

CHEVRON FOLDS: UN RECURSO INTERACTIVO PARA VISUALIZAR EL MECANISMO DE DESLIZAMIENTO POR FLEXIÓN (*FLEXURAL SLIP*) EN EL DESARROLLO DE PLIEGUES TIPO *CHEVRON*

Alberto Vásquez-Serrano^{1*}

¹Departamento de Procesos Litosféricos, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

*alberto-vasquez@ciencias.unam.mx

RESUMEN

Chevron Folds es un programa computacional que funciona bajo el sistema operativo Windows® y fue desarrollado en Visual Basic 6®. El programa busca mostrar de manera interactiva el desarrollo de pliegues tipo *chevron* bajo el mecanismo de deslizamiento por flexión (*flexural slip*). Chevron Folds utiliza como variables de entrada el ángulo de inclinación de los flancos del pliegue (α), el espesor de la capa competente (t_1) y la longitud del flanco del pliegue ($l/2$). Con estas variables de entrada se obtiene como resultado una simulación del desarrollo del pliegue, la cantidad de acortamiento que acomoda el pliegue, el deslizamiento total entre las capas y dos gráficos que muestran la variación del acortamiento y deslizamiento total en función del ángulo de inclinación del flanco (α). El mecanismo de deslizamiento por flexión puede ser el principal en el desarrollo del pliegue hasta el ángulo de bloqueo (ángulo entre flancos = $\sim 60^\circ$). Este programa puede ser una herramienta de apoyo valiosa para estudiantes de licenciatura y posgrado en Ciencias de la Tierra en las clases de Geología Estructural.

Palabras clave: pliegues clase 1B, interfaz gráfica, acortamiento, cizalla simple.

ABSTRACT

Chevron Folds is a computer program that runs under Windows® and was developed in Visual Basic 6®. It seeks to interactively display the development of chevron folds under the flexural-slip mechanism. Chevron Folds uses as input variables the angle of inclination of the fold limbs (α), the thickness of the competent layer (t_1), and the length of the fold flank ($l/2$). These input variables are used to generate results, including a simulation of fold development, the amount of shortening accommodated by the fold, the total slip between the layers, and two graphs illustrating the variation in shortening and total slip as functions of the flank inclination angle (α). The flexural-slip mechanism may be the main one in developing the fold up to the locking angle (interlimb angle = $\sim 60^\circ$). This program can be a valuable support tool for undergraduate and graduate Earth Science students in Structural Geology classes.

Keywords: folds class 1B, graphic interface, shortening, simple shear.

INTRODUCCIÓN

Los pliegues geológicos son estructuras muy comunes en sitios donde ocurre acortamiento de la corteza terrestre. Su geometría depende de las condiciones reológicas de las rocas, de la cantidad de acortamiento que acumulan y de los mecanismos involucrados en su formación (Ramsay *et al.*, 1983). Estos mecanismos son: plegamiento por doblez, plegamiento pasivo y plegamiento por flexión (Figura 1; Biot 1961; Ramsay, 1967; Hudleston, 1973; Hudleston y Treagus, 2010; Fossen, 2016). El plegamiento por flexión suele ser importante, ya que muchas de las cuencas sedimentarias deformadas están afectadas por pliegues asociados con este mecanismo.

En la clase de Geología Estructural a nivel licenciatura y posgrado se suele enseñar los distintos mecanismos de generación de pliegues desde un punto de vista principalmente teórico y se complementa con observaciones directas en el campo. Sin embargo, sólo es posible ver el estado final de la formación de los pliegues. Esta condición dificulta a los alumnos visualizar el desarrollo de los pliegues desde su origen hasta su estado final. Así mismo, complica comprender el papel que tienen los mecanismos de plegamiento, en especial el de flexión. En este trabajo se presenta el programa computacional Chevron Folds que se ejecuta bajo el sistema operativo Windows® y permite mostrar de manera interactiva el desarrollo de pliegues tipo *chevron* formados a partir del mecanismo de deslizamiento por flexión, uno de los más importantes en los medios geológicos.

El programa Chevron Folds, toma en cuenta la propuesta de una filosofía de programación que incluye tres aspectos importantes en la enseñanza de fenómenos geológicos: 1) se basa en ecuaciones matemáticas que describen el fenómeno; 2) propone que el programa incluya relaciones entre las variables de interés mediante gráficos (x, y) así como una parte numérica donde se observe el cambio de ciertas variables (de salida) durante la corrida del programa, e 3) incluye un apartado donde se cambian de manera interactiva las variables de interés (de entrada) por parte del usuario. Además, incluye una animación del fenómeno a analizar.

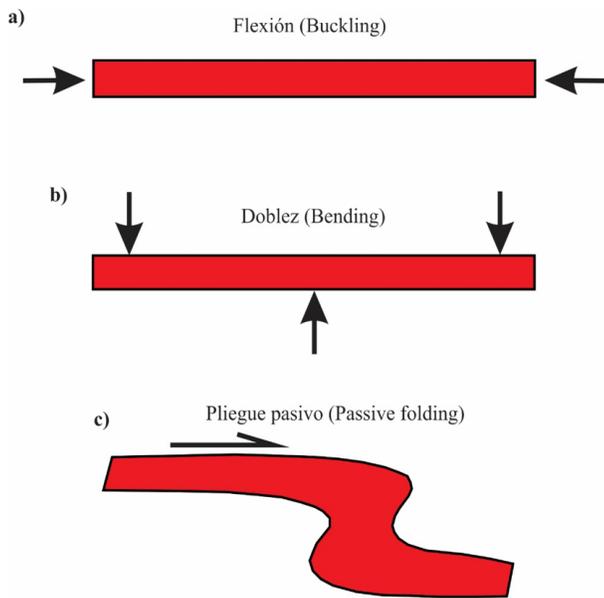


Figura 1. Mecanismos de formación de pliegues geológicos y su relación con las fuerzas aplicadas. a) Pliegues por flexión, b) pliegues por doblez y c) pliegues pasivos. (Tomado de Fossen, 2016).

Pliegues chevron

Los pliegues tipo *chevron* son estructuras con una geometría relativamente simple, tienen flancos planos, una zona de charnela estrecha y se forman bajo el mecanismo de plegamiento por flexión (Ramsay, 1967). El modelo de Ramsay (1974) considera que los pliegues *chevron* se forman en medios que tienen una anisotropía planar, por ejemplo en secuencias estratificadas donde se intercalan capas competentes (areniscas o calizas) e incompetentes (lutitas) o en rocas foliadas (Figuras 1 y 2). En las rocas foliadas, la anisotropía mecánica está dada por los planos de foliación y los sitios de contactos entre dichos planos (p. ej. filitas), o por variaciones mecánicas entre bandas cuarzo-feldespáticas y bandas de micas, como en el caso de los gneises (Ramsay, 1974; Bastida *et al.*, 2007).

La anisotropía planar ayuda a que los pliegues *chevron* se desarrollen a partir del deslizamiento entre las capas hasta un cierto límite llamado ángulo de bloqueo, donde ya no es posible continuar con dicho deslizamiento (De Sitter, 1956; Ramsay, 1967, 1974; Vásquez-Serrano *et al.*, 2019). El ángulo de bloqueo se adquiere a aproximadamente 60° del ángulo entre los flancos donde el mecanismo activo de flexión se detiene, aunque el desarrollo del pliegue puede continuar mediante otro mecanismo llamado aplastamiento (Ramsay, 1974; Bastida *et al.*, 2007; Vásquez-Serrano *et al.*, 2019).

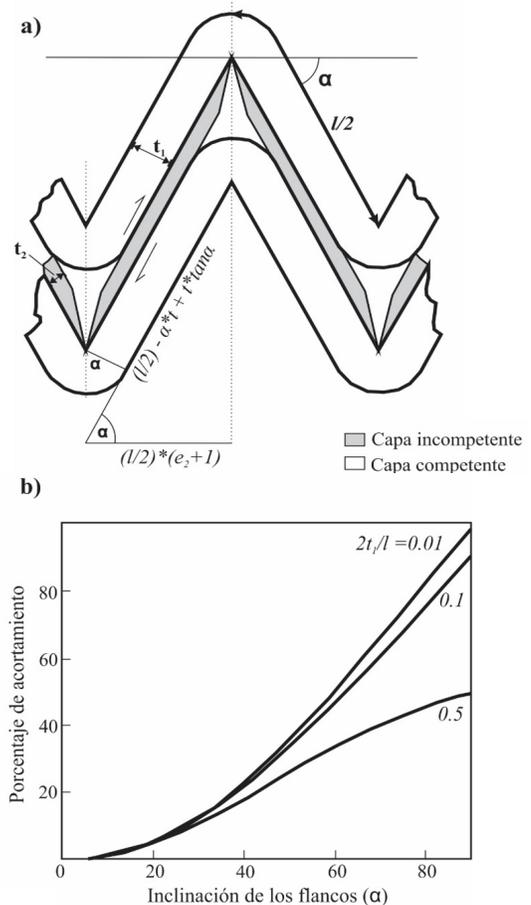


Figura 2. a) Modelo geométrico de pliegues tipo *chevron* según Ramsay (1974). b) Variación de la cantidad de acortamiento, dada en porcentaje, en función del ángulo de inclinación de los flancos. Figura tomada y modificada de Ramsay (1974).

En algunos casos, los pliegues *chevron* tienen un plano axial inclinado e incluso pueden ser recumbentes (plano axial horizontal). Esta geometría se adquiere por una cizalla sobrepuesta que rota los pliegues en el sentido de dicha cizalla. A pesar de esta rotación, la cantidad de acortamiento por flexión no se ve afectada y representa una parte del acortamiento total que registran las rocas en un sistema orogénico; la otra parte se acomoda a través de deslizamiento por cizalla (Fitz-Díaz *et al.*, 2012).

Además de los pliegues *chevron*, existen otro grupo de pliegues que también tienen una geometría angular y se desarrollan en rocas con anisotropía planar, llamados pliegues *kink*. A diferencia de los pliegues *chevron* (pliegues Clase 1B en la clasificación de Ramsay, 1967), los pliegues *kink* son altamente asimétricos y son principalmente Clase 2 (Ramsay, 1967; Fossen 2016). Una diferencia importante entre ambos pliegues es la relación angular entre el plano axial y la dirección de acortamiento. En los pliegues *chevron* el plano axial es perpendicular a la dirección de acortamiento desde su inicio; en los pliegues *kink*, el plano axial es oblicuo a la dirección de acortamiento y forman pares conjugados. En experimentos analógicos se ha observado que con un acortamiento de ~50 % los pares conjugados de pliegues *kink* se pueden juntar y formar pliegues *chevron*. Sin embargo, en la naturaleza no existen pliegues *kink* que registren un 50 % de acortamiento. Esto sugiere que esta forma de generar pliegues *chevron* no es la más común (Fossen, 2016). En pliegues *chevron* naturales el acortamiento registrado por el mecanismo de flexión es de alrededor de 45 % (Vásquez-Serrano *et al.*, 2019), el cual es inferior al sugerido en los experimentos analógicos donde se forman pliegues *chevron* a partir de pliegues *kink*. Esta observación apoya la idea de que la unión de bandas conjugadas de pliegues *kink* no es el mecanismo de formación de pliegues *chevron*.

Deslizamiento por flexión (flexural slip)

El mecanismo de deslizamiento por flexión (*flexural slip*) es importante en el desarrollo de pliegues dentro de las sucesiones estratificadas, las cuales son principalmente asociadas con cuencas sedimentarias (Tanner, 1989). Este mecanismo acomoda la deformación dentro de los pliegues mediante el deslizamiento entre las capas en los flancos y su doblez en la zona de la charnela (Figura 2). Dentro de las capas competentes la deformación se acomoda a través de cizalla simple en los flancos (flujo flexural), y sin deformación en la zona de la charnela. Sin embargo, en las capas competentes se ha observado deformación mediante cizalla pura (extensión y acortamiento), a través del mecanismo de deformación tangencial longitudinal (Ramsay, 1967, 1974; Bastida *et al.*, 2007).

El deslizamiento por flexión genera una serie de estructuras relacionadas con el desarrollo de los pliegues. Algunas de estas estructuras son el desarrollo de clivaje (*cleavage*) paralelo al plano axial y fracturas escalonadas oblicuas a la estratificación en las capas competentes (Figura 3) (Ramsay, 1967, 1974). Así mismo, es posible el desarrollo de zonas de cizalla en las capas incompetentes, donde puede observarse foliación sigmoidal, crecimiento de fibras de calcita o cuarzo hacia el sentido de la cizalla y formación de estrías (Ramsay, 1974; Bastida *et al.*, 2007) (Figura 3).

Programa Chevron Folds

Para entender el papel que tiene el mecanismo de deslizamiento por flexión, se diseñó un programa en Visual Basic 6® tomando como base el modelo de desarrollo de pliegues *chevron* de Ramsay (1974). Este modelo plantea que el deslizamiento por flexión es el principal responsable en la formación de este tipo de pliegues. El programa considera los siguientes aspectos:

- Se examina el mecanismo de deslizamiento por flexión a través del análisis geométrico del modelo de Ramsay (1974).
- El programa presenta dos gráficas que muestran la variación de la cantidad de acortamiento (que acomoda el pliegue) y el deslizamiento entre las capas en función del ángulo de inclinación de los flancos.
- Las variables de entrada son el espesor de las capas (t_1 y t_2), la longitud de las capas (l) y el ángulo de inclinación de los flancos [Ángulo (*Dip*)]. Es posible cambiar esta última variable de manera interactiva a través de una barra de desplazamiento lateral.
- Se consideran como variables de salida el acortamiento (%), la relación entre el espesor de la capa competente y la longitud del flanco (t_1/l_1), la longitud de onda (W_a) y el deslizamiento total entre las capas (*Slip*).
- El programa asume que los pliegues *chevron* son simétricos y con plano axial vertical.
- En secuencias estratificadas, se considera que la capa incompetente (ya sea la de arriba o la de abajo) es vecina de la capa competente con el espesor más grueso (t_1) ya que esta capa competente determina la cantidad de acortamiento que acomodan los pliegues (Ramsay, 1974).

El ejecutable del programa Chevron Folds puede descargarse desde el siguiente enlace o contactando al autor:

<https://drive.google.com/drive/folders/1Lx2MAAdnOTvMILDEQ2RxIWzESR6YWuW3?usp=sharing>

Desarrollo de pliegues *chevron* mediante deslizamiento por flexión

Algunos autores (Ramsay, 1967, 1974; Tanner, 1989) sugieren que el deslizamiento por flexión es el principal mecanismo de formación de los pliegues *chevron*. El programa Chevron Folds simula la formación de los pliegues *chevron* bajo este mecanismo. Los datos de entrada necesarios para cada simulación son el espesor (t_1 y t_2) y la longitud de las capas (l ; Figura 4). El espesor y la longitud no tienen una unidad específica en el programa, pero podrían ser milímetros, metros, pulgadas u otra unidad de longitud. El rango de valores que puede tener el espesor está entre 0.1 y 10, aunque se recomienda que el espesor máximo sea 2 y el mínimo sea 0.5. En cuanto a la longitud de la capa, se recomiendan valores de entre 10 y 20.

Una vez que se establece el espesor y la longitud de las capas, el siguiente paso es presionar los botones de la barra de desplazamiento lateral (Figura 4). Al dar *click* en la flecha de la derecha se incrementará el valor del ángulo de inclinación de los flancos del pliegue, mientras que si se da *click* en la flecha izquierda el ángulo disminuirá. Con cada incremento en el ángulo de inclinación de los flancos se va construyendo el pliegue tipo *chevron* mediante deslizamiento por flexión. Bajo este mecanismo, se adquiere desde el inicio una geometría de flancos planos y zona de charnela estrecha. Los pliegues que se generan son paralelos (clase

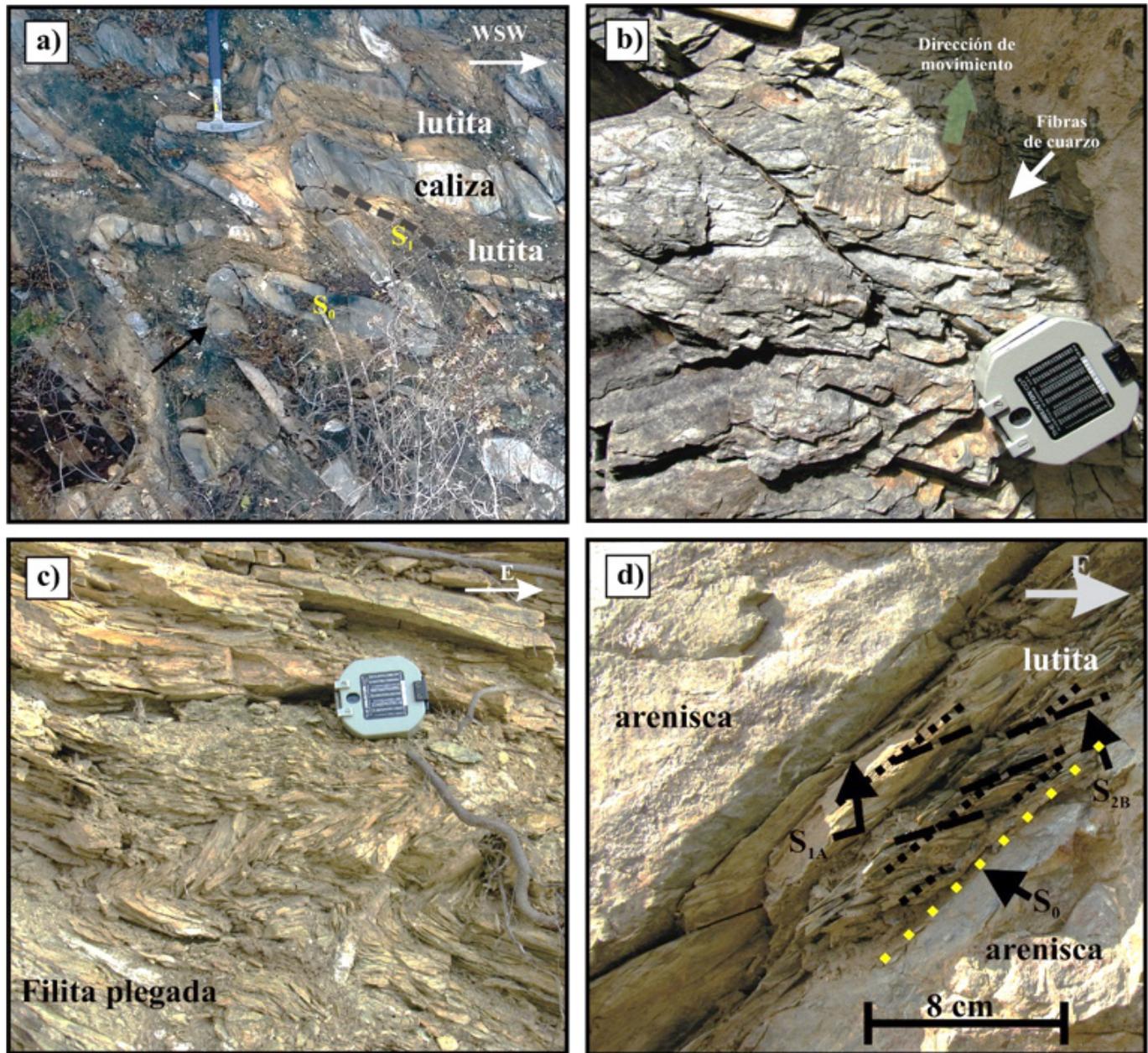


Figura 3. Fotografías de afloramientos de rocas mesozoicas dentro del Orógeno Mexicano en la región de la Sierra Gorda de Querétaro, centro de México. a) Pliegues tipo *chevron* en rocas estratificadas de la Formación Tamaulipas (Aptiano-Albiano); b) fibras de crecimiento de cuarzo y estrías en areniscas (Formación El Chilar) del Triásico tardío en el flanco de un pliegue sinforme tipo *chevron*; c) pliegues *chevron* en rocas foliadas (filita) del Cretácico temprano de la Formación San Juan de la Rosa; d) foliación en capas incompetentes (lutita) relacionada con pliegues dentro de una sucesión de capas de areniscas y lutitas de la Formación El Chilar (Triásico tardío).

1B en la clasificación de Ramsay, 1967) donde el espesor de la capa competente es constante a lo largo de la estructura (Ramsay, 1974).

Si se mantiene presionada la flecha derecha de la barra de desplazamiento lateral, es posible ver la animación continua del desarrollo del pliegue *chevron*. Así mismo, es posible retrodeformar el pliegue a su geometría inicial o en cualquier punto de su desarrollo con solo mantener presionada la flecha izquierda (disminuyendo el ángulo de inclinación de los flancos).

Variación del deslizamiento entre capas y acortamiento total en función de la inclinación de los flancos

Acompañando la animación de la formación y desarrollo del pliegue tipo *chevron*, el programa también incluye el cálculo de algunas variables como el deslizamiento total entre las capas (*Slip*), la longitud de onda ($W\lambda$), la relación entre el espesor y la longitud de la capa (t_1/l_2), y la cantidad de acortamiento dada en porcentaje (%e).

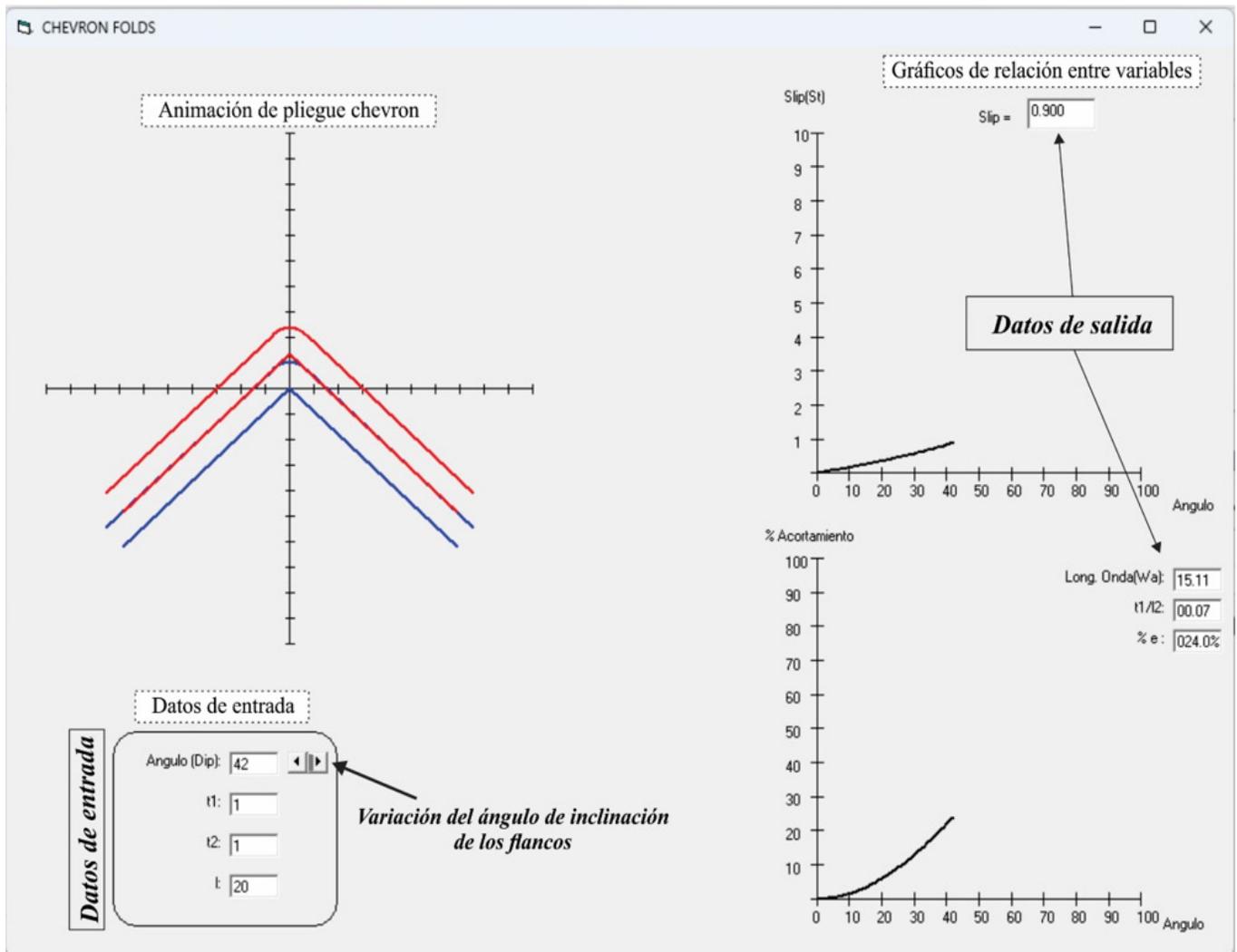


Figura 4. Pantalla principal de Chevron Folds y elementos que integran a dicho programa. Nótese la inclusión de gráficos, datos de entrada y salida, así como animación del desarrollo del pliegue.

El modelo geométrico de Ramsay (1974) sugiere que después de cierta cantidad de acortamiento, las capas situadas en cada flanco adquieren cierto ángulo de inclinación (α). Sobre el flanco del pliegue, el deslizamiento total entre las capas (S) está dado por la siguiente ecuación donde t_1 y t_2 son los espesores de las capas.

$$S = (t_1 + t_2) \tan \alpha$$

En el caso de la cantidad de acortamiento, el modelo de Ramsay (1974) toma en cuenta la longitud del flanco ($l/2$ o l_2 en el programa), el ángulo de inclinación de los flancos (α) y el espesor de la capa competente (t_1). A partir de estas variables, y tomando en cuenta la relación trigonométrica de la Figura 2, se obtiene la siguiente ecuación para el cálculo del acortamiento.

$$\% e = \left(\left(\left(1 - \frac{2at_1}{l} \right) \cos \alpha + t_1 \sin \frac{2\alpha}{l} \right) - 1 \right) * 100$$

El programa Chevron Folds cuenta con dos gráficos que muestran la variación del acortamiento ($\%e$) y el deslizamiento total entre capas (S) en función del ángulo de inclinación del flanco [Ángulo (Dip)]. Estas gráficas en conjunto con la animación y los valores numéricos ayudan en gran medida a un entendimiento integral del mecanismo de deslizamiento por flexión (Figura 3).

Ejercicio de aplicación del programa Chevron Folds en la clase de Geología Estructural

Como parte de la aplicación del programa Chevron Folds, se diseñó un ejercicio simple para su uso en la clase de Geología Estructural tomando en cuenta el pliegue tipo *chevron* de la figura 26a del artículo de Ramsay (1974). Los alumnos requieren el programa Imagen J® (software de análisis de imágenes de acceso libre: <https://imagej.net/ij/>) para medir el espesor y longitud de las capas así como el ángulo de inclinación de los flancos, considerando que el pliegue es simétrico con plano axial vertical. Para casos en los que el plano axial está inclinado o es un sinforme, como en el caso de la figura 26a del artículo de Ramsay (1974), se recomienda rotarlo

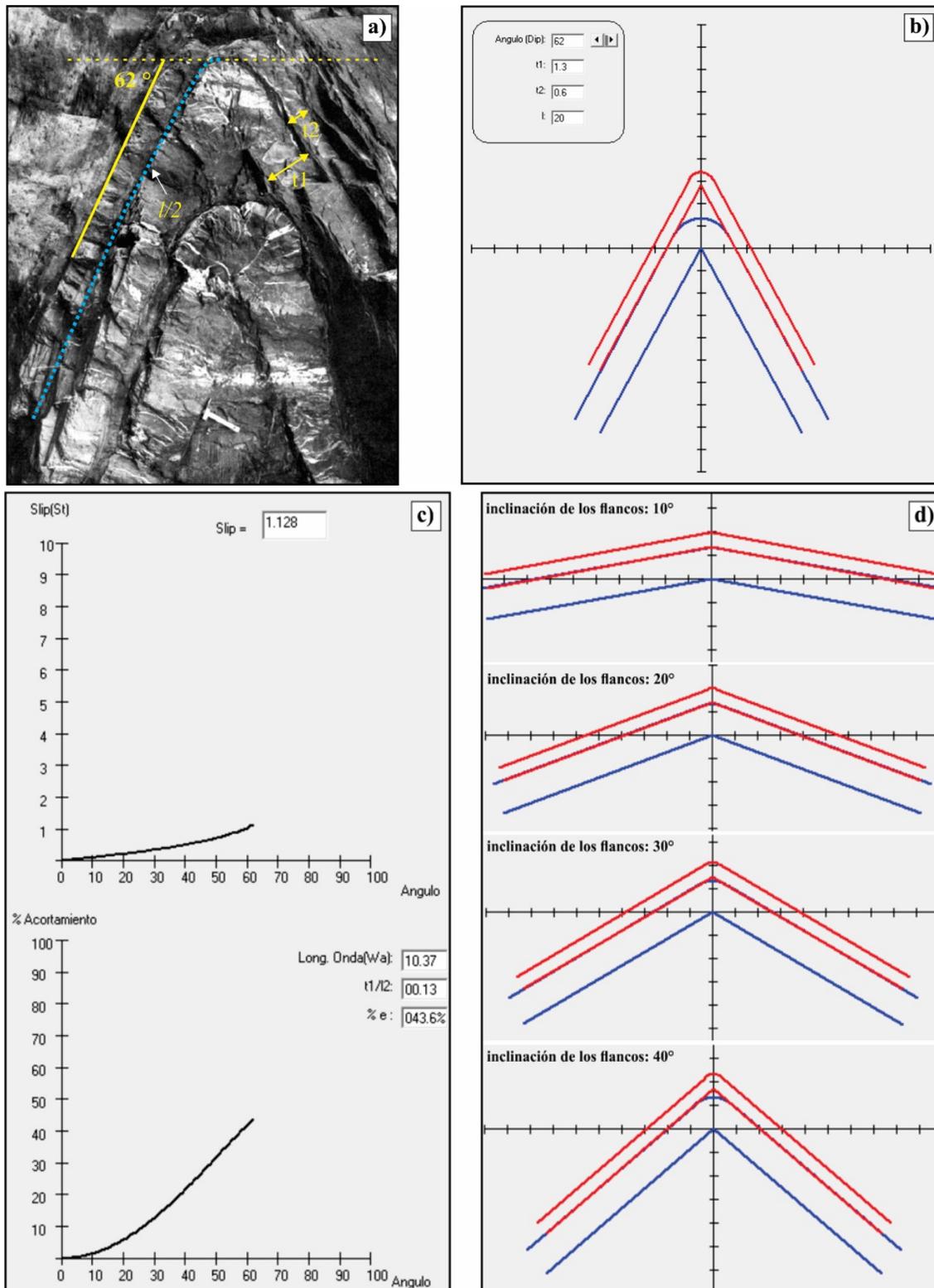


Figura 5. Ejemplo del uso del programa Chevron Folds para el análisis de pliegues naturales. a) Pliegue tipo *chevron* en areniscas de *Culm Series* en Milook, Inglaterra (tomado de Ramsay, 1974). b) Generación de pliegue *chevron* de *Culm Series* en el programa Chevron Folds. Para su reproducción se usaron los valores que se observan en la parte superior izquierda. Si consideramos una longitud máxima de 10 para los flancos, los espesores relativos a esta longitud son $t_1=1.3$ y $t_2=0.6$. Así mismo, se midió una inclinación de los flancos de 62° . c) Gráficos de deslizamiento entre los flancos (*Slip*) y acortamiento en función del ángulo de inclinación de los flancos para las condiciones dadas en el inciso b. d) Evolución del pliegue tipo *chevron* de la fotografía de Ramsay (1974) a partir de la variación del ángulo de inclinación de los flancos. **Nota:** El pliegue *chevron* de *Culm Series* originalmente era un sinforme con plano axial inclinado por lo que, para el ejercicio, se rotó hasta tener un antiforme con plano axial vertical.

a la vertical y ponerlo como antiforme. Una vez que se tienen los datos del pliegue natural se ingresan en el programa Chevron Folds. Con esta acción es posible reproducir la geometría del pliegue, conocer el valor de las variables de salida (deslizamiento entre las capas, cantidad de acortamiento) y visualizar su evolución variando el ángulo de inclinación de los flancos (Figura 5).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El mecanismo de deslizamiento por flexión suele ser uno de los más importantes en la formación de los pliegues tipo *chevron*. Su entendimiento por parte de los alumnos de Ciencias de la Tierra es esencial para su formación profesional. El programa Chevron Folds tiene el propósito de mostrarle al usuario la manera en que un pliegue se desarrolla a partir del mecanismo de deslizamiento por flexión. Así mismo, es posible monitorear la variación de algunas variables (deslizamiento entre las capas, cantidad de acortamiento, longitud de onda) en función de la inclinación de los flancos, lo cual permite conectar dicho cambio con el desarrollo del pliegue.

El programa también permite conocer dos aspectos importantes en la evolución de los pliegues tipo *chevron*. Por un lado, es posible observar que bajo condiciones de alta deformación (alto porcentaje de acortamiento) el mecanismo de deslizamiento por flexión no explica la geometría de los pliegues naturales después del umbral del ángulo de bloqueo (~60°). Esto es fundamental, ya que a los alumnos les permite comprender que deben existir otros mecanismos que actúen en el desarrollo de los pliegues, como lo sugiere Bastida *et al.* (2007). Adicionalmente, el programa ayuda a conocer la evolución de pliegues *chevron* naturales a partir de la medición en el campo del espesor y longitud de las capas, así como el ángulo de inclinación de los flancos. Con estos datos se puede determinar la cantidad de desplazamiento que hay entre las capas y el acortamiento que acomodan los pliegues.

Tanto el programa Chevron Folds como el ejercicio propuesto para entender el desarrollo de los pliegues *chevron* naturales pueden ser de gran utilidad en la enseñanza de los pliegues geológicos y sus mecanismos de formación en las clases de Geología Estructural. El programa aún sigue en construcción pero puede ser usado para la enseñanza o en el desarrollo de investigación sobre deformación en sistemas orogénicos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco las interesantes pláticas sobre pliegues geológicos con el Dr. Gustavo Tolson Jones que inspiraron la presente contribución. Así mismo, agradezco los comentarios valiosos de los revisores, quienes contribuyeron a mejorar el manuscrito.

REFERENCIAS

Bastida, F., Aller, J., Toimil, N. C., Lisle, R. J. y Bobillo-Ares, N. C. (2007). Some considerations on the kinematics of chevron folds. *Journal of Structural Geology*, 29(7), 1185-1200. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.03.010>

- Biot, M. A. (1961). Theory of folding of stratified viscoelastic media and its implications in tectonics and orogenesis. *Geological Society of America Bulletin*, 72(11), 1595-1620. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[1595:TOFOSV\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[1595:TOFOSV]2.0.CO;2)
- De Sitter, L. U. (1956). The strain of rock in mountain-building processes. *American Journal of Science*, 254(10), 585-604. <https://doi.org/10.2475/ajs.254.10.585>
- Fossen, H. (2016). *Structural geology*. Cambridge university press.
- Fitz-Díaz, E., Tolson, G., Hudleston, P., Bolaños-Rodríguez, D., Ortega-Flores, B. y Vásquez-Serrano, A. (2012). The role of folding in the development of the Mexican fold-and-thrust belt. *Geosphere*, 8(4), 931-949. <https://doi.org/10.1130/GES00759.1>
- Hudleston, P. J. (1973). An analysis of "single-layer" folds developed experimentally in viscous media. *Tectonophysics*, 16(3-4), 189-214. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(73\)90012-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(73)90012-7)
- Hudleston, P. J. y Treagus, S. H. (2010). Information from folds: A review. *Journal of Structural Geology*, 32(12), 2042-2071. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.08.011>
- Ramsay, J. G. (1967). *Folding and fracturing of rocks*. Mc Graw Hill Book Company, 568.
- Ramsay, J. G. (1974). Development of chevron folds. *Geological Society of America Bulletin*, 85(11), 1741-1754. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1974\)85<1741:DOCF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1974)85<1741:DOCF>2.0.CO;2)
- Ramsay, J. G., Huber, M. I. y Lisle, R. J. (1983). *The techniques of modern structural geology: Folds and fractures* (Vol. 2). Academic press.
- Tanner, P. G. (1989). The flexural-slip mechanism. *Journal of Structural Geology*, 11(6), 635-655. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90001-1](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90001-1)
- Vásquez-Serrano, A., Tolson, G., Fitz-Díaz, E. y Hudleston, P. (2019). Estimación de acortamiento en pliegues chevron que han experimentado deformación post flexión. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 36(3), 348-356. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2019.3.1493>

Manuscrito recibido: 1 de abril de 2025

Manuscrito corregido recibido: 22 de mayo de 2025

Manuscrito aceptado: 3 de junio de 2025