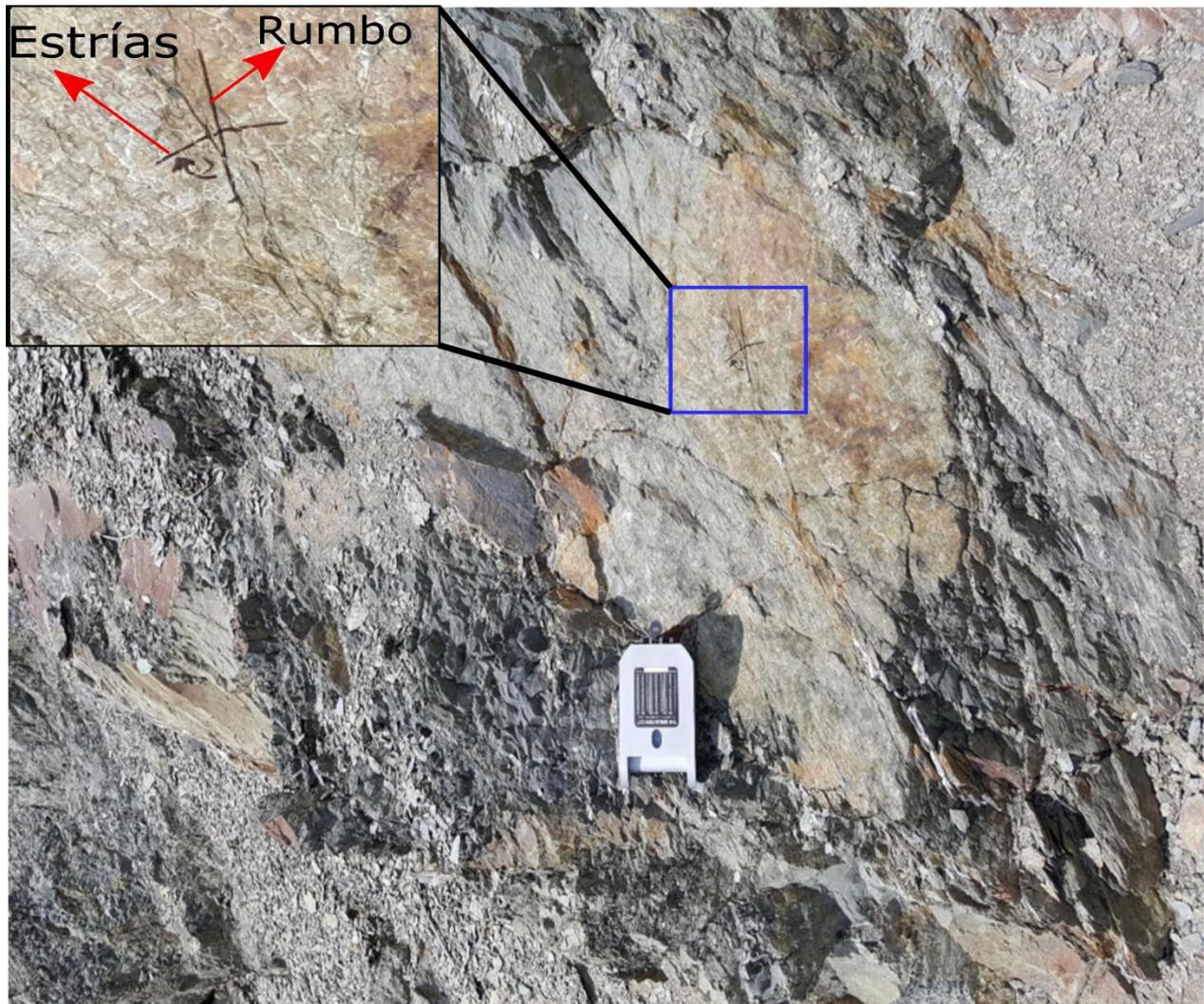


Figura 4.31 Plano de Falla y estrías en lutitas de la Formación Tuzancoa, sobre la terracería cerca del poblado de Tula con una orientación  $N23^{\circ}E$ ,  $83^{\circ}SE$  y los estratos  $S68^{\circ}E$ ,  $81^{\circ}SW$ .

Se identificaron como lutitas en estratos de 15 a 20 mm, el rumbo y echado de los estratos en ese afloramiento es de  $S68^{\circ}E$ ,  $81^{\circ}SW$ , en la foto se puede visualizar un zoom en la parte superior izquierda de las estrías marcadas con un color negro así como el rumbo del estrato para poder obtener el pitch y su sentido.

En la figura 4.32 se muestra la ciclográfica de la falla inversa en lutitas de la Formación Tuzancoa en la terracería llegando al poblado de Tula (figura 4.31), de color negro, a un costado derecho se observa su orientación en azimutal (Strike/DipRight).

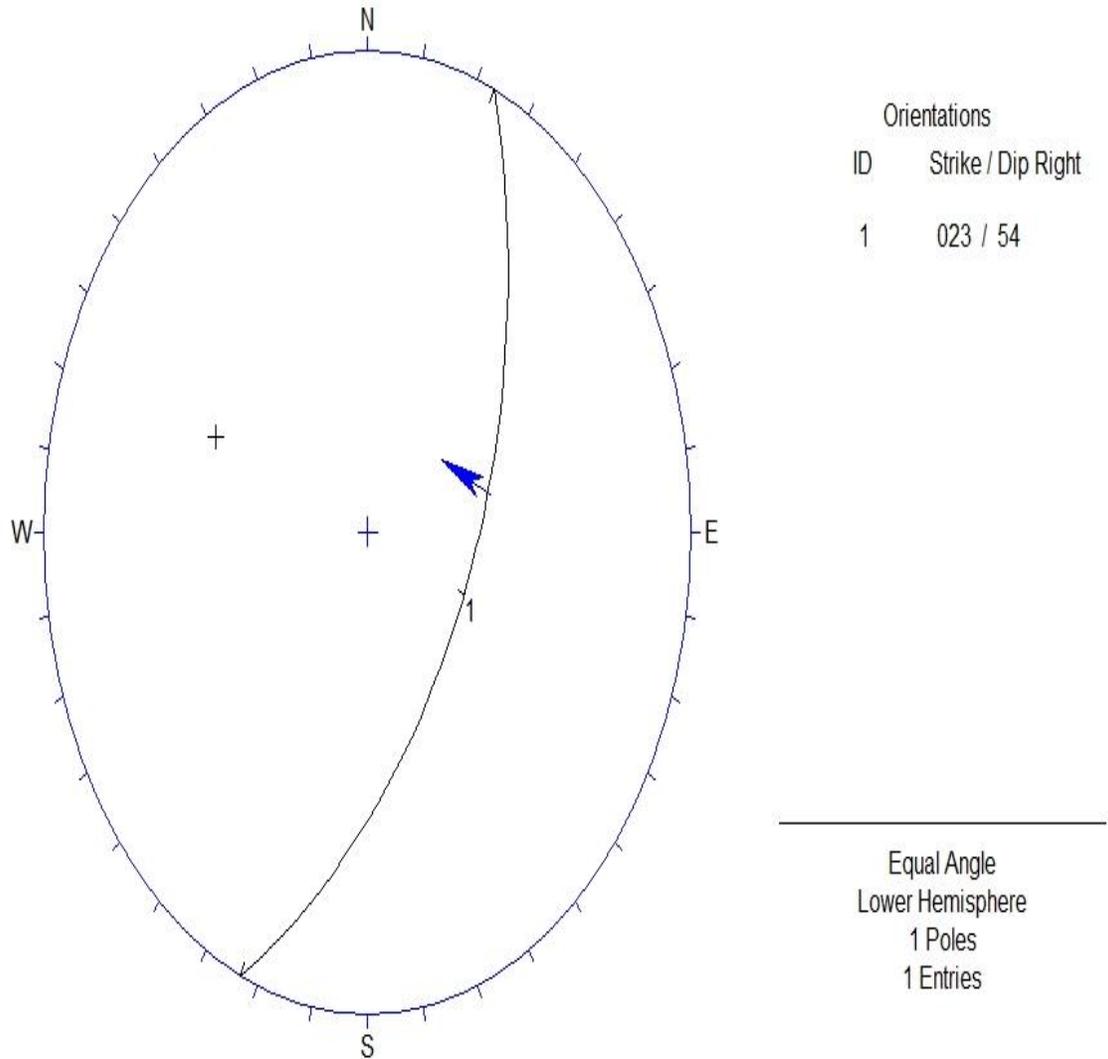


Figura 4.32 Diagrama de falla inversa en lutitas de la Formación Tuzancoa cercanas al poblado de Tula, plano de falla 1:  $N23^{\circ}E, 54^{\circ}$ , la flecha azul está indicando el pitch que es de  $67^{\circ}$  en sentido horario.

La flecha en color azul indica el tipo de falla (Inversa) y está situada en el pitch que dio  $67^{\circ}$  en sentido horario.

En la figura 4.33 se observa el plano de una falla inversa que está ubicada en un afloramiento cerca del poblado de Tula en las coordenadas UTM en X: 547415 en Y: 2308823.

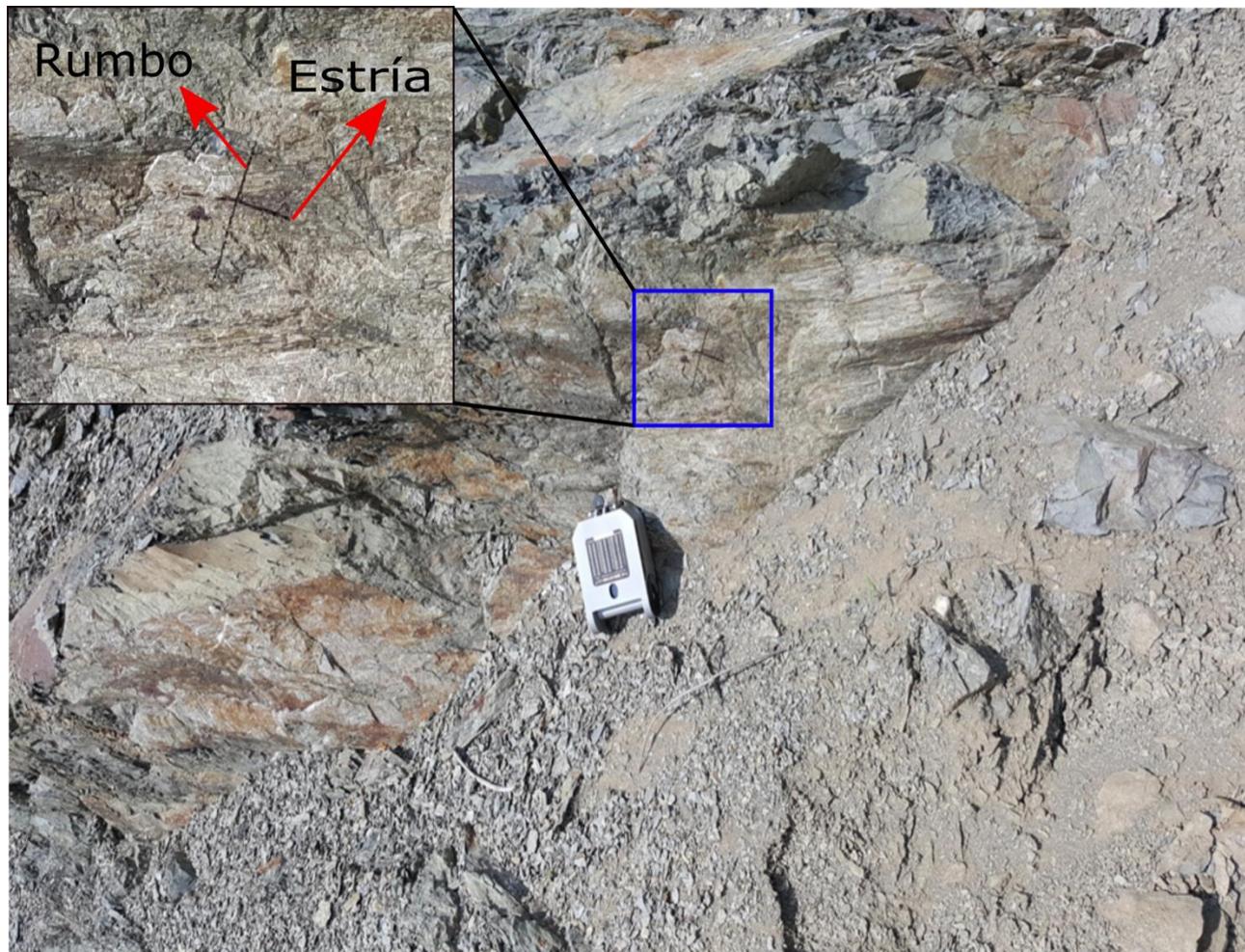


Figura 4.33 Plano de Falla y estrías en Lutitas de la Formación Tuzancoa sobre la terracería cerca del poblado de Tula, la orientación del plano de falla es  $S75^{\circ}W, 77^{\circ}$ , y la de los estratos  $S68^{\circ}E, 81^{\circ}$ .

Las estrías marcadas con plumón así como el rumbo del estrato para poder reconocer el pitch y su sentido se muestran en un zoom en la parte superior izquierda, el rumbo y echado de los estratos en este punto es de  $S68^{\circ}E, 81^{\circ}SW$ , esta pequeña falla es el par conjugado de la falla descrita con anterioridad en la figura 4.31 y 4.32.

En la figura 4.34 se observa la ciclográfica del plano de falla inversa en lutitas de la Formación Tuzancoa de la figura 4.33 de color negro, a la derecha se muestra su rumbo y echado en azimutal (Strike/DipRight).

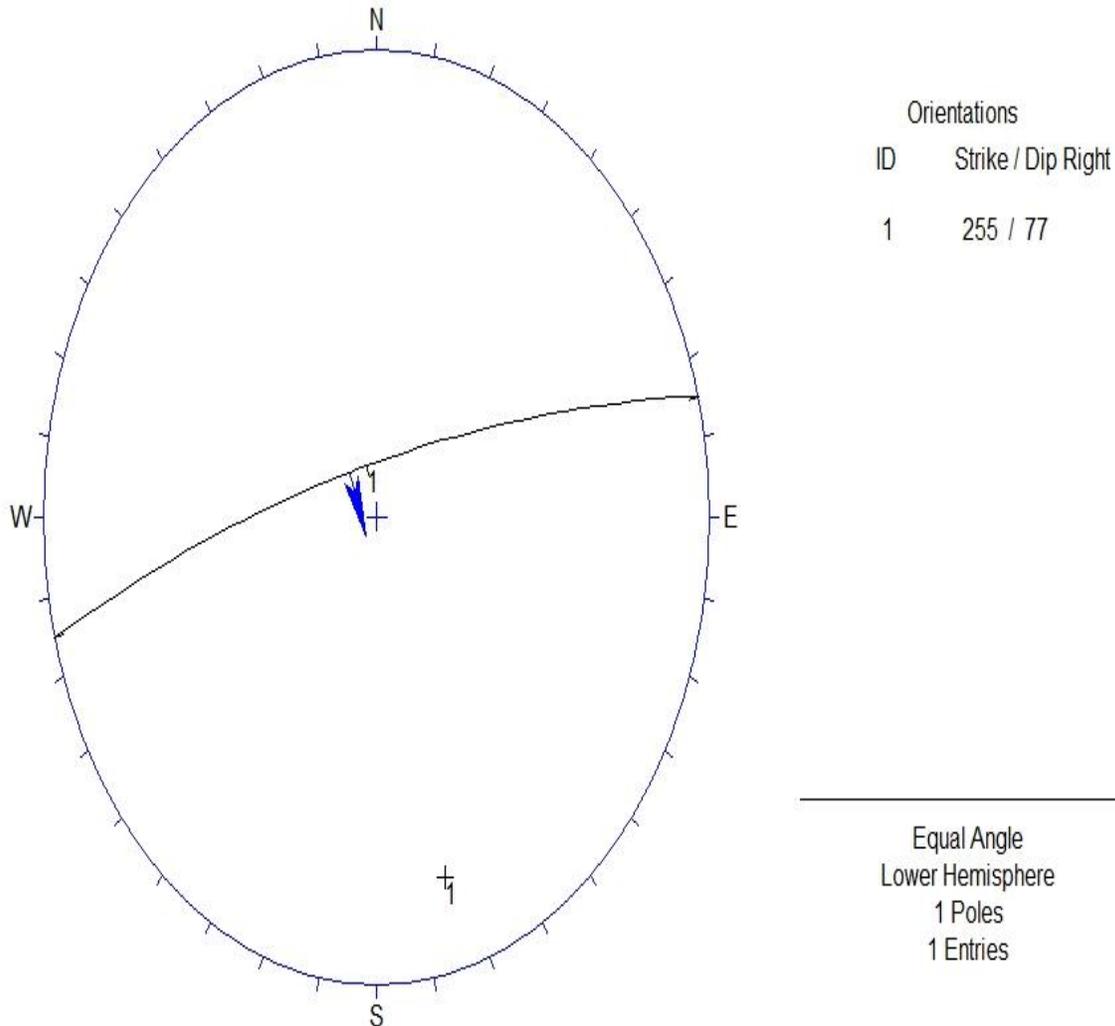


Figura 4.34 Esquema de Falla inversa en lutitas de la Formación Tuzancoa en la terracería cercana al poblado de Tula, plano de falla 1: S75°W, 77°, la flecha azul está en el pitch que es de 82° en sentido horario.

La flecha azul representa el tipo de falla (Inversa) y está situada en el pitch que dio 82° en sentido horario.



### 4.1.1 Análisis de Fourier.

Un método básico en matemáticas para analizar las variaciones de la curvatura en pliegues y tratar de explicar en series de funciones simples de  $x$ - $y$  es el análisis de Fourier. Esto es posible con una expresión de un polinomio de la forma:

$$f(xy) = a + bx + cx^2 + dx^3 \dots$$

Para cada curva en particular puede ser expresada como un número de coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , etc. para los miembros de esta serie. En la práctica es demasiado largo tratar de encontrar estos coeficientes incluso para un sector pequeño de pliegue.

La técnica conocida como “análisis armónico de Fourier” usa series de funciones trigonométricas para expresar el tipo de curvatura de la forma:

$$\begin{aligned} f(xy) = & a_0 + a_1 \cos x + a_2 \cos 2x + a_3 \cos 3x \dots \\ & \dots + b_1 \sin x + b_2 \sin 2x + b_3 \sin 3x \dots \end{aligned} \quad (1)$$

Cada curva esta especificada por los parámetros  $a$  y  $b$  conocidos como coeficientes de Fourier los cuales se refieren a la amplitud de varias ondas de seno y coseno.

Para realizar el análisis se tiene que seleccionar un sector del pliegue que este completo, donde se observe el punto de inflexión y el punto “hinge” (Figura 4.35 punto  $i$  &  $h$ ).

El sector del pliegue  $i$ - $h$  es previsto ahora como la longitud de un cuarto de onda de un sector simétrico de onda, y estos cambios pueden ser expresados por una expresión reducida en la serie de Fourier:

$$f(xy) = b_1 \sin x + b_3 \sin 3x + b_5 \sin 5x \dots \quad (2)$$

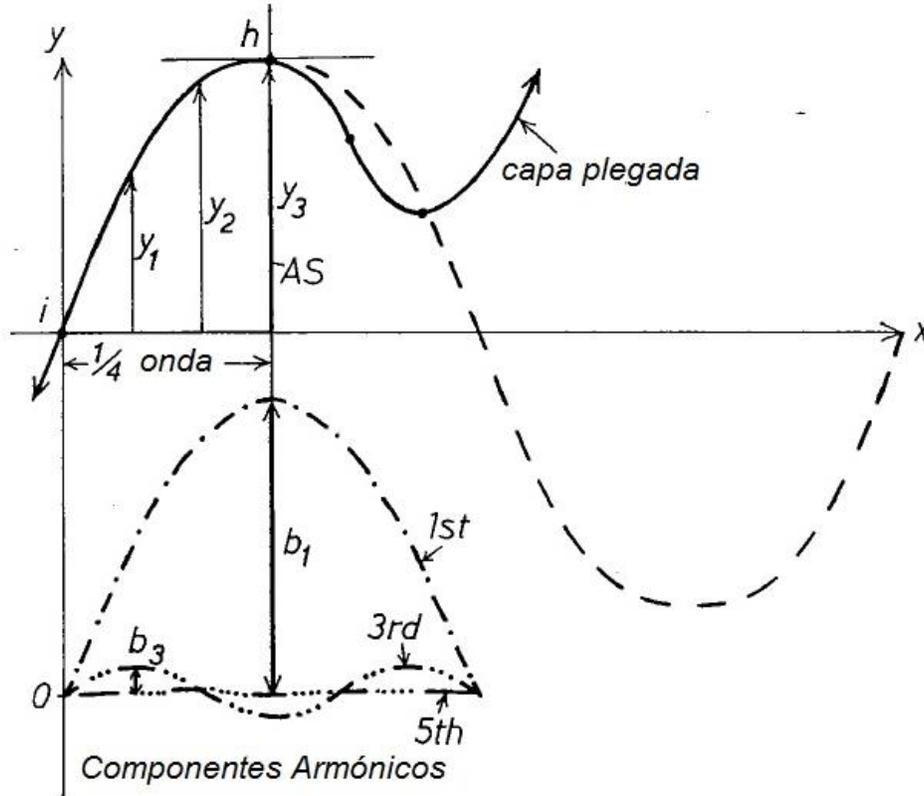


Figura 4.35 Método para seleccionar las coordenadas para el sector de cuarto de onda donde se muestra el punto “i” y el “h”. El significado de los coeficientes de Fourier  $b_1$ ,  $b_3$ , y  $b_5$ , se muestran en el diagrama de abajo de componentes armónicos (modificado de Ramsay, 2006).

Solo los tres primeros coeficientes dan un significado de la descripción del tipo de onda y el tercero de estos da un valor muy pequeño. Una solución conveniente para evaluar los coeficientes de Fourier fue sugerida por Stabler. Se divide la longitud de cuarto de onda del sector a analizar en tres partes iguales  $y_1, y_2, y_3$  (Figura 4.35) y queda reducido a expresiones algebraicas simples para calcular los coeficientes de Fourier y son las siguientes:

$$\left. \begin{aligned}
 b_1 &= \frac{y_1 + \sqrt{3}y_2 + y_3}{3} \\
 b_3 &= (2y_1 - y_3)/3 \\
 b_5 &= \frac{y_1 - \sqrt{3}y_2 + y_3}{3}
 \end{aligned} \right\} \boxed{3}$$

A continuación se muestran las mediciones hechas en los dos sectores de pliegues de las secciones 4.1 y 4.2 para realizar el análisis de Fourier (figuras 4.36 y 4.37). Las medidas fueron tomadas en milímetros.

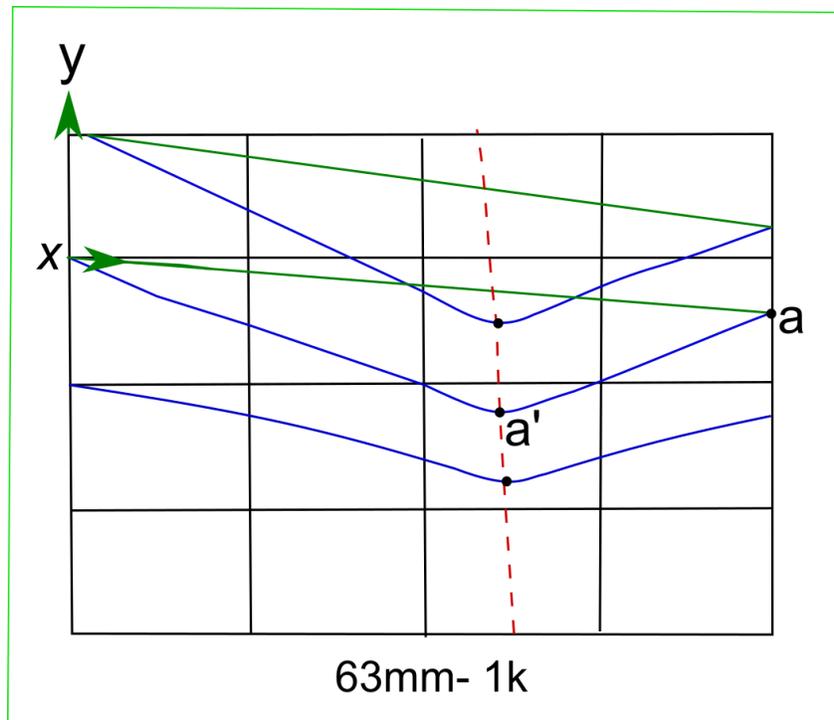


Figura 4.36 Sección de pliegues en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali. (Tomado de la sección 4.1). La parte del pliegue analizado fue de a-a'.

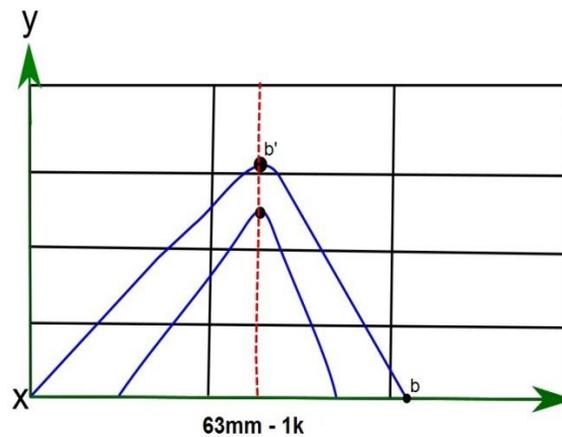


Figura 4.37 Sección de pliegues en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa entre el poblado de Tostlamantla y Chiquitla (Tomado de sección 4.2). La parte del pliegue analizado va de b-b'.

Se realizó el análisis de Fourier para los pliegues de las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali y para las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa al poniente de Calnali. En la figura 4.38 se elaboró un análisis armónico visual de los pliegues para ambas formaciones, donde A son pliegues de caja, C son pliegues semi-elípticos, D son de parábola y F son tipo chevron.

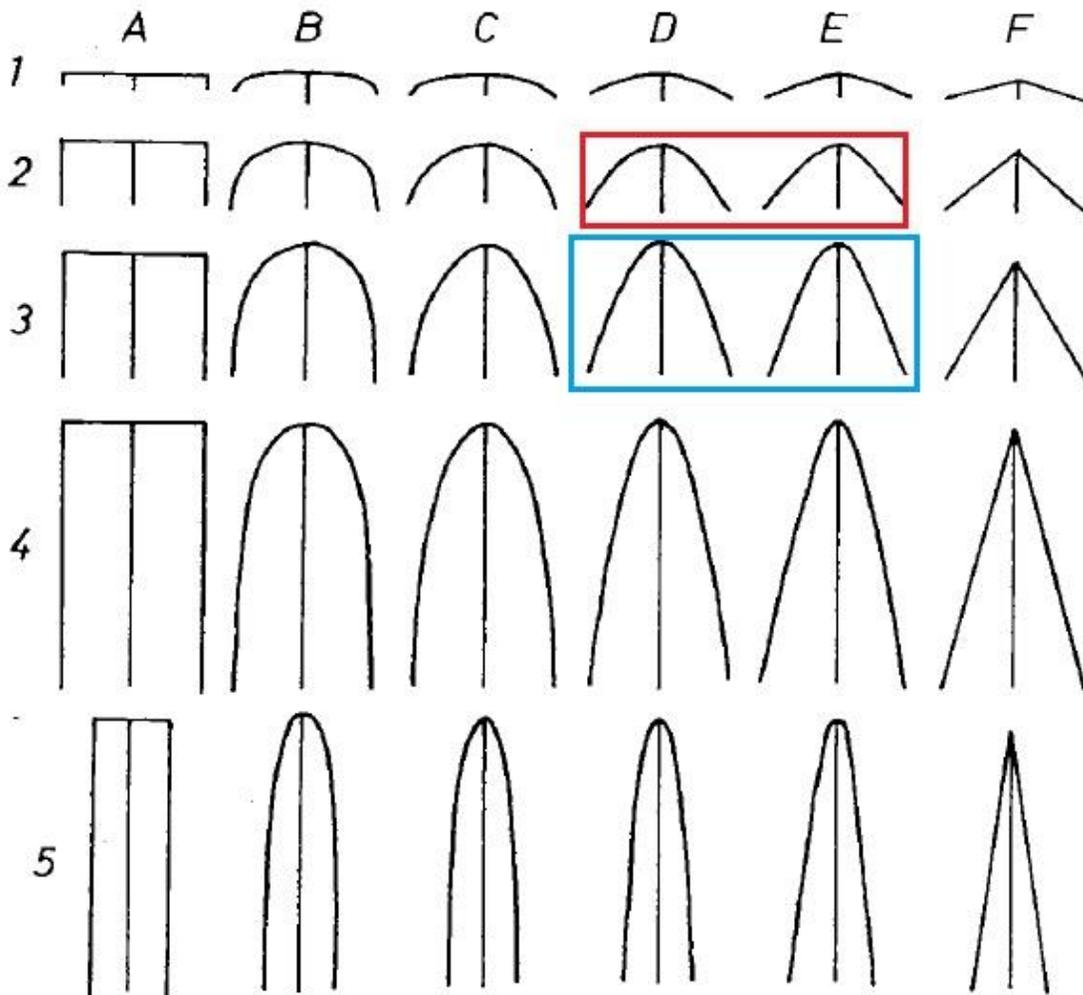


Figura 4.38 Los 30 tipos de pliegues básicos (A-F), la amplitud de onda (1-5), usado para el análisis armónico visual (Después de Hudleston, 1973; modificado de Ramsay, 2006). El cuadro azul representa el pliegue analizado para la Formación Tuzancoa en el camino de terracería entre el poblado de Chiquitla y Tostlamantla. El cuadro color rojo representa el pliegue analizado para las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali.

Se graficaron los tipos de pliegue para las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali y las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa del camino de Tostlamantla a Chiquitla del análisis armónico visual en la figura 4.38.

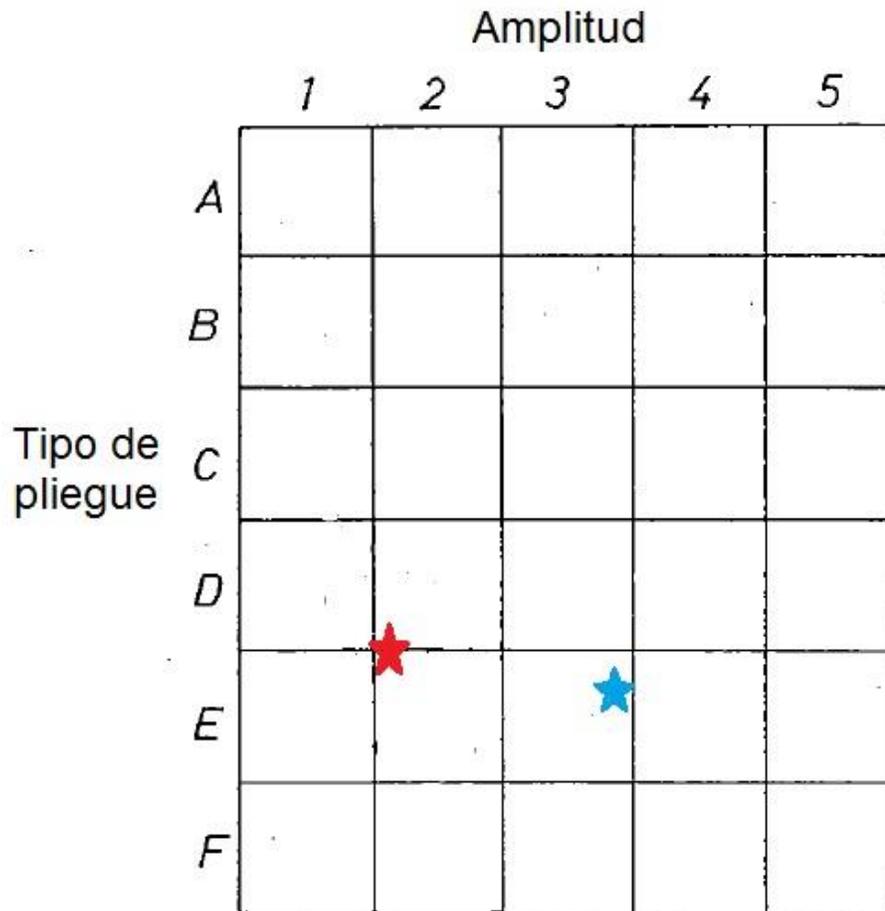


Figura 4.39 Análisis visual de pliegues usando la figura 4.38. La estrella azul representa el pliegue analizado para las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa en la terracería entre el poblado de Tostlamantla y Chiquitla. La estrella roja representa el pliegue analizado para las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali.

En las figuras 4.40 y 4.41 se muestran las mediciones necesarias para evaluar los coeficientes de Fourier.

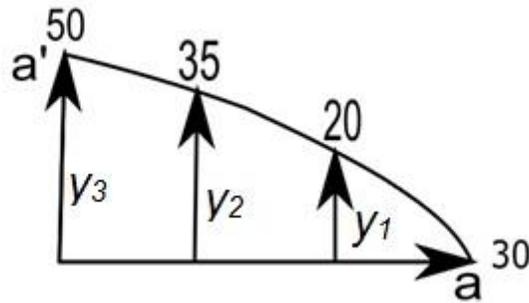


Figura 4.40 Mediciones necesarias para el análisis de Fourier del arco del pliegue en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, medidas tomadas en milímetros.

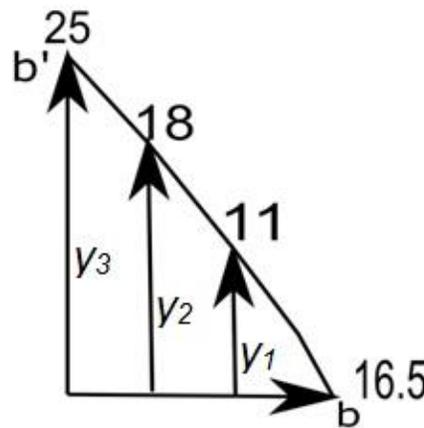


Figura 4.41 Mediciones necesarias para el análisis de Fourier del arco del pliegue de la Formación Tuzancoa entre el poblado de Chiquitla y Tostlamantla, medidas tomadas en milímetros.

Para concordar con las unidades de base de cuarto de onda, se multiplicó por  $\pi/2$  y los resultados fueron los siguientes para las calizas de la Formación Tamaulipas (figura 4.40):

$$y_1 = \left(\frac{20\pi}{2}\right)(30) = 0.9$$

$$y_2 = \left(\frac{35\pi}{2}\right)(30) = 1.6$$

$$y_3 = \left(\frac{50\pi}{2}\right)(30) = 2.3$$



Para las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa (figura 4.41) el resultado fue el siguiente:

$$y_1 = \left(\frac{11\pi}{2}\right)(16.5) = 2.85$$

$$y_2 = \left(\frac{18\pi}{2}\right)(16.5) = 4.66$$

$$y_3 = \left(\frac{25\pi}{2}\right)(16.5) = 6.48$$

Aplicando la fórmula (3) para encontrar los coeficientes de Fourier, los resultados para las calizas de la Formación Tamaulipas del sector a-a' son los siguientes:

$$b_1 = 1.99$$

$$b_3 = -0.16$$

Y para las intercalaciones de lutitas-areniscas del sector b-b' son los siguientes:

$$b_1 = 5.80$$

$$b_3 = -0.26$$

Para completar el análisis realizado se hizo la relación  $b_3/b_1$  el cual es un método gráfico práctico para representar los tipos de pliegues usando los coeficientes de Fourier, donde se establece un área el cual da una idea más concreta de que tipo de pliegue es (figura 4.42 & 4.43).

En la figura 4.42 se graficó el resultado para el sector del pliegue analizado de las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali.

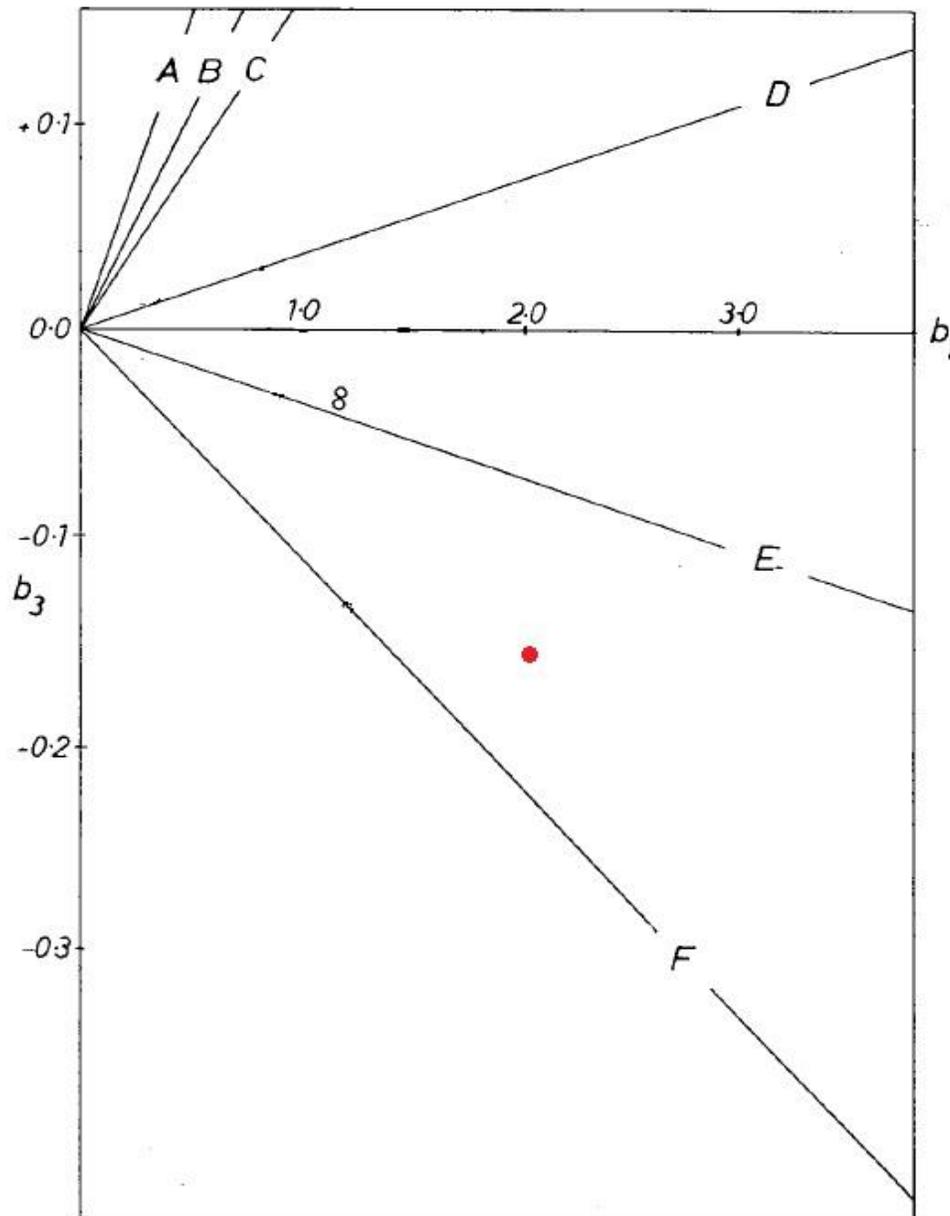


Figura 4.42 Método gráfico para complementar el análisis de Fourier, en el eje de las abscisas esta  $b_1$  y en las ordenas  $b_3$ , las letras de A-F describen el tipo de pliegue y los números la amplitud (después de Hudleston, 1973, Modificado de Ramsay, 2006). En color rojo está representado el sector de pliegue de las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali analizado.

En la figura 4.43, se gráfica el resultado para el sector del pliegue de lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa analizadas entre el poblado de Tostlamantla y Chiquitla.

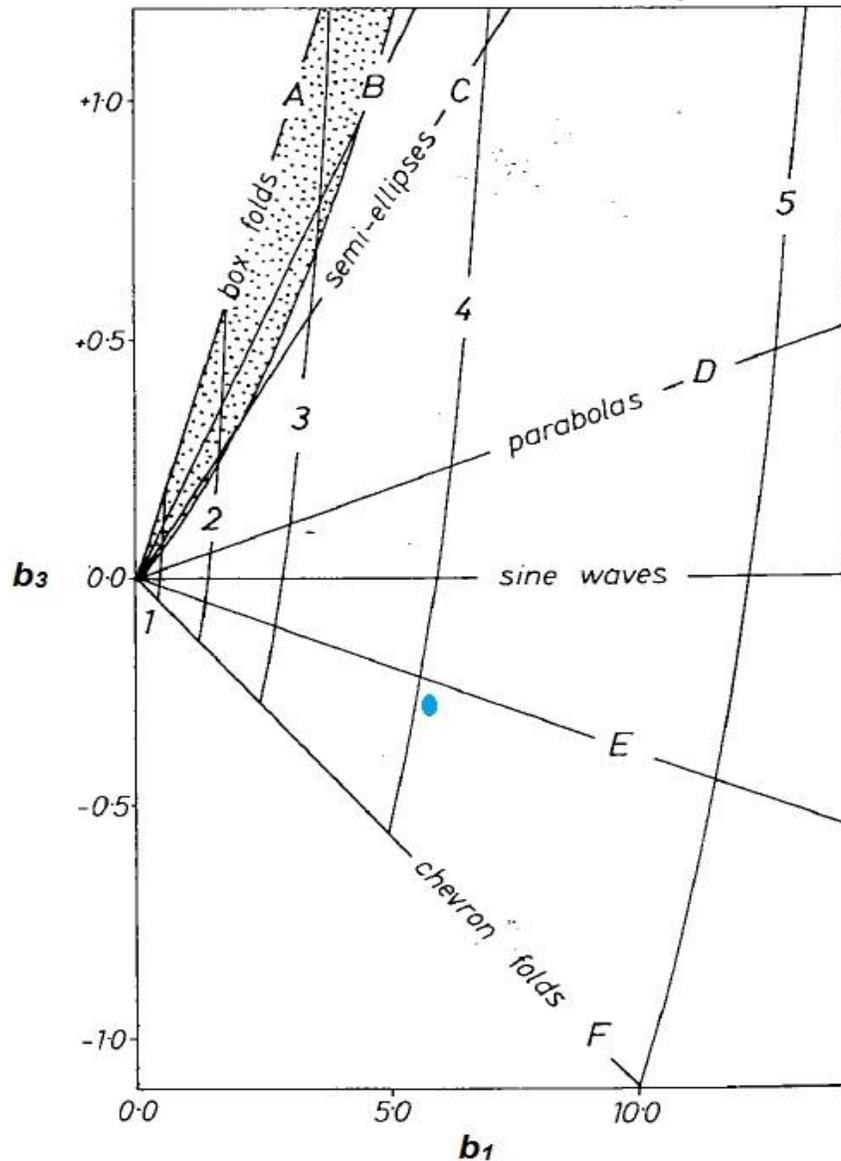
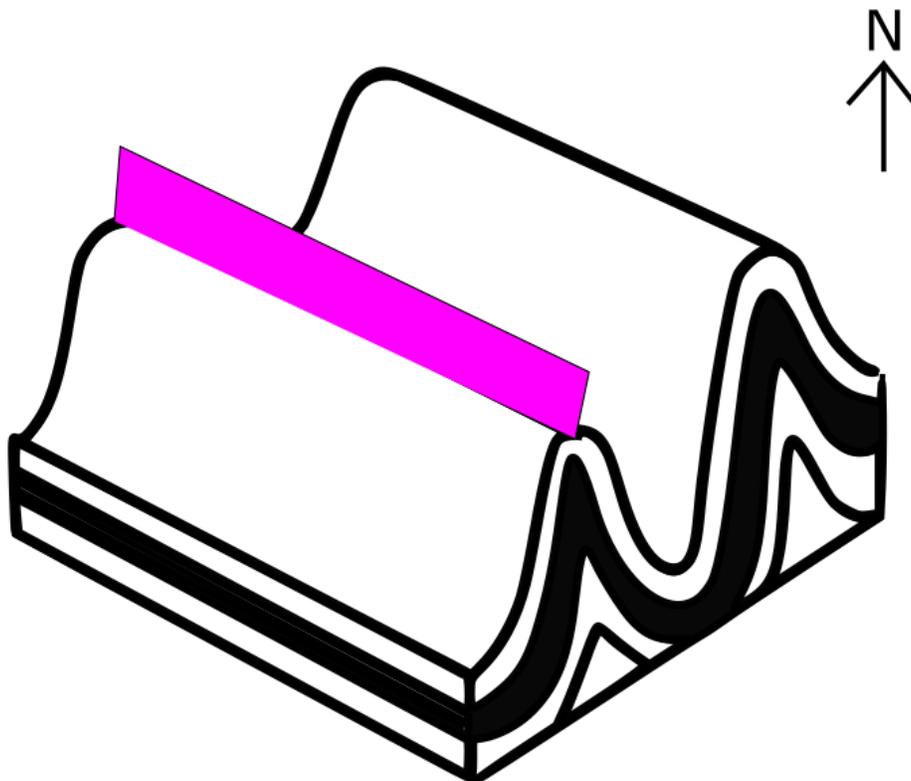


Figura 4.43 Método gráfico para complementar el análisis de Fourier, en el eje de las abscisas esta  $b_1$  y en las ordenas  $b_3$ , las letras de A-F describen el tipo de pliegue y los números la amplitud (después de Hudleston, 1973, Modificado de Ramsay, 2006). El punto azul esta graficado con el resultado del sector analizado para lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa entre el poblado de Tostlamantla y Chiquitla.

Con base en lo graficado en las figuras 4.42 y 4.43 el resultado que se obtuvo para los pliegues de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali son del tipo **E2** y para las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa del área del poblado de Tostlamantla a Chiquitla del tipo **E4**.

En el esquema 4.1 se muestra los pliegues idealizados y el plano axial de todas las figuras de los diagramas estereográficos realizados para las formaciones Tamaulipas y Tuzancoa.



*Esquema 4.1 Pliegues idealizados para las formaciones Tamaulipas y Tuzancoa de todos los diagramas estereográficos realizados para ambas formaciones. El esquema se muestra orientado, el cual se observa que los flancos de los pliegues tienen una dirección NW-SE y se inclinan hacia en SW-NE tal como se observa en los diagramas estereográficos, el plano rosa representa el plano axial.*



## 4.2 Análisis Cinemático.

El análisis cinemático, es una técnica gráfica para examinar los datos de las fallas. Esto permite caracterizarlas cuantitativamente en general, toda la deformación o el patrón de movimiento, resultando una acumulación de movimientos en una región y así poder determinar la dirección de concentración de los ejes de acortamiento y de extensión. A diferencia del análisis dinámico, el análisis cinemático no busca determinar la orientación y magnitud de los esfuerzos responsables de la deformación.

Los datos necesarios para un análisis cinemático son: El rumbo y echado del plano de falla, el pitch que indica a donde se desplazó el bloque y el sentido del movimiento.

El análisis cinemático no solo sirve para caracterizar o ver el patrón de movimiento en un área, con este también se puede dar testimonio de si existe compatibilidad cinemática. En algunas regiones las fallas tienen obviamente diferentes orientaciones de planos y de movimiento. Si el análisis para cada falla muestra una misma región de eje de acortamiento y de extensión se dice que son compatibles cinemáticamente, pero si el análisis muestra dos o más distribuciones de este par de ejes, las fallas probablemente no tienen compatibilidad cinemática y esto representa diferentes eventos de deformación.

En cuestión de pliegues el eje de acortamiento y de extensión son el polo del plano axial y la charnela respectivamente, además de saber a qué tipo de deformación pertenecen estas estructuras secundarias.

Se analizó las fallas en rocas carbonatadas (Formación Tamaulipas) y rocas clásticas (Formación Tuzancoa), se determinó el eje de acortamiento y de extensión tanto en pliegues y fallas además en estas últimas se determinó un promedio para entender si fueron uno o más eventos de deformación que las originaron.

En la figura 4.44, se muestra el análisis cinemático de la falla inversa encontrada en calizas de la Formación Tamaulipas Superior en la carretera que se dirige al poblado de Pezmatlán (Figura 4.19).

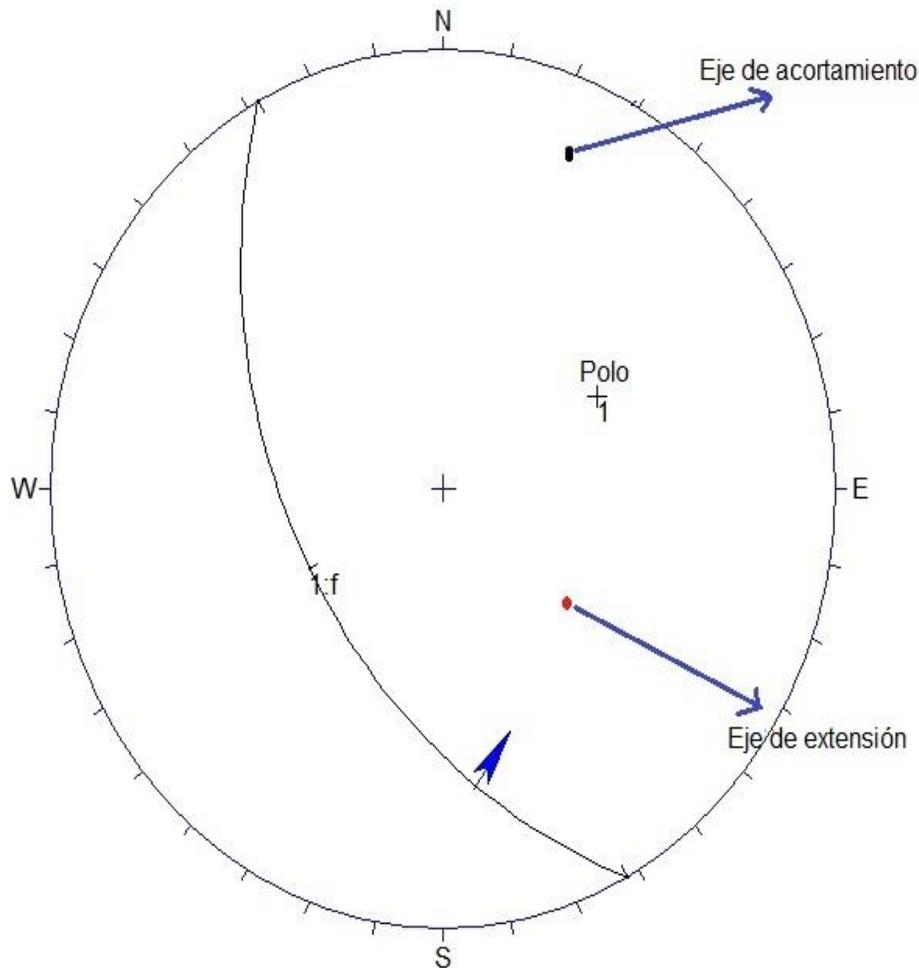


Figura 4.44 Análisis cinemático de falla inversa en calizas de la Formación Tamaulipas sobre la carretera a Pezmatlán, Plano de falla 1:  $S28^{\circ}E$ ,  $48^{\circ}$ , eje de acortamiento con dirección NE y eje de extensión con dirección SE.

En rojo se muestra el eje de extensión y el punto negro resalta el eje de acortamiento, se puede observar que tienen una dirección SW y NE respectivamente.

En la figura 4.44 se mostró el análisis cinemático para la falla inversa en las calizas de la Formación Tamaulipas Superior sobre la carretera al poblado de Pezmatlán, en esta falla se realizó el cálculo del acortamiento el cual dio el siguiente resultado.

Se midió en primera instancia la longitud inicial de los estratos que fue de 423 cm y la longitud final de 304 cm (figura 4.45).



*Figura 4.45 Falla inversa en calizas de la Formación Tamaulipas Superior analizada en la carretera rumbo a Pezmatlán, línea roja longitud inicial, línea azul longitud final, línea amarilla plano de falla.*

En la figura 4.45 se muestra la falla que se analizó, la línea amarilla es el plano de falla, el resultado obtenido fue un acortamiento de 28%, lo cual tiene una diferencia de alrededor de 20% de lo analizado por Eguiluz et al. (2000), esto se abordará más adelante en la discusión de este trabajo.

La figura 4.46 representa el análisis cinemático de la falla normal encontrada en el camino de terracería hacia el poblado de Tula (Figura 4.22).

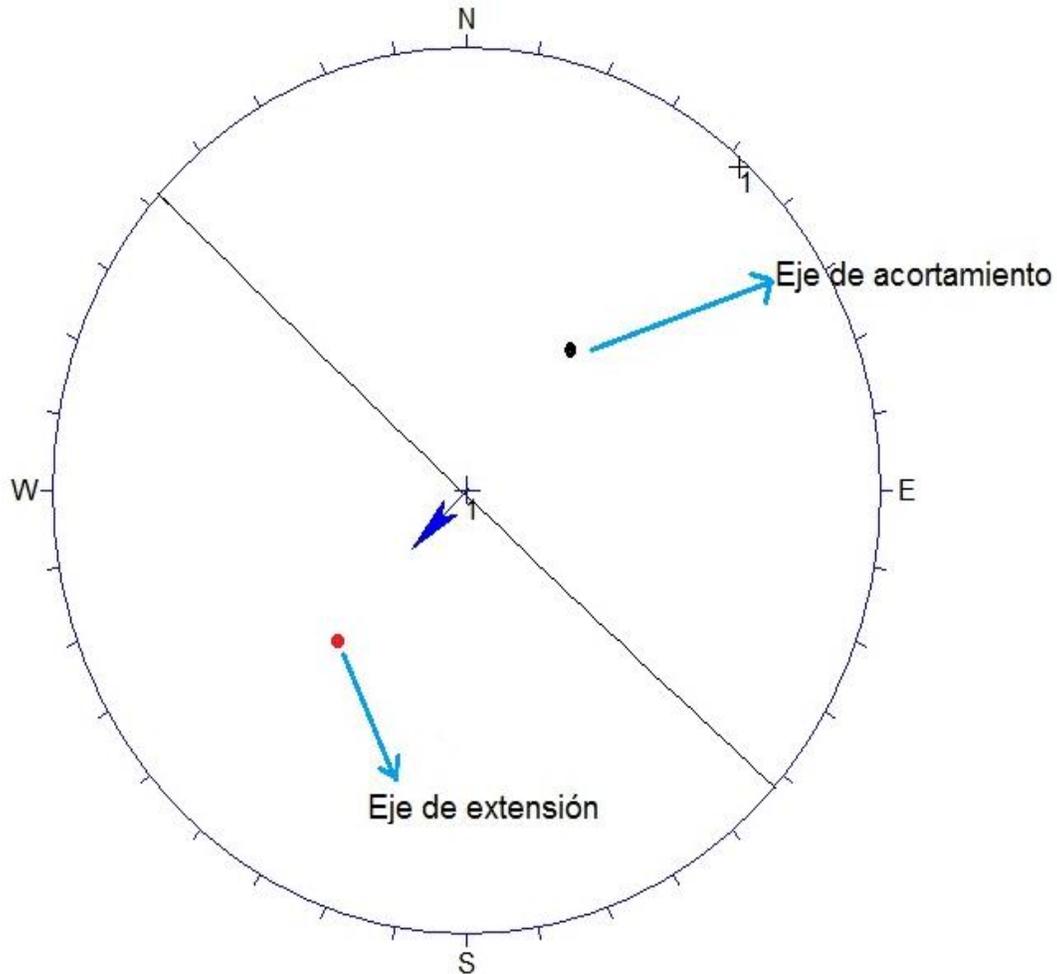


Figura 4.46 Análisis cinemático de falla normal en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa en la terracería al poblado de Tula, plano de falla  $S48^{\circ}E$ ,  $89^{\circ}$ , eje de acortamiento con dirección NE, eje de extensión con dirección SW.

Los puntos en rojo y negro muestran los ejes de extensión y acortamiento respectivamente, se observa una dirección NE para el acortamiento y una SW para la extensión.

En la figura 4.47 se observa el análisis cinemático de las lutitas de la Formación Tuzancoa cabalgando a calizas de la Formación Tamaulipas (Figura 4.25) en la terracería que se dirige al poblado de Tula,

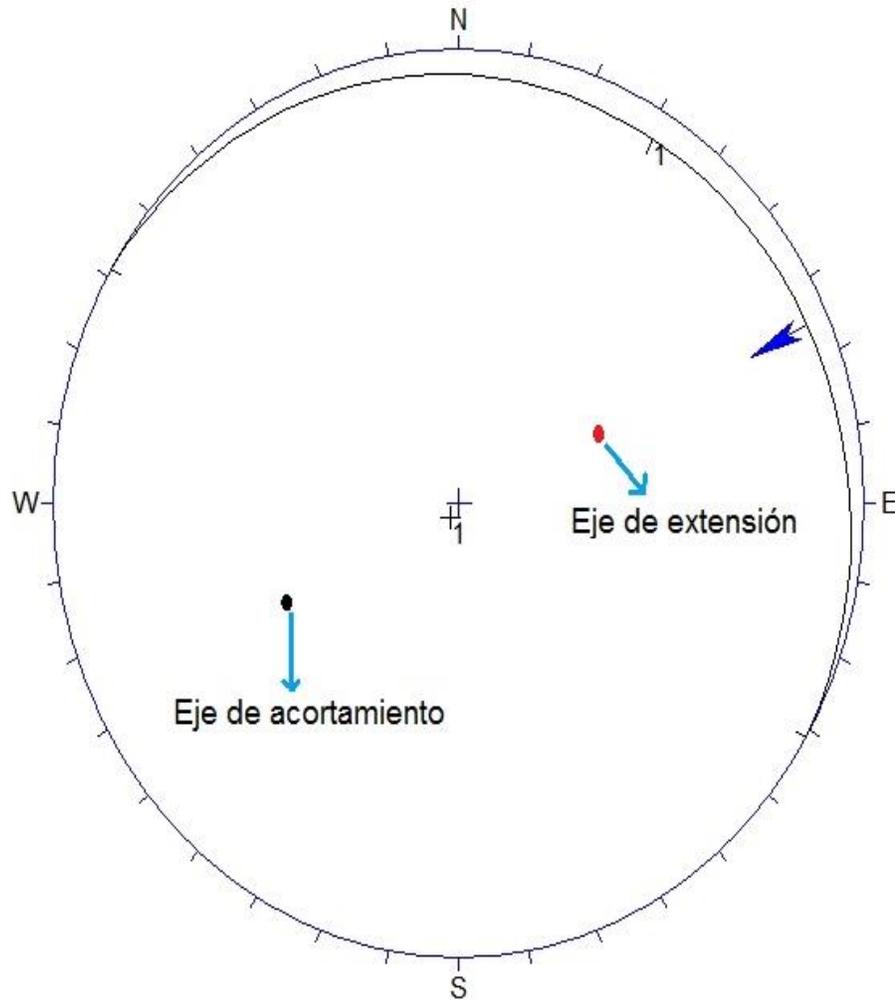


Figura 4.47 Análisis cinemático de falla inversa de lutitas de la Formación Tuzancoa sobre calizas de la Formación Tamaulipas en la terracería hacia el poblado de Tula, plano de falla 1:  $N59^{\circ}W, 04^{\circ}$ , eje de extensión con dirección NE y eje de acortamiento con dirección SW.

Los puntos rojo y negro señalan el eje de extensión y de acortamiento respectivamente. La dirección preferencial de NE para el de extensión y SW para el de acortamiento.

En la figura 4.48 se muestra el análisis cinemático de una falla inversa encontrada en lutitas de la Formación Tuzancoa en el camino que va al pueblo de Tula (figura 4.30).

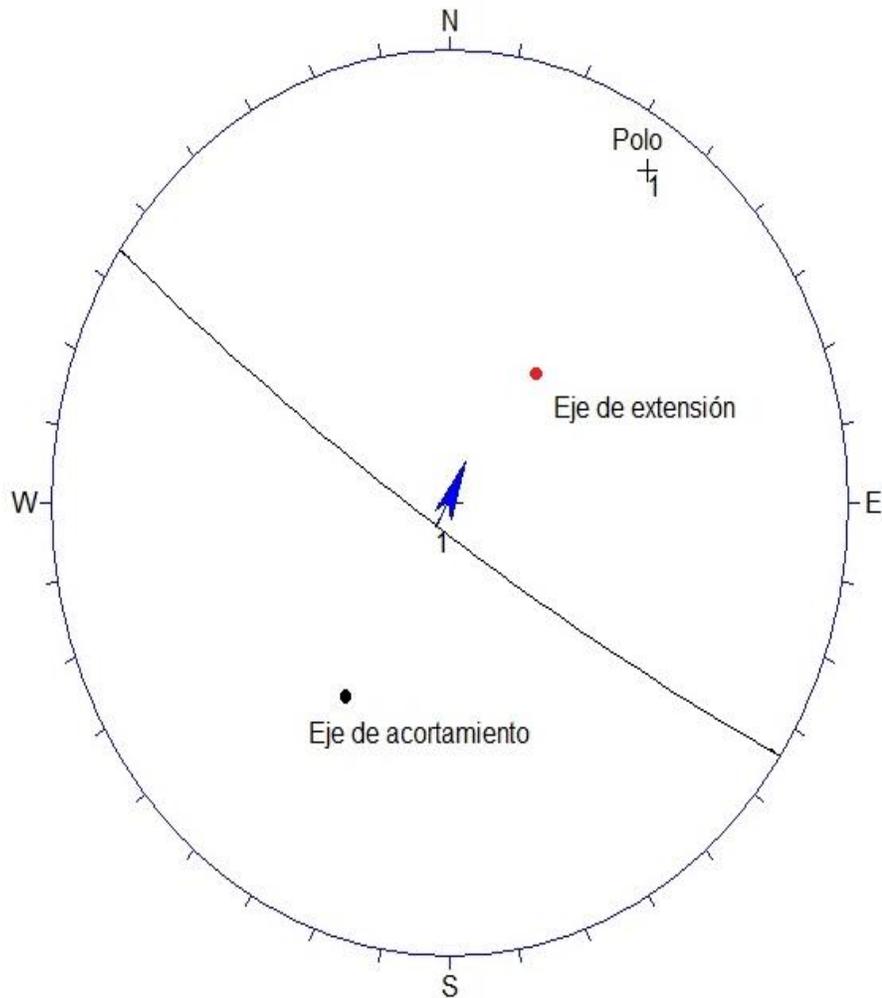


Figura 4.48 Análisis cinemático de falla inversa en lutitas de la Formación Tuzancoa en la terracería rumbo al poblado de Tula, plano de falla 1:  $S56^{\circ}E, 83^{\circ}$ , eje de acortamiento con dirección SW y eje de extensión con dirección NE.

En negro y rojo resaltan el eje de acortamiento y de extensión respectivamente, estos tiene una dirección SW para el primero y para el segundo de NE.

En la figura 4.49 se muestra el análisis cinemático de una falla inversa encontrada en lutitas de la Formación Tuzancoa sobre el camino de terracería hacia el poblado de Tula (Figura 4.31).

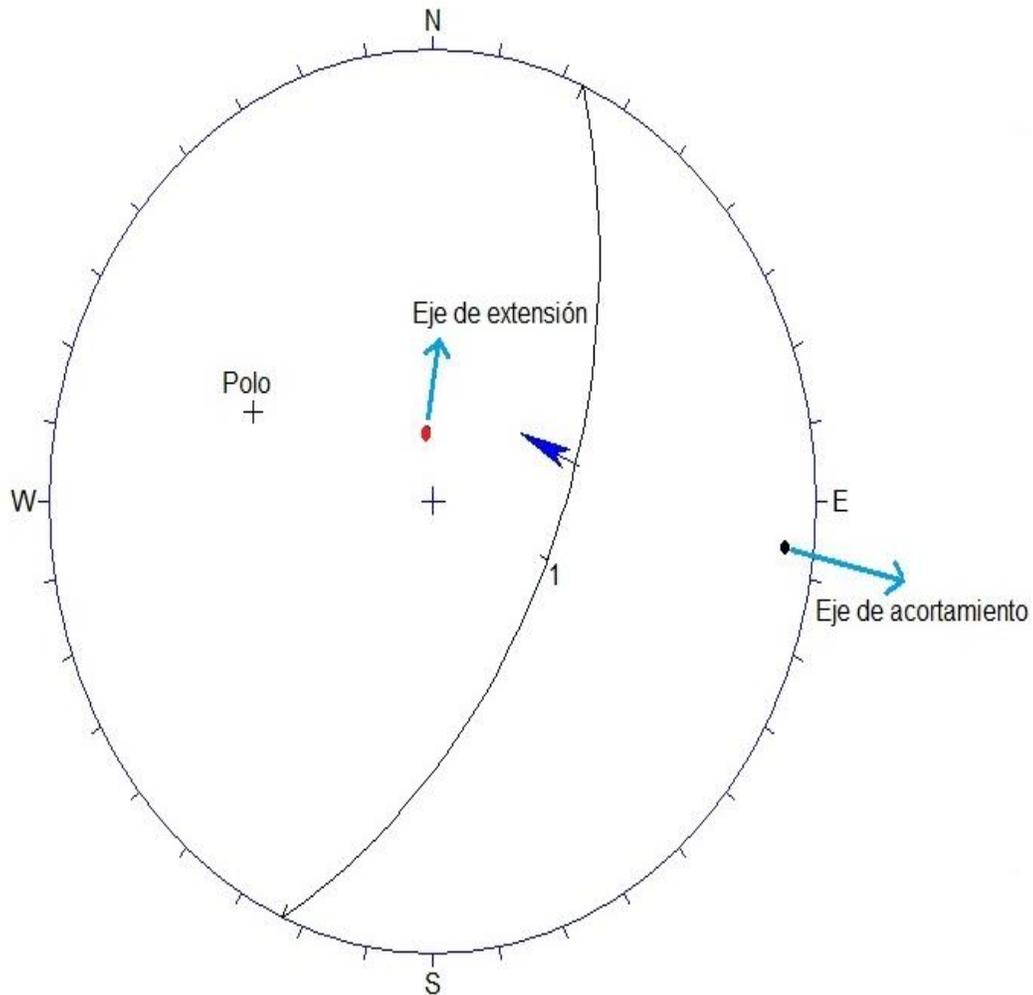


Figura 4.49 Análisis cinemático de falla inversa en lutitas de la Formación Tuzancoa en la terracería rumbo al poblado de Tula, plano de falla 1:  $N23^{\circ}E$ ,  $54^{\circ}$ , eje de extensión con dirección norte y el eje de acortamiento con dirección SE.

El punto rojo representa el eje de extensión y el punto negro el de acortamiento, la dirección para el primero es de Norte franco y para el eje de acortamiento es SE.

En la figura 4.50 se esquematiza el análisis cinemático de una falla inversa encontrada en lutitas de la Formación Tuzancoa muy cerca del poblado de Tula.

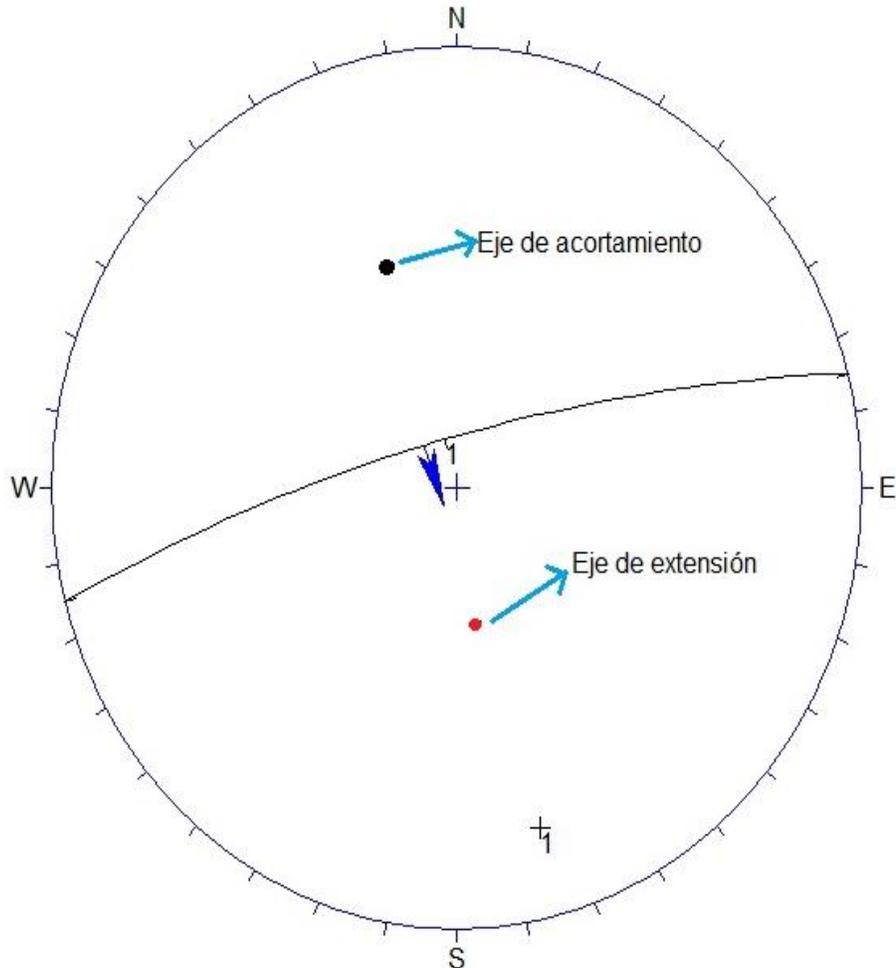


Figura 4.50 Análisis cinemático de falla inversa en lutitas de la Formación Tuzancoa en la terracería cerca al poblado de Tula, plano de falla 1:  $S75^{\circ}W$ ,  $77^{\circ}$ , eje de acortamiento con dirección NW y eje de extensión con dirección sur franco.

El punto rojo se observa el eje de extensión y el negro el eje de acortamiento, tienen una dirección de Sur franco y NW respectivamente.

En la figura 4.51 se observa el promedio de la concentración de los ejes de acortamiento en las fallas analizadas. El color negro representa el mayor porcentaje de densidad de los ejes que está a un costado derecho.

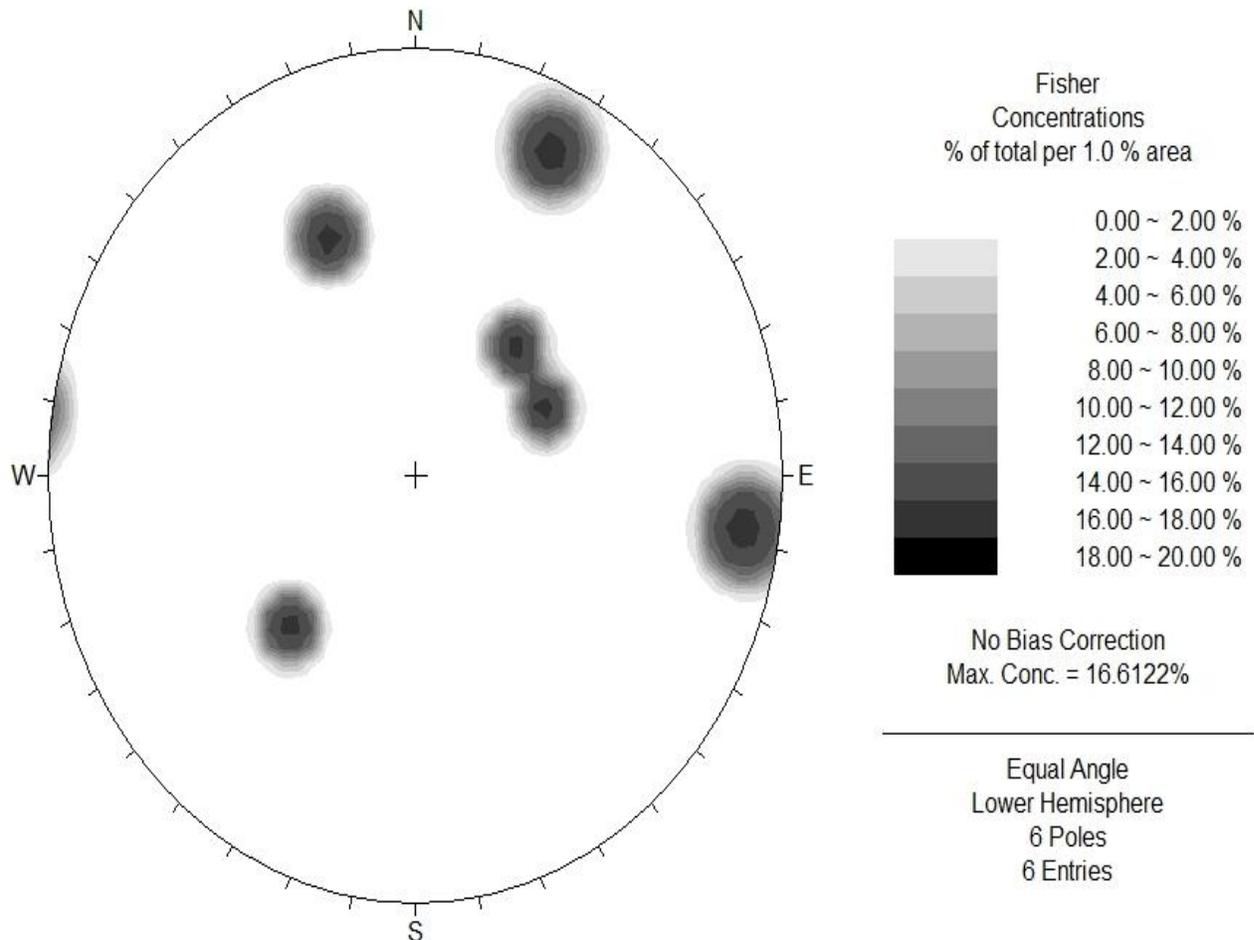


Figura 4.51 Promedio de ejes de acortamiento de todas las fallas analizadas tanto para la Formación Tamaulipas como Tuzancoa, se puede apreciar que no hay compatibilidad cinemática y hay dos eventos de deformación NE-SW y SE-NW.

Cabe destacar que no hay una concentración única de ejes de acortamiento para las fallas, se puede observar que si tienen una dirección preferencial hacia el NE, sin embargo no existe la compatibilidad cinemática y se aprecia un mínimo de dos eventos de deformación.

En la figura 4.52 se observa la concentración de ejes de extensión de las fallas analizadas, a un costado derecho se muestra el promedio y porcentaje de los ejes, en color oscuro se representa con la mayor densidad.

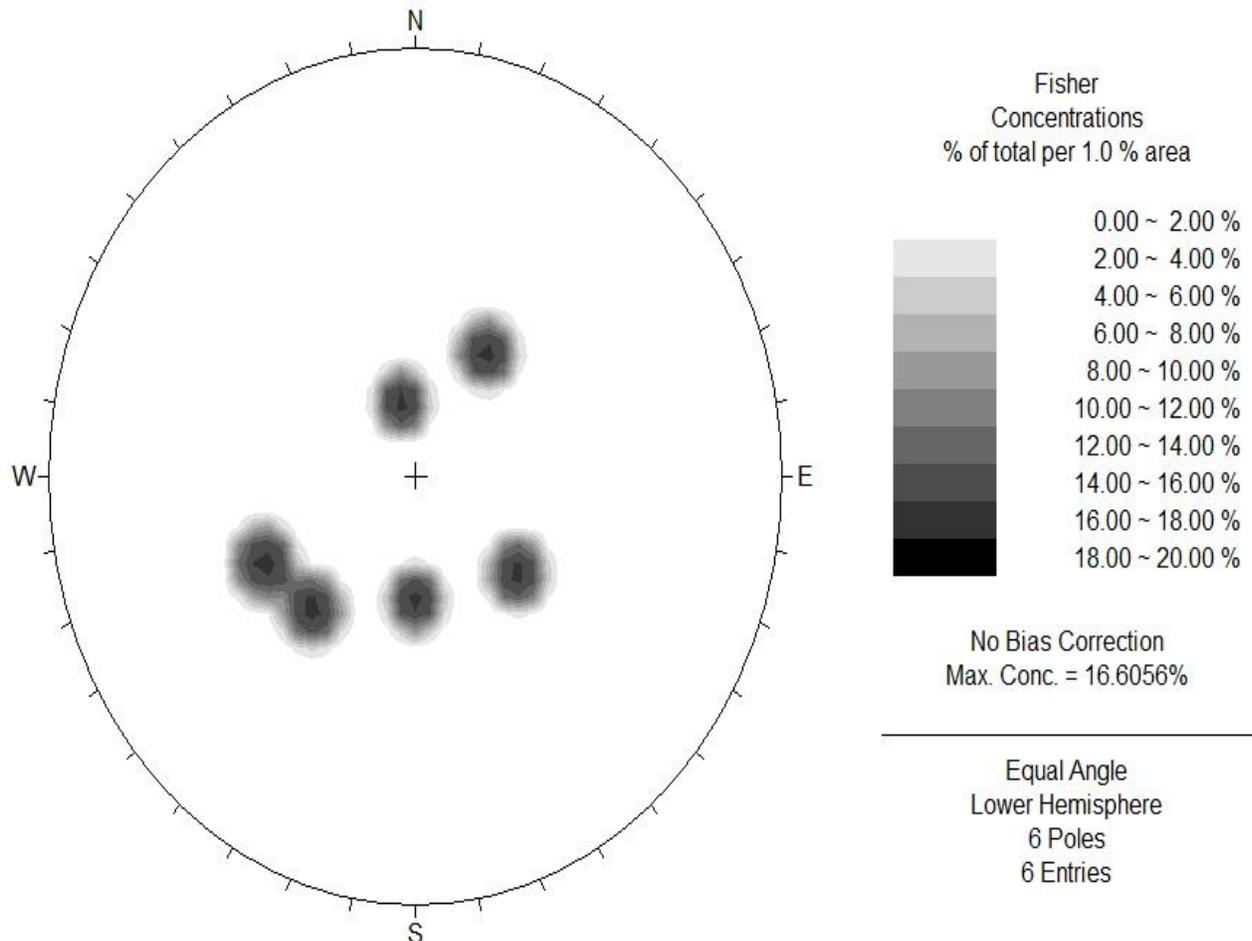


Figura 4.52 Promedio de ejes de extensión para todas las fallas analizadas de la Formación Tuzancoa y Tamaulipas, se observa que no hay compatibilidad cinemática y por los menos dos eventos de deformación en dirección W-E y SW-NE.

Se observa que todos los ejes de extensión tienen ángulos altos y tienen una dirección preferencial hacia el cuadrante SW, se puede argumentar que tienen compatibilidad cinemática por tener a la mayoría contenidos en una traza ciclográfica pero al no estar todos en ésta, no son compatibles y hay dos eventos de deformación, los de dirección W-E y los de SW-NE son de un evento distinto.

Los siguientes diagramas representan el análisis cinemático en pliegues de la Formación Tamaulipas y Tuzancoa, se utilizó un promedio de flancos para los pliegues de ambas formaciones. En la figura 4.53 se observa el análisis cinemático en el promedio de pliegues de calizas de la Formación Tamaulipas, las ciclográficas con 1 y 2 son los flancos y la rosa es el plano axial.

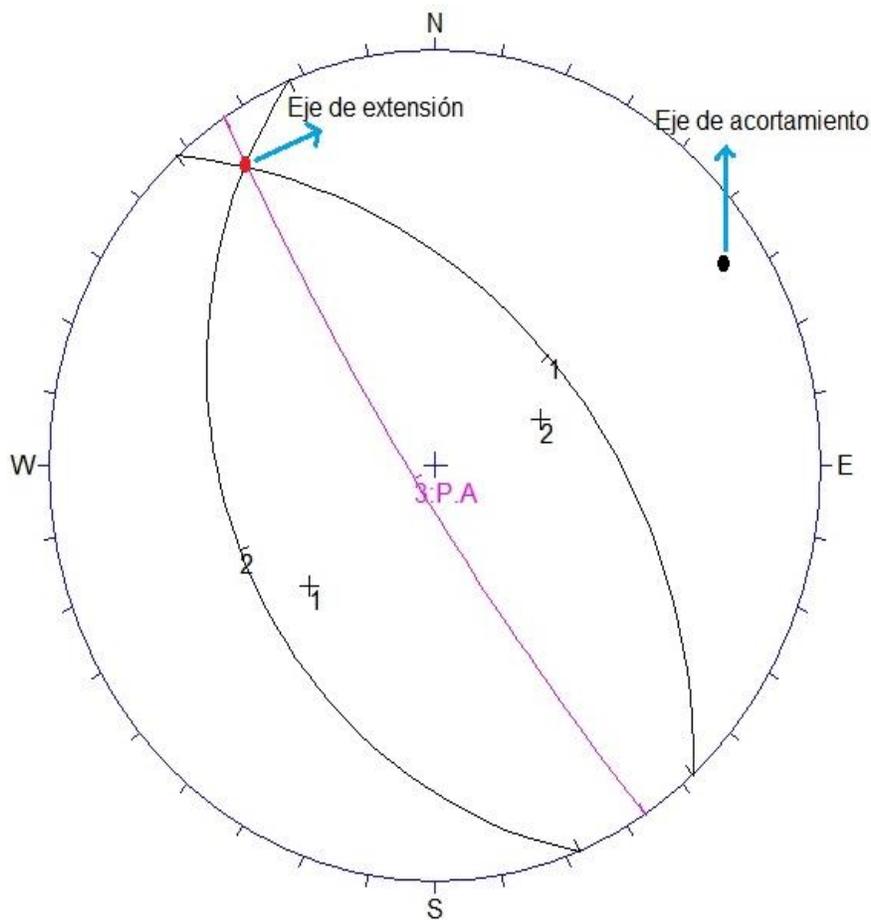


Figura 4.53 Análisis cinemático para el promedio de los flancos de pliegues de las calizas de la Formación Tamaulipas, flanco 1:  $N42^{\circ}W$ ,  $47^{\circ}$ , flanco 2:  $S22^{\circ}E$ ,  $33^{\circ}$ , 3: P.A  $S33^{\circ}E$ ,  $83^{\circ}$ , eje de extensión con dirección NW y eje de acortamiento con dirección NE.

El punto de color negro representa el eje de acortamiento que tiene una dirección NE, el punto rojo es el eje de extensión que tiene una dirección NW ambos con un buzamiento ligero.

En la figura 4.54 se muestra el análisis cinemático para el promedio de flancos de los pliegues de la Formación Tuzancoa, en negro son las ciclográficas de cada flanco, en rosa el plano axial.

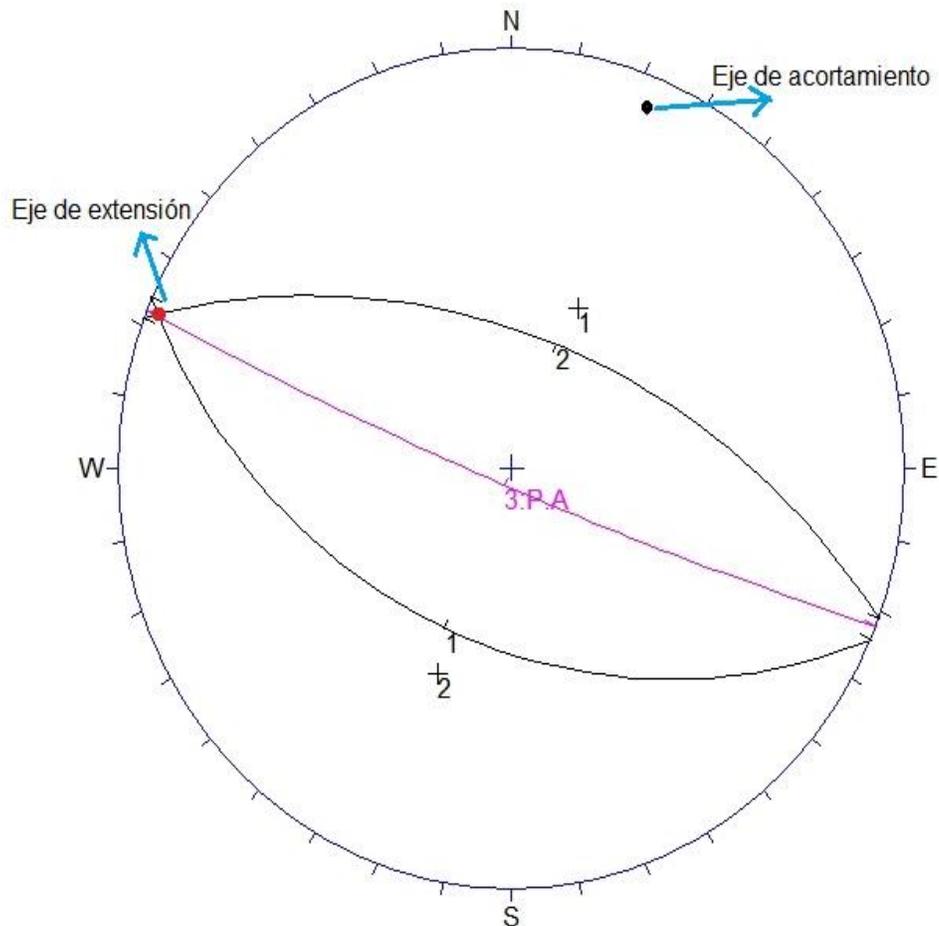


Figura 4.54 Análisis cinemático para el promedio de los flancos de pliegues de las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa, flanco 1:  $S66^{\circ}E, 45^{\circ}$ , flanco 2:  $N69^{\circ}W, 55^{\circ}$ , 3: P.A  $S78^{\circ}E, 85^{\circ}$ , eje de acortamiento con una dirección NE y eje de extensión con una dirección NW.

El punto rojo representa el eje de extensión que es casi horizontal con dirección NW y el eje de acortamiento es el punto negro con una dirección NE y de igual manera casi horizontal.

En la figura 4.55 se muestra las densidades de ejes de acortamiento en pliegues para las Formaciones Tamaulipas y Tuzancoa, aún costado derecho se observa el promedio de concentraciones.

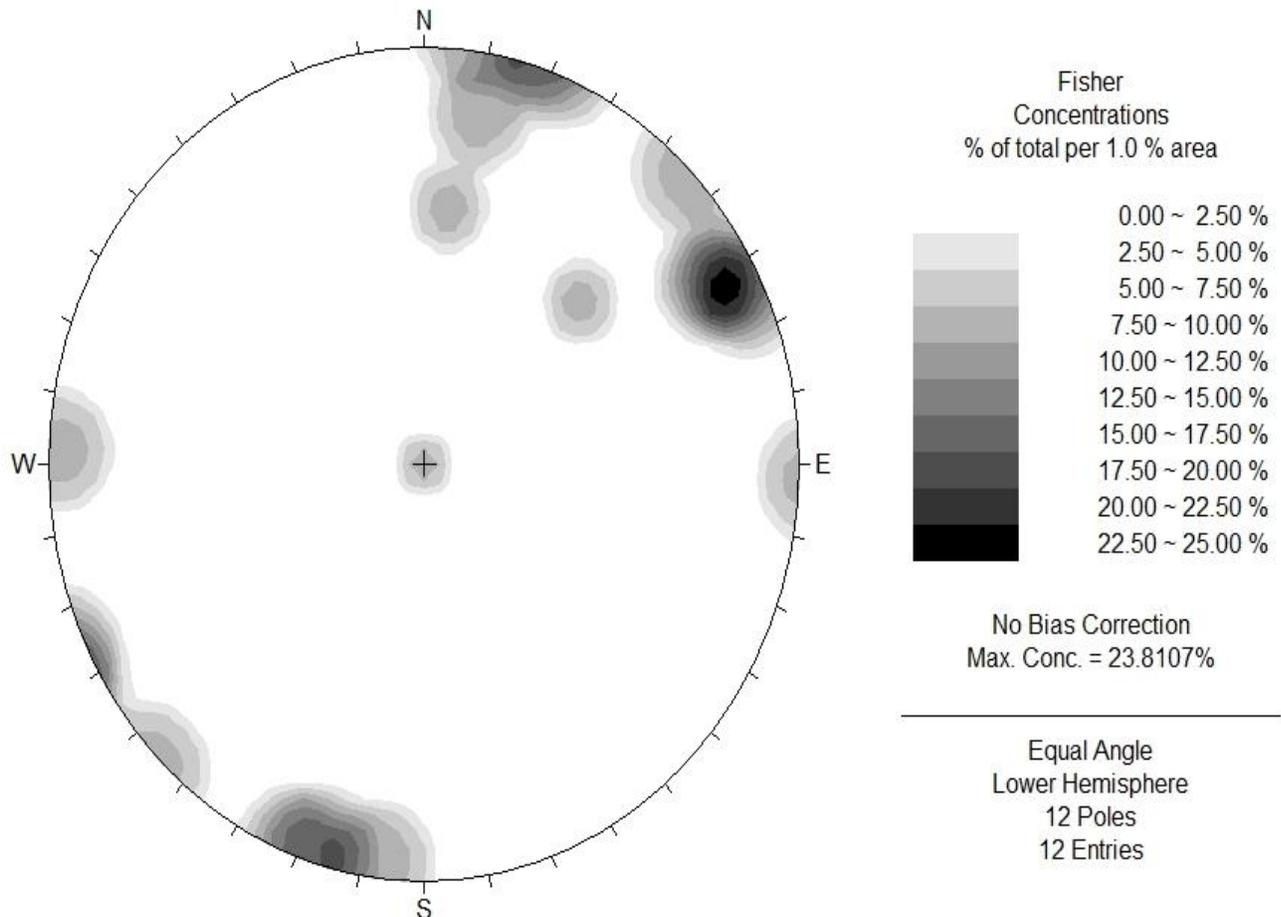


Figura 4.55 Densidad de ejes de acortamiento en pliegues de calizas de la Formación Tamaulipas y lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa al poniente de Calnali, se muestra dos direcciones preferenciales NE para la Formación Tamaulipas y SW para la Formación Tuzancoa.

Considerando que ambas direcciones para los ejes de acortamiento de los pliegues de la Formaciones Tuzancoa y Tamaulipas dan una dirección preferencial NE en ambas formaciones (Figuras 4.53, 4.54) y los de la figura 4.55 dan NE para las calizas y SW para las lutitas-areniscas, se expone que por lo menos hay dos deformaciones diferentes para las calizas y una para las lutitas-areniscas.

En la figura 4.56 se muestra el diagrama de densidad para los ejes de extensión de las calizas de la Formación Tamaulipas y lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa, el color negro representa la mayor densidad y aún costado derecho el promedio de concentraciones.

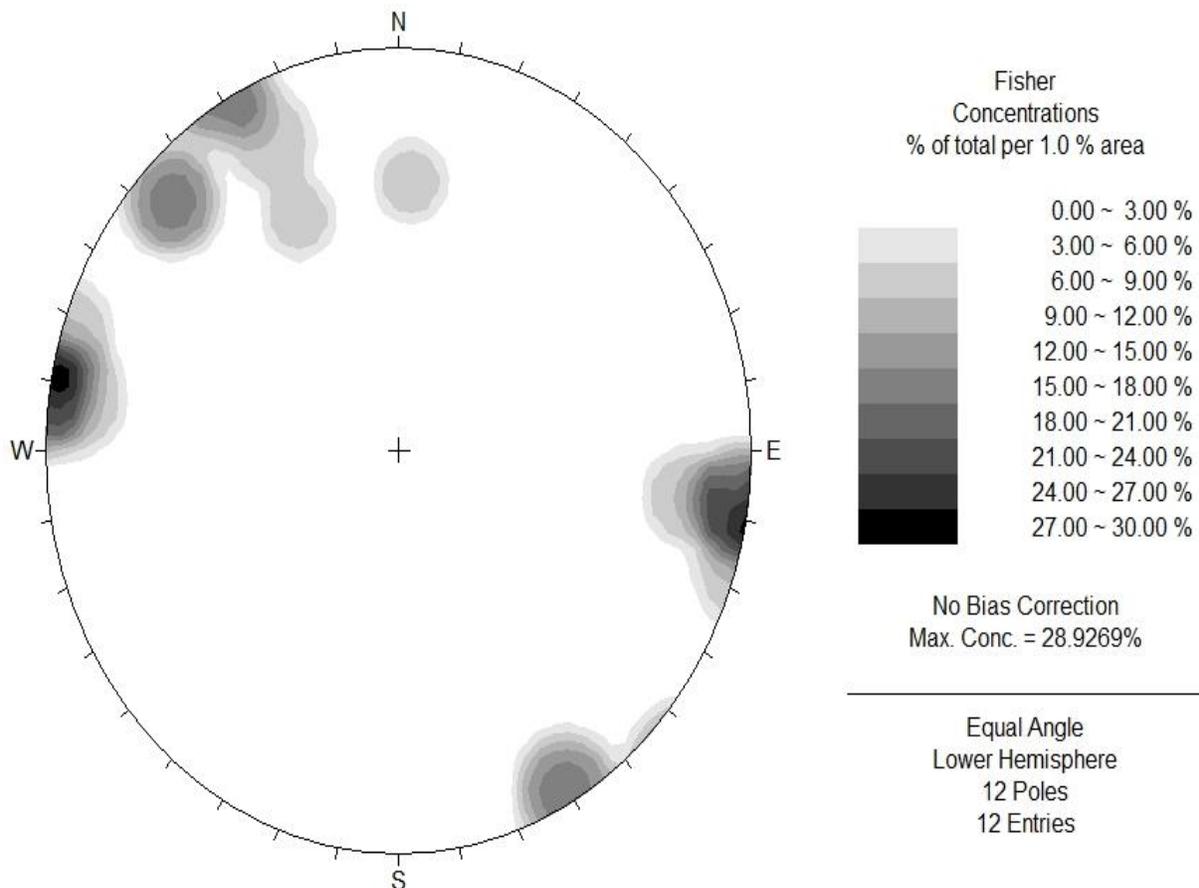
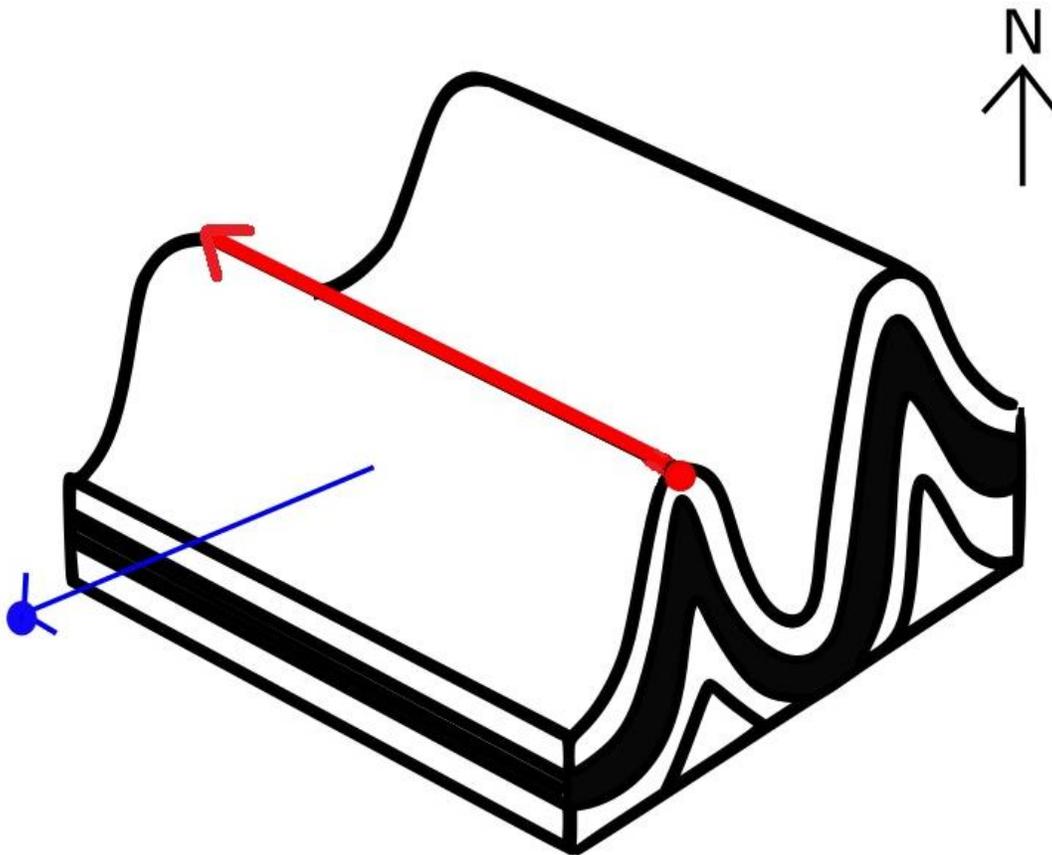


Figura 4.56 Densidad de ejes de extensión en pliegues de calizas de la Formación Tamaulipas y lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa al poniente de Calnali, se muestran una dirección preferencial de NW para la Formación Tuzancoa y para la Formación Tamaulipas.

Se observa que por lo menos hay dos eventos para las calizas y uno para las lutitas-areniscas. Se sabe que en la naturaleza hay distintos tipos de mecanismos formadores de pliegues, existe los eventos de plegamiento flexural (“Bending”, “Buckling”, pliegues “Forzados”) y el plegamiento por cizalla, el cual en esta zona de estudio se determinó que era el mecanismo formador de pliegues que se sustentara en la discusión de este trabajo.

Se tiene un promedio de acortamiento en las fallas en dirección NE y una dirección SW para el de extensión y al no estar contenidos los ejes en una sola ciclográfica, existe la no compatibilidad cinemática y se propone que hubo dos eventos de deformación por lo menos.

En el esquema 4.2 se muestra los ejes de acortamiento y de extensión para los promedios de los pliegues analizados de las Formaciones Tamaulipas y Tuzancoa (figura 4.55, 4.56).



*Esquema 4.2 Esquema idealizado del eje de acortamiento (recta color azul) con dirección NE para las calizas de la Formación Tamaulipas y SW para las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa, el eje de extensión (recta roja) con dirección NW para ambas formaciones del promedio de los flancos de los pliegues analizados (figuras 4.55 & 4.56).*

### 4.3 Análisis Dinámico.

En este punto del trabajo se conocerá los esfuerzos principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  (Figura a 4.57) que conforman a los pliegues y fallas analizados anteriormente, para poder reconstruir la orientación de cada uno y se esquematizará las ciclográficas usando el programa DIPS<sup>®</sup>.

Se sabe que por convención  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , juntos los principales esfuerzos definen el elipsoide de esfuerzos (Figura b 4.57). La tensión normal que actúa sobre cualquier plano dentro de un cuerpo no puede exceder a  $\sigma_1$  ni ser inferior que  $\sigma_3$ , incluso en las situaciones donde la corteza se está extendiendo como tal es el caso de los Rifts, donde los esfuerzos principales pueden ser de compresión.

Por estudios de laboratorio se conoce que si el cuerpo es de propiedades isotrópicas se pueden producir fracturas en un par conjugado, las cuales son perpendiculares a los planos de  $\sigma_1$  &  $\sigma_3$ . Estas fracturas forman un ángulo agudo con  $\sigma_1$  y forman un ángulo obtuso con  $\sigma_3$ . El ángulo entre  $\sigma_1$  y las fracturas es variable, dependiendo del tipo de roca y de las magnitudes de los esfuerzos principales, pero casi siempre es  $\leq 45^\circ$

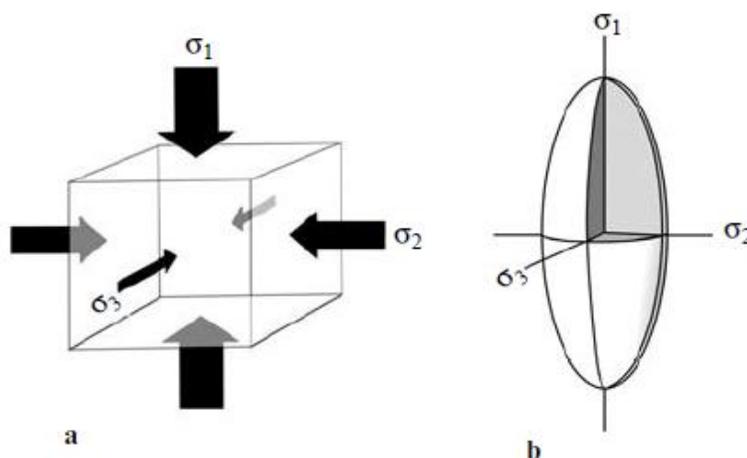


Figura 4.57 (a) Representa los principales esfuerzos. (b) El elipsoide de esfuerzos.

Se comenzará con los pliegues de las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, en el camino que llega al poblado de Tostlamantla. La figura 4.58 muestra el análisis dinámico de un pliegue sinforme.

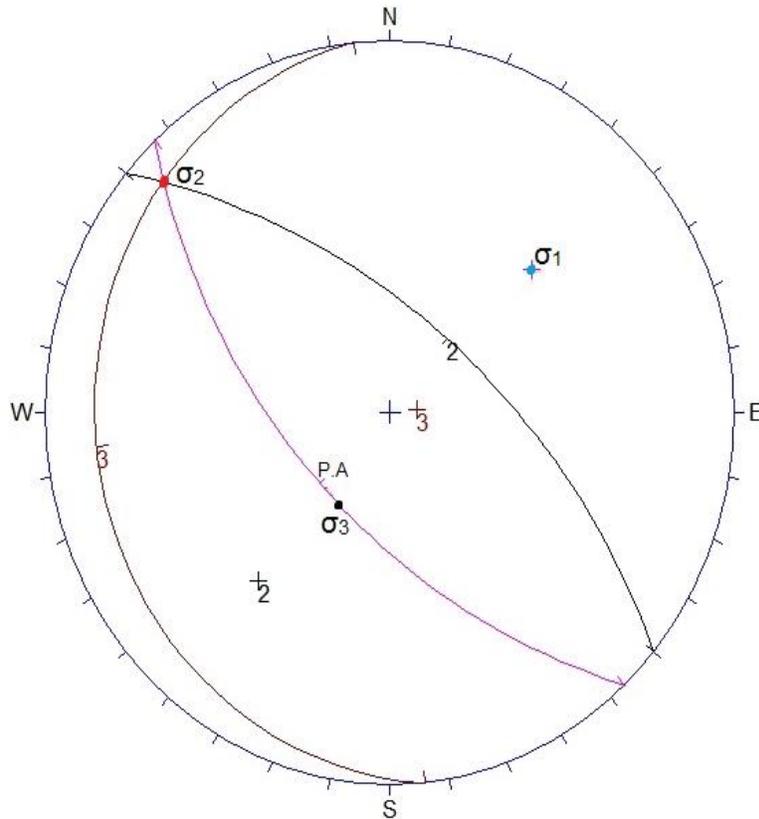


Figura 4.58 Análisis dinámico de pliegue Sinforme en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, flanco 2:  $N50^{\circ}W, 61^{\circ}$ , flanco 3:  $S08^{\circ}E, 09^{\circ}$ , 5: P.A  $S43^{\circ}E, 59^{\circ}$ , punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.1 muestra los rumbos y echados de los flancos del pliegue, plano axial (P.A.) y los esfuerzos principales de la figura 4.58.

Rumbo y echado	
$N50^{\circ}W, 61^{\circ}NE$	(2) Flanco NW
$S6^{\circ}E, 9^{\circ}SW$	(3) Flanco SE
$S43^{\circ}E, 59^{\circ}SW$	(P.A.)plano axial
$31^{\circ}$ al $NE46^{\circ}$	$\sigma_1$
$7^{\circ}$ al $NW46^{\circ}$	$\sigma_2$
$62^{\circ}$ al $SW25^{\circ}$	$\sigma_3$

La figura 4.59 se representa el análisis dinámico de un pliegue antiforme.

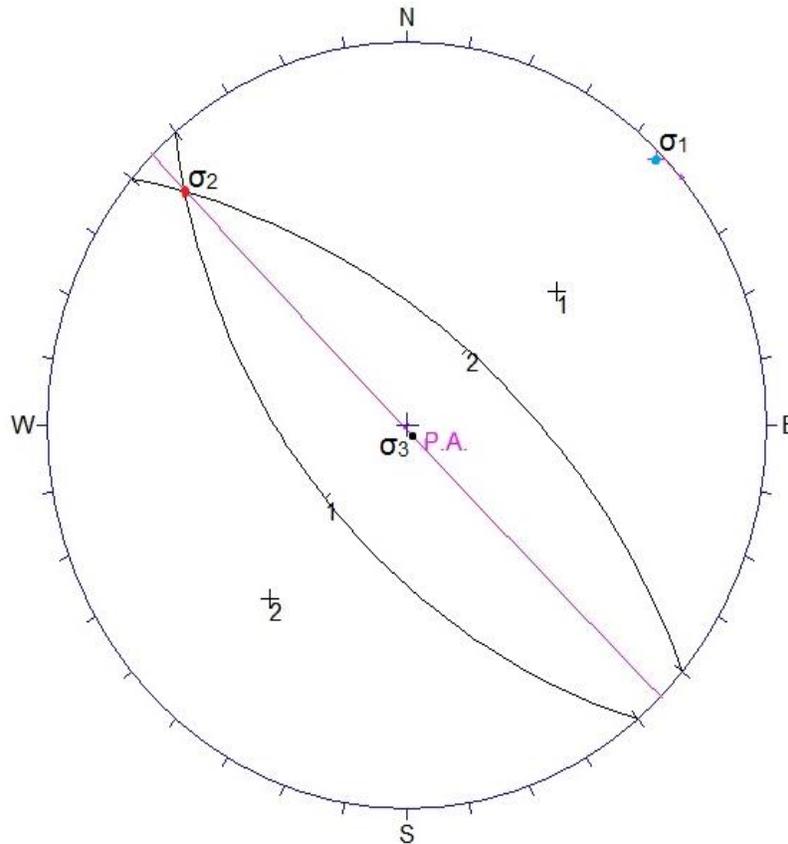


Figura 4.59 Análisis dinámico de pliegue Antiforme en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, flanco 1: S40°E, 57°, flanco 2: N50°W, 61°, 4: P.A S45°E, 89° punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.2 muestra los rumbos y echados de los flancos del pliegue, plano axial (P.A) y los esfuerzos principales de la figura 4.59.

Rumbo y echado	
S40°E, 57°SW	(1) Flanco SE
N50°W, 61°NE	(2) Flanco NW
S45°E, 89°SW	(P.A.)plano axial
1° al NE44°	$\sigma_1$
8° al NW45°	$\sigma_2$
89° al SE45°	$\sigma_3$

La figura 4.60 muestra el análisis dinámico de un pliegue sinforme.

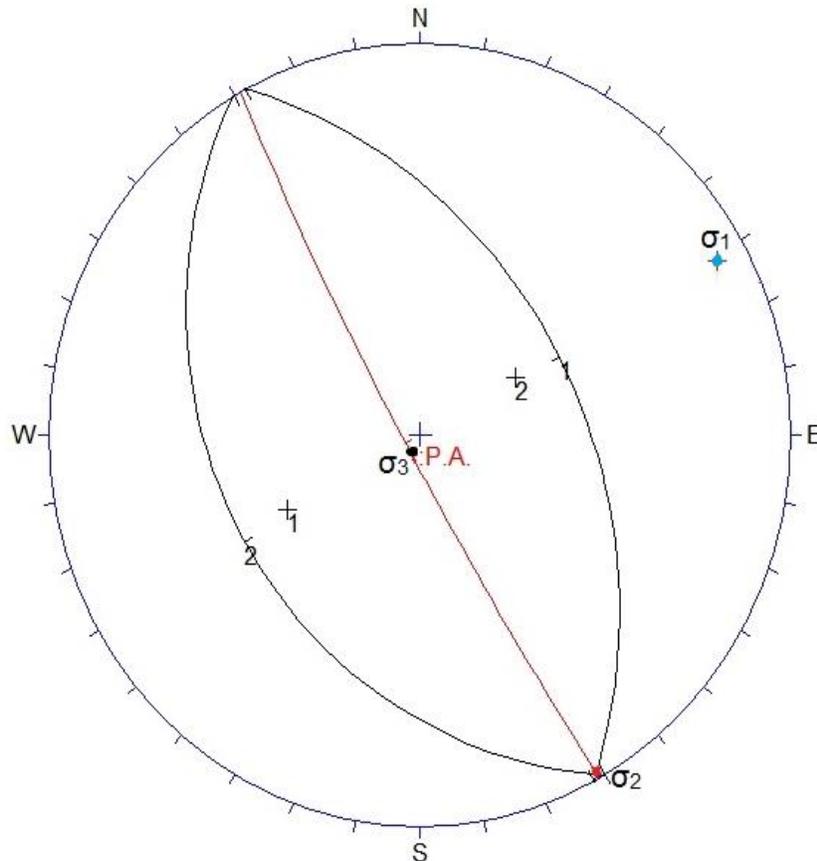


Figura 4.60 Análisis dinámico de pliegue Sinforme en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, flanco 1: N28°W, 44°, flanco 2: S30°E, 33°, 4: P.A S29°E, 85°, punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.3 muestra los rumbos y echados de los flancos del pliegue, plano axial (P.A) y los esfuerzos principales de la figura 4.60.

Rumbo y echado	
N28°W, 44°NE	(1) Flanco NW
S30°E, 33°SW	(2) Flanco SE
S29°E, 85°SW	(P.A.)plano axial
5° al NE59°	$\sigma_1$
1° al SE29°	$\sigma_2$
86° al SW61°	$\sigma_3$

La figura 4.61 representa el análisis dinámico de un pliegue antiforme.

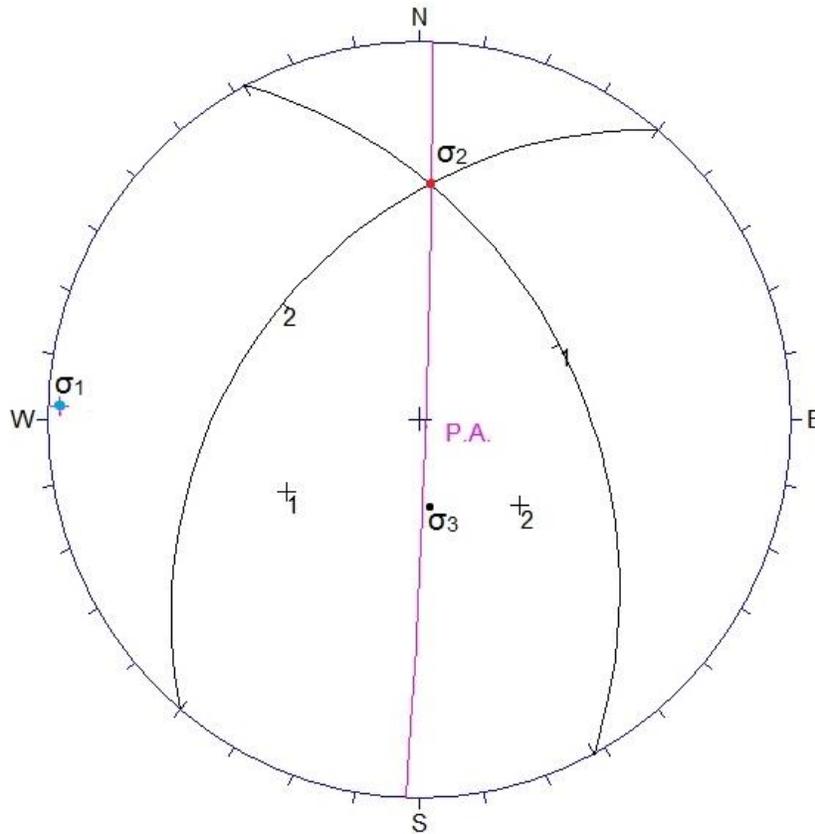


Figura 4.61 Análisis dinámico de pliegue Antiforme en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, flanco 1:  $N28^\circ W, 44^\circ$ , flanco 2:  $S40^\circ W, 39^\circ$ , 3: P.A  $N02^\circ E, 88^\circ$ , punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.4 muestra los rumbos y echados de los flancos del pliegue, plano axial (P.A) y los esfuerzos principales de la figura 4.61.

Rumbo y echado	
$N28^\circ W, 44^\circ NE$	(1) Flanco NW
$S40^\circ W, 39^\circ NW$	(2) Flanco SW
$N02^\circ E, 88^\circ SE$	(P.A.)plano axial
$2^\circ$ al $NW88^\circ$	$\sigma_1$
$27^\circ$ al $NE02^\circ$	$\sigma_2$
$72^\circ$ al $SE02^\circ$	$\sigma_3$

La figura 4.62 representa el análisis dinámico de un pliegue sinforme.

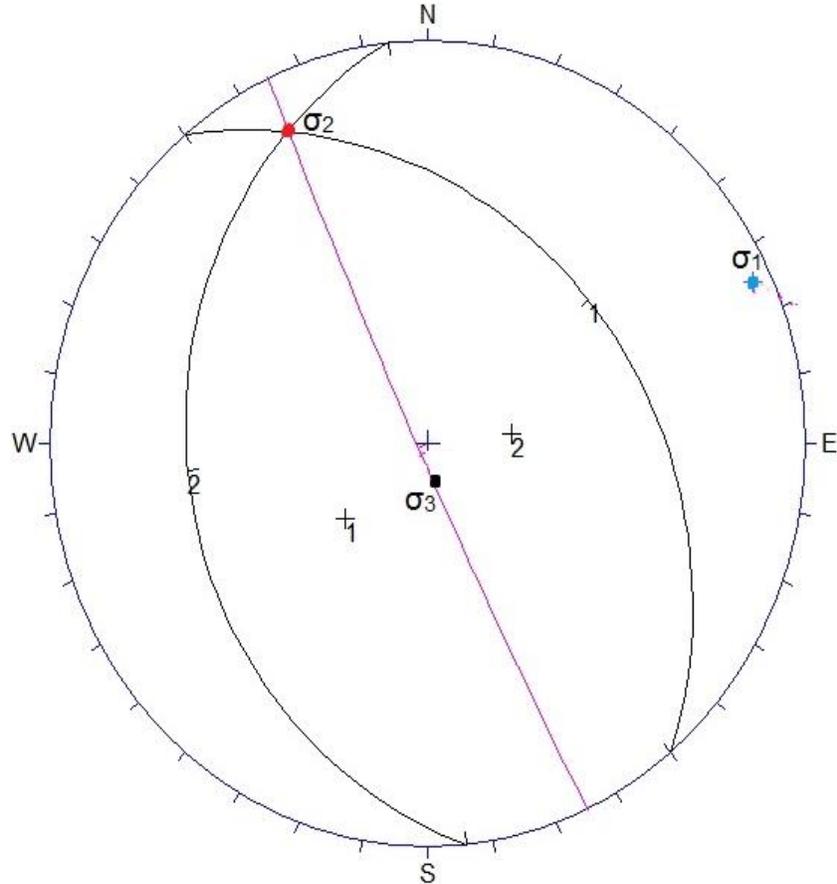


Figura 4.62 Análisis de pliegue Sinforme en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, Flanco 1: N40°W, 32°, flanco 2: S06°E, 25°, 3: P.A S25°E, 87°, punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.5 muestra los rumbos y echados de los flancos del pliegue, plano axial (P.A) y los esfuerzos principales de la figura 4.62.

Rumbo y echado	
N40°W, 32°NE	(1) Flanco NW
S06°E, 25°SW	(2) Flanco SE
S35°E, 87°SW	(P.A.)plano axial
2° al NE54°	$\sigma_1$
10° al NW25°	$\sigma_2$
82° al SE25°	$\sigma_3$

En la figura 4.63 se muestra la máxima concentración de polos de los planos axiales de los pliegues analizados al Norte de Calnali en la terracería que se dirige al poblado de Tostlamantla. Aún costado derecho se muestra el porcentaje de mayor densidad de polos que está representado de color oscuro.

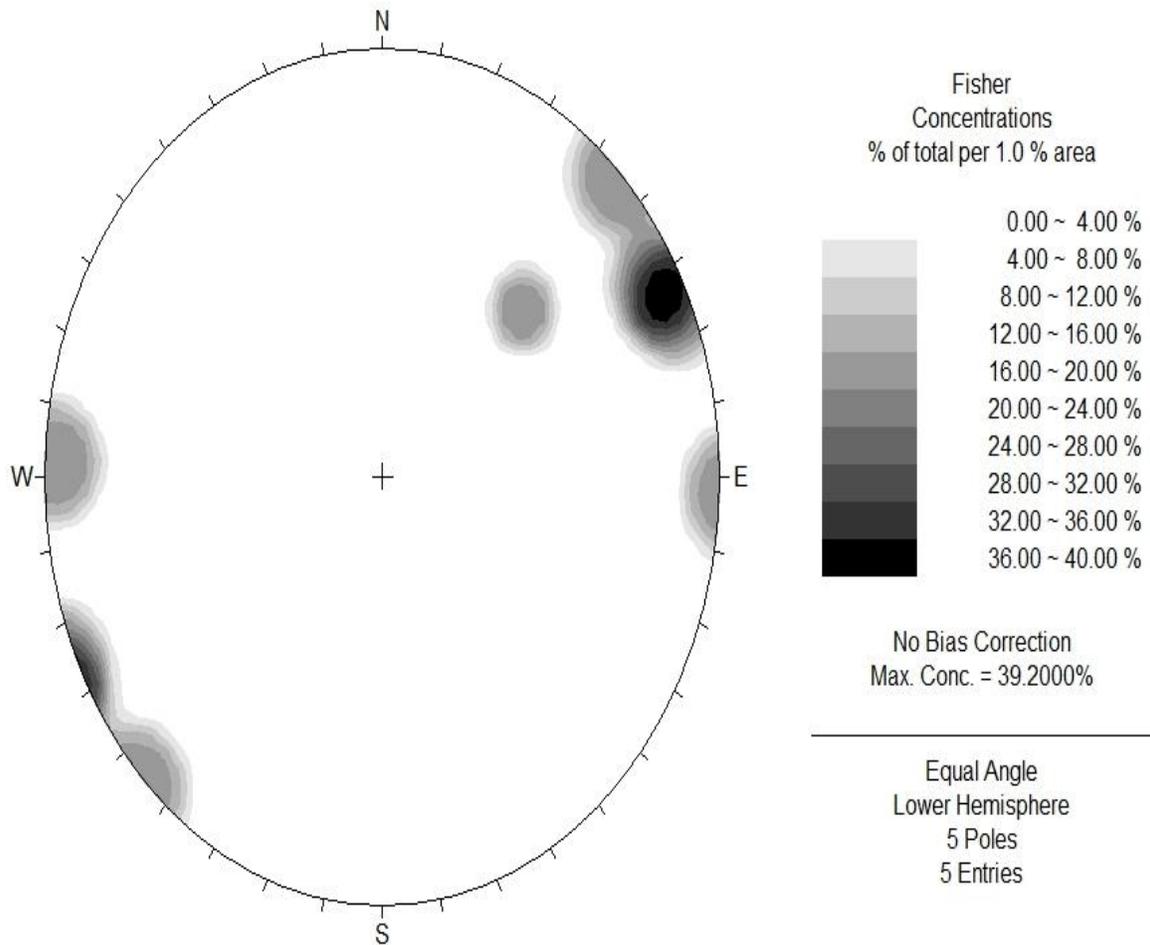


Figura 4.63 Concentración de polos de planos axiales de los pliegues analizados de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, la orientación preferencial para el esfuerzo  $\sigma_1$  es de  $4^\circ$  al  $NE60^\circ-64^\circ$  casi horizontal.

Se nota que en la orientación aproximada de  $4^\circ$  al  $NE-SW60^\circ - NE-SW64^\circ$  esta la mayor concentración de polos de planos axiales que se interpretan como el esfuerzo principal de mayor magnitud " $\sigma_1$ ". En la figura 4.64 se muestra el patrón de fracturamiento de las calizas de la Formación Tamaulipas al Norte de Calnali.

En la figura 4.64 se observa el patrón de fracturamiento obtenido en las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali en el camino que va al poblado de Tostlamantla.

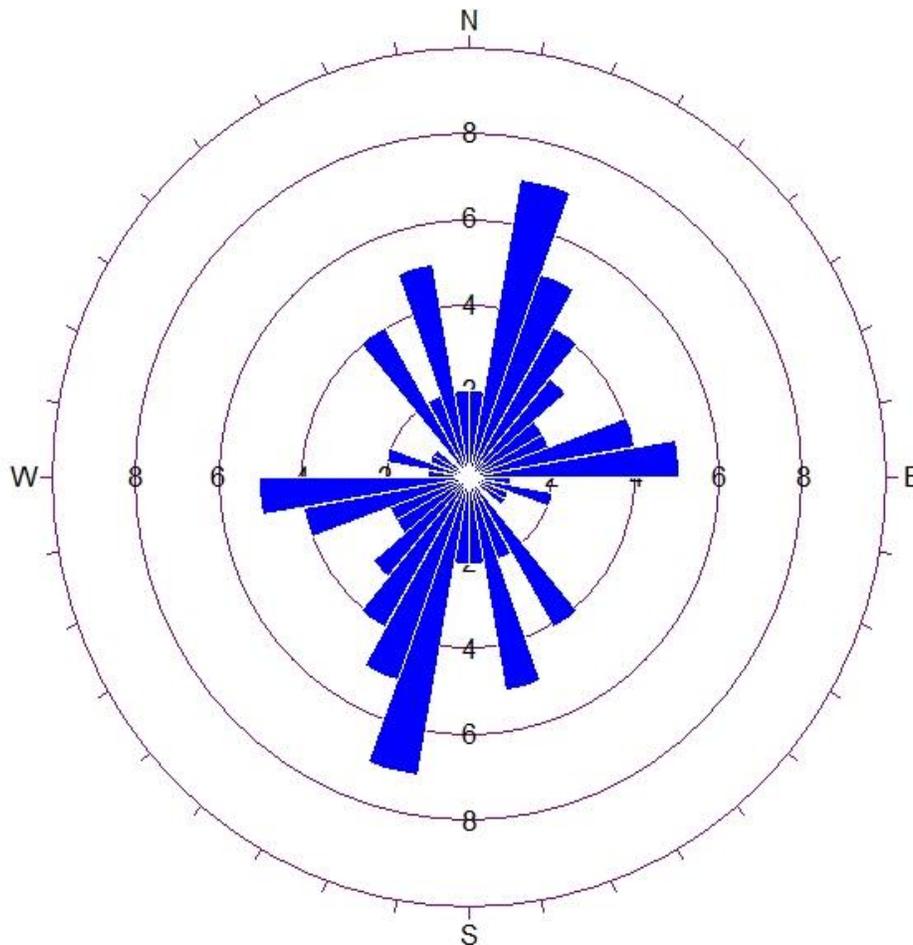


Figura 4.64 Roseta de rumbos de patrón de fracturamiento de calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, la orientación de las familias más persistentes es de NE-SW10°-20°.

La mayor densidad de datos se perciben en los rangos de NE-SW 10-20° con 7 unidades, NE-SW 20-30° & 80-90° con 5 unidades, esto concuerda con la figura 4.63, en dirección NE-SW está orientado el mayor esfuerzo  $\sigma_1$  y tiene una importante distribución a lo largo de toda la dirección pero en más énfasis en los ya mencionadas.

Los datos usados para la roseta de rumbos fueron un total de 52 y se muestran en la tabla 1 del apéndice.

La figura 4.65 representa el análisis dinámico de un pliegue sinforme.

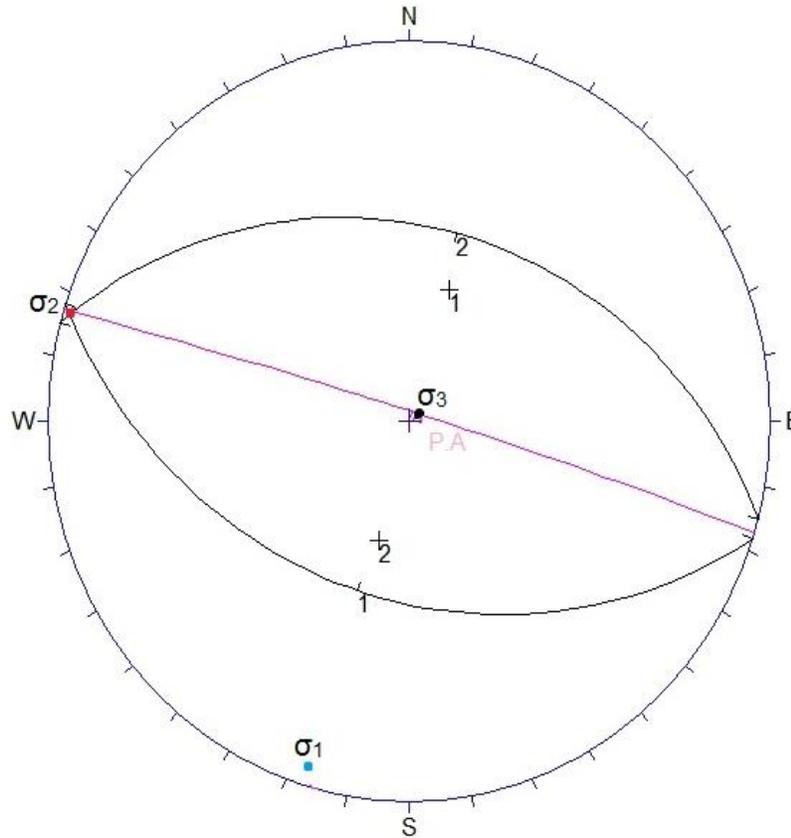


Figura 4.65 Análisis dinámico de pliegue Sinforme en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa del poblado de Tostlamantla a Chiquitla, flanco 1:  $S72^{\circ}E, 40^{\circ}$ , flanco 2:  $N75^{\circ}W, 36^{\circ}$ , 3: P.A  $N73^{\circ}W, 87^{\circ}$ , punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.6 muestra los rumbos y echados de los flancos del pliegue, plano axial (P.A) y los esfuerzos principales de la figura 4.65.

Rumbo y echado	
$S72^{\circ}E, 40^{\circ}SW$	(1) Flanco SE
$N75^{\circ}W, 36^{\circ}NE$	(2) Flanco NW
$N77^{\circ}W, 87^{\circ}NE$	(P.A.)plano axial
$3^{\circ}$ al $SW18^{\circ}$	$\sigma_1$
$1^{\circ}$ al $NW73^{\circ}$	$\sigma_2$
$87^{\circ}$ al $NE18^{\circ}$	$\sigma_3$

La figura 4.66 representa el análisis dinámico de un pliegue antiforme

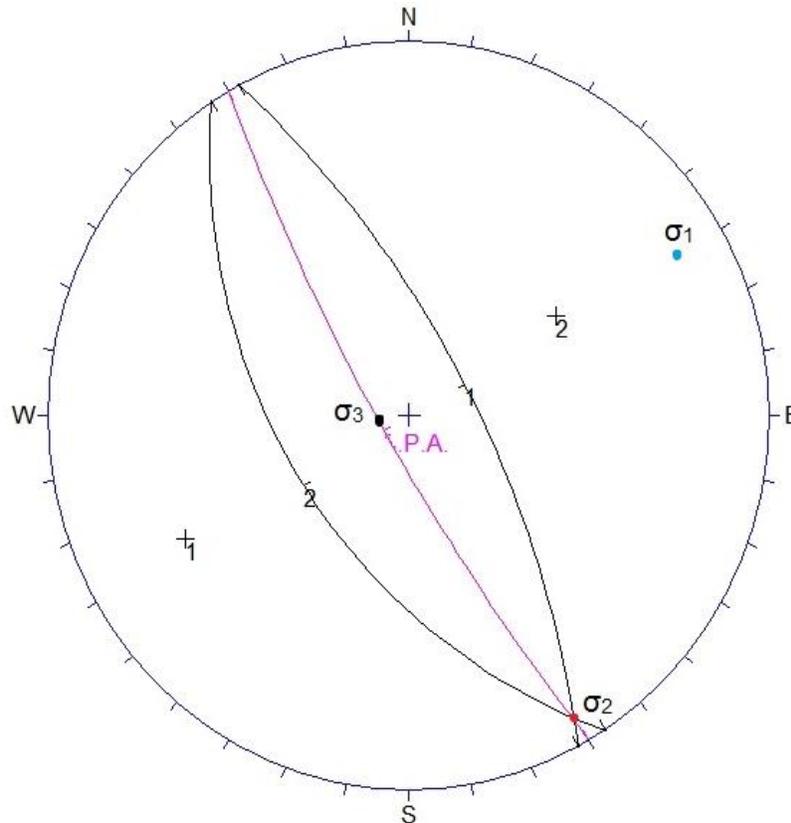


Figura 4.66 Análisis dinámico de pliegue Antiforme en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa del poblado de Tostlamantla a Chiquitla, flanco 1:  $N28^{\circ}W, 70^{\circ}$ , flanco 2:  $S33^{\circ}E, 52^{\circ}$ , 3: P.A  $S30^{\circ}E, 81^{\circ}$ , punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.7 muestra los rumbos y echados de los flancos del pliegue, plano axial (P.A) y los esfuerzos principales de la figura 4.66.

Rumbo y echado	
$N28^{\circ}W, 70^{\circ}NE$	(1) Flanco NW
$S33^{\circ}E, 52^{\circ}SW$	(2) Flanco SE
$S30^{\circ}E, 81^{\circ}SW$	(P.A.)plano axial
$9^{\circ}$ al $NE60^{\circ}$	$\sigma_1$
$4^{\circ}$ al $SE30^{\circ}$	$\sigma_2$
$80^{\circ}$ al $SW72^{\circ}$	$\sigma_3$

La figura 4.67 representa el análisis dinámico de un pliegue sinforme.

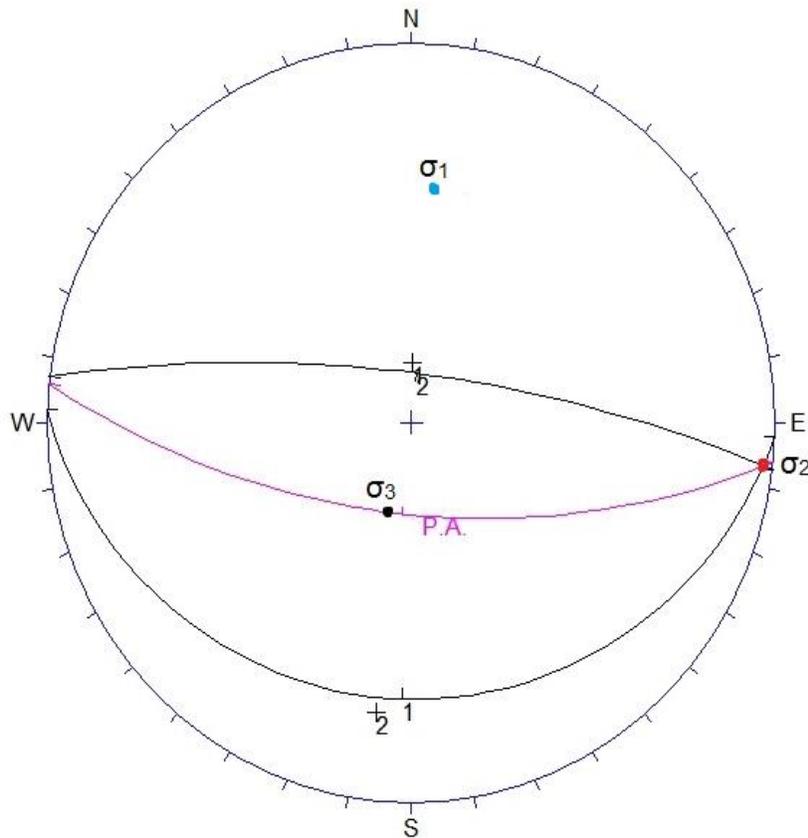


Figura 4.67 Análisis dinámico de pliegue Sinforme en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa sobre la carretera al poblado de Ahuacatlán al poniente de Calnali, flanco 1: S88°E, 16°, flanco 2: N83°W, 75°, 3: P.A S84°E, 63°, punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.8 muestra los rumbos y echados de los flancos del pliegue, plano axial (P.A) y los esfuerzos principales de la figura 4.67.

Rumbo y echado	
S88°E, 18°SW	(1) Flanco SE
N83°W, 75°NE	(2) Flanco NW
S84°E, 63°SW	(P.A.)plano axial
27° al NE07°	$\sigma_1$
2° al SE83°	$\sigma_2$
68° al SW12°	$\sigma_3$

La figura 4.68 representa el análisis dinámico de un pliegue antiforme

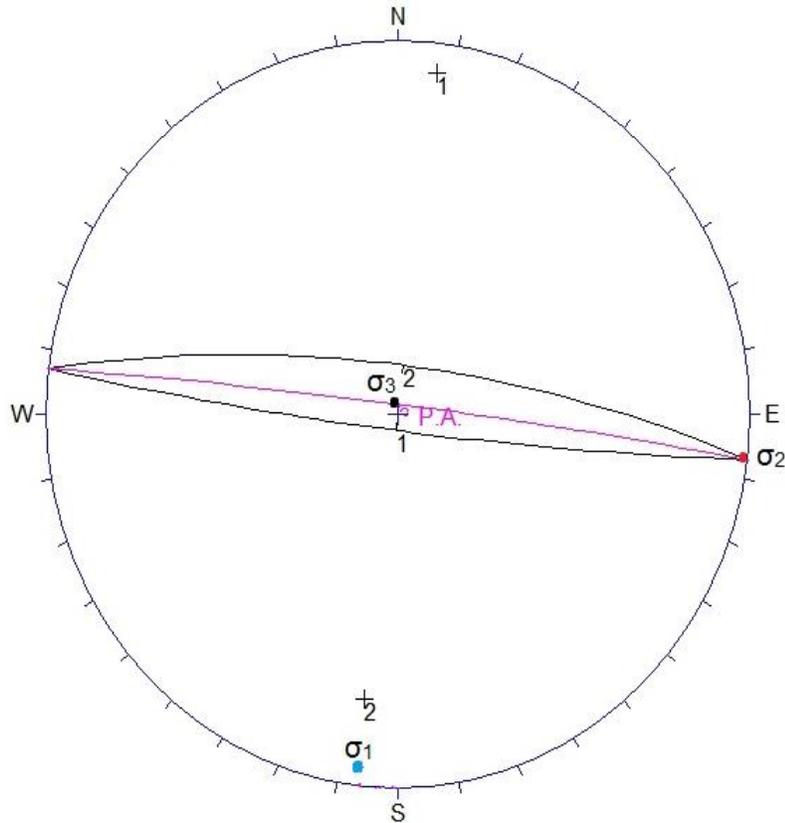


Figura 4.68 Análisis dinámico de pliegue Antiforme en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa en la terracería hacia el cerro Teacal al poniente de Calnali, flanco 1: S83°E, 85°, flanco 2: N83°W, 75°, 3: P.A N83°W, 87°, punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.9 muestra los rumbos y echados de los flancos del pliegue, plano axial (P.A) y los esfuerzos principales de la figura 4.68.

Rumbo y echado	
S87°E, 85°SW	(1) Flanco SE
N83°W, 75°NE	(2) Flanco NW
N83°W, 87°NE	(P.A.)plano axial
2° al SW08°	$\sigma_1$
1° al SE82°	$\sigma_2$
87° al NW06°	$\sigma_3$

La figura 4.69 representa el análisis dinámico de un pliegue sinforme.

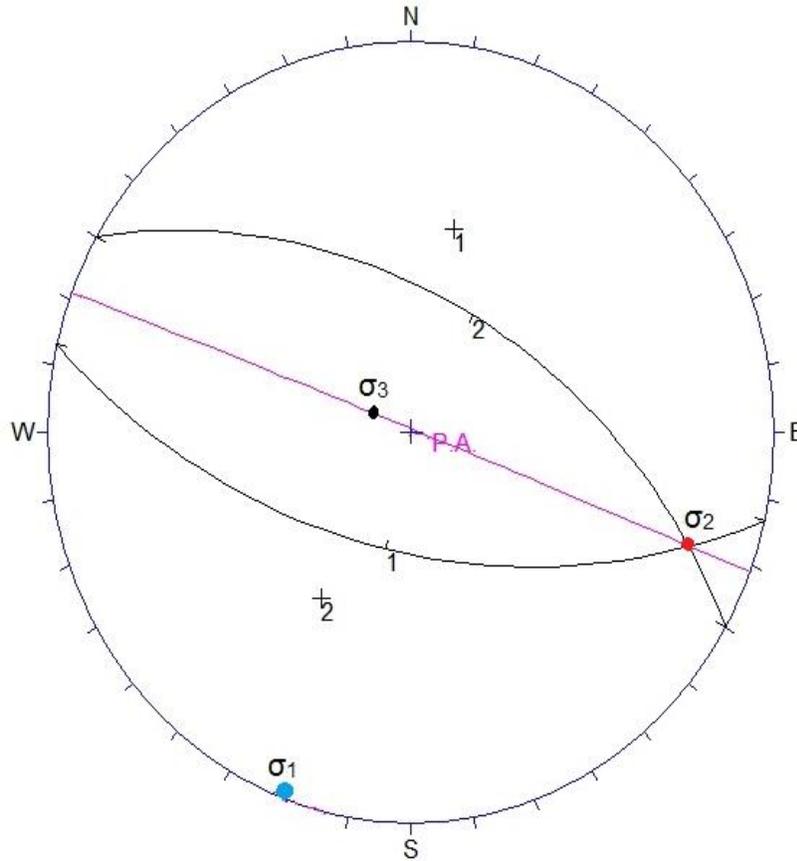


Figura 4.69 Análisis dinámico de pliegue Sinforme en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa en la terracería al cerro Teacal al poniente de Calnali, flanco 1:  $S77^{\circ}E, 56^{\circ}$ , flanco 2:  $N60^{\circ}W, 52^{\circ}$ , 3: P.A  $N69^{\circ}W, 89^{\circ}$ , punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.10 muestra los rumbos y echados de los flancos del pliegue, plano axial (P.A) y los esfuerzos principales de la figura 4.69.

Rumbo y echado	
$S77^{\circ}E, 56^{\circ}SW$	(1) Flanco SE
$N60^{\circ}W, 52^{\circ}NE$	(2) Flanco NW
$N69^{\circ}W, 89^{\circ}NE$	(P.A.)plano axial
$1^{\circ}$ al $SW22^{\circ}$	$\sigma_1$
$12^{\circ}$ al $SE69^{\circ}$	$\sigma_2$
$79^{\circ}$ al $NW69^{\circ}$	$\sigma_3$

La figura 4.70 representa el análisis dinámico de un pliegue antiforme.

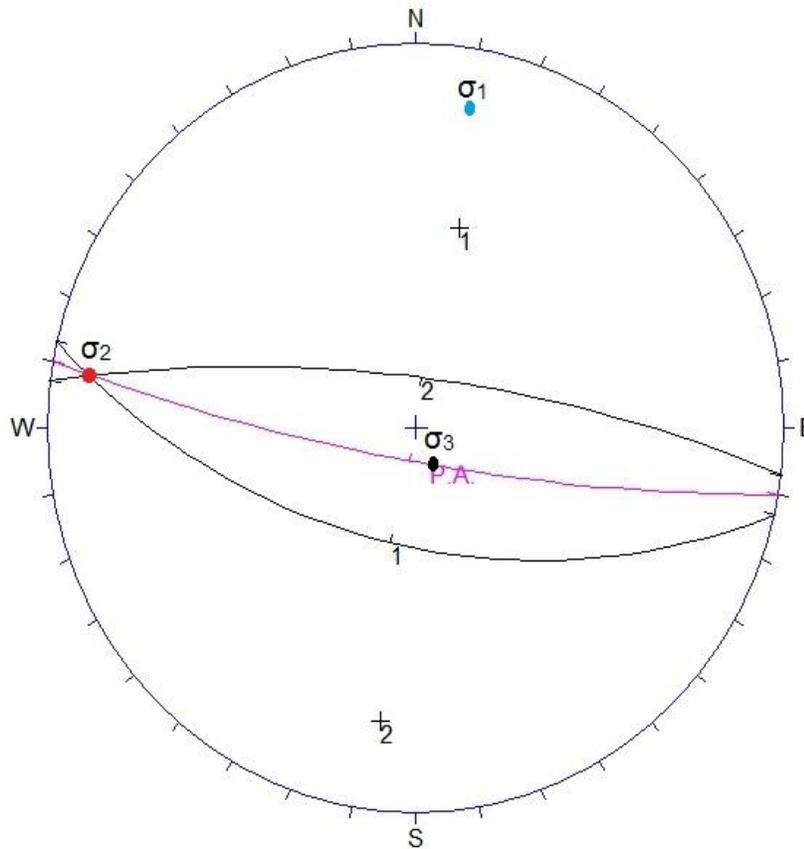


Figura 4.70 Análisis dinámico de pliegue Antiforme en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa en la terracería rumbo al cerro Teacal al poniente de Calnali, flanco 1: S77°E, 56°, flanco 2: N83°W, 75°, 3: P.A S80°E, 80°, punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.11 muestra los rumbos y echados de los flancos del pliegue, plano axial (P.A) y los esfuerzos principales de la figura 4.70.

Rumbo y echado	
S77°E, 56°SW	(1) Flanco SE
N83°W, 75°NE	(2) Flanco NW
S80°E, 80°SW	(P.A.)plano axial
10° al NE10°	$\sigma_1$
6° al NW81°	$\sigma_2$
79° al SE48°	$\sigma_3$

En la figura 4.71 se muestra la concentración de polos de los planos axiales analizados para los pliegues de la Formación Tuzancoa al poniente de Calnali, en la terracería que va del poblado de Tostlamantla a Chiquitla y al cerro Teacal. A la derecha de la figura se observa el porcentaje, el de mayor densidad se representa con color oscuro.

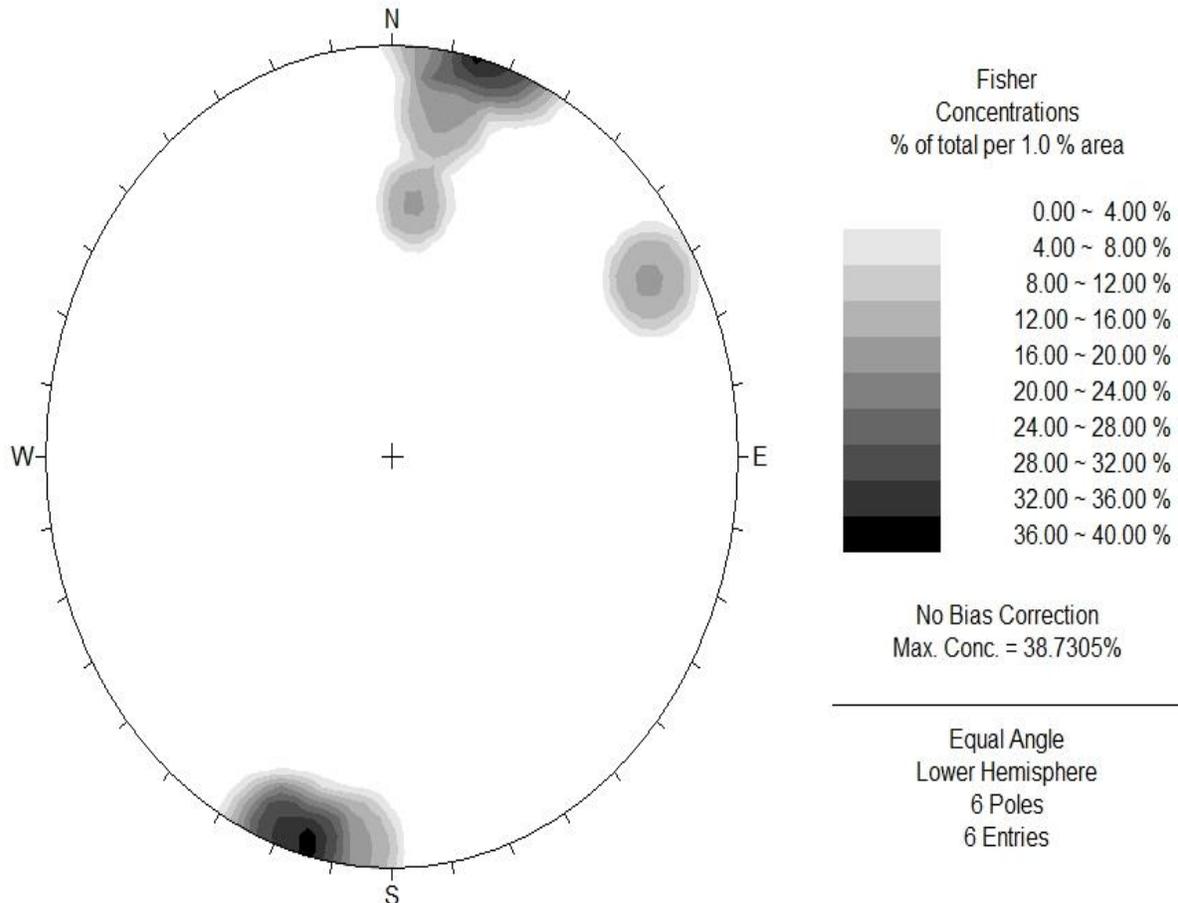
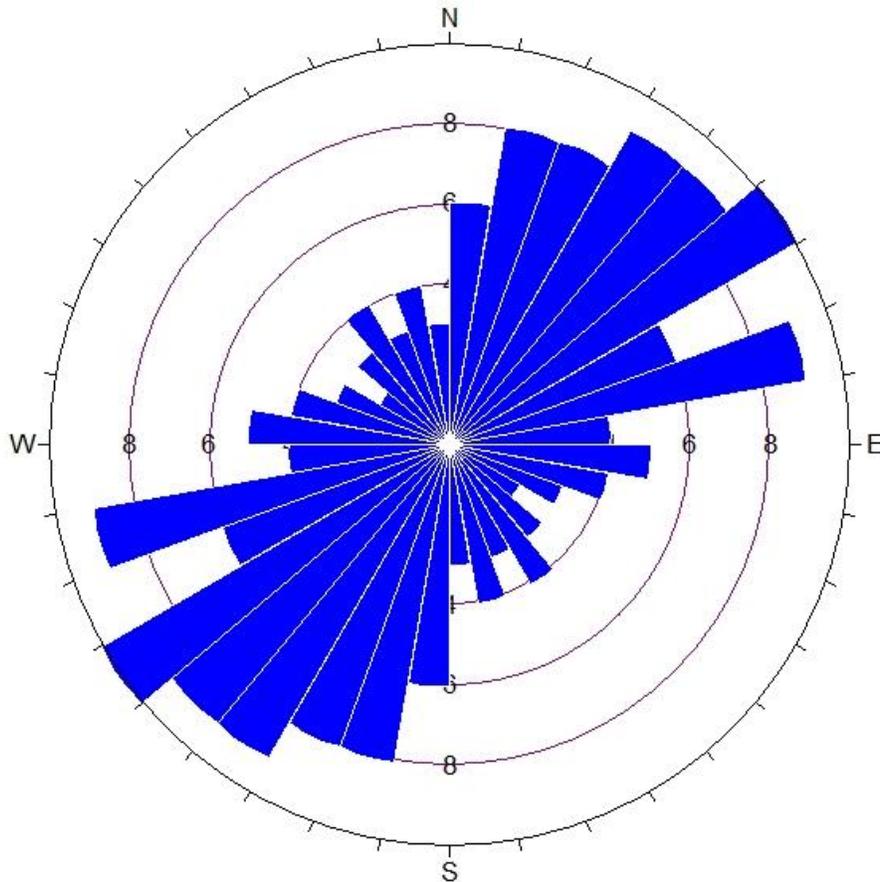


Figura 4.71 Concentración de polos de los planos axiales de pliegues analizados en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa el promedio arrojó  $0^\circ$  al  $SW15^\circ$  de la zona oriente del poblado de Calnali para el esfuerzo principal  $\sigma_1$ .

Se observa que la orientación preferencial se encuentra en  $0^\circ$  al  $SW-NE15^\circ$  por lo que podemos afirmar que el esfuerzo principal " $\sigma_1$ " está orientado en esa dirección, pero también se puede apreciar que hay una pequeña concentración en la orientación aproximada  $8^\circ$  al  $NE60^\circ$  que es la misma de las calizas de la Formación Tamaulipas (Figura 4.63) analizada anteriormente.

La figura 4.72 representa el fracturamiento de las intercalaciones de lutitas y areniscas de la Formación Tuzancoa, este patrón de fracturamiento fue tomado en los afloramientos a lo largo de la carretera Lolotla-Atlapexco al poniente de Calnali.



*Figura 4.72 Roseta de rumbos del patrón de fracturamiento de lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa sobre la terracería al cerro Teacal y la carretera al poblado de Ahuacatlán, las familias más persistentes son las de orientación NE-SW30°-60°.*

Se tomaron rangos de 10°, la mayor densidad se encuentra en el rumbo NE-SW 30-60° con 9 y 10 unidades, también sobresaltando el de 70-80° con 9 unidades lo que indica que esas son las orientaciones de las familias de mayor fracturamiento. El esfuerzo principal  $\sigma_1$  visto en la figura 4.71 también tiene el mismo rumbo por lo cual se reitera que esa es la orientación de los esfuerzos de deformación.

En la Tabla 3 del apéndice muestra los 100 datos utilizados para la figura 4.72.

La figura 4.73 representa el análisis dinámico del pliegue antifforme interpretado en calizas al suroriente de Calnali

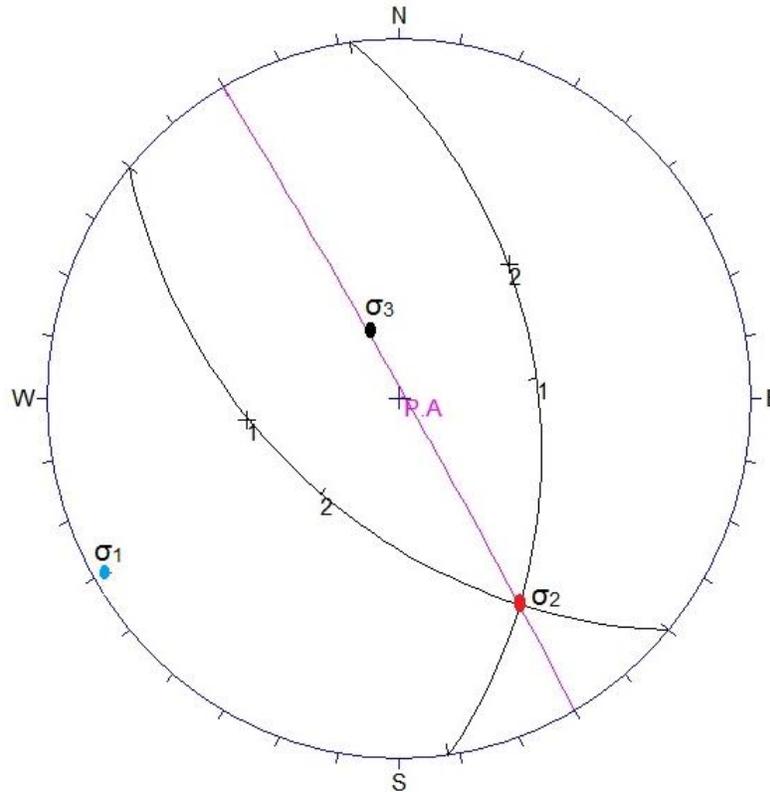


Figura 4.73 Análisis dinámico de pliegue Antifforme interpretado en suroriente del poblado de Calnali en calizas de la Formación Tamaulipas flanco 1: N08°W, 47°, flanco 2: S50°E, 52°, 3: P.A N30°W, 88°, punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.12 muestra los rumbos y echados de los flancos del pliegue, plano axial (P.A) y los esfuerzos principales de la figura 4.73.

Rumbo y echado	
N08°W, 47°NE	(1) Flanco NW
S50°E, 52°SW	(2) Flanco SE
N30°W, 88°NE	(P.A.)plano axial
2° al SW60°	$\sigma_1$
23° al SE30°	$\sigma_2$
67° al NW30°	$\sigma_3$

La figura 4.74 representa el análisis dinámico del pliegue antiforme interpretado en lutitas al suroriente de Calnali.

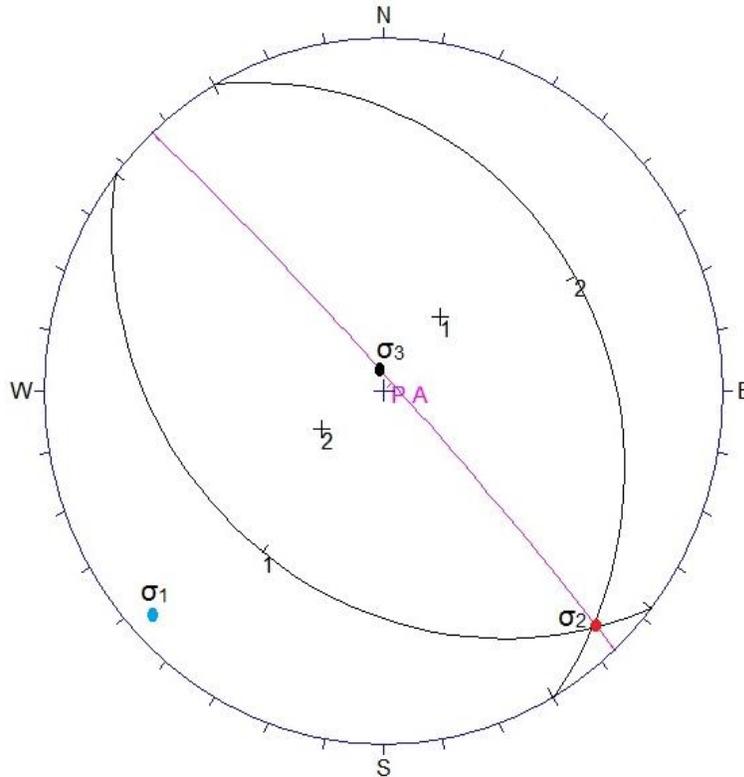
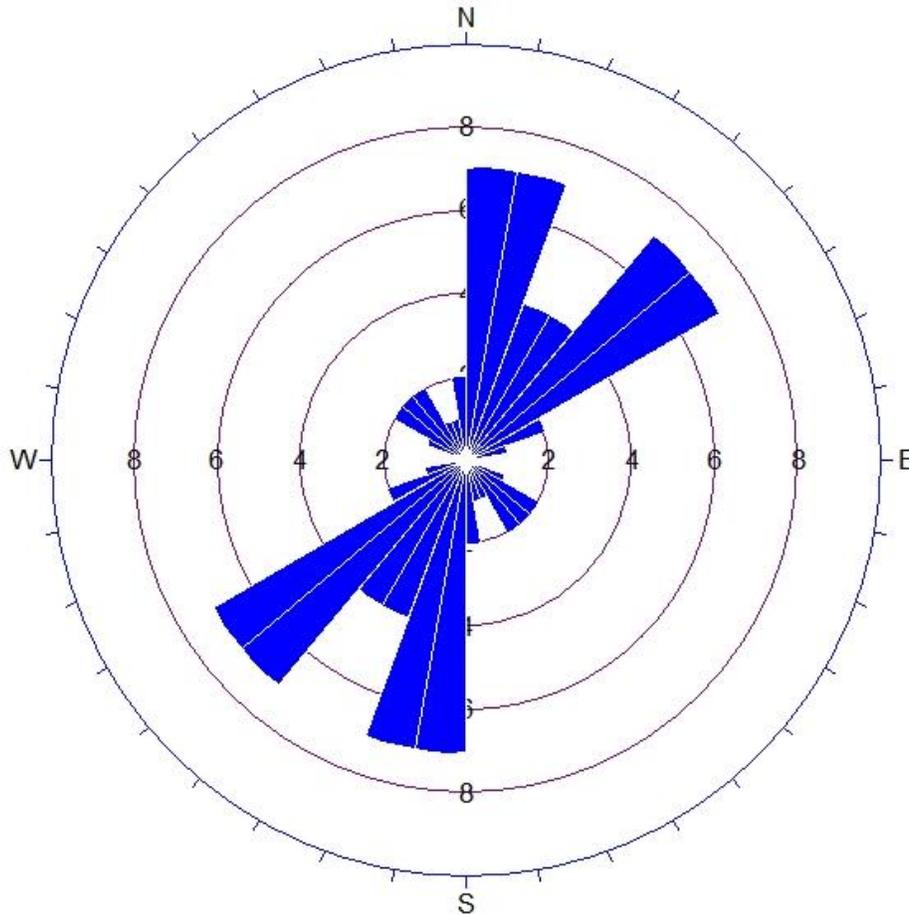


Figura 4.74 Análisis dinámico de pliegue antiforme interpretado en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa al suroriente de Calnali, flanco 1: S52°E, 30°, flanco 2: N30°W, 24°, 3: P.A N43°W, 86°, punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.13 muestra los rumbos y echados de los flancos del pliegue, plano axial (P.A) y los esfuerzos principales de la figura 4.74.

Rumbo y echado	
S52°E, 30°SW	(1) Flanco SE
N30°W, 24°NE	(2) Flanco NW
N43°W, 86°NE	(P.A.)plano axial
3° al SW48°	$\sigma_1$
5° al SE42°	$\sigma_2$
84° al NW12°	$\sigma_3$

En la Figura 4.75 se presenta la roseta de fracturamiento del Flanco NW de la figura 4.74, que fue tomada a las afueras de Calnali.



*Figura 4.75 Roseta de rumbos del patrón de fracturamiento de unos de los flancos del pliegue (N30°W, 24°) interpretado en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa al suroriente de Calnali, las familias más persistentes NE-SW 10°-20° y 40°-60°.*

Se observa las direcciones preferenciales del patrón de fracturamiento NE-SW de 0-20° y de 40-60° ambos con 7 unidades de densidad, si se compara con la orientación del esfuerzo mayor  $\sigma_1$  (Tabla 4.13) del pliegue de la Formación Tuzancoa (figura 4.74) el cual converge perfectamente con el pliegue interpretado en esa misma zona para las calizas del Tamaulipas (figura 4.73), esto sustenta que el esfuerzo principal tiene una vergencia hacia el SW en esta parte del área de estudio.

La tabla 2 del apéndice muestra los datos de la roseta de rumbos de la figura 4.75.

Considerando el análisis dinámico que se realizó a los pliegues de la Formación Tuzancoa y a los de la Formación Tamaulipas, se sabe que el esfuerzo principal  $\sigma_1$  en los casos para la primera formación tiene una orientación NE-SW, para la segunda SW-NE y para los pliegues que se interpretaron al suroriente de Calnali es de SW.

Sin embargo podemos representar con un diagrama de cubo como es que van direccionados los esfuerzos tanto en los pliegues antifformes y sinformes ya que aunque el esfuerzo principal  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  siempre tiene la misma orientación el que si cambia es  $\sigma_3$ .

La figura 4.76 muestra los diagramas de cubo para los esfuerzos orientados en los pliegues antifformes y sinformes,  $\sigma_3$  cambia dependiendo del tipo de pliegue ya que se orienta hacia donde se deforman las capas de roca.

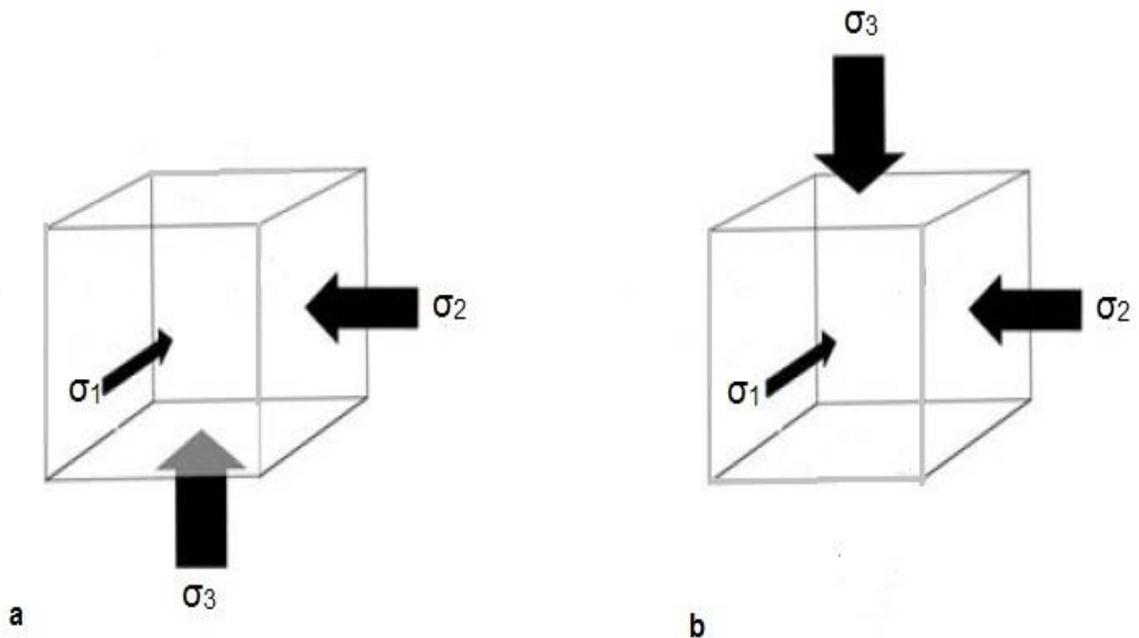
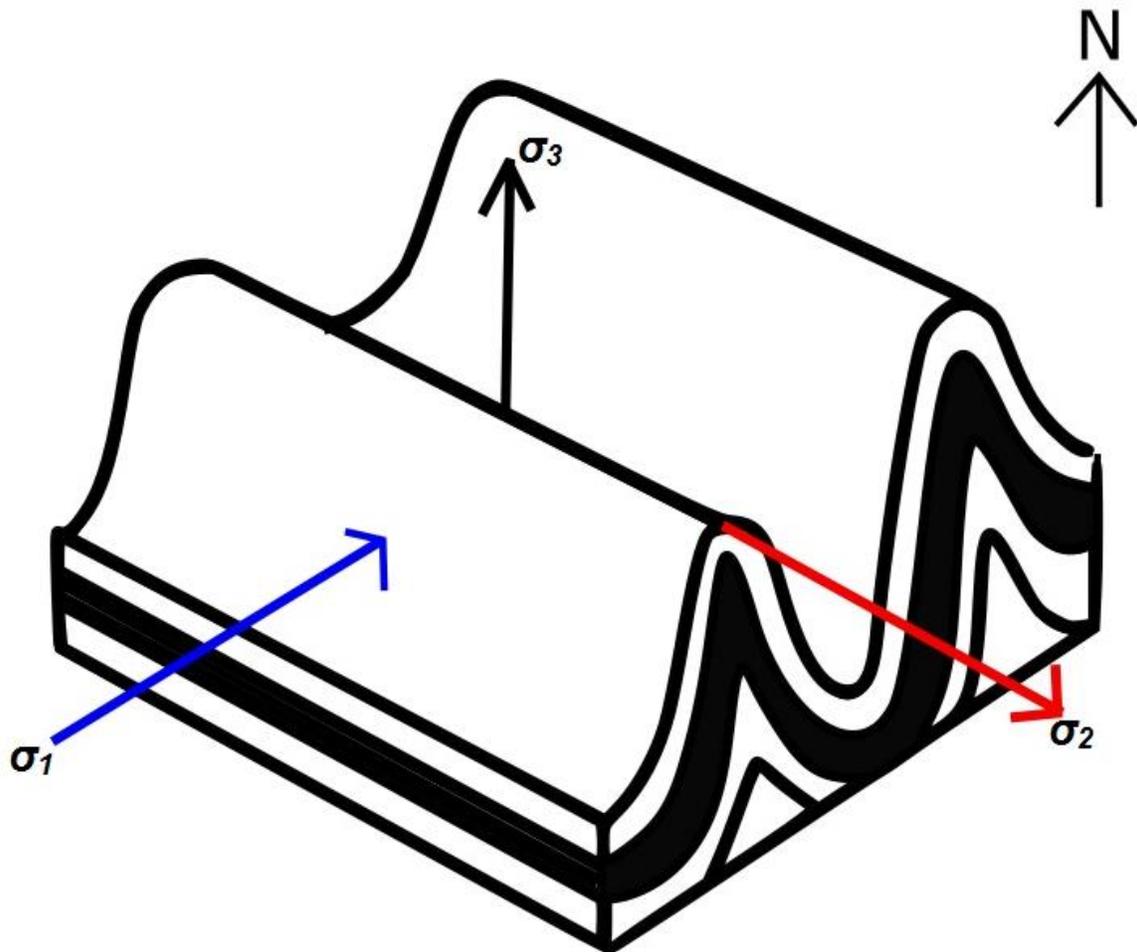


Figura 4.76 (a) Representa los esfuerzos en pliegues antifformes. (b) Diagrama de esfuerzos en pliegues sinformes.

En el esquema 4.3 se muestra la distribución de los esfuerzos principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  idealizados para los pliegues analizados de las formaciones Tamaulipas (figura 4.63) y Tuzancoa (figura 4.71).



*Esquema 4.3 Distribución de esfuerzos principales en los pliegues idealizados para las Formaciones Tamaulipas y Tuzancoa, la orientación preferencial de  $\sigma_1$  es  $0^\circ$  al  $SW15^\circ$  para las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa al poniente de Calnali y  $4^\circ$  al  $NE60^\circ$  para las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali*

En la figura 4.77 se observa el análisis dinámico en un par de fallas conjugadas en lutitas de la Formación Tuzancoa

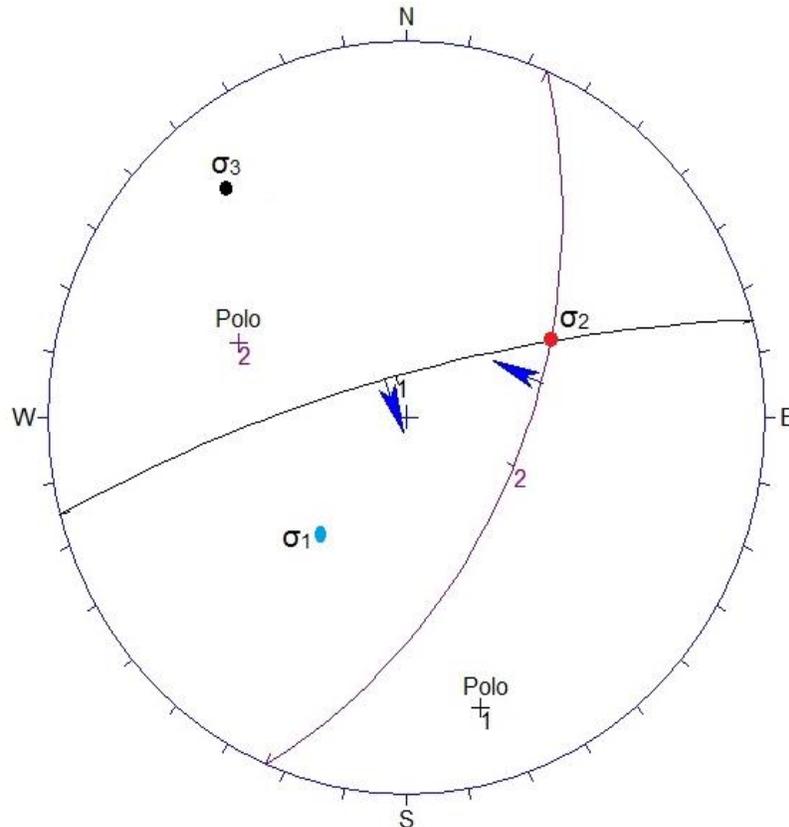


Figura 4.77 Análisis dinámico de fallas en lutitas de la Formación Tuzancoa en la terracería cercanas al poblado de Tula, plano de falla 1: S75°E, 77°, 2: N23°E, 54°, la flecha azul indica tipo de falla y el punto azul  $\sigma_1$ , punto rojo  $\sigma_2$  y punto negro  $\sigma_3$ .

La Tabla 4.14 muestra los rumbos y echados de los planos de falla y las orientaciones de los esfuerzos principales de la figura 4.77.

Rumbo y echado	
S75°W, 77°NW	(1) Falla SW
N23°E, 54°SE	(2) Falla NE
46° al SW36°	$\sigma_1$
42° al NE63°	$\sigma_2$
14° al NW39°	$\sigma_3$



Tomando en cuenta que el análisis dinámico en fallas, para su elaboración es necesario tener el par conjugado de estas sin embargo hay un método en el cual se puede analizar solo usando una falla teniendo como limitante el no obtener el esfuerzo medio  $\sigma_2$  ya que este se encuentra en la intersección de ambos planos de falla.

### *“El método de Diedra derecha”*

Sí los datos de orientación de las fallas no permiten obtener los esfuerzos principales existe el método de Diedra derecha. El plano de falla junto con un plano secundario perpendicular al de la falla y teniendo la dirección de su movimiento se podrá generar el “plano auxiliar”, el cual sirve para dividir todas las direcciones posibles dentro del círculo mayor en par de cuadrantes. Dependiendo del tipo de falla y el sentido de su movimiento, es posible delimitar en un par de cuadrantes la dirección del esfuerzo  $\sigma_1$  y el otro par restante define la posible orientación de  $\sigma_3$ . En los siguientes diagramas se analizarán las fallas con el método del Diedro derecha.

En la figura 4.78 se observa el análisis dinámico realizado en la falla inversa encontrada sobre la carretera rumbo a Pezmatlán en calizas de la Formación Tamaulipas Superior (figura 4.19).

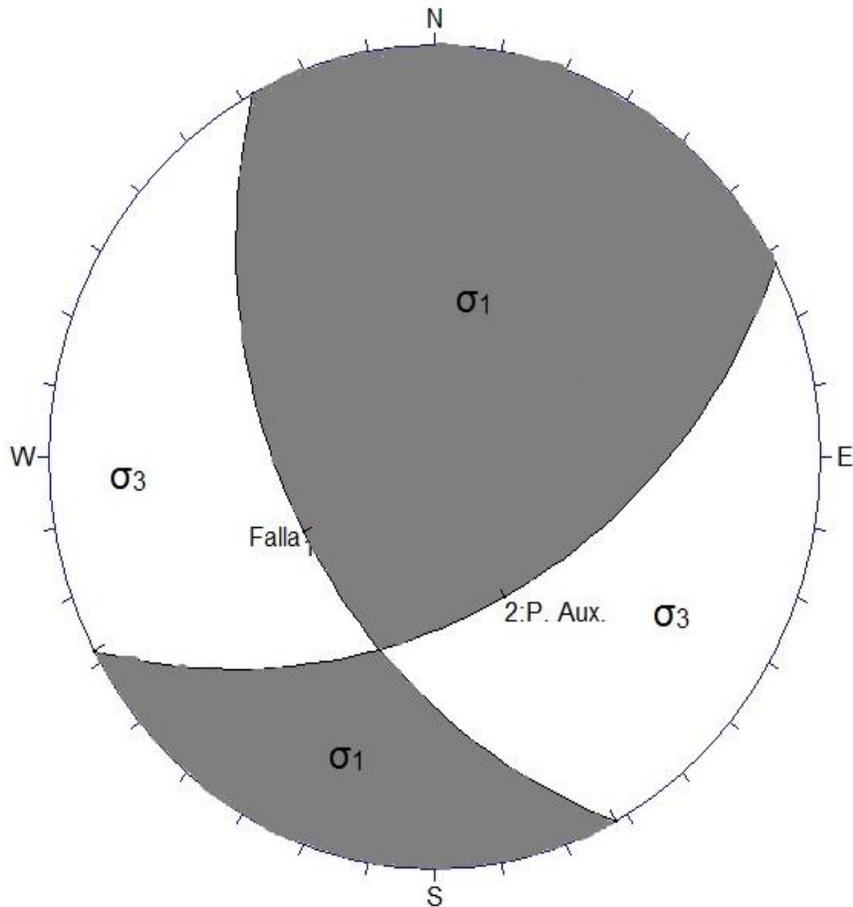


Figura 4.78 Análisis dinámico por el método de Diedro derecha de falla inversa en calizas de la Formación Tamaulipas en la carretera a Pezmatlán. La orientación del plano de falla 1: S28°E, 48°, el plano auxiliar 2: N62°E, 48°, lo sombreado representa la posible área para  $\sigma_1$  y lo de blanco  $\sigma_3$ .

Se observa que la orientación de  $\sigma_1$  que esta iluminada está en la región N-NE y S-SW, sacando un promedio la orientación sería NW-SW18° y para el esfuerzo  $\sigma_3$  está en la región W-NW y E-SE y promediándola da la orientación NW-SE77°.

En la figura 4.79 se muestra el análisis dinámico de una falla normal en lutitas de la Formación Tuzancoa (figura 4.22).

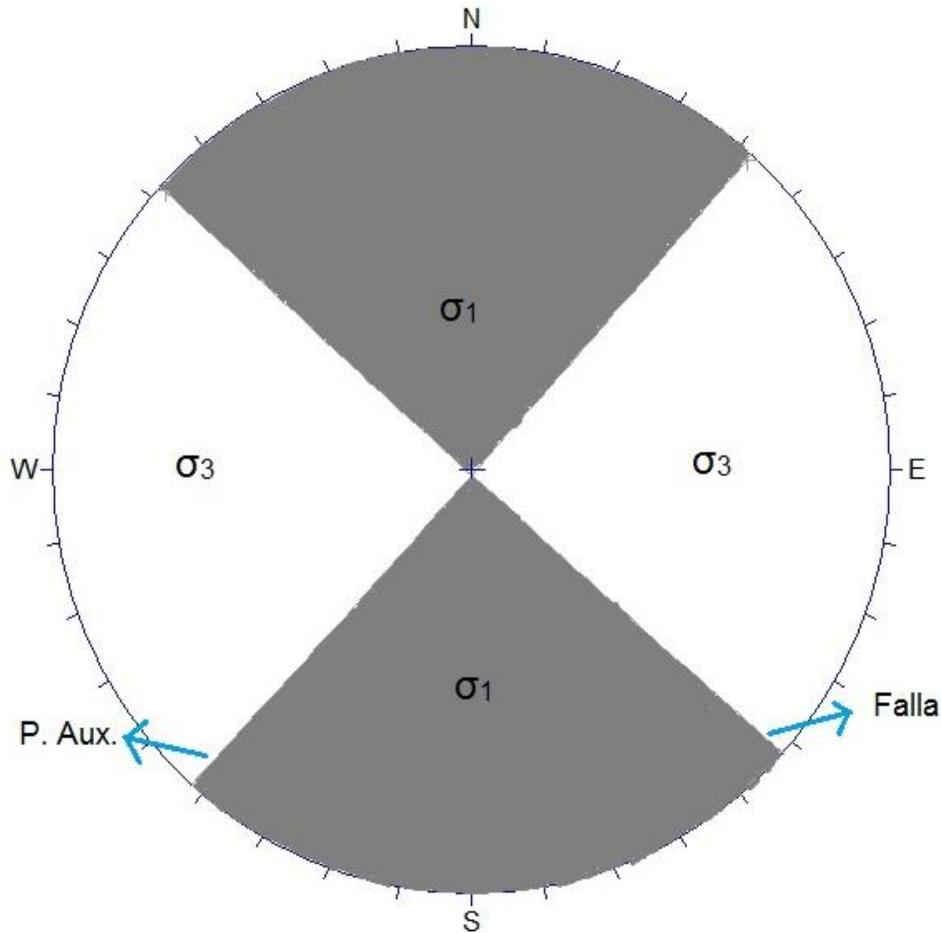


Figura 4.79 Análisis dinámico por el método de Diedra derecha de falla normal en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa en la terracería hacia el poblado de Tula, plano de falla es  $S48^{\circ}E, 89^{\circ}$ , el plano auxiliar es  $N42^{\circ}E, 89^{\circ}$ , lo sombreado representa la posible área para  $\sigma_1$  y lo blanco para  $\sigma_3$ .

Se puede observar que el esfuerzo principal sombreado  $\sigma_1$  se encuentra orientado en el posible rango de SW-NE $40^{\circ}$  a NW-SE $40^{\circ}$  y para  $\sigma_3$  en blanco posiblemente en W-E haciendo un promedio del rango en el cual se pueden localizar con un poco más de precisión estos esfuerzos.

En la figura 4.80 se muestra el análisis dinámico de una falla inversa en lutitas de la Formación Tuzancoa en la terracería que va rumbo al poblado de Tula (figura 4.30).

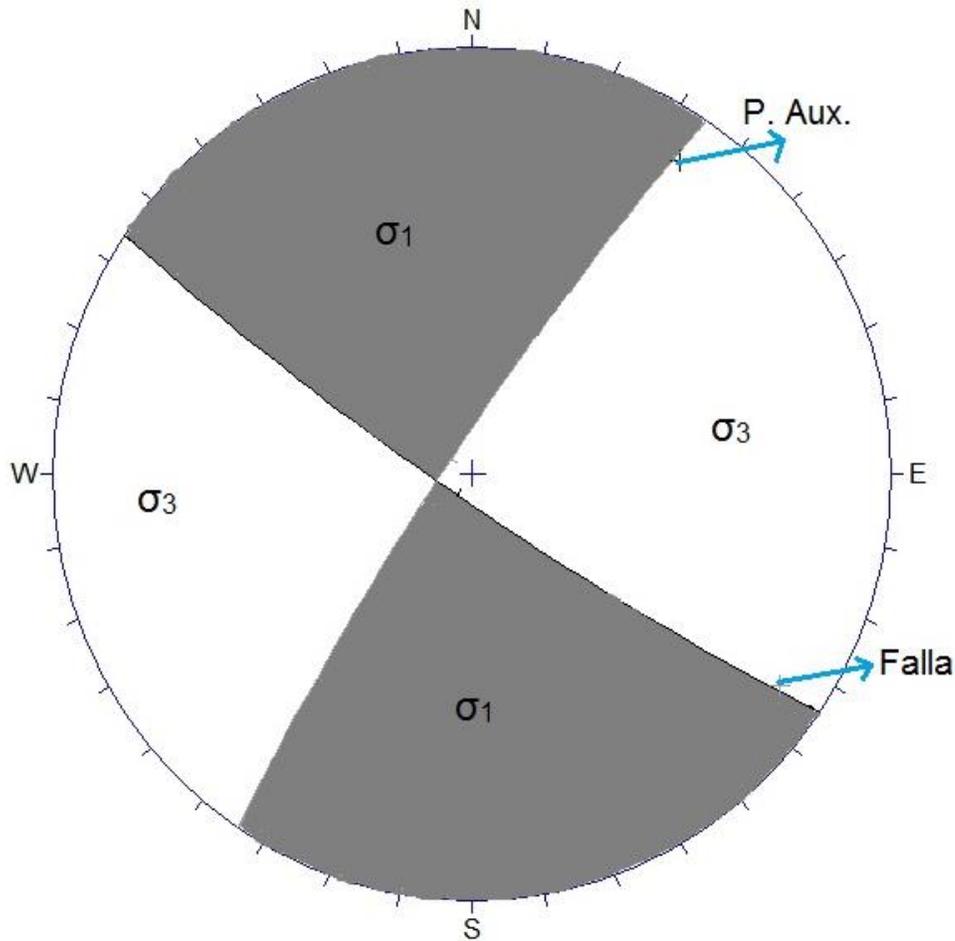
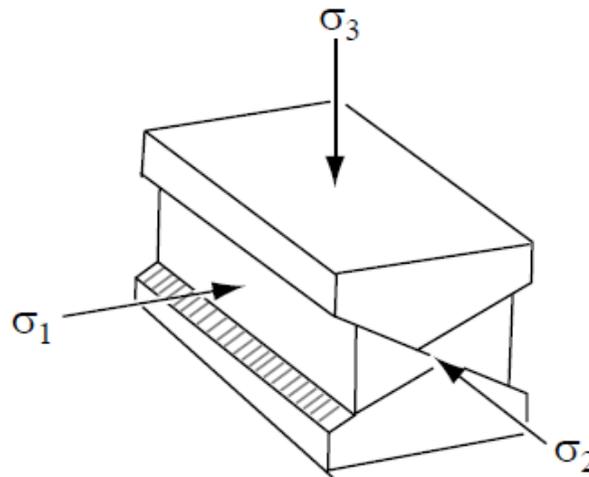


Figura 4.80 Análisis dinámico por el método de Diedra derecha de falla inversa en lutitas de la Formación Tuzancoa en la terracería rumbo al poblado de Tula, plano de falla S56°E, 83°, plano auxiliar S34°W, 83°, lo sombreado representa la posible área para  $\sigma_1$  y lo blanco para  $\sigma_3$ .

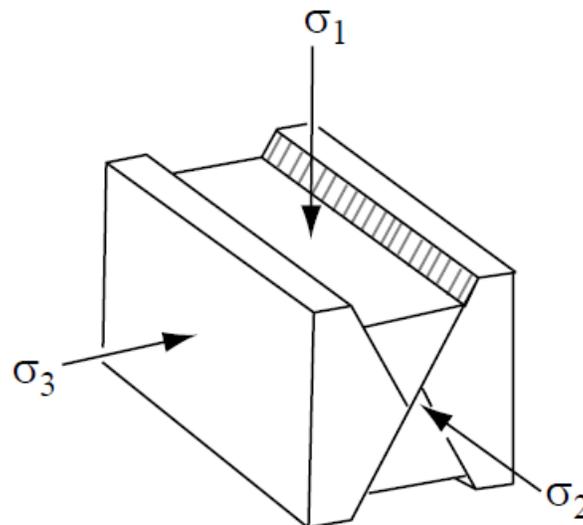
Se observa sombreado la posible orientación de  $\sigma_1$  promedio es de SE-NW10° y para el esfuerzo  $\sigma_3$  en blanco tiene un promedio posible de NE-SW80°.

En el esquema 4.4 se muestra una representación gráfica de cómo actúan los esfuerzos principales para las fallas inversas.



Esquema 4.4 Diagrama de bloque para la distribución de esfuerzos de falla inversa, (Tomado de *Structural Analysis and Synthesis*, Rowland, 2007).

En el esquema 4.5 se muestra una representación gráfica de cómo actúan los esfuerzos principales en las fallas normales.



Esquema 4.5 Diagrama de bloque para la distribución de esfuerzos de falla normal, (Tomado de *Structural Analysis and Synthesis*, Rowland, 2007).

Se realizó la relación plegamiento-fracturamiento para saber si el esfuerzo  $\sigma_1$  generó los pliegues y fracturas en un mismo estadio de deformación o fueron distintos eventos. En la figura 4.81 se muestra la relación plegamiento-fracturamiento en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali.

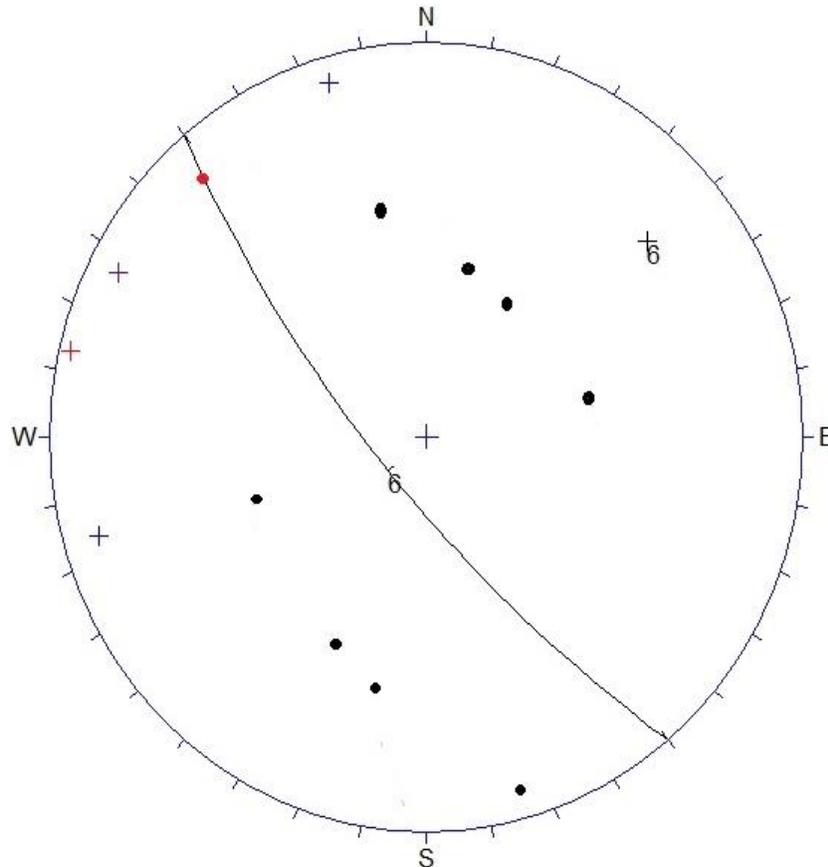


Figura 4.81 Relación plegamiento-fracturamiento en calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, plano axial 6: S40°E, 75°, las cruces representan los polos de las fracturas, el punto rojo representa la línea de charnela y los puntos negros la intersección de los flancos del pliegue con los planos de fracturas donde no existe clivaje o fracturamiento axial planar.

Se observa el plano axial 6 con una orientación de S40°E, 75°, el punto rojo es la línea de charnela y las rectas de intersección de los planos de fracturamiento con los flancos del pliegue (Puntos negros), se observa que estas rectas no cortan en ningún momento al plano axial, y no se aproximan a la línea de charnela, por lo cual no existe un fracturamiento o clivaje axial planar y se argumenta que primero se formó el plegamiento y después las fracturas que tiene las calizas de la Formación Tamaulipas.

En la figura 4.82 se observa la ciclográfica del plano axial con una orientación de  $S68E^{\circ}$ ,  $85^{\circ}$ , el punto rojo es la línea de charnela y los puntos negros representan la intersección entre los flancos del pliegue y los planos de fracturamiento.

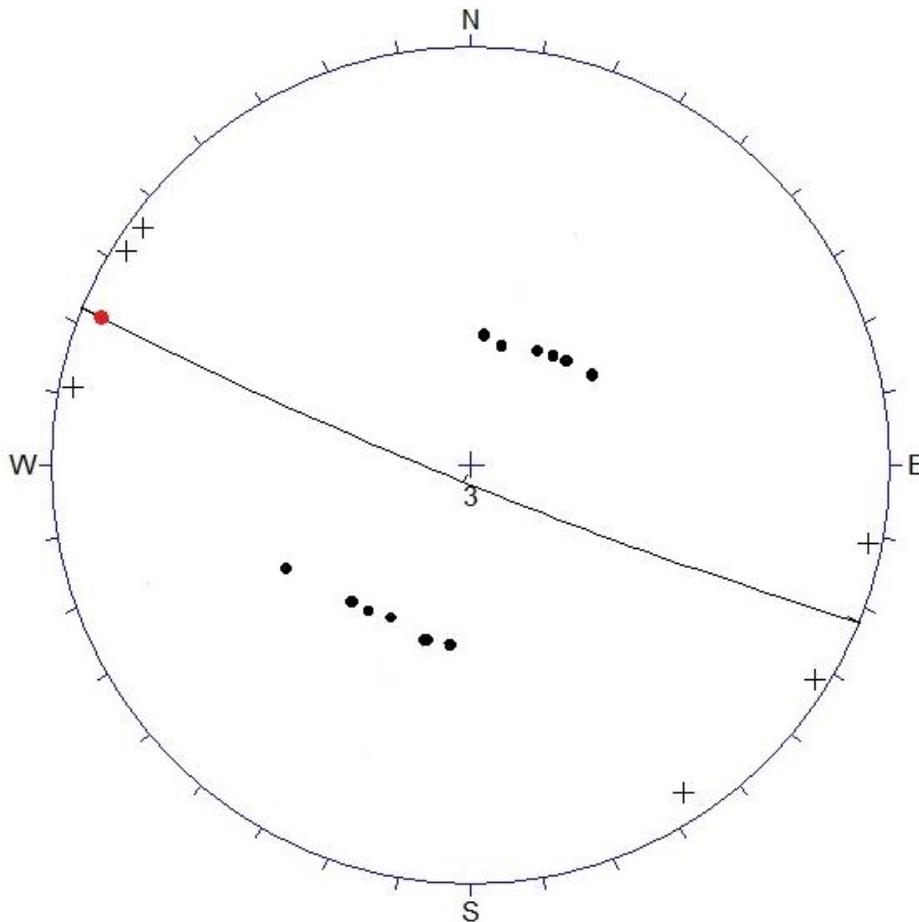
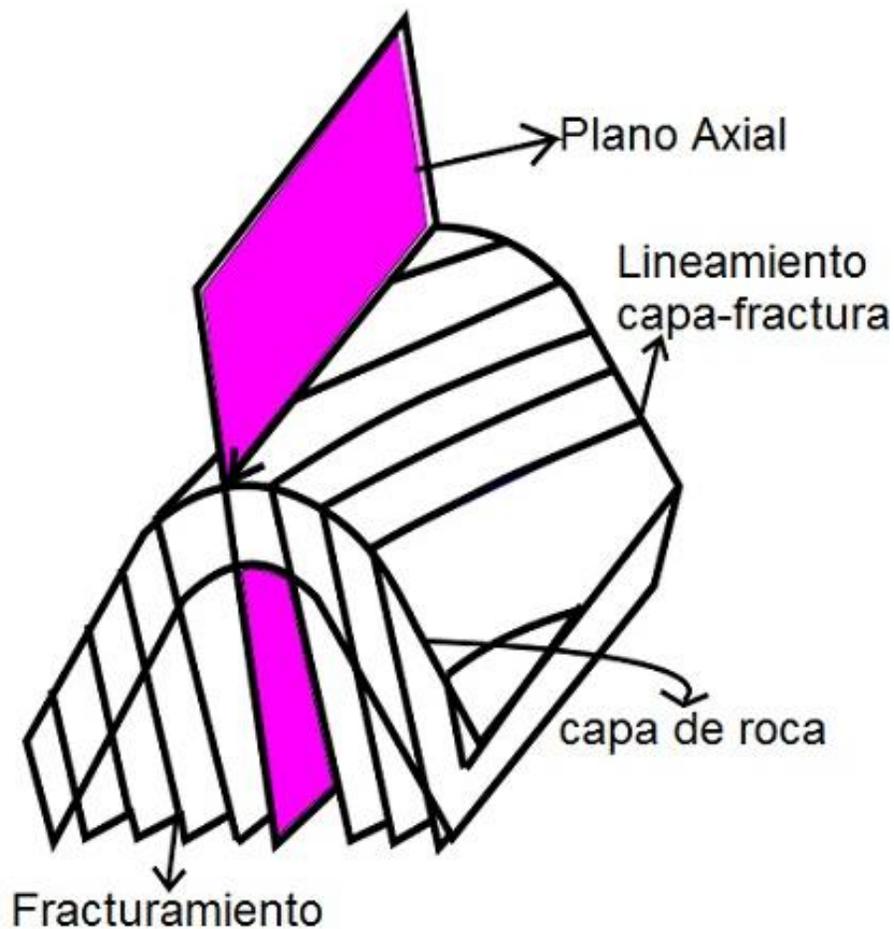


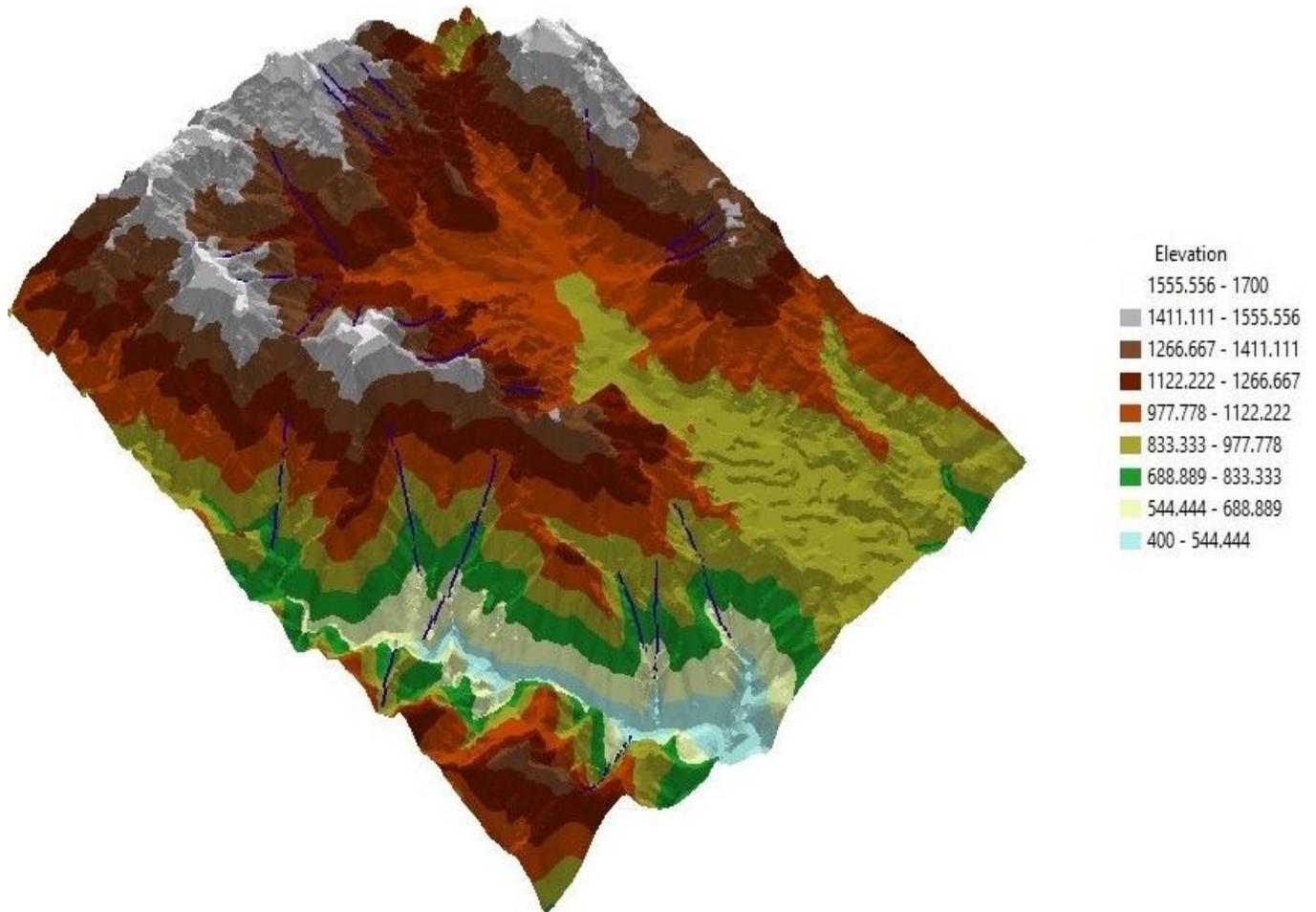
Figura 4.82 Relación plegamiento-fracturamiento en lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa sobre la terracería al cerro Teacal y la carretera al poblado de Ahuacatlán, plano axial 3:  $S68^{\circ}E$ ,  $85^{\circ}$ , las cruces representan los polos de los planos de fracturas, el punto rojo es la línea de charnela y los puntos negros representan la intersección de los flancos del pliegue con los planos de fracturamiento, para el cual no existe fracturamiento o clivaje axial planar.

Se observa que no se aproximan a la línea de charnela, por lo cual no existe un fracturamiento o clivaje axial planar y se argumenta que primero se formó el plegamiento y después las fracturas que tiene las intercalaciones de lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa.

En el esquema 4.6 se muestra la representación del plegamiento-fracturamiento para ambas formaciones (figura 4.81 & 4.82) el cual es un fracturamiento o clivaje axial no planar, por lo que el fracturamiento se formó en otro estadio de deformación.



*Esquema 4.6 Esquema que demuestra el clivaje o fracturamiento axial no planar que resultó para las calizas de la Formación Tamaulipas y las lutitas-areniscas de la Tuzancoa (figuras 4.81 & 4.82) donde el fracturamiento se formó después que el plegamiento.*



*DEM (Digital Elevation Model) Modelo digital de elevación de la zona de estudio, visto desde una perspectiva SE-NW, aún costado derecho se muestra la elevación en metros, el color blanco representa la mayor elevación y el azul la menor. Se trazaron los lineamientos de color azul marino, los cuales tienen una dirección preferencial que concuerda con la deformación y los planos axiales de los ejes de los pliegues.*

DEM (Digital Elevation Model) modelo digital de elevación donde se observa el sistema de topofomas de Sierra de la zona de estudio, los lineamientos más persistentes con la dirección preferencial de la deformación NW-SE. El color blanco representa la mayor elevación que en promedio es de 1400 a 1600 msnm y el color azul la menor elevación de 400-500 msnm.



## 4.4 Resultados.

### *MARCO TEÓRICO.*

Si se desarrollan pliegues perfectos o casi perfectos en un material que originalmente tenía una estratificación uniforme y paralela, entonces las condiciones de deformación heterogénea, solo pueden explicarse mediante dos modelos básicos de deformación finita (figura 4.83 A, B). El modelo A las elipses de deformación orientadas de forma variable, tienen una dirección de deformación longitudinal no finita, paralela a la superficie axial y en el modelo B todas las elipses tiene una deformación idéntica (extensión cuadrática) paralelamente a la superficie axial.

Si en una localidad hay varios tamaños de pliegues similares de diversas longitudes de onda y amplitudes que representan probablemente diferentes estadios de deformación progresiva en el desarrollo del modelo de plegamiento, entonces existen solo dos procesos posibles que pueden explicar la formación de los pliegues: 1) cizalla simple progresiva y heterogénea y 2) deformación homogénea y uniforme en toda la región, junto con una cizalla simple heterogénea y progresiva. El mecanismo de formación de pliegues corresponde en ambos casos a una componente variable de cizalla actuando a través de la estratificación y transponiendo las capas como marcadores pasivos. Los planos de cizalla pueden estar muy juntos, dando lugar a pliegues en los que las capas de roca forman láminas que se curvan de forma continua, no obstante, a veces los desplazamientos por cizalla tienen discontinuidades a manera de escalones y la superficie plegada puede cortarse dando lugar a cierto número de fragmentos separados.

La forma geométrica de los pliegues similares puede explicarse mediante un esquema de deformación que puede descomponerse en dos tipos: una cizalla heterogénea formadora de pliegues y una deformación homogénea no formadora de pliegues.

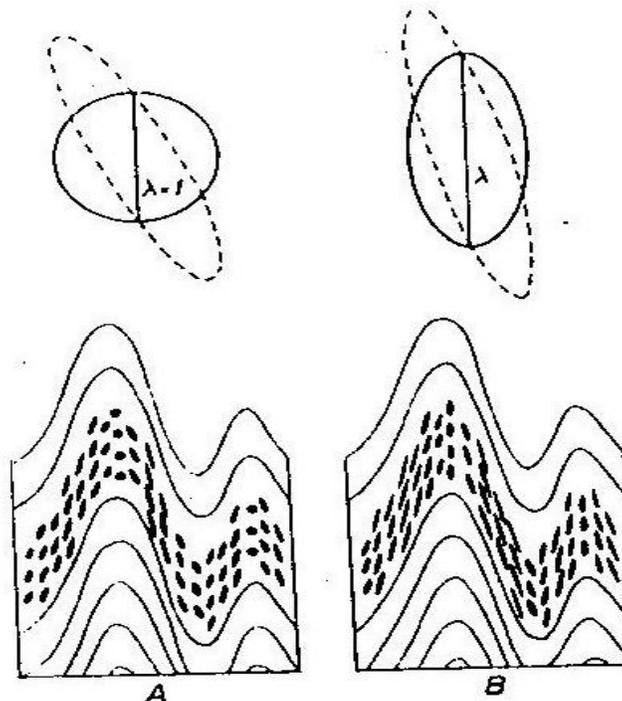


Figura 4.83 Los dos posibles tipos de deformación en pliegues similares ideales. En el modelo A los pliegues se forman por cizalla simple heterogénea donde la amplitud es constante y la longitud de onda no ha cambiado ( $\lambda=1$ ). En el modelo B los pliegues similares se forman por cizalla simple heterogénea y deformación de modo que la amplitud es constante así como la extensión cuadrática  $\lambda$  (tomado de Ramsay, 2002).

Si se considera un plano marcador contenido en un bloque de material (figura 4.84) y el bloque es sometido a una cizalla simple de modo que los ejes de la cizalla  $a$ ,  $b$  y  $c$  permanezcan fijos, pero que la intensidad varíe dentro del bloque, las superficies superior e inferior del bloque y del plano marcador se pliegan resultando pliegues similares. Las superficies axiales de los pliegues son siempre paralelas a “ $ab$ ” o plano de cizalla. La charnela y los ejes de los pliegues son paralelos a la línea de intersección del plano de cizalla “ $ab$ ”.

Cuando la dirección “ $b$ ” de la cizalla se sitúa sobre el plano marcador el eje  $F$  del pliegue es paralelo a “ $ab$ ” (figura 4.84 B), pero esta condición no se mantiene normalmente y el eje  $F$  suele formar un ángulo  $\beta$  con el eje “ $b$ ” (figura 4.85 B).

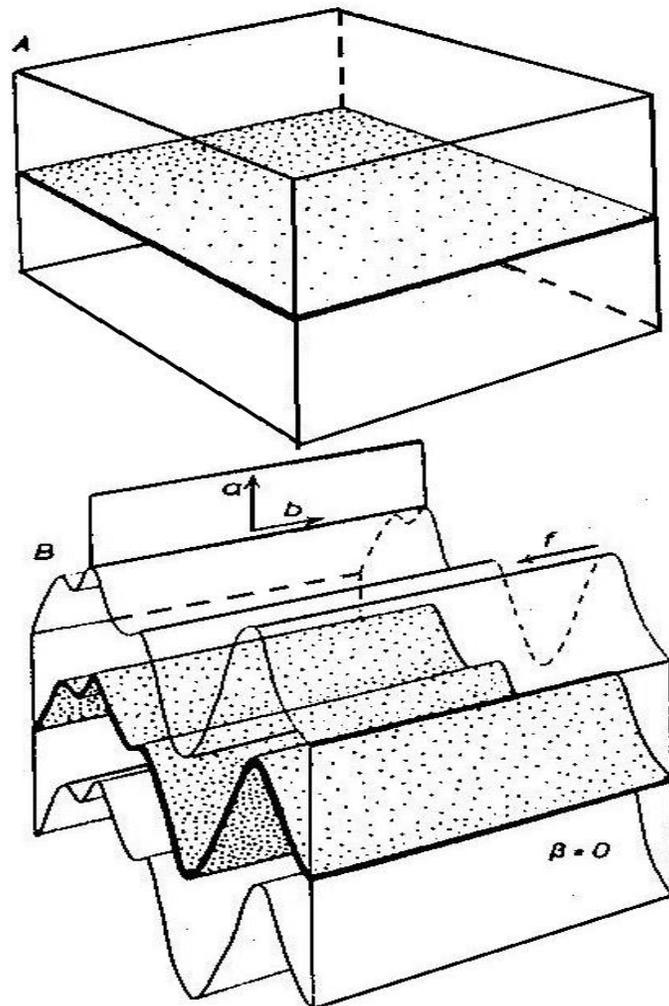


Figura 4.84 Forma geométrica de los pliegues similares formados por cizalla simple heterogénea, en los que la dirección del deslizamiento "a" es perpendicular a las capas. Los ejes "F" de los pliegues son paralelos a "b". (Tomado de Ramsay, 2002).

Las deformaciones finitas pueden conducir al desarrollo de una fábrica rocosa, que puede favorecer las traslaciones en regiones situadas a cierta distancia en donde se iniciaron, este flujo o deslizamiento ocurre en capas paralelas entre sí, y se explica con el mecanismo de tipo "paquete de cartas" con lo cual se define la producción de pliegues similares (figura 4.86).

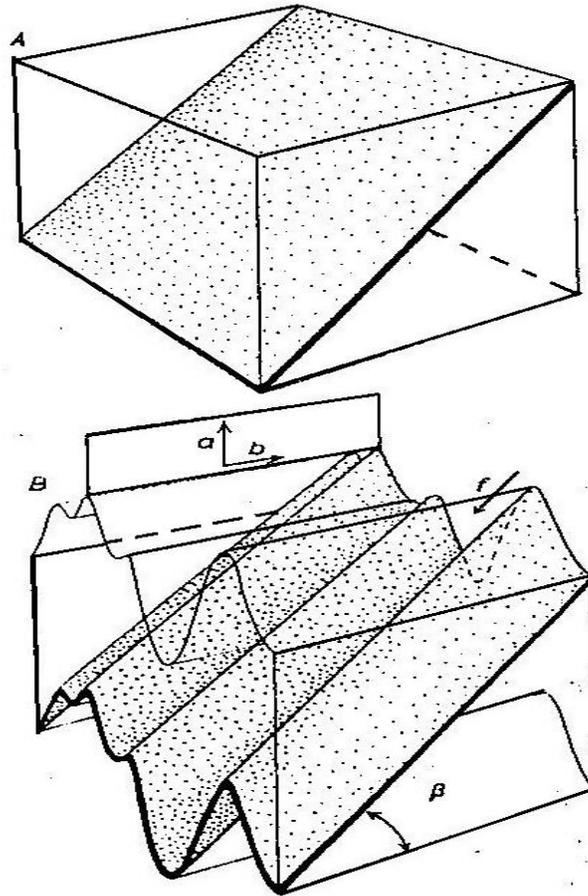


Figura 4.85 Forma geométrica de los pliegues similares formados por cizalla simple heterogénea, en los que “a” no es perpendicular a las capas. Los ejes F del pliegue forman un ángulo  $\beta$  con el eje “b”. (Tomado de Ramsay, 2002).



Figura 4.86 Mecanismo tipo “baraja de cartas” producido por cizallamiento que forma pliegues similares.

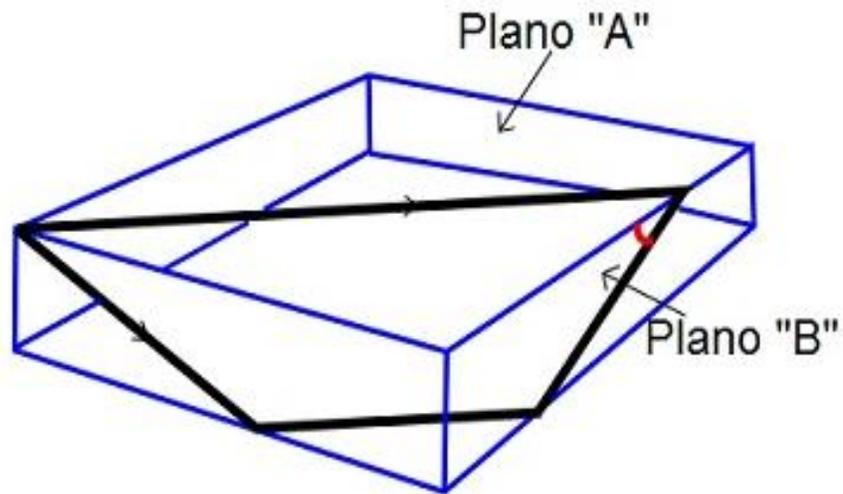


Con base en la similitud que se obtuvo en el análisis descriptivo para los pliegues de las formaciones Tamaulipas y Tuzancoa, los diagramas  $\pi$  obtenidos (figuras 4.6 & 4.14) su interpretación y comparación con la figura 4.18 al obtener un cierto tipo de pliegues, del tipo B para las calizas de la Formación Tamaulipas al norte de Calnali, y del tipo E para las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa en la terracería entre el poblado de Chiquitla y Tostlamantla (parte NNW del mapa) así también que en promedio tenemos pliegues abiertos y buzantes inclinados y normales en toda el área de estudio.

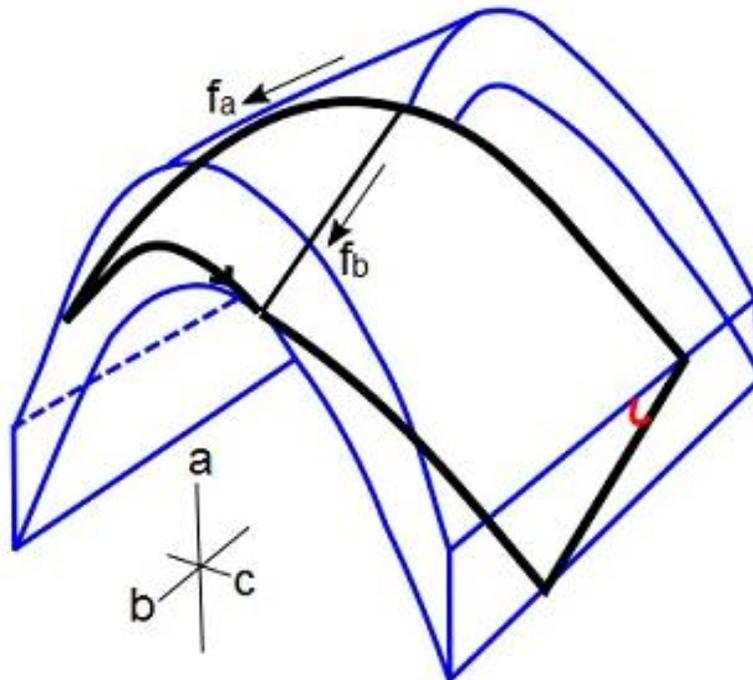
Por otra parte los resultados obtenidos en el análisis cinemático y dinámico; siendo la direcciones preferencial de los ejes de acortamiento y de extensión hacia el noreste y suroeste respectivamente (figuras 4.51, 4.52, esquema 4.2) y tomando en cuenta que la orientación del esfuerzo principal  $\sigma_1$  en los pliegues de la Formación Tamaulipas es de  $4^\circ$  al  $NE60^\circ$  y para las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa es de  $0^\circ$  al  $SW15^\circ$  (figuras 4.63 y 4.71, esquema 4.3) y en las fallas analizadas se tiene la misma orientación.

Los pliegues similares son comunes en la mayoría de las áreas muy deformadas de las fajas orogénicas, normalmente en estas regiones la deformación total se lleva a cabo mediante diversos movimientos de empuje separados que llevan a la formación de varias generaciones de pliegues. Esto se puede explicar mediante el modelo de cizalla simple progresiva y heterogénea parecida al modelo de la figura 4.85, donde las capas de ambas formaciones ya estaban basculadas cuando se produjo la deformación y es el mecanismo tipo “baraja de cartas” que explica su creación en los últimos estadios de la deformación de la orogenia Laramide en toda la zona cartografiada para este trabajo.

El esquema 4.7 y 4.8 representa los estadios idealizados de la deformación en la zona de trabajo, donde ya existe un ángulo de estratificación y esta es desplazada por cizalla simple heterogénea, la línea de charnela no coincide con la del plano de cizalla y la forma de la sección de los pliegues que se produce es asimétrica.



Esquema 4.7 Orientación idealizada de las formaciones Tamaulipas y Tuzancoa antes de la deformación donde el plano B representa las capas de roca, y el plano A es la superficie donde se producirá la cizalla simple progresiva y heterogénea.



Esquema 4.8 Orientación idealizada de las formaciones Tamaulipas y Tuzancoa producidas por una cizalla simple progresiva y heterogénea, donde " $f_a$ " es el eje de la capa A, " $f_b$ " es el eje del plano B que representa las capas de roca, el plano de cizalla esta dado por " $ab$ " y se observa que es paralelo a " $f_a$ ", pero no para " $f_b$ " y se forma un ángulo  $\beta$  que esta marcado en rojo



## CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN.

Como se ha mencionado en la zona de estudio los afloramientos identificados han sido de calizas de la Formación Tamaulipas Superior, al oriente de Calnali sobre la carretera que va al poblado de Pezmatlán (zona Este del mapa), en las calizas que se encuentran al norte de Calnali (zona norte del mapa) hacia el poblado de Tostlamantla se identificaron como Tamaulipas pero al no haber un rasgo distintivo solo se ha mencionado como Formación Tamaulipas; en los afloramientos para la Formación Tuzancoa solo se encontraron las facies volcánicas sobre el río Calnali (derrames de basaltos) y las secuencias de areniscas y lutitas de las facies 2 y 3.

Los pliegues analizados en las calizas al norte de Calnali y las secuencias sedimentarias de lutitas-areniscas al poniente de esta ciudad, basándonos en las figuras 4.6 y 4.14 del capítulo 4, que son los diagramas  $\pi$  para los pliegues de las formaciones respectivamente, en cuanto a la dirección de los ejes de pliegue para la Formación Tuzancoa y la Formación Tamaulipas, los datos obtenidos en el análisis descriptivo de este trabajo proporcionan que el eje de los pliegues es casi horizontal teniendo como máxima inclinación  $8^\circ$  con un rumbo NW de entre  $40^\circ$ - $80^\circ$ .

En las fallas encontradas en la zona de estudio se observó que para el eje de acortamiento hay una dirección preferencial hacia el NE (Figura 4.51 capítulo 4), para el eje de extensión hay una dirección SSW (figura 4.52 capítulo 4) y es claro que no existe la compatibilidad cinemática, por lo cual en ambas se observa la distribución de dos eventos de deformación esto lo podemos aclarar por dos factores; el primero que las litologías analizadas no son las mismas y que presentan diferentes respuestas mecánicas a los esfuerzos, por su parte las calizas son más competentes que las lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa así como la calidad de roca que presentaron cuando actuaron los esfuerzos y por último puede darse por heterogeneidades que se desarrollan durante el proceso que acompaña a la deformación de la roca.



Cabe destacar que la falla encontrada en la terracería hacia el poblado de Tula (figura 4.25 capítulo 4, zona sureste del mapa) es la más importante en el área de estudio debido a que pone en contacto tectónico las calizas de la Tamaulipas con la Formación Tuzancoa y se interpretó como la cabalgadura “Pochutla” que Ochoa-Camarillo y Rosales-Lagarde declaran en sus debidos trabajos, la cual controla la estratigrafía de la zona.

En la figura 4.45 (capítulo 4) se representó el análisis del acortamiento en calizas de la Formación Tamaulipas Superior, el cual dio como resultado 28%, que tiene una diferencia de alrededor del 20% de lo propuesto por Eguiluz et al. (2000) para el sector Huayacocotla de la cadena plegada de la Sierra Madre Oriental lo cual es debido a la diferencia de las litologías, heterogeneidades en el proceso de deformación y por ser el extremo SE del cinturón ya no actuaron los esfuerzos con la misma intensidad.

En cuanto a la parte dinámica realizada en este trabajo, se aprecia que el esfuerzo principal  $\sigma_1$  de los pliegues de las calizas de la Formación Tamaulipas, tienen una dirección preferencial casi horizontal de 4° al NE60° (Figura 4.63 capítulo 4) y para las intercalaciones de lutitas-areniscas de la Formación Tuzancoa,  $\sigma_1$  es totalmente horizontal con un rumbo SW15° (figura 4.71 capítulo 4), tal vez el cambio de dirección de cuadrante de NE a SW se deba a la competencia o heterogeneidades en el proceso de deformación como ya se mencionó o por encontrarse con algún elemento que detuviera los esfuerzos. Que puede ser el alto del basamento cristalino en la zona de Huiznopala al NW de la zona de estudio, el cual propició que se ejecutaran los esfuerzos más en una dirección (SW) en las litologías sin embargo sigue siendo horizontal.

Comprobando que el esfuerzo  $\sigma_1$  tiene esa orientación (SW-NE) es observando las rosetas de fracturamiento para ambas formaciones (figura 4.64; 4.72 y 4.75 capítulo 4) donde las familias de juntas o fracturas tienen la dirección preferencial SW-NE, al igual que las fallas examinadas el esfuerzo principal tiene la dirección SW-NE sin



embargo sabemos que por lo menos hubo dos eventos de deformación por el análisis cinemático y por el estudio realizado de clivaje o fracturamiento axial planar (figura 4.81 y 4.82 y esquema 4.6) el cual se tiene que no es paralelo al plano axial de los pliegues y podemos argumentar que si hubo dos deformaciones por lo menos, que en una de estas se generaron los pliegues y en otra las fallas y fracturas. Debido a la similitud de pliegues en las dos formaciones analizadas en el área de estudio, donde en promedio en el análisis descriptivo resultaron pliegues “abiertos” con charnelas casi horizontales ( $1^{\circ}$ - $8^{\circ}$  de inclinación), y a los resultados obtenidos en el análisis de Fourier (pliegues tipo E2 y E4, figura 4.43 capítulo 4), los esfuerzos principales tanto para pliegues como fallas examinadas son muy parecidos. Se esta de acuerdo con el modelo que proponen Eguiluz et al. (2000) que es una zona de cizalla, pero no con el de tipo “*fault bend-fold*” para pliegues. El modelo que se piensa en la zona de estudio, se asimila y explica la formación de los pliegues es el básico de deformación finita de cizalla simple progresiva y heterogénea donde el plano de cizalla no es paralelo al eje del pliegue (figura 4.85 capítulo 4) debido a que ya existía un basculamiento en las capas de roca (esquema 4.7 & 4.8, capítulo 4) y el mecanismo generador de pliegues similares en los últimos estadios de deformación es el de tipo “baraja de cartas” (figura 4.86, capítulo 4).

En cuanto a la reconstrucción tectónico-estructural, se sabe que para el Pérmico Inferior la Formación Tuzancoa se depositaba en una zona tectónicamente inestable en un ambiente de intra-arco (Rosales-Lagarde et al., 2005) asociado a una subducción sometida a esfuerzos extensivos (figura 5.1). Para el periodo Jurásico temprano, con base en Ochoa-Camarillo et al. (1999) empieza la extensión en toda la región de Molango, provocando Horst y Graben (figura 5.2) y termina en el Jurásico Medio con el depósito de la Formación Tepexic empezando el estadio de postrift. Al oriente del área de estudio al mismo tiempo comienza la apertura del Golfo de México y entre el periodo Cretácico Inferior y Eoceno surge el levantamiento de la Sierra Madre Oriental conocido como orogenia Laramide que provoca la deformación de la zona estudiada generando pliegues y cabalgaduras (Figura 5.3).

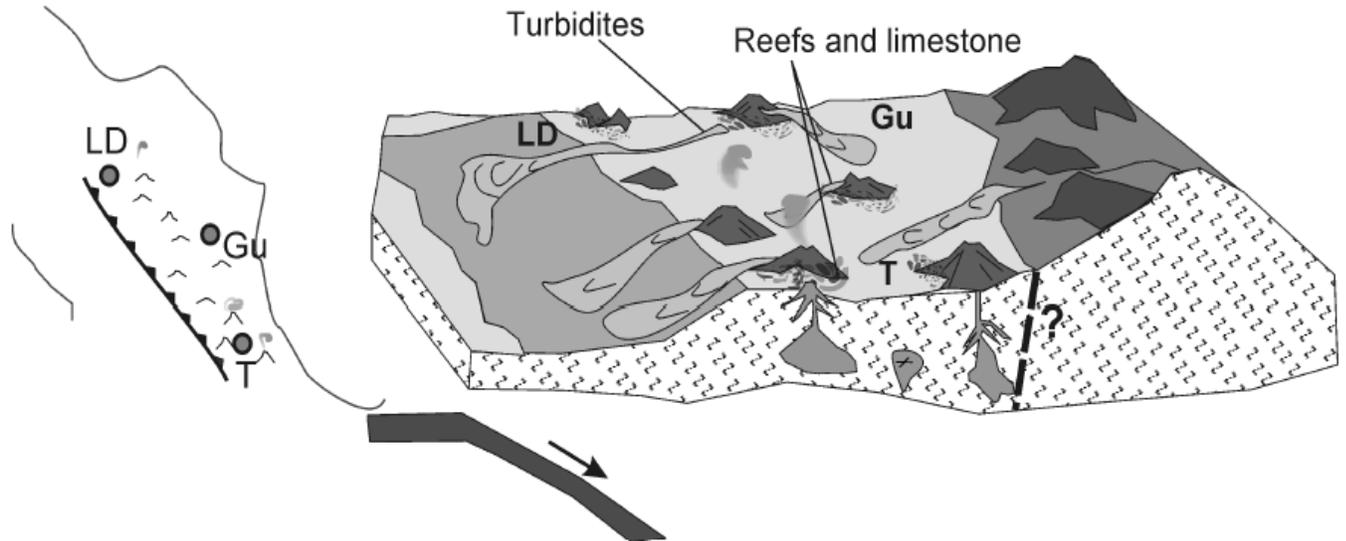


Figura 5.1 Modelo paleogeográfico, paleoambiental y tectónico propuesto para el Pérmico de la Formación Tuzancoa (T) y las distribuciones de las formaciones parecidas Guacamaya (Gu) y Las Delicias (LD), (Tomado de Rosales-Lagarde et al., 2005).

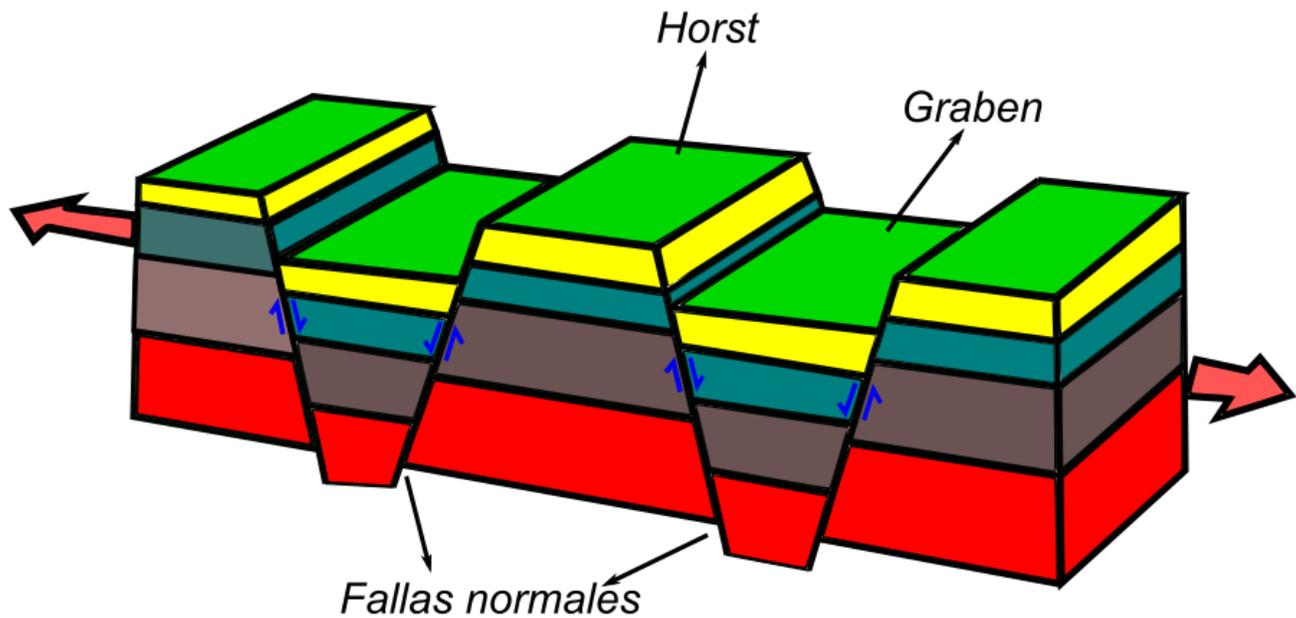
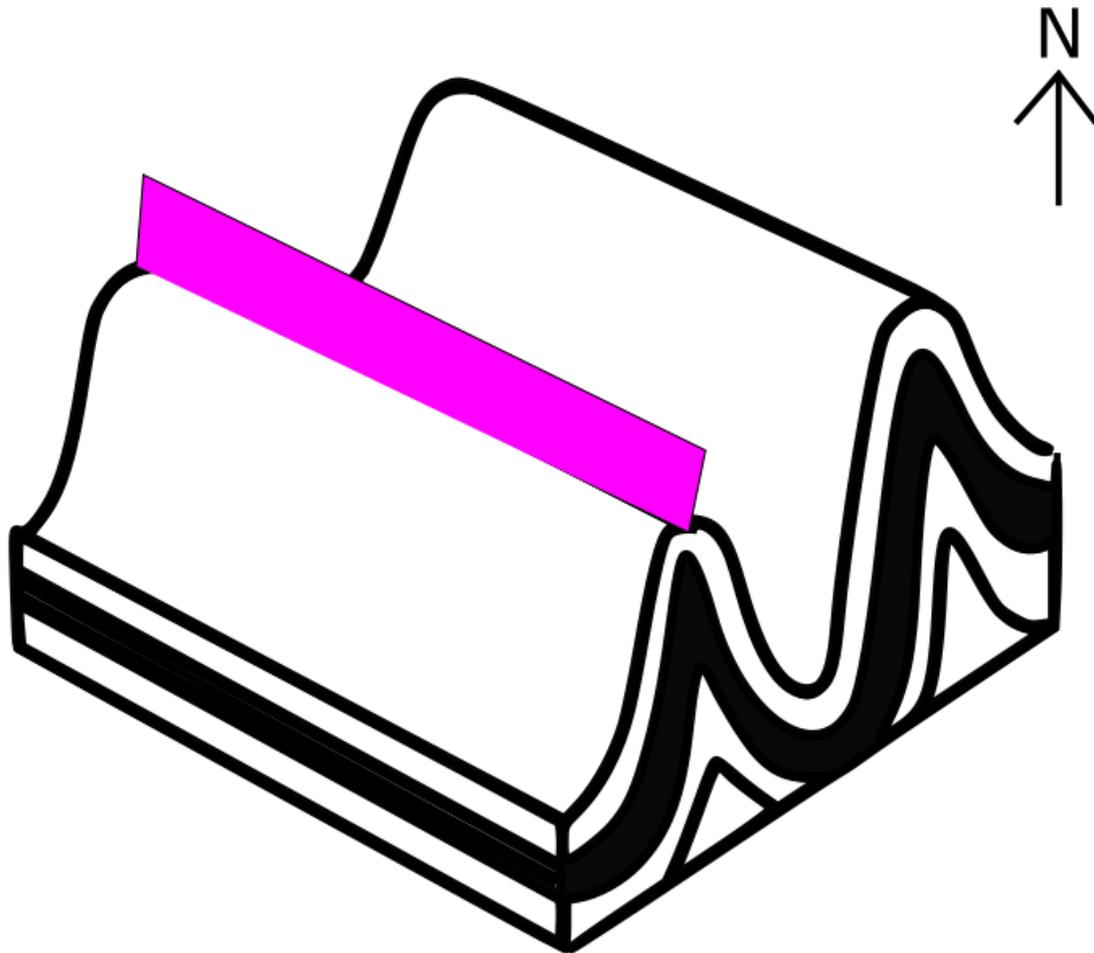


Figura 5.2 Modelo tectónico propuesto para el Jurásico (Ochoa-Camarillo et al., 1999) de esfuerzos extensivos para la región de Molango, cerca de la zona de estudio donde había altos y bajos estructurales (Horst y Graben), el cual termina con el depósito de la Formación Tepexic donde hay un cambio brusco de ambiente continental a marino.



*Figura 5.3 Modelo de pliegues similares producido por cizalla simple progresiva heterogénea provocada durante la deformación ocurrida entre el Cretácico Inferior y el Eoceno conocida como orogenia Laramide para la zona de estudio. El plano rosa es plano axial y los pliegues están orientados NW-SE*



## CONCLUSIONES.

El anticlinorio de Huayacocotla se originó por una compresión en dirección suroeste-noreste, entre el Cretácico Inferior y Eoceno, en particular el sector Huayacocotla el cual se encuentra nuestra área de estudio y presenta estas características.

Se puede argumentar, que aunque había limitantes en las salidas de campo debido a la posición geográfica, al sistema de topofomas, a lo abrupto de las pendientes y la densidad de la vegetación, se logró realizar una cartografía de la zona de trabajo, así como los análisis programados para esta tesis (análisis descriptivo, cinemático y dinámico).

Debido a los pocos antecedentes que se tiene en la zona de estudio, en materia de geología estructural, se logró caracterizar de manera adecuada la zona de trabajo. La tectónica extensiva que ocurrió durante el Jurásico Medio y después las modificaciones ocurridas durante el levantamiento de Sierra Madre Oriental. En primera instancia ocasionaron la formación de cabalgaduras y pliegues similares por cizallamiento, también se cree que las formaciones que afloran en esta zona se encuentran en contacto tectónico, debido a que no se encontraron aflorando las unidades que corresponden al Triásico y Jurásico y por la falla encontrada en la terracería rumbo al poblado de Tula, en lo que afirmamos que el paleozoico también está participando en la deformación.

Debido a la orientación de los esfuerzos NE-SW y al cambio posterior en la dirección SW, por el alto del basamento cristalino del gneis Huiznopala que se encuentra al NW del área de estudio que sirvió como un bloque que detuvo la deformación en una dirección (NE) y actuó con más intensidad en la dirección SW y si tomamos en cuenta que la cizalla viene desde norte a sur por la deformación Laramídica podemos confirmar que estamos en una zona de cizalla de tipo “derecha”.



## BIBLIOGRAFÍA.

Arellano-Gil, J., Vachard, D., Yussim, S. y Flores de Dios-González, (1998). “Aspectos estratigráficos, estructurales y paleogeográficos del Pérmico inferior al Jurásico inferior en Pemuxco, Estado de Hidalgo”, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 15, p. 9-13.

Buitrón, B.E., Patiño-Ruíz, J., Moreno-Cano, L., (1987). “Crinoides del Paleozoico Tardío (Pensilvánico) de Calnali, Hidalgo”, Revista de la Sociedad Mexicana de Paleontología, v 1, p. 125-136.

Babín-Vich, R., Gómez-Ortiz, D., (1996). “Comparative Study of various fault-related folds models. Detected troubles”, Geogaceta, 20(4), p. 759-762.

Campa, M.F. & Coney, P.J., (1983). “Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distribution in Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 20, p.1040-1051,

Carrillo Bravo, J., (1965). “Estudio geológico de una parte del Anticlinorio de Huayacocotla”: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 17(5-6) p.73-96.

Centeno-García, E., Sánchez-Zavala, J.L., and Ortega-Gutierrez, F., (1998).“Late Proterozoic– Paleozoic stratigraphy of Mexico and its role in Gondwana-Laurentia interactions”: Internacional Geological Correlation Programme, Project 376 meeting, Laurentian-Gondwanan connections before Pangea, Oaxaca, México, p. 13.



Centeno-García, E., (2005). "Review of upper Paleozoic and lower Mesozoic stratigraphy and depositional environments of central and west Mexico: Constraints on terrane analysis and paleogeography": Geological Society of America Special paper 393, p 233-258.

Eguiluz de Antuñano S., Aranda García M., Randall Marret., (2000). "Tectónica de la Sierra Madre Oriental", México Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. México 53: 1-26.

Hernandez-Castillo, G. R., Silva-Pineda, S.A., Cevallos, S.R.S. (2014). "Early Permian conifer remains from Central Mexico and reevaluation of Paleozoic conifer morphotaxa": Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 66(1), p. 85-96.

Imlay, R.W., Cepeda, E., Alvarez, M., and Díaz, T., (1948). "Stratigraphic relation of certain Jurassic formations in eastern Mexico": American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 32, p. 1750–1761.

INEGI-CONAGUA, 2007. Mapa de red Hidrográfica de México, Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la carta Hidrológica de Agua Superficiales serie I. México, p 1-2.

INEGI, 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. México, p. 2-9.

Leyshon, P.R., Lisle, R.J., "Stereographic Projection Techniques in Structural Geology", Butterworth, pp. 52-60.



Martínez-Pérez, J., “Estudio geológico de una porción de la Sierra Madre Oriental de Zacualtipán y Tianguistengo, Hgo.” (Tesis de licenciatura en Ingeniería Geológica), México, Instituto Politécnico Nacional, 1962.

Moreno-Cano, L., Patiño-Ruíz, R., “Estudio del Paleozoico de la región de Calnali, Hgo. (En la Sierra Madre Oriental).” (Tesis de licenciatura en Ingeniería Geológica), México, Instituto Politécnico Nacional, 1981, 91 pp.

Ochoa-Camarillo, H.R., “Geología del anticlinorio de Huayacocotla en la región de Molango, estado de Hidalgo.” (Tesis de maestría en ciencias), México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, 1996, 87 pp.

Ochoa-Camarillo, H., Buitrón-Sánchez, B., and Silva-Pineda, A., (1999). “Red beds of the Huayacocotla Anticlinorium, state of Hidalgo, east-central Mexico”, *in* Bartolini, C., Wilson, J. L., and Lawton, T. F., eds., Mesozoic sedimentary and tectonic history of north-central Mexico: Geological Society of America Special Paper 340, p. 59–68.

Ortega-Gutiérrez, F., Lawlor, P., Cameron, K. L., and Ochoa-Camarillo, H., (1997). “New studies of the Grenvillean Huiznopala Gneiss, Molango area, State of Hidalgo, Mexico-preliminary results”, *in* Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo e Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, eds., II Convención sobre la Evolución Geológica de México y Recursos Asociados: Pachuca, México, Libro-guía de las excursiones geológicas, Excursión 1, p. 19–25

Ramsay, J.G., Huber, M.I., “Plegamiento y fracturamiento de las Rocas, vol.1”, H. Blume, Madrid, 2002, pp. 434-455.

Ramsay, J.G., “The Techniques of Modern Structural Geology, Vol. 2: Folds and Fractures”, Elsevier Science, U.K., 2006, pp. 309-327.



Rosales-Lagarde, L., “Estratigrafía y Geoquímica de la secuencia vulcanosedimentaria paleozoica del Noreste del estado de Hidalgo, México”. (Tesis de maestría en ciencias), México, Universidad Nacional Autónoma de México, 2002, 79 pp.

Rosales-Lagarde, L., Centeno-García, E., Dostal, J., Sour-Tovar, F., Ochoa-Camarillo, H., Quiroz-Barroso, S., (2005). “The Tuzancoa Formation: Evidence of an Early Permian Submarine Continental Arc in East-Central Mexico.” *International Geology Review*, v. 47, p. 901-919.

Rowland, S.M., Duebendorfer E. M., Schiefelbein, M.I., “Structural Analysis and Synthesis”, tercera edición, USA, Blackwell, 2007, pp. 61-98.

SGM, 2014. Panorama Minero del Estado de Hidalgo. México, p 5-10.

Sour-Tovar, F., Pérez-Huerta, A., Quiroz-Barroso, S.A., Centeno-García, E., (2005). “Braquiópodos y trilobites del Pérmico Inferior del Noroeste del Estado de Hidalgo, México.” *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(1), p. 24-35.



APÉNDICE.

**Tabla 1**  
Fracturamiento Calizas Formación Tam.  
al norte de Calnali

Rumbo (azimutal)	echado (Mano derecha)
22	85
3	85
350	85
340	85
10	85
250	85
270	85
260	85
350	85
341	85
297	85
280	85
327	85
10	85
12	85
320	85
50	85
20	85
45	85
70	85
42	85
25	85
80	85
55	85
75	85

70	85
68	85
104	85
125	85
29	85
10	85
345	85
35	85
154	85
348	85
8	85
328	85
340	85
320	85
30	85
62	85
190	85
150	85
80	85
23	85
198	85
191	85
35	85
43	85
260	85
269	85
31	85



**Tabla 2**  
Fracturamiento lutitas-areniscas Formación  
Tuzancoa al suroriente de Calnali

Rumbo (azimutal)	echado (Mano derecha)
22	85
3	85
350	85
340	85
10	85
250	85
270	85
260	85
350	85
341	85
297	85
280	85
327	85
10	85
12	85
320	85
50	85
20	85
45	85
70	85
42	85
25	85
80	85
55	85
75	85

70	85
68	85
104	85
125	85
29	85
10	85
345	85
35	85
154	85
348	85
8	85
328	85
340	85
320	85
30	85
62	85
190	85
150	85
80	85
23	85
198	85
191	85
35	85
43	85
260	85
269	85
31	85



**Tabla 3**  
Fracturamiento Formación Tuzancoa al Poniente (cerro Teacal) de Calnali

Rumbo (azimutal)	echado (Mano derecha)
25	85
90	85
10	85
340	85
27	85
288	85
200	85
208	85
227	85
220	85
42	85
74	85
175	85
318	85
254	85
243	85
312	85
195	85
223	85
342	85
292	85
155	85
324	85
154	85
38	85
235	85
255	85
324	85
47	85
172	85
32	85
237	85
299	85
270	85

202	85
70	85
210	85
192	85
183	85
45	85
57	85
57	85
241	85
8	85
325	85
327	85
340	85
126	85
33	85
212	85
232	85
251	85
242	85
237	85
28	85
27	85
40	85
305	85
43	85
261	85
244	85
245	85
254	85
276	85
233	85
188	85
189	85
108	85
266	85
168	85
236	85
258	85



FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM



14	85
4	85
216	85
240	85
213	85
18	85
288	85
83	85
155	85
272	85
35	85
278	85
196	85
33	85

131	85
194	85
206	85
108	85
182	85
234	85
231	85
87	85
252	85
40	85
356	85
72	85
115	85
14	85