Artículo de Investigación. Revista Ciencia e Ingeniería. Vol. 45, No. 1 pp. 71-80, diciembre-marzo, 2024.
ISSN 1316-7081. ISSN Elect. 2244-8780 Universidad de los Andes (ULA)

Caracterización Estructural mediante elementos cinemáticos del sector “Las Cruces – El Joque”, municipio Campo Elías del Estado Mérida

Structural Characterization through Kinematic Elements of the "Las Cruces - El Joque" sector, Campo Elías municipality, Mérida State.

Bongiorno, Francisco*; Arellano, Maribi; Alarcón, Nayeska
Grupo de Investigaciones en Geología Aplicada. (GIGA), Departamento de Geomecánica
Escuela de Geológica, Facultad de Ingeniería,
Universidad de Los Andes, ULA. Mérida 5101. Venezuela.
*frabon@ula.ve

Resumen

La siguiente investigación tiene como finalidad caracterizar estructuralmente el sector “Las Cruces – El Joque” mediante la estimación de la dirección de los esfuerzos principales del área estudiada. La metodología utilizada se basó en la recolección de datos de rumbos y buzamientos de las diferentes superficies de fallas encontradas, así como también elementos cinemáticos como el ángulo pitch a las estrías que se localizaron y midieron en afloramientos. Con estos datos de las Formaciones Capacho y La Luna se usó el programa computacional Stereo32, con el fin de determinar la dirección y análisis de la inclinación de los esfuerzos principales mediante el método de los diedros rectos y así determinar información objetiva del estado tensional de la zona. Con la metodología implementada se determinó que la vergencia en la zona tiene una dirección N62,6°W, coincidiendo con la vergencia de Los Andes venezolanos, previamente investigada y con ello, se corroboró que el régimen tectónico con influencia en la zona es transpresivo. Finalmente, de acuerdo con los datos obtenidos en la etapa de campo y los datos elaborados por el programa Stereo32, se generó un mapa geológico estructural a escala 1:25.000 y se planteó un modelo geológico acorde con el régimen tectónico antes indicado.

Palabras clave: *Esfuerzos Principales, Dirección e Inclinación, Vergencia, Régimen Transpresivo.*

Abstract

The following research aims to structurally characterize the sector "Las Cruces - El Joque" by estimating the direction of the main stresses in the studied area. The methodology used was based on the collection of data on azimuths and dips of different fault surfaces found, as well as kinematic elements such as the pitch angle to the streaks that were located and measured in outcrops. With these data from the Capacho and La Luna Formations, the Stereo32 software was used to determine the direction and analysis of the inclination of the main stresses using the method of right diedrons and thus determine objective information on the tensional state of the zone. With the implemented methodology it was determined that the vergence in the zone has a N62.6°W direction, coinciding with the vergence of the Venezuelan Andes, previously investigated, and thereby corroborating that the tectonic regime influencing the zone is transpressive. Finally, according to the data obtained in the field stage and the data processed by the Stereo32 software, a geological structural map was generated at a scale of 1:25,000 and a geological model was proposed in accordance with the tectonic regime indicated above.

Keywords: *Main Stresses, Direction and Inclination, Vergence, Transpressional Regime*

1 Introducción

La geología estructural busca estudiar las estructuras que se generan debido a la deformación de la corteza terrestre y la relación que hay entre ellas, siendo pilar fundamental para ejecución de estudios geológicos que requieran apoyo de esta rama (López y col; 2014). El mismo autor establece que la geología estructural emplea métodos gráficos y numéricos que se han desarrollado en las últimas décadas, gracias a estos estudios (teóricos y experimentales) que permiten mediante datos de deformación medidos en campo, se pueden determinar la naturaleza (tipo y dirección) de los esfuerzos que la provocaron. Las fuerzas tectónicas que se generan en la corteza dan como resultado estructuras geológicas, como fallas y pliegues; dentro de ellas podemos evidenciar elementos cinemáticos que contribuyen a determinar la dirección de los esfuerzos (movimiento) y la afectación en determinadas zonas de estudio como parte de su historia geológica y así mismo, aportando información valiosa. La zona en estudio se encuentra ubicada en el occidente de Venezuela, dentro de la cordillera Andina, específicamente en el municipio Campo Elías del estado Mérida, en el sector "Las Cruces" hasta la finca "El Joque". El presente trabajo de investigación tiene como finalidad profundizar en los estudios geológicos-estructurales, haciendo énfasis en los elementos cinemáticos presentes en el área de estudio.

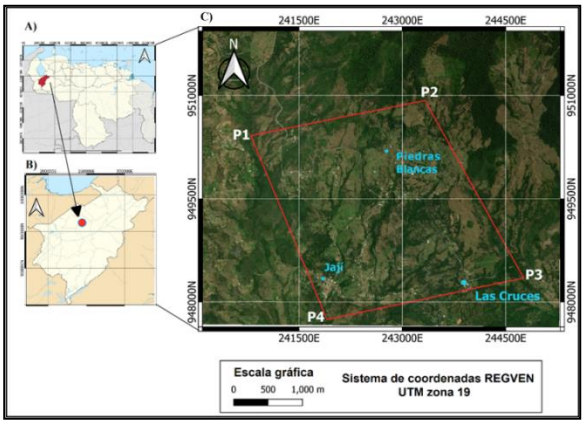


Fig. 1. Ubicación general de la zona de estudio. A) Ubicación relativa mapa de Venezuela. B) Ubicación relativa mapa de Mérida. C) Ubicación del área de estudio. (General location of the study area. A) Relative location map of Venezuela. B) Relative location map of Mérida. C) Location of the study area.)

2 Procedimiento metodológico

En esta investigación se emplearon dos métodos para el análisis y procesamientos de las estrías de fallas:

- Determinación de esfuerzos principales mediante el software Stereo32 y la aplicación del método de los diedros rectos (la metodología empleada fue basada en investigaciones previas tales como: "Evaluación geomecánica-estructural del sector los Araques-San Juan, de Lagunillas municipio sucre, estado Mérida." (Di Giusto y col ; 2017)

- Método gráfico aplicado para una sola superficie de falla cuya metodología empleada se muestra a continuación:

2.1 Determinación de esfuerzos principales mediante el Método Grafico

Este método gráfico permite determinar las orientaciones de los esfuerzos principales deducidas de los datos de campo, para estrías pertenecientes al mismo plano de falla. (Bruce y col; 1981).

Los principales pasos para la realización de este método es el siguiente: Se procede a graficar los datos de rumbo y buzamiento en la estereofalsilla de Wulff como se muestra en
la figura 2.

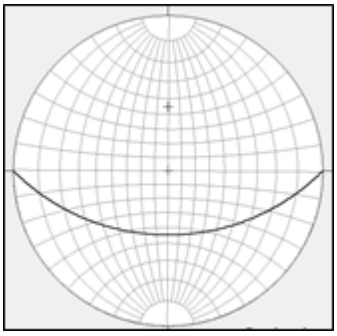


Fig. 2. Plano de falla proyectado sobre la estereofalsilla de Wulf. (Fault plane projected onto the Wulff stereofalsilla.)

Se calcula el Polo (P) de la superficie de falla, que se ubica a 90º de cualquier superficie proyectada sobre la estereofalsilla de Wulf, como se muestra en la figura 3.de la posición mostrada en la figura 3.

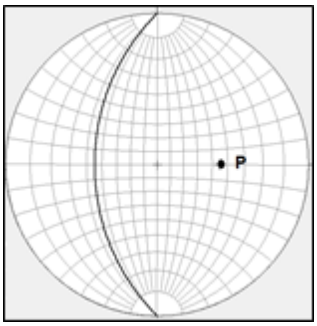


Fig. 3. Ubicación del polo de la superficie de falla. (Location of the pole of the fault Surface)

Seguidamente se ubica el ángulo pitch (C) medido sobre la superficie de falla en el campo de acuerdo a su cinemática y

la forma de hacerlo es como se muestra en la figura 4.

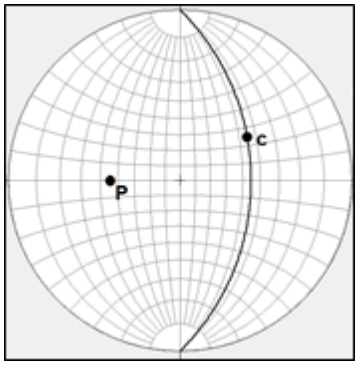


Fig. 4. Ubicación del ángulo pitch sobre la superficie de falla. (Location of the pitch angle on the failure Surface.)

Se requiere relacionar los pountos C y P mediante una curva isohipsa de la red de Wulf que las contenga. Este procedimiento se muestra en la figura 5.

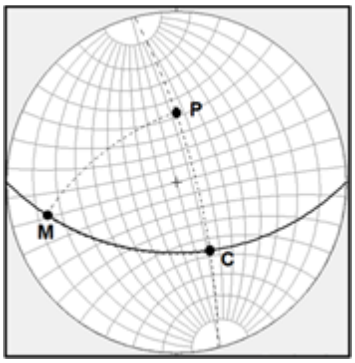


Fig. 5. Proyección de la curva isohipsa en la red de Wulf que contiene P y C. (. Projection of the isohypsa curve on the Wulf lattice containing P and C.)

Se rota la isohipsa que contiene P y C a la dirección N-S de la red, se miden 90º en dirección E-O como se muestra en la figura 6, que generalmente debe coincidir en algún sector con el plano de falla proyectado. Este punto se denomina M y representa el esfuerzo principal intermedio a $\sigma_{2.}$

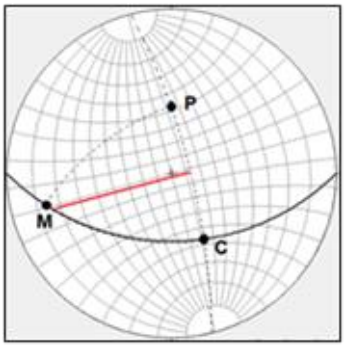


Fig. 6. Determinación del punto que contiene al esfuerzo $\sigma_{2.}$*(Determination of the point that contains the stress σ2.)*

A partir del punto C, se miden 30º en dirección N-S para obtener un valor del esfuerzo principal menor σ_3, luego a 90º de este esfuerzo se ubicará el otro esfuerzo principal mayor $\sigma_{1,}$ como se muestra en la figura 7.

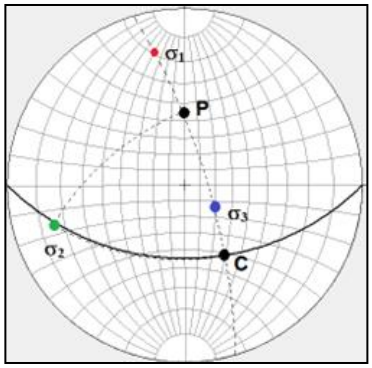


Fig. 7. Determinación de los esfuerzos principales mediante el método gráfico. (Determination of the principal efforts using the graphic method.)

3 Discusión y resultados

Durante la etapa de campo se localizaron afloramientos que presentan superficies de fallas, algunos de ellos, presentaban elementos cinemáticos como estrías, logrando encontrar un total de siete juegos de estrías sobre las mismas. Estos datos se midieron se analizaron *in situ*, como son los datos de rumbos y buzamientos de la superficie de falla, ángulo *pitch (Inclinación de la Estría)* y estimación de la cinemática presente. Los datos obtenidos en las estrías se encontraban en distintos puntos del área de estudio, ubicando cuatro juegos de estrías en las rocas representadas por la Formación La Luna y tres juegos en las rocas pertenecientes a la Formación Capacho. En su mayoría los rumbos de esas superficies, se ubican en dirección del cuadrante N-W con ángulos que oscilan entre 60º y 85º y buzamientos que predominan en dirección SW con ángulos de inclinación entre 25º y 47º como se observa en la tabla.

Tabla 1. Datos de las estrías de falla localizadas durante en la etapa de campo. (Data on the fault streaks located during the field stage)

Estrías de falla	Rumbo	Buzamiento	Pitch	Cinematica	Azimut	Unidad Geologica
L1	N85 W	25SW	70 NW	Inversa Dextral	275	Formación La Luna
L2	EW	45S	67 NW	Inversa Dextral	90	Formación La Luna
L3	N83 W	32SW	45 NW	Inversa Dextral	277	Formación La Luna
L4	N75 E	32SE	70 NW	Inversa Dextral	75	Formación La Luna
C1	N80 W	27SW	65 NE	Inversa Sinestral	280	Formación Capacho
C2	N60 W	47SW	85 NE	Inversa Sinestral	300	Formación Capacho
C3	N70 E	45SE	75 NE	Inversa Dextral	70	Formación Capacho

3.1 Resultados de la estimación de esfuerzos principales

Los datos medidos sobre las superficies de fallas en rocas de la Formación Capacho representan la principal y su conjugada. Para el caso de la Formación La Luna (ver tabla 2), todas las estrías pertenecen a la misma superficie de falla, por lo tanto, no se encontró su conjugada, es por ello, que es necesario realizar un cálculo de esfuerzos principales a cada estría por separado para este caso, y así obtener la dirección de los esfuerzos principales mediante el método gráfico conociendo sus orientaciones y el sentido del desplazamiento del bloque (*pitch*) previamente.

Tabla 2. Datos de estrías pertenecientes a la Formación La Luna. (Striae data belonging to the La Luna Formation)

Estrías de falla	Rumbo	Buzamiento	Pitch	Cinemática	Azimut	Unidad Geológica
L1	N85W	25SW	70NW	Inversa Dextral	275	Formación La Luna
L2	EW	45S	67NW	Inversa Dextral	90	Formación La Luna
L3	N83W	32SW	45NW	Inversa Dextral	277	Formación La Luna
L4	N75E	32SE	70NW	Inversa Dextral	75	Formación La Luna

3.1.1 Método Gráfico

Se procede a generar la proyección estereográfica mediante el método gráfico previamente explicado y aplicado para una sola superficie de falla, a través de la ubicación del ángulo pitch y el polo del plano de falla mediante un plano que los contiene, de esta forma se hallan los esfuerzos principales que se encuentran ortogonales entre sí. En la figura 7, se encuentra la proyección estereográfica de la estría L1, cuyo método gráfico fue aplicado para calcular las direcciones de los esfuerzos principales identificados con rojo, verde y azul.

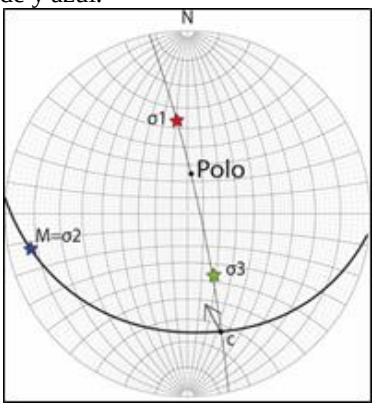
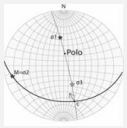
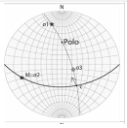
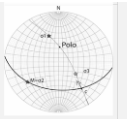
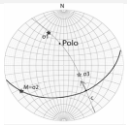


Fig. 8. Método grafico aplicado para la estría de falla L1 (Graphic method applied to the L1 fault rake)

Se procedió a aplicar el método gráfico para las demás estrías pertenecientes a las localizadas en rocas de la Formación La Luna que se anexan en la Tabla 3.

Tabla 3. Cuadro resumen del cálculo de la ubicación de los esfuerzos principales mediante el método gráfico a las estrías pertenecientes a rocas de la Formación La Luna (Summary table of the calculation of the location of the main stresses using the graphic method to the striations belonging to rocks of the La Luna Formation)

PLANOS DE FALLA	RUMBO Y BUZ.	CUADRANTE σ_1	UNIDAD	PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA
L1	N85W/25SW	NW	Fm. La Luna	
L2	EW/45S	NW	Fm. La Luna	
L3	N83W/32SW	NW	Fm. La Luna	
L4	N75E/32SE	NW	Fm. La Luna	

3.1.2 Software Stereo32

Para determinar los esfuerzos principales que tienen influencia sobre el área de estudio, se usó el metdo de los Diedros Rectos usando la estereofalsilla de Wulf y los resultados fueron corroborados empleando el *software libre Stereo32*, tomando como base los valores presentados en la tabla 1. Estos valores corresponden a las mediciones de rumbos y buzamientos de superficies de falla obtenidas durante la etapa de campo. La información que arrojaron el método de los Diedros Rectos fueron cortejados con trabajos relacionados con el Levantamiento de Los Andes de Venezuela y se integran a los esfuerzos principales de la vergencia andina. Se agruparon los planos de fallas principales y conjugados en la Tabla 4, con el fin de emplear el software mediante dos planos de fallas definidos como se observa en la figura 9. Las figuras 8 y 10 indican la determinación de los esfuerzos principales usando la estereofalsilla de Wulf y los resultados arrojados por el programa respectivamente, como se pueden notar que la posición de los esfuerzos principales mayor, intermedio y menor, son las mismas en ambas figuras, con ello se puede indicar que tanto la red de Wulf, usando el método de los

Diedros rectos, como le programa, funcionan.

Tabla 4. Datos tomados en campo a los diferentes planos de fallas. (Data taken in the field from the different fault planes)

Combinación de planos de falla	Plano principal	Cinemática	Plano Conjugado	Cinemática
C2-L2	N60W/47SW	Inversa Sinestral	EW/45S	Inversa Dextral
C3-C1	N70E/45SE	Inversa Dextral	N80W/65NW	Inversa Sinestral
C3-C2	N70E/45SE	Inversa Dextral	N60W/47SW	Inversa Sinestral
L1-C2	N85W/25SW	Inversa Dextral	N60W/47SW	Inversa Sinestral
L4-C1	N75E/32SE	Inversa Dextral	N80W/27SW	Inversa Sinestral
L2-C1	EW/45S	Inversa Dextral	N80W/27SW	Inversa Sinestral

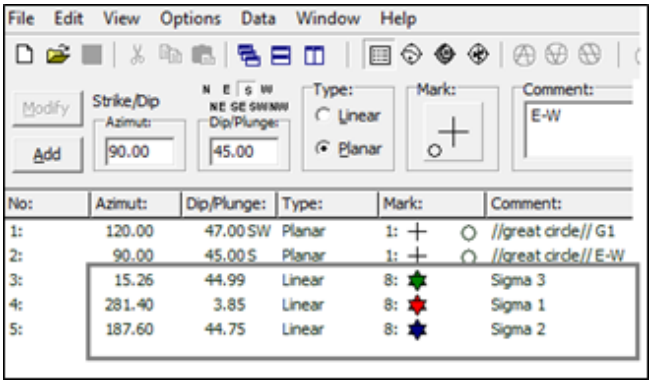


Fig. 9. Ventana del programa computacional Stereo32 y la ubicación de los esfuerzos principales, mediante la simulación realizada para las fallas C2-L2 los cuales corresponden al plano principal y al conjugado. (. Shows the window of the Stereo32 computer program and the location of the principal stresses, through the simulation carried out for the C2-L2 faults, which correspond to the principal plane and the conjugate plane.)

En la estereofalsilla de Wulff de la figura 10, se muestra el plano de falla principal representado con color negro y el plano de falla conjugado representado con color vinotinto. El esfuerzo principal mayor σ_1 se representa en forma de "estrella" de color rojo, el esfuerzo principal medio σ_2 se representa en forma de "estrella" de color azul y, por último, el esfuerzo principal menor σ_3 se representa en forma de "estrella" color verde.

Mediante el *programa computacional Stereo32* se logran obtener valores en grados de la ubicación de los esfuerzos principales mayor, intermedio y menor, σ_1, σ_2 y σ_3, respectivamente, cuyos valores se encuentran dentro de las casillas de Azimut y la inclinación representada en *Dip/Plunge*. Es importante tener presente que estos esfuerzos son ortogonales entre sí para verificar que se cumpla con el principio del Modelo de Anderson (1959) y que es característica fundamental de estos esfuerzos.

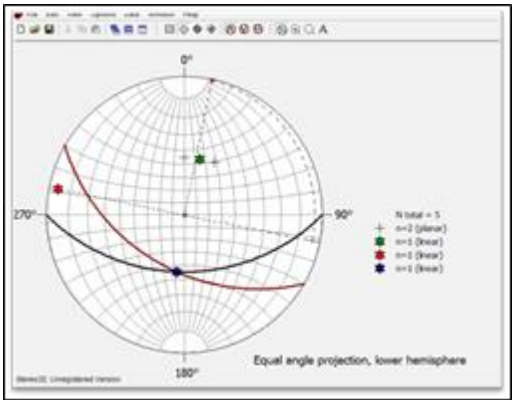


Fig. 10. Representación estereográfica y la ubicación de los esfuerzos principales, mediante la simulación realizada para las fallas C2-L2. (Stereographic representation and location of the main stresses, through the simulation carried out for the C2-L2 faults

De acuerdo a los diagramas de Anderson, se puede determinar que el esfuerzo principal σ_1 se ubica en el ángulo agudo que forman dos planos de falla en la proyección estereográfica, el esfuerzo principal intermedio σ_2 se ubica en la intersección de los dos planos de la misma proyección, mientras que el esfuerzo principal menor σ_3, se encuentra en el ángulo obtuso de la proyección, las cuales mediante la estereofacilla muestran la predominancia del movimiento vertical.

Los esfuerzos principales obtenidos son similares a los propuestos en el modelo de Anderson. En la tabla 5, donde se muestran los resultados de las direcciones e inclinaciones de los esfuerzos principales, producto de las combinaciones de planos.

Tabla 5. Resultados de dirección e inclinación de los esfuerzos principales obtenidos para las combinaciones de planos. (. Results of direction and inclination of the principal forces obtained for the combinations of planes.)

COMBINACION C2-L2			COMBINACION L1-C2		
ESFUERZO	DIRECCIÓN	INCLINACIÓN	ESFUERZO	DIRECCIÓN	INCLINACIÓN
(σ)	(N)	(α)	(σ)	(N)	(α)
σ1	281,4	3,85	σ1	140,00	30,22
σ2	167,60	44,75	σ2	239,20	15,27
σ3	15,26	44,90	σ3	352,5	55,38
COMBINACION C3-C2			**COMBINACIÓN C3-C1**		
ESFUERZO	DIRECCIÓN	INCLINACIÓN	ESFUERZO	DIRECCIÓN	INCLINACIÓN
(σ)	(N)	(α)	(σ)	(N)	(α)
σ1	272,90	2,36	σ1	132	27,5
σ2	180,7	43,09	σ2	233,20	20,38
σ3	5,45	46,82	σ3	354,7	54,62
COMBINACION L4-C1			**COMBINACIÓN C1-L2**		
ESFUERZO	DIRECCIÓN	INCLINACIÓN	ESFUERZO	DIRECCIÓN	INCLINACIÓN
(σ)	(N)	(α)	(σ)	(N)	(α)
σ1	115,20	15,96	σ1	163,1	34,09
σ2	212,9	25,14	σ2	259,9	9,92
σ3	356	25,14	σ3	3,91	54,10

Analíticamente, se puede distinguir y evidenciar que los esfuerzos principales mayores σ_1 se ubican en dos principales cuadrantes, en los cuales, dos proyecciones estereográficas están en el cuarto cuadrante NW, y cuatro proyecciones estereográficas en el segundo cuadrante SE, por lo que se promediara dichos esfuerzos según el cuadrante perteneciente, cuyos resultados se encuentran en la tabla 6.

Tabla 6. Promedios de los esfuerzos principales mayores σ_1 para los cuadrantes resultantes**. (**Averages of the largest principal stresses σ1 for the resulting quadrants)

CUADRANTE NW		
ESFUERZO (σ)	DIRECCIÓN(ψ)	INCLINACIÓN (α)
σ_1 promedio	277,15	3,10
σ_2 promedio	184,15	43,92
σ_3 promedio	10,35	45,90
CUADRANTE SE		
ESFUERZO (σ)	DIRECCIÓN(ψ)	INCLINACIÓN (α)
σ_1 promedio	137,57	26,95
σ_2 promedio	239,20	17,67
σ_3 promedio	355,8	47,31

Para destacar, como parte de los resultados obtenidos, es que para los casos en donde los esfuerzos principales mayores σ_1 se encuentran en el tercer cuadrante, es decir al SE, se asume que sus representaciones homologas se encuentran ubicadas a +/- 180º de ellos, sumando o restando según sea el caso y el método computacional empleado, es decir, luego de dicha corrección, el esfuerzo principal el σ_1 se ubica homólogamente sobre el cuadrante NW. reflejándose esto en que la dirección del esfuerzo principal mayor que se maneja según los resultados de las proyecciones estereográficas se localiza en los cuadrantes SE-NW. Se observan todos los resultados obtenidos mediante las proyecciones estereográficas para cada combinación en la Tabla 7.

Para determinar en función a los datos manejados durante este estudio, la dirección e inclinación de los esfuerzos principales actuantes, especialmente el esfuerzo principal mayor σ_1, se promediaron los resultados obtenidos en la tabla 8, pertenecientes al cuadrante NW y SE. Se corrigió el valor obtenido en el cuadrante SE, para concentrar los polos en un mismo cuadrante, sumando o restando 180º, según sea el caso y permitiéndonos obtener su valor homólogo en el cuadrante NW.

Para determinar en función a los datos manejados durante este estudio, la dirección e inclinación de los esfuerzos principales actuantes, especialmente el del σ_1, para ello se promediaron los resultados obtenidos en la Tabla 8, pertenecientes al cuadrante NW y SE. Se corrigió el valor obtenido en el cuadrante SE, para concentrar los polos en un mismo cuadrante, sumando o restando 180º, según sea el caso y permitiéndonos obtener su valor homólogo en el cuadrante NW.

Esta investigación generó un modelo estructural del área de estudio mediante elementos cinemáticos que permitieron conocer la dirección e inclinación de los esfuerzos principales actuantes, es por ello, que fue de impera necesidad de calcular la vergencia del área. A partir de los datos promediados de $\sigma_1[(\psi)]$ se obtiene un valor que representa la Vergencia o dirección del esfuerzo principal mayor que actúa en el sistema de fallas presentes en la zona de estudio, mostrado en la Tabla 8 y se utiliza para el desarrollo del modelo estructural. Para obtener los valores del esfuerzo principal mayor σ_1, se realizó un análisis de las proyecciones estereográficas utilizando el *software Stereo32*. Se estableció un valor promedio de N 62,64º W (aproximadamente N 63º W) para la orientación de la vergencia, según la Tabla 8.

Tabla 7. Cuadro resumen con todos datos y combinaciones de los mismos proyectadas en el *Software Stereo 32 (Summary table with all data and combinations thereof projected in the Stereo 32 Software)*

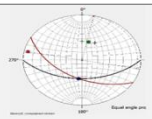
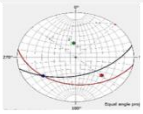
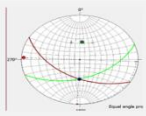
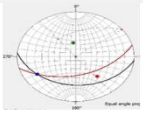
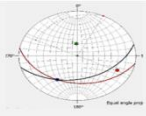
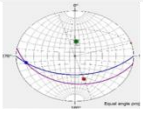
PLANOS DE FALLA	PLANO PRINCIPAL	PLANO CONJUGADO	σ_1	PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA
C2-L2	N60W/47SW	EW/45S	281,40	
C3-C1	N70E/45SE	N80W/65NW	132,00	
C3-C2	N70E/45SE	N60W/47SW	272,90	
L1-C2	N85W/25SW	N60W/47SW	140,00	
L4-C1	N75E/32SE	N80W/27SW	115,20	
C1-L2	EW/45S	N80W/27SW	163,10	

Tabla 8. Valores para σ_1 promediados en los cuadrantes NW y SE. (Values for σ_1 averaged in the NW and SE quadrants)

PROMEDIO σ_1		
CUADRANTE	**DIRECCION(ψ)**	**DIRECCION CORREGIDA (ψ)**
Cuadrante IV (NW)	**277,15**	**277,15**
Cuadrante II (SE)	**137,57**	**317,57**
PROMEDIO σ_1		**297,36**
VERGENCIA		**N62,64ºW**

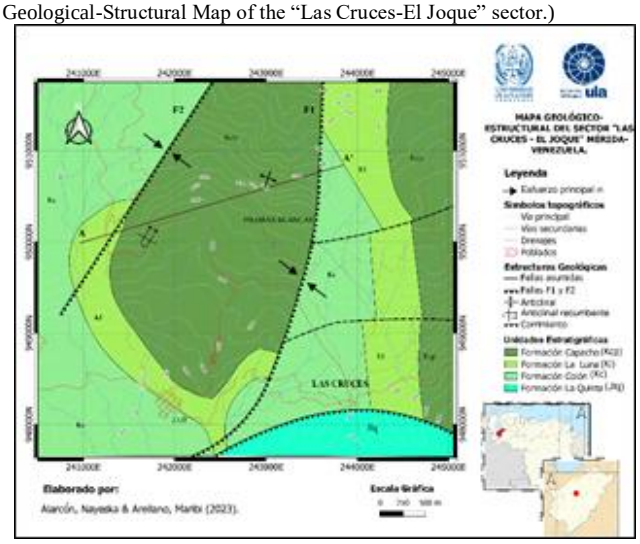
Durante la etapa de campo, se identificó que el esfuerzo principal mayor actúa de forma oblicua en las superficies de fallas del área de estudio, ya que incide de forma inclinada con respecto a la horizontal, lo que concuerda con el resultado obtenido de la vergencia. Vectorialmente, este esfuerzo general se descompone en dos componentes: una normal (σ_n) que se opone al movimiento y otra tangencial (τ) que lo favorece. Este esfuerzo tangencial coincide con la cinemática de las superficies de fallas (estrías de falla), ya que el ángulo pitch al ser oblicuo, posee una componente vertical y otra horizontal, entonces, como los ángulos pitch son mayores de 45º, indica que la vertical es mayor que la horizontal, es decir, la componente vertical es la más relevante en la zona de estudio, lo que sugiere que la deformación se está produciendo principalmente por movimientos verticales.

3.2 Mapa Geológico-Estructural

Se generó el mapa Geológico-Estructural en donde se ubicaron los esfuerzos principales actuantes en el área de estudio como se observa en la figura 11.

La ubicación general de estos esfuerzos coincide con investigaciones que se ha publicado sobre la generación de Los Andes venezolanos, pero además, la determinación y ubicación de los esfuerzos principales en la área de estudio, coincide con la vergencia andina. Específicamente, se refieren a lo que algunos autores denominan "esfuerzos de cierre", que corresponden a la última activación de los esfuerzos que provocaron el levantamiento andino. Se puede notar en el mapa que existen 2 fallas principales que controlan la Geología Estructural de la zona, como lo son la falla F1 y el Corrimiento de Mesa Bolívar, este último siendo una estructura regional que controla toda la deformación desde la población de Tovar hasta las poblaciones aledañas a Jají.

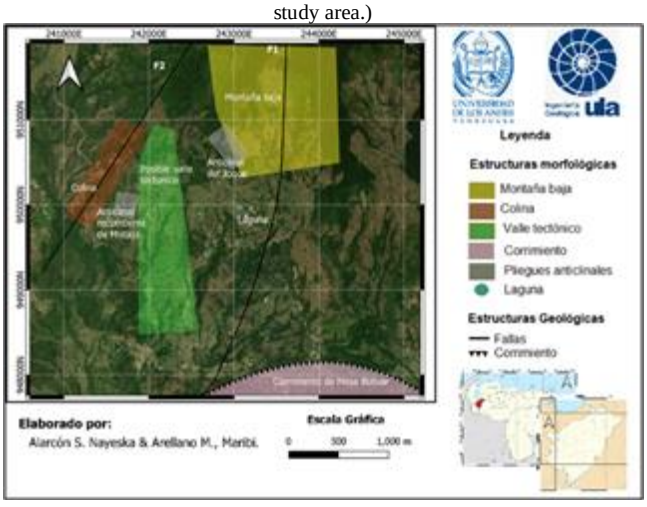
Fig. 11. Mapa Geológico-Estructural del sector "Las Cruces-El Joque".(Geological-Structural Map of the "Las Cruces-El Joque" sector.)



3.3 Modelo Geológico-Estructural

El área de estudio de la investigación se encuentra en una zona montañosa que presenta una serie de pliegues y fallas geológicas. El objetivo de este modelo Geológico-Estructural es correlacionar los elementos morfológicos con el movimiento de las fallas predominantes en la zona, los principales rasgos y caracterices fueron interpretadas en un ortofotomapa que se muestra en la figura 12, que además fueron corroboradas en el campo; en esa figura, se plasma la distribución área de las unidades litológicas o rocosas del área de estudio.

Fig. 12. Ortofotomapa con polígonos que representan diferentes estructuras morfológicas presentes en el área de estudio. (Orthophotomap with polygons that represent different morphological structures present in the study area.)



Se puede denotar que fallas principales o modelan el sector de investigación del presente trabajo son 3:

- Falla F1: se encuentra ubicada al NE, y posee una dirección NE-SW, cuyo extremo sur se trunca con el corrimiento de Mesa Bolívar. Es de tipo Inversa-Dextral.
- Falla F2: se encuentra ubicada al NW, en dirección NE-SW, cuya cinemática es de tipo Inversa-sinestral, es decir, el movimiento inverso domina por sobre el sinestral, conocida mediante estrías de fallas, cuya existencia fue evidenciada por rasgos morfológicos característicos, como alineaciones topográficas, controles hídricos y sobre todo por las estrías medidas sobre su superficie.
- Corrimiento de Mesa Bolívar: "Es una falla crustal que permite aflorar en a la superficie terrestre rocas del basamento de edad paleozoica pertenecientes a la Asociación Tostos" Bongiorno y col. (2011), esta falla controla y provoca la deformación regional de todo el sector

En observaciones de campo de esta investigación se identificaron evidencias morfológicas características de regímenes transpresivos dominados por asociaciones de fallas inversas influenciados por el corrimiento de Mesa Bolívar, los mismos se aprecian claramente en la figura 12, y esta son, una colina de menos de 200m de altura, al NW de la zona de estuduo, esta morfología indica la presencia de la falla F2 y la misma se muestra en la figura 13.

Fig. 13. Colina influenciada por la falla F2, morfología generada por esta falla. (Hill influenced by fault F2, morphology generated by this Fault)



Otra deformación o morfología ubicada en la zona de estudio es el plegamiento anticlinal recumbente inclinado que se muestra en la figura 14, cuyo eje axial se encuentra en dirección al NW-SE y rumbos y buzamientos del flanco largo que fueron medibles en campo son N75E/45SE. Este anticlinal está conformado litológicamente por las rocas de el Miembro Seboruco (de edad Cenomaniense-Turoniense) de la Formación Capacho, ubicado en la parte interna como capa más antigua y el Miembro Guayacán (de edad Turoniense) de la misma unidad formacional, ubicado en la capa externa como la capa más joven, corroborando con ello que se trata de un pliegue anticlinal. Debido a que no se había documentado su existencia, el aporte de esta investigación es su ubicación y se ha denominado como Pliegue Anticlinal Recumbente de Mistaja. Este plegamiento obedece a la cinemática meduca de las fallas F1 y F2, ya que el mismo se encuentra en el área encerrada por estas fallas.

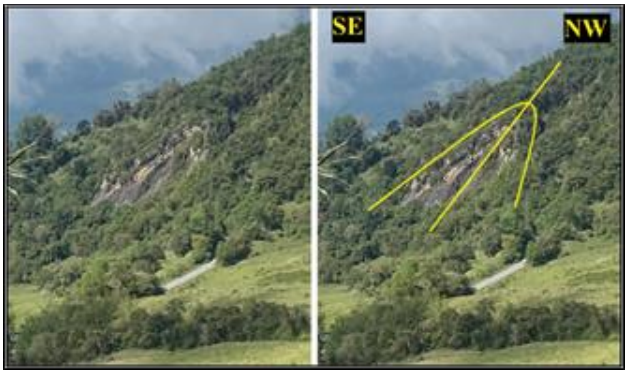


Fig. 14. Pliegue Anticlinal Recumbente de Mistajá. (Mistajá Recumbent Anticline Fold)

Otra morfología localizada y que es producto de la deformación en la zona en un alto estructural que se denominó como montaña media con aproximadamente 400 m de altura que se muestra en la figura 15, que posee alta cobertura vegetal, pero además se aprecia un macizo rocoso prominente, que, al ser visto desde un área cercana, se identificó y que pertenece al anticlinal del Joque, estructura muy característica del sector.



Fig. 15. Alto Estructural ubicada al NE del área que representa al Anticlinal de El Joque. (Structural High located NE of the area that represents the El Joque Anticline.)

La misma morfología descrita anteriormente, pero vista desde el NE se puede evidenciar uno de los flancos del Anticlinal del Joque, que representa principalmente a calizas pertenecientes al Miembro Guayacán de la Formación Capacho, el área cuenta con abundante cobertura vegetal, y no se aprecia uno de los flancos, específicamente el ubicado al SW, que la morfología nos indica su evidencia, pero no está expone el macizo rocoso. Las mediciones estimadas para el flanco que esta es de N23W para el ángulo y dirección de rumbo y 17SW para el ángulo

y dirección de buzamiento. Estas características descritas están apoyadas por la figura 16.



Fig. 16. Anticlinal de El Joque perteneciente a la Formación Capacho, Miembro Seboruco. (El Joque Anticline belonging to the Capacho Formation, Seboruco Member.**)**

En el sector de Piedras Blancas, ubicado en las adyacencias del Anticlinal de El Joque, se evidencia una laguna que posee características naturales y que posiblemente sea una consecuencia de la existencia de la falla F1, debido a que su localización esta muy cercana a ella. La figura 17 muestra las características de la misma.



Fig. 17. Laguna por falla ubicada en el sector Piedras Blancas (Fault lagoon located in the Piedras Blancas sector)

3.3.1 Análisis del modelo geológico-estructural

En el área de estudio, las fallas F1 y F2 son los principales moldeadores de la zona, especialmente la interacción de ambas con la influencia del Corrimiento de Mesa Bolívar. El modelo geológico del área se define como un sistema de fallas imbricadas que se encuentran subparalelas como se observan en el corte geológico (Figura 12). La interacción de ambas fallas produce un movimiento de dirección de rumbo
NE y genera morfologías en el área ubicada entre ellas dos, debido a la influencia de ambas fallas inversas como por ejemplo los plegamientos localizados en dicha zona.

Se ha determinado que la falla F2 es de movimiento Inverso-sinestral, ya que los ángulos pitch de las estrías de fallas localizadas en esta área oscilan entre 65º y 85º. Esta cinemática tiene una influencia directa sobre la inclinación del pliegue Anticlinal de Mistajá, cuya estructura fue generada por un movimiento transpresivo. La inclinación de la superficie axial del anticlinal es una evidencia que corrobora el tipo de movimiento de esta falla, ya que no está completamente horizontal. En otras palabras, el movimiento dominante es el inverso, mientras que el secundario es el sinestral, además influye en la formación de la colina que se encuentra en esta zona.

La falla F1 posee una cinemática de tipo Inversa-Dextral, debido a que los ángulos pitch localizados están entre 45º-70º. El movimiento de esta falla tiene relación directa con el Anticlinal del Joque, la montaña baja y la laguna que se ubica en el Piedras Blancas. El movimiento principal que domina en esta estructura es el inverso, lo que sugiere la posibilidad de que se hayan generado pliegues anticlinales como el Anticlinal del Joque debido a la actividad de esta falla. También, se asocia la formación de la laguna a la misma. La componente transcurrente tiene una influencia significativa en la formación de las montañas ubicadas al norte del área de estudio, es decir, domina el movimiento dextral de F1, esto es importante para la comprensión de la deformación tectónica de la zona.

Todo el modelo estructural se ve influenciado por el Corrimiento de Mesa Bolívar que se ubica al sur, el cual logra exponer las superficies de las Formaciones Capacho, La Luna y Colón. La interacción del frente de este corrimiento con las unidades aflorantes adyacentes a él coincide con el sistema de esfuerzos compresivos mostrados en las proyecciones estereográficas (Tabla 7), donde se confirma la influencia de la vergencia andina, corroborando que todo el modelo Geológico-Estructural está asociado con el levantamiento de Los Andes venezolanos.

4. Conclusiones

Finalizada la investigación se plantean puntualidades que se describen como conclusiones del estudio

De acuerdo con los elementos cinemáticos localizados en la etapa de campo como plegamientos, estrías de fallas y ángulos pitch se concluye que la zona de estudio está influenciada por la vergencia andina, coincidiendo con investigaciones previas sobre la formación de Los Andes Venezolanos. Para la obtención de la dirección de los Esfuerzos principales de la zona, se realizó un análisis estadístico que determinó una vergencia correspondiente a N 62,6º W, debido a este valor, se asume que se está en presencia de esfuerzos denominados “esfuerzos de cierre” que corresponden a la última activación de los esfuerzos que provocaron el levantamiento andino.

La cinemática proporcionada por los ángulos pitch de las estrías de fallas, es oblicua, lo cual se descompone en una componente vertical y otra horizontal, siendo la

componente vertical dominante por sobre la horizontal o transcurrente, debido a que los ángulos medidos fueron mayores a 45º. Se identificaron fallas inversas con componente dextral (falla F1) y con componente sinestral (falla F2) formando un sistema de fallas imbricadas. Para la falla F1: se identificaron estrías con un rumbo N85º W y buzamientos 25º SW con un *pitch* de 70º. La generación del pliegue Anticlinal del Joque se da como consecuencia de esta falla. Las estrías encontradas para la falla F1, presentan dirección NW y valor del ángulo *pitch* (θ) mayor a los 45°, lo que permite denominarla una falla Inversa-dextral.

Para la falla F2: se identificaron estrías con rumbos N80W y buzamiento 27SW con un *pitch* de 65º, además de desviaciones de los mismos. Las estrías encontradas para la falla F2 presentan dirección NE y valor del ángulo pitch (θ) mayor a 45º, lo que permite denominarla una falla Inversa-sinestral.

El modelo Geológico-Estructural obtenido representa un sistema de fallas imbricadas y subparalelas con comportamiento Inverso-dextral e Inverso-sinestral como se muestra en el corte geológico, encontrándose bajo un régimen tectónico transpresivo y que coincide con los modelos tectónicos propuestos en las zonas de pie de monte de Los Andes venezolanos. Se obtuvieron evidencias morfológicas de ellas y cinemáticas. A partir del estudio de las superficies de fallas, se identificaron las principales y sus conjugadas, los cuales fueron usados para estimar la dirección e inclinación de los esfuerzos principales en el área mediante el uso del método gráfico y el *software Stereo32* basado en la aplicación del método de los Diedros Rectos, con ello, se ha determinado que la dirección e inclinación de los esfuerzos principales coinciden con los resultados obtenidos por el modelo geológico antes señalado, basados en la posición del esfuerzo σ_1 que es localizado en el ángulo agudo que forman los dos planos de falla; el esfuerzo σ_2 ubicado en la intersección de los dos planos y el esfuerzo σ_3 situado en el ángulo obtuso según los diagramas de Anderson.

Referencias

Anderson, E. (1951) *The Dinamics of Faulting; 2nd ed., Edinburgh, Oliver and Boyd*, 206 p.

Bruce, H., Wintrhop, M., Paul, W. (1981). Geología Estructural. Barcelona: ediciones Omega S.A. ISBN:84-282-0569-8.

Bongiorno, F., Belandria, N., y Úcar, R. (2011). Determinación de la dirección de los esfuerzos principales a través de análisis numérico y proyecciones estereográficas de la falla de Boconó en el sector Yacambú estado Lara. Revista Ciencia e Ingeniería, Facultad de Ingeniería. ULA.

Di Guisto, O & Segovia, I. (2017) Evaluación Geomecánica - Estructural del sector los Araques – San Juan, municipio Sucre, estado Mérida. Trabajo Especial de grado: Universidad de Los Andes.

López, H. Nelson, R. (2014). Estilo estructural asociado al sistema de fallas Las Mercedes en el sector de Lourdes y Gramalote, Norte de Santander, Colombia. Trabajo de grado para optar al título de Geólogo. Universidad de Santander. Bucaramanga, Colombia 2014.

Recibido: 25 de julio 2023

Aceptado: 15 de octubre 2023

Alarcón, Nayeska. *Ingeniero Geólogo, Universidad de Los Andes, Mérida- Venezuela. Correo electrónico: nayefe08@gmail.com https://orcid.org/0009-0006-0283-4668*

Arellano Maribi. *Ingeniero Geólogo, Universidad de Los Andes, Mérida- Venezuela. Correo electrónico: maribiarellano@gmail.com https://orcid.org/0009-0007-1416-4080*

Bongiorno Francisco. *Ingeniero Geólogo, Universidad de Los Andes, Mérida- Venezuela. Dr. En Gerencia Avanzada. MSc Scientiarum en Matemáticas Aplicada a la ingeniería. Profesor Titular Área Geología Estructural, Mecánica de Roca, Geotecnia. Correo electrónico frabon@ula.ve https://orcid.org/0000-0001-7508-2408*