



Aplicación del modelo cinemático *Trishear* a plegamiento por propagación de falla: nuevos resultados obtenidos a través de modelado analógico en 2D

Berenice PLOTEK¹, Cecilia GUZMÁN¹, Ernesto CRISTALLINI¹, Daniel YAGUPSKY¹ y Rodrigo SUAREZ²

¹ Laboratorio de Modelado Geológico (LaMoGe), Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber" (IDEAN), Universidad de Buenos Aires-CONICET, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

² Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología (IIPG), Universidad Nacional de Río Negro-CONICET, General Roca, Argentina.

E-mail: berenice@gl.fcen.uba.ar, cguzman@gl.fcen.uba.ar, ecristallini@gl.fcen.uba.ar, daniely@gl.fcen.uba.ar, rjsuarez@unrn.edu.ar

Editor: José F. Mescua

Recibido: 20 de enero de 2023

Aceptado: 20 de abril de 2023

RESUMEN

Comprender la mecánica, geometría y cinemática del plegamiento por propagación de falla se ha convertido en un importante campo de investigación. En particular, los experimentos de laboratorio han proporcionado información útil, ya que permiten observar en tiempo real el desarrollo progresivo del plegamiento. En esta oportunidad, se realiza un modelo análogo en 2D para, en primer lugar, estudiar el campo de velocidad durante el plegamiento por propagación de falla, y luego, poder compararlo con los propuestos por el modelo teórico-cinemático *Trishear*. Para ello, empleamos una técnica basada en correlación óptica de imágenes que no es destructiva (PIV, particle image velocimetry). A través de este procesamiento, pudimos obtener perfiles de velocidad, tanto paralelos como perpendiculares a la falla, durante las diferentes etapas del desarrollo del experimento. En este sentido, los vectores de velocidad del bloque colgante exhiben una disminución gradual en la componente paralela a la falla hacia el bloque yacente, mientras que la componente perpendicular a la falla se vuelve negativa, lo que se ajusta bien con el modelo cinemático *Trishear*. Además, comparamos la geometría del pliegue modelado en laboratorio con las geometrías de pliegue predichas por el modelo *Trishear* para varios ángulos apicales, así como también, probamos que *Backlimb Trishear* proporciona una aproximación útil del campo de velocidad en el experimento.

Palabras clave: Modelo cinemático *Trishear*, Modelo analógico en 2D, Correlación óptica de imágenes, Plegamiento por propagación de falla, *Trishear* de limbo dorsal.

ABSTRACT

Testing the application of the Trishear kinematic model for fault-propagation folding: Results from 2D analogue model.

Understanding the mechanics, geometry, and kinematics of fault-propagation folding has become a major research field. Laboratory experiments have provided useful insights because they allow observing in real-time the progressive development of folding. We perform 2D analogue modelling to study the velocity field during fault-propagation folding and compare it with those proposed by the *Trishear* kinematic model. In this regard, we employ the non-intrusive, particle image velocimetry (PIV) technique to obtain both fault-parallel and fault-perpendicular velocity profiles during different stages of experiment development. Hanging wall vectors reveal a gradual decrease in the parallel component of velocity towards the footwall, while the perpendicular component turns negative, fitting well with the *Trishear* kinematic model. In addition, we compare the observed fold shape to the fold shapes predicted by the *Trishear* model for various apical angles and prove that *Backlimb Trishear* provides a useful approximation of the velocity field of the

experiment. Although some researchers have investigated the kinematic field of fault-propagation folds using numerical models, fewer studies have addressed this issue using physical models. The present research explores the application of the *Trishear* method to fault-propagation folds based on analogue simulations.

Keywords: Kinematic *Trishear* Model, 2D analogue model, Particle image velocimetry, Fault-propagation folding, Backlimb *Trishear*.

INTRODUCCIÓN

El concepto de plegamiento por propagación de fallas implica una falla inversa/corrimiento que se propaga hacia arriba y forma un pliegue a expensas de consumir el deslizamiento (Suppe y Medwedeff 1984, 1990). En la mayoría de los casos, la geometría del pliegue que se forma es asimétrica con su limbo frontal empinado o volcado, y el limbo dorsal con una inclinación suave (Fig. 1, Suppe y Medwedeff 1990, Shaw et al. 2005, Brandes y Tanner 2014). Las primeras propuestas de modelos cinemáticos para balancear estas estructuras se basaron en relaciones geométricas (Suppe y Medwedeff 1990, Saffar 1993) con geometrías ideales implícitas, es decir, la falla es plana, el limbo dorsal es paralelo a la rampa y los ejes del pliegue son apretados con charnelas angulares (Woodward 1997, Jabbour et al. 2012). Estas geometrías de pliegues autosimilares (Suppe y Medwedeff 1990, Saffar 1993) son útiles para comparar con ejemplos naturales, pero no logran predecir los patrones de deformación observados, ya que imponen una deformación homogénea dentro de cada dominio de buzamiento (p. ej., Allmendinger et al. 2004). Asimismo, se han propuesto otros modelos para explicar la geometría de los pliegues por propagación de falla (Wallace y Homza 2004), como el de ángulo variable de interlimbo (Mitra 1990, Mitra y Mount 1998) o el modelo mecánico de pliegues forzados (Johnson y Johnson 2002).

El modelo cinemático *Trishear* fue inicialmente desarrollado por Erslev (1991), el cual teóricamente involucra una zona triangular de cizallamiento que irradia desde la terminación de la falla (Fig. 1b). En este modelo, la deformación por cizalla se concentra en la zona triangular, mientras que las partículas en el bloque colgante solo se deforman por traslación y permanecen principalmente fijas en el bloque yacente (Fig. 1b). El modelo *Trishear* permite reproducir varias características de los pliegues por propagación de falla que se observan en la naturaleza (Fig. 1a), como la presencia de sinclinales en el bloque yacente, variaciones en el espesor de las capas hacia la falla (Allmendinger 1998, Hardy y Ford 1997, Cardozo y Aa-nonsen 2009, Hardy y Allmendinger 2011, Brandes y Tanner 2014) y patrones de deformación heterogéneos (Cristallini y Allmendinger 2001, Allmendinger et al. 2004, Liu et al. 2012, Grothe et al. 2014).

Zehnder y Allmendinger (2000) introdujeron un método general para la derivación de campos de velocidad consistente con la cinemática básica del modelo *Trishear*. Luego, Cardozo et al. (2003) realizaron la primera comparación entre modelos mecánicos de elementos finitos de plegamiento por propagación de falla y el método *Trishear*. Además, las simulaciones de elementos discretos sugieren que el *Trishear* es esencialmente una expresión de la homogeneidad de la secuencia de cobertura (Hardy y Finch 2007).

El modelo *Trishear* aplicado al limbo dorsal (Cristallini y Allmendinger 2002) es conceptualmente análogo al modelo *Trishear* convencional (Erslev 1991, Allmendinger 1998), ya que aplica ecuaciones de conservación de área similares a las derivadas para *Trishear* de limbo frontal (Zehnder y All-

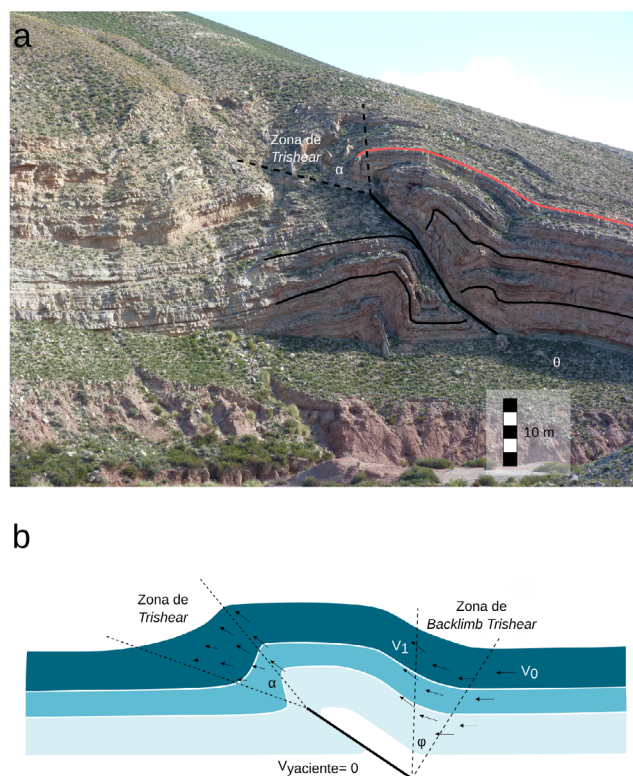


Figura 1. a) Pliegue por propagación de falla desarrollado en las areniscas del Subgrupo Pirgua, en la Provincia de Jujuy, Argentina; b) Ejemplo de pliegue por propagación de falla, modelado con el método de *Trishear* en el limbo frontal y aplicando *Backlimb Trishear* en la zona dorsal (modificado de Cristallini y Allmendinger, 2002). Ambos limbos presentan zonas de cizalla triangular. Sin embargo, en el limbo dorsal el ápice de la zona triangular se ubica en el quiebre de la falla, mientras que en el limbo frontal el *Trishear* se expande desde la terminación de la falla principal. En ambos casos, el espesor de las capas no se conserva.

mendinger 2000). En este caso, las ecuaciones se aplican al material por encima de un quiebre en la falla (p. ej., Plotek et al. 2021). Esto permite tanto la rotación progresiva de los limbos sobre un quiebre angular del plano de falla (Fig. 1b) como la generación de charnelas curvas. Dado que el área de rotación se modela como una zona triangular que irradia desde el quiebre de la falla (Fig. 1), la curvatura de las capas disminuye alejándose de la falla (Cristallini y Allmendinger 2002).

A pesar de que varios modelos mecánicos comparan los campos de velocidad y deformación resultantes del plegamiento por propagación de falla (Cardozo et al. 2003, Hardy y Finch 2007, Cardozo et al. 2011, Hughes y Shaw 2015, Zhao et al. 2017), solo algunos artículos abordan este aspecto a partir de modelos análogos (Mitra y Miller 2013, Bonanno et al. 2017). Por lo tanto, realizamos experimentos de laboratorio que simulan un plegamiento por propagación de falla para extraer el campo de velocidad durante la evolución de la estructura empleando la técnica de correlación óptica de imágenes (PIV, *particle image velocimetry*) (Sveen 2004, Thielicke y Stamhuis 2014). A partir de la obtención del campo de velocidad, se analizan las relaciones entre las componentes vertical y horizontal al plano de falla de los vectores de velocidad. Luego, al comparar el campo de velocidad medido en el modelo análogo con el *Trishear* predicho teóricamente, concluimos que el modelo *Trishear* se aproxima a la cinemática y la geometría resultantes del experimento análogo.

METODOLOGÍA

El propósito de nuestro modelado análogo es analizar cómo evoluciona el campo de velocidad durante la formación del pliegue por propagación de falla. Para cumplir con este objetivo, los vectores de desplazamiento que representan el campo de velocidad son calculados mediante la correlación de una secuencia de fotografías. Por lo tanto, nos enfocamos en los diferentes dominios del campo cinemático y sus cambios relativos durante la evolución del pliegue por propagación de falla, sin tener en cuenta los valores absolutos de los vectores de velocidad. El análisis óptico de las fotografías fue realizado con PIV. Esta técnica utiliza fotografías tomadas por una cámara, en nuestro caso, posicionada en una vista lateral de los experimentos (Adam et al. 2002, Sveen 2004, Thielicke y Stamhuis 2014, Krýza et al. 2019). Este método identifica patrones únicos de píxeles en las secuencias de imágenes, detectando diferencias que se atribuyen al movimiento, y luego se trazan los vectores de desplazamiento. A continuación, se describen con mayor detalle los modelos análogos.

Configuración experimental

Los modelos análogos implementados en este trabajo se basan en el modelo cinemático *Trishear*, tal como lo introdujo Erslev (1991). Este autor notó en las Montañas Rocosas (Norteamérica) que amplias zonas de plegamiento en niveles estructurales someros se contraen hacia abajo en zonas de fallas limitadas que separan bloques de basamento con deformación de penetración menor. Las estructuras mencionadas involucran sucesiones estratificadas y plegadas que cubren rocas del basamento afectadas por fallamiento, evidenciando un fuerte contraste mecánico entre ambos materiales.

Los experimentos se realizaron en una caja con paredes de acrílico de 55 cm x 15 cm de largo y ancho, respectivamente. Uno de los lados de la caja es empujado con un pistón, comprimiendo los materiales dentro de la caja (Fig. 2).

Para imitar el contraste mecánico descrito en el modelo de Erslev (1991), empleamos arena y pasta de azúcar simulando el basamento rígido y la cubierta sedimentaria plegada con comportamiento dúctil (p. ej., lutitas o evaporitas), respectivamente (Figs. 2a, 3). En experimentos análogos homogéneos, se utilizan materiales dúctiles como la arcilla para crear estructuras similares a las obtenidas por el método *Trishear* (Guohai y Groshong 2006, Bonanno et al. 2017).

La arena es un material friccional utilizado frecuentemente en experimentos análogos para simular el comportamiento mecánico frágil (tipo Coulomb) de la corteza superior (Hoth et al. 2006, Panien et al. 2006, Cristallini et al. 2009, Perrin et al. 2013, Li y Mitra 2017, Sun et al. 2018, Zanon y Gomes 2019, Darnault y Hill 2020). Por este motivo, la base de la caja se rellena con arena de cuarzo (con tamaño de grano <860 μm , forma angular, densidad = 1.65 g/cm^3). El espesor de esta capa es de aproximadamente 9 cm (Fig. 2a). A esta capa basal de arena se le inserta una lámina de plástico rígido para inducir la falla que inclina 45° hacia la pared que empuja el pistón (es decir, la pared móvil). En este experimento, la lámina rígida mide 11 cm de largo por 15 cm de ancho (ancho total de la caja) y está ubicada a 23 cm del pistón (Fig. 2a). Sobre este paquete basal, se tamizaron láminas de arena coloreada de 0.5 cm (mismas propiedades que la arena basal) en la caja de acrílico, formando una capa de hasta 2.5 cm de espesor (Fig. 2a).

Dado que el modelo análogo pretende reproducir estratos plegados de una cobertura sedimentaria que no presenta fallamiento interno, empleamos láminas cohesivas de pasta de azúcar de 5 mm de espesor sobre la capa de arena, alcanzando un espesor total de 2.5 cm (Fig. 2a). Para representar rocas sedimentarias de baja densidad aparente, la densidad de la pasta de azúcar ($\rho_{pa} = 1.27 \text{ g}/\text{cm}^3$) es menor que la den-

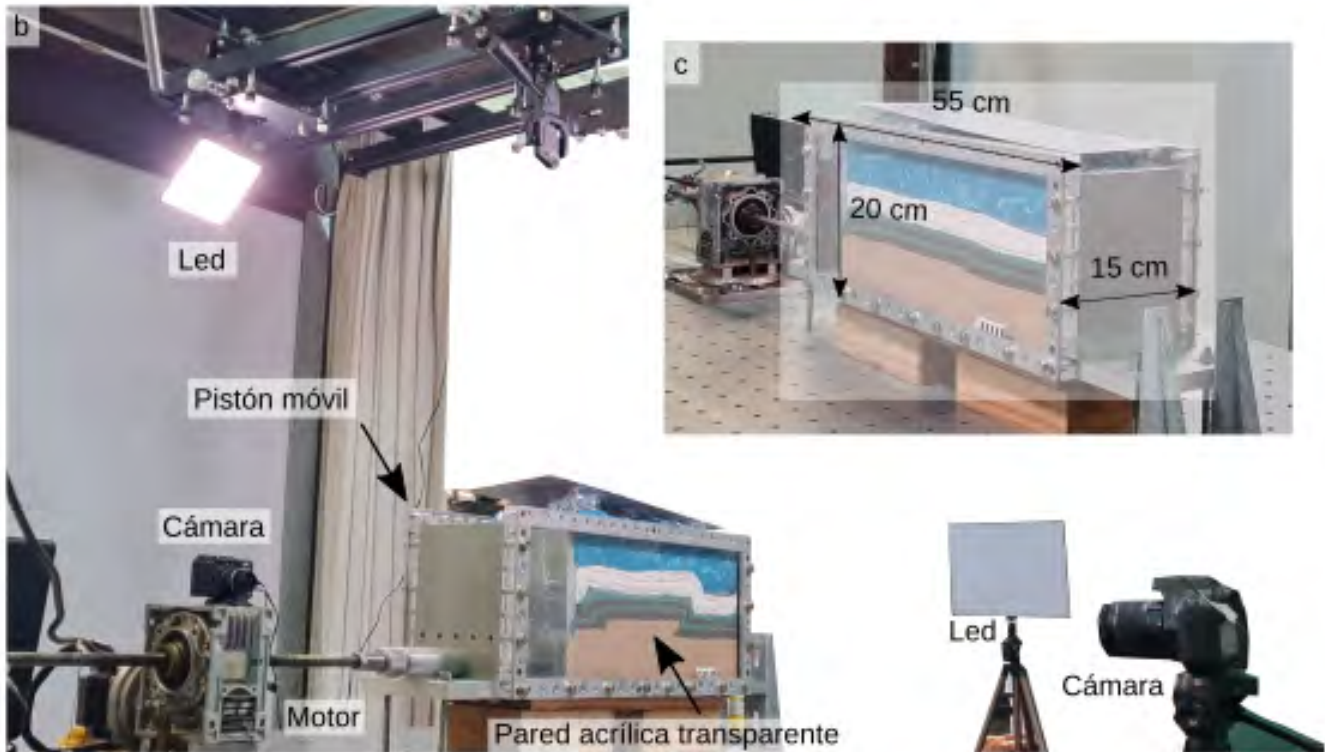
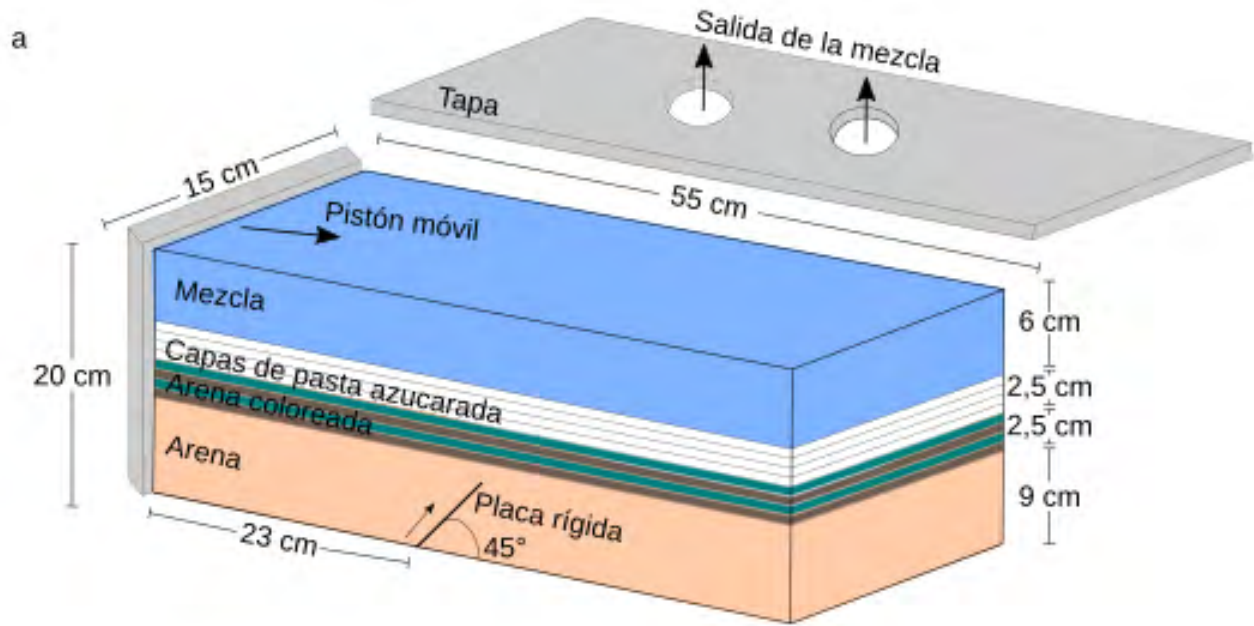


Figura 2. a) Configuración experimental. La flecha en la esquina superior izquierda indica la dirección de movimiento impuesta por el pistón móvil; b) Fotografía que exhibe la posición de las cámaras, leds y la caja de paredes acrílicas donde se realiza el modelo; c) Fotografía detallada de la caja que se utiliza para el armado de los experimentos.

sidad de la arena utilizada (1.65 g/cm^3). La viscosidad de la pasta de azúcar es $\sim 2.2 \times 10^7 \text{ Pa s}$ (Plotek et al. 2021).

Sobre la pasta de azúcar colocamos una mezcla constituida por sal, harina y agua (Fig. 2a) ($\rho_d \sim 1.29 \text{ g/cm}^3$ y viscosidad $\sim 1.2 \times 10^5 \text{ Pa s}$). Esta mezcla no pretende representar un material análogo, sino que se emplea para evitar que la pasta

de azúcar se separe de la arena. Este enfoque experimental no afecta la evolución del campo cinemático, ya que solo se utiliza para comprimir todo el modelo, aumentando la presión vertical sobre las láminas de azúcar (Bazalgette y Petit 2007), y haciendo que las capas de pasta de azúcar se acomoden plegándose al movimiento de la arena. A medida que se cierra

la caja, la mezcla permite un aumento de la presión de confinamiento. De esta forma, podríamos aproximarnos a la forma de la estructura de pliegues de Erslev (1991) (Fig. 3).

La evolución del pliegue se monitorea por medio de dos cámaras ubicadas perpendicularmente a la dirección de desplazamiento del pistón, tomando fotografías laterales a intervalos de 1 min (Fig. 2b). Cabe destacar que ensayos previos fueron seccionados y comparados con las vistas laterales, concluyendo que la deformación observada a través de las paredes laterales de la caja es representativa de la deformación que ocurre internamente dentro de los modelos, por lo que, se puede garantizar la condición de deformación plana.

Luego, las fotografías fueron analizadas para obtener vectores cinemáticos por la técnica PIV utilizando el software de código abierto PIVlab™ (Thielicke y Stamhuis 2014, Thielicke y Sonntag 2021). Este *software* realiza una correlación de imágenes sucesivas al comparar la posición de un área específica en una imagen con la posición del área en imágenes posteriores, implementando algoritmos de correlación de imágenes (Adam et al. 2005, Louis et al. 2007, Thielicke y Stamhuis 2014, Rudolf et al. 2019). El modelo se comprimió durante 30 minutos a 8.5 cm/h (ver apartado de escalado), alcanzando un acortamiento total de 4.2 cm (7.6 % de acortamiento), y en efecto, formando un pliegue por propagación

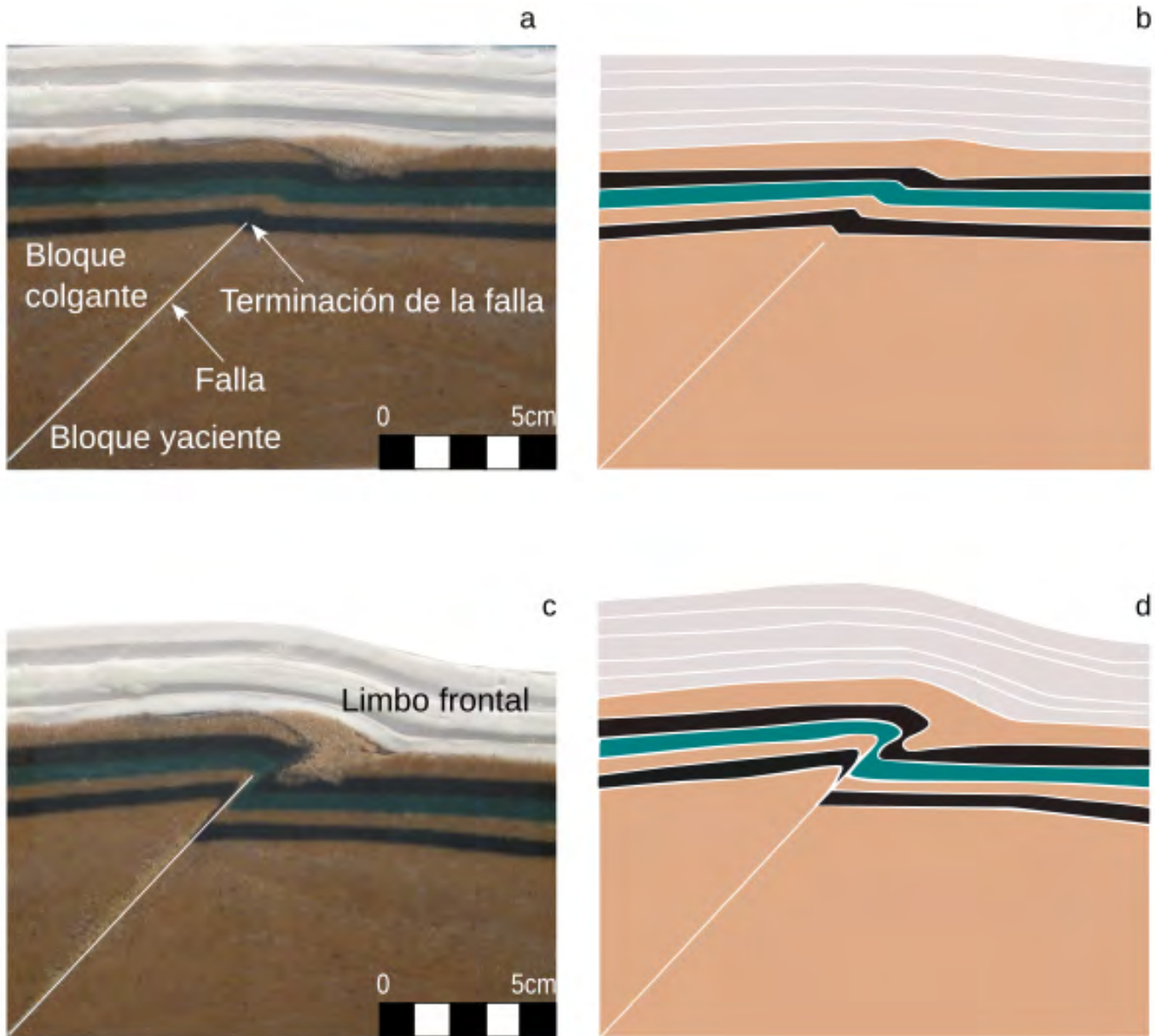


Figura 3. Simulación de un basamento afectado por una falla inversa, donde en la cubierta sedimentaria ocurre el plegamiento: a) Fotografía al inicio del experimento, indicando la ubicación de la falla; b) Esquema de la fase inicial en la evolución de un pliegue por propagación de falla; c) Fotografía representando el último estadio del modelo análogo, luego de 4,2 cm de acortamiento aplicado; d) Esquema de la fase final de un pliegue por propagación de falla.

de falla (Fig. 3).

Escalado: Aplicando la teoría del escalado se puede comparar cuantitativamente experimentos analógicos y prototipos naturales. Esta teoría demanda similitud geométrica, cinemática y dinámica para escalar los resultados del modelo con la naturaleza (Hubbert 1937, Koyi 1997, Cobbold y Jackson 1992, Schellart 2002, Schellart y Strak 2016). Si bien el escalado dinámico aplicado de forma rigurosa es esencial en aplicaciones ingenieriles, en ocasiones esto puede ser complejo y no necesariamente esencial para los modelos que investigan la física básica detrás de un proceso (Reber et al. 2020). Dado que el objetivo de este trabajo se basa en evaluar las diferencias relativas de velocidades y sus direcciones, no así los valores absolutos, el escalado dinámico es aproximado. De este modo, se brinda una mejor comprensión de los procesos estructurales (Saha et al. 2016, Reber et al. 2020).

El modelo descrito en este artículo fue escalado de tal manera que 1 cm en el laboratorio corresponde a 100 m en la naturaleza (factor de escala geométrica $\lambda = 1 \times 10^{-4}$). Tanto el prototipo natural como el modelo están sujetos al mismo valor de aceleración gravitacional, imponiendo un factor de escala $g = 1$, siendo imposible de seguir para todas las relaciones de fuerzas en el experimento. Sin embargo, estudios previos han demostrado que, si el modelo se restringe a estructuras de pequeña escala con bajas tasas de deformación, la influencia de las fuerzas de cuerpo puede despreciarse (Zulauf y Zulauf 2004).

Para nuestro modelado, decidimos utilizar la densidad promedio de la corteza continental como la densidad del prototipo natural, la cual se estimó en $\sim 2.60 \text{ g/cm}^3$ (Michon y Merle 2003, Saha et al. 2016, Rosas et al. 2017). Dado que la densidad del modelo ($\rho_m = 1.40 \text{ g/cm}^3$) es el promedio entre las densidades de los materiales, se obtiene un valor de densidad (ρ) igual a 0.54.

El factor de escala de stress (S) está dado por:

$$S = \rho \cdot g \cdot \lambda = 5.4 \times 10^{-5}$$

Asumiendo un comportamiento frágil de tipo Coulomb para las rocas del basamento, la arena es apropiada para trabajar a la escala seleccionada. En particular, idealizar la arena como un material de Coulomb es preciso a los fines del escalado (Weijermars et al. 1993, Schellart 2000). En este caso, la arena que utilizamos presenta una cohesión que oscila los 1000 Pa, pudiendo representar materiales prototipo que rondan los 20 MPa.

En modelos análogos usualmente se emplean materiales como plastilina o similares para simular rocas dúctiles (Tapponnier et al. 1982, Zulauf y Zulauf 2004, Schellart y Strak 2016, Fan et al. 2020). El comportamiento de la pasta de azúcar es similar a la plastilina, y solo comienza a fluir a altas temperaturas. Suponiendo un comportamiento dúctil para la cubierta sedimentaria, este material es conveniente para realizar los experimentos análogos.

Para escalar la viscosidad se requiere agregar una relación de escala de tiempo al factor de escala geométrica (λ) previamente definido, que es igual a 1×10^{-4} . Davy y Cobbold (1988) utilizaron una relación de tiempo (T) de 10^{-10} (1h = 1Ma), el cual adoptamos para este experimento.

Tales resultados dan un factor de escala para la viscosidad (V_s) igual a 10^{-14} :

$$V_s = \lambda T = 10^{-4} \times 10^{-10}$$

La viscosidad de la pasta de azúcar utilizada es de $\sim 2.2 \times 10^7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Plotek et al. 2021) y puede representar una capa de sedimento-evaporita con una viscosidad alrededor de $\sim 10^{21} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Mukherjee et al. 2010, Schuh-Senlis et al. 2020, Słotwiński et al. 2020).

Varios parámetros no son escalables, como la porosidad o la permeabilidad. El uso de la mezcla es una necesidad experimental porque la pasta de azúcar no debe separarse de la arena, es decir, la mezcla se utiliza para comprimir todo el modelo, aumentando la presión vertical sobre las láminas de azúcar (Bazalgette y Petit 2007), y provocando que las capas de pasta azucarada se acomoden plegándose al movimien-

Cuadro 1. Propiedades de los materiales y parámetros para el escalado entre el modelo experimental y los prototipos naturales.

Propiedades de los materiales y parámetros de escalado	Arena	Pasta azucarada	Mezcla	Prototipo natural	Radio (modelo/ prototipo)
Forma del grano	angular	-	-	-	-
Tamaño de grano (μm)	<860	-	-	-	-
Densidad (kg/m^3)	1650	1270	1290	2600	$\delta = 0.54$
Largo (cm)		1		10000	$\lambda = 1 \times 10^{-4}$
Tiempo		1 hora		1 Ma	$T = 10^{-10}$
Aceleración de la gravedad, g (m/s^2)			9.81		1
Viscosidad (Pa s)	-	2.2×10^7	1.2×10^5	1×10^{21}	$V_s = 10^{-14}$

to de la arena. A pesar de estas limitaciones, los resultados de nuestros modelos son útiles a la finalidad de proporcionar ideas de carácter cinemático.

Análisis mediante PIV: La técnica PIV consiste en la correlación de imágenes con la finalidad de obtener velocidades de un medio que se somete a deformación. Mediante el seguimiento del desplazamiento de partículas en sucesivas imágenes (es decir, variación de la posición en el tiempo) se resuelve el campo de velocidad (Adam et al. 2002, Sveen 2004, Thielicke y Sonntag 2021). Esta técnica es útil para rastrear el movimiento de partículas a escala de grano en la arena de modelos analógicos, teniendo la ventaja que no es destructiva (Adam et al. 2005, Hoth et al. 2006, Yan et al. 2016, Marshak et al. 2019, Krýza et al. 2019, Fan et al. 2020). Los cristales de azúcar en las capas de pasta actúan como trazadores y permiten la detección mediante PIV. Un algoritmo 2D-PIV calcula la función de correlación cruzada del campo de intensidad de la imagen entre dos imágenes consecutivas, separadas por un breve intervalo de tiempo. Cada imagen se divide en regiones parcialmente superpuestas, llamadas ventanas de interrogación, donde se evalúa la función de correlación cruzada. La maximización de esta función permite determinar el desplazamiento más probable (Sarno et al. 2018).

Para que la correlación entre imágenes sea exitosa, la ventana de interrogación debe ser mayor que la magnitud máxima del vector dentro del campo de desplazamiento para el intervalo utilizado (White et al. 2003), que es el tiempo entre dos imágenes consecutivas. En nuestras imágenes, cada píxel representa 0.02 mm, y el desplazamiento máximo entre cada imagen sucesiva es de 1,2 mm. El análisis realizado en este estudio no considera vectores de velocidad ubicados en el sector superior de la caja, ya que el uso de la mezcla es una necesidad experimental (Figs. 2, 3).

Además, una vez que se obtienen los vectores de desplazamiento de partículas, es decir las componentes horizontal (V_x) y vertical (V_y) de los vectores, se pueden calcular las componentes de la deformación. El campo de deformación principal incremental se examinó paso a paso para rastrear la ubicación y la progresión de la deformación durante cada modelo. Los resultados del PIV se procesaron con el *software* GEODEF 1.1 (Yagupsky 2010), obteniendo los patrones de deformación superficial incremental y acumulada. Este proceso considera las derivadas direccionales para cada vector incremental entre dos cuadros, permitiendo así el cálculo del tensor de deformación (*strain rate*) para cada parche del modelo usando las ecuaciones de deformación finita de Means (1976). Las magnitudes de los ejes principales de deformación en 2-D se emplearon para cuantificar la deformación total

en los experimentos, en este caso, a través del cociente entre el eje mayor y el menor de la elipse de deformación, es decir, la elipticidad (véase más en Yagupsky 2010).

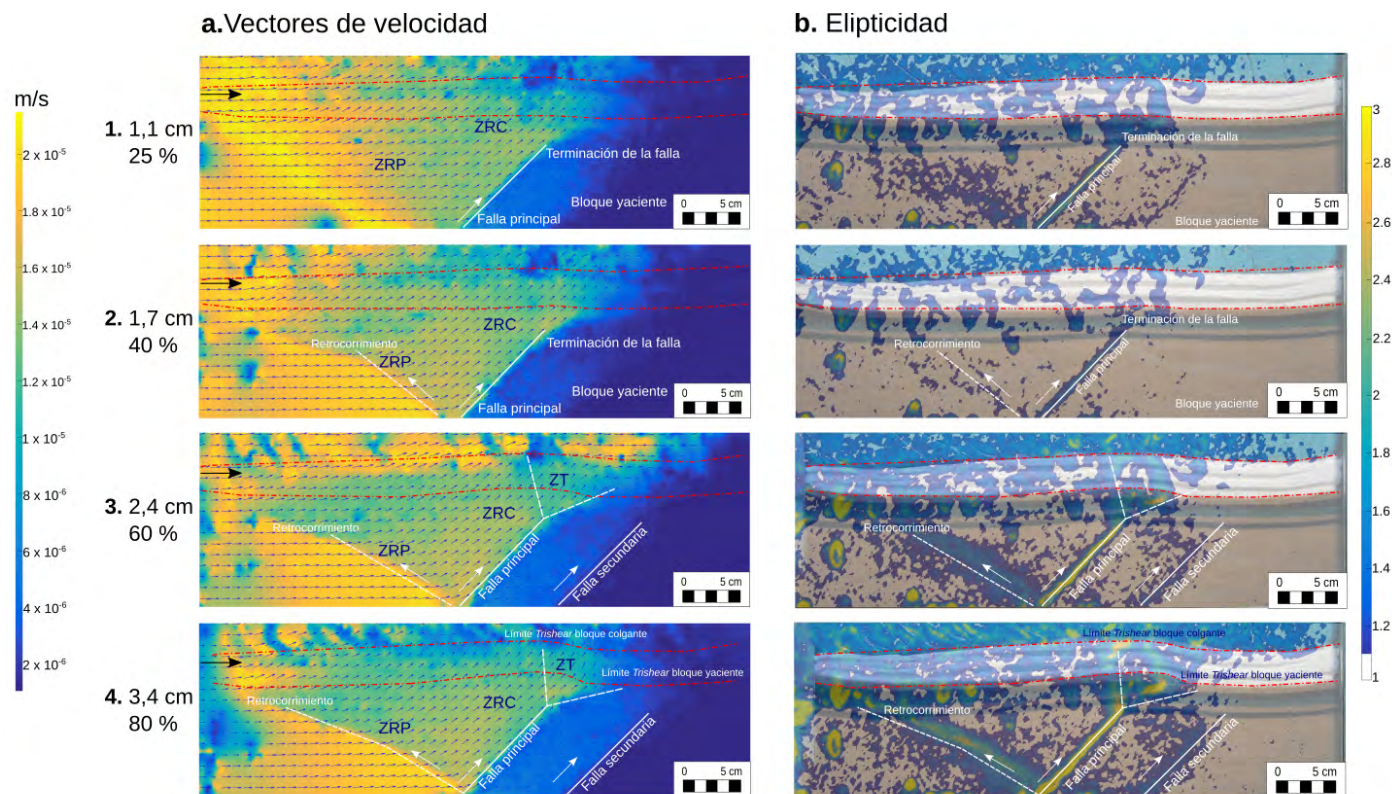
RESULTADOS DEL MODELO ANÁLOGO

Los resultados del modelado análogo se presentan en diagramas, graficando el campo de velocidad y el campo de deformación incremental para diferentes etapas de nuestro modelo experimental. Se muestran los campos de velocidad totales para cuatro etapas sucesivas de acortamiento (25%, 40%, 60% y 80% del total de acortamiento) que abarcan el desarrollo del pliegue (Fig. 4, columna a). Cada panel muestra el campo de velocidad incremental, tanto la magnitud escalar como los vectores cinemáticos. Además, se utilizan las mismas etapas para ilustrar la magnitud de la elipticidad (Fig. 4, columna b).

Análisis del campo cinemático

Tomando como base los dominios identificados en el campo cinemático y las etapas de formación del pliegue por propagación de falla, la evolución del modelo análogo se divide en tres etapas principales. En la primera etapa domina la traslación de los materiales, con el plegamiento poco conformado. En la segunda etapa es posible identificar la rotación del campo cinemático en el sector frontal del anticlinal. En la última fase, ambos limbos se encuentran bien configurados. A continuación, se presenta cada una con mayor detalle, acompañado por una descripción del campo de velocidad".

En la etapa inicial (*etapa 1*) de acortamiento (Fig. 4, fila 1), los vectores de desplazamiento cerca de la pared móvil no muestran cambios en términos de magnitud o dirección de movimiento, es decir, este sector está dominado por traslación sin sufrir deformación interna. La cantidad de desplazamiento disminuye hacia la falla en la zona central del experimento y tiende a cero al acercarse a la pared fija de la caja (Fig. 4, columna a, fila 1). Es posible identificar un patrón de rotación en sentido antihorario en el bloque colgante, donde V_y aumenta (Fig. 4, columna a, filas 1 y 2). Dado que el desplazamiento del corrimiento frontal siempre excede al del retrocorrimiento, el tope de la superficie del bloque triangular entre ambos debe inclinarse hacia el interior. Nos referimos a este sector como la Zona de Rotación Progresiva (ZRP, ver Fig. 4). Esta rotación continúa hasta que los vectores son paralelos a la falla. Esta área se conoce como la Zona de Rampa Colgante (ZRC, Fig. 4). El acortamiento progresa en las siguientes etapas de la evolución del pliegue y el sector donde los vectores de velocidad son paralelos a la falla se vuelve más grande (Fig. 4,



Referencias:

ZRP = Zona de Rotación Progressiva ZRC = Zona de Rampa Colgante ZT = Zona de *Trishear*

Figura 4. Campo cinemático representado con vectores (flechas azules en la columna a), elipticidad incremental para cada estadio representado en las fotografías del modelo experimental (columna b). La traza de la falla se indica en línea blanca y el sentido de movimiento se señala con la flecha negra. Las líneas punteadas rojas delimitan las capas de pasta azucarada: 1) 1.1 cm de acortamiento, representando el 25% del acortamiento total alcanzado. El movimiento se concentra en el bloque colgante, por el avance del pistón móvil, con marcado dominio de vectores horizontales; 2) 1.7 cm de acortamiento, representando el 40% alcanzado. El movimiento se concentra en el bloque colgante, donde la rotación del campo cinemático ocurre desde la línea punteada hacia la derecha; 3) 2.4 cm de acortamiento, que representan el 60% del acortamiento total alcanzado; 4) 3.4 cm de acortamiento, representando el 80% del total alcanzado.

columna a, fila 2). Para esta etapa, el plegamiento aún no se visualiza (Fig. 4, columna b, filas 1 y 2).

La siguiente etapa (*etapa 2*) se caracteriza por una ligera rotación en sentido horario observada cerca de la terminación de la falla principal, junto con el crecimiento del limbo frontal del pliegue (Fig. 4, fila 3). En esta zona, la rotación gradual de los vectores está bien definida formando una zona de deformación triangular cuyo vértice se encuentra ubicado en la terminación de la falla principal, es decir, la Zona de *Trishear* (ZT). Cerca del límite del *Trishear* en el bloque colgante, los vectores son paralelos a la falla (Fig. 4, columna a, fila 3). Estos vectores son similares en magnitud, dirección y sentido de movimiento a los que dominan el bloque colgante del modelo análogo (ZRC, Fig. 4, columna a, fila 3). Los vectores ubicados en el interior de la zona triangular reducen su tamaño e inclinación hasta alcanzar el límite de *Trishear* del bloque yaciente.

Las mismas zonas previamente identificadas se observan

en etapas posteriores con diferencias menores (Fig. 4, columna a, fila 4). La etapa final (*etapa 3*) se distingue geométricamente por la forma visible de los limbos frontal y dorsal (Fig. 4, columna b, fila 4). Además, se forman un retrocorrimento y una falla secundaria que afecta al bloque yaciente (Fig. 4, columna a, filas 3 y 4).

Por otro lado, encontramos que existe una relación directa entre los límites de las zonas cinemáticas definidas previamente por el análisis mediante PIV y los patrones de deformación (Fig. 4). Las fallas están representadas como regiones de alta elipticidad, señalando altas tasas de deformación. Asimismo, la zona teórica de *Trishear* está iluminada por la elipticidad incremental.

Comparación geométrica y cinemática

Para analizar en detalle la Zona de *Trishear* (ZT), ubicada en el limbo frontal, realizamos varios perfiles perpendiculares a la falla principal durante las diferentes etapas de la

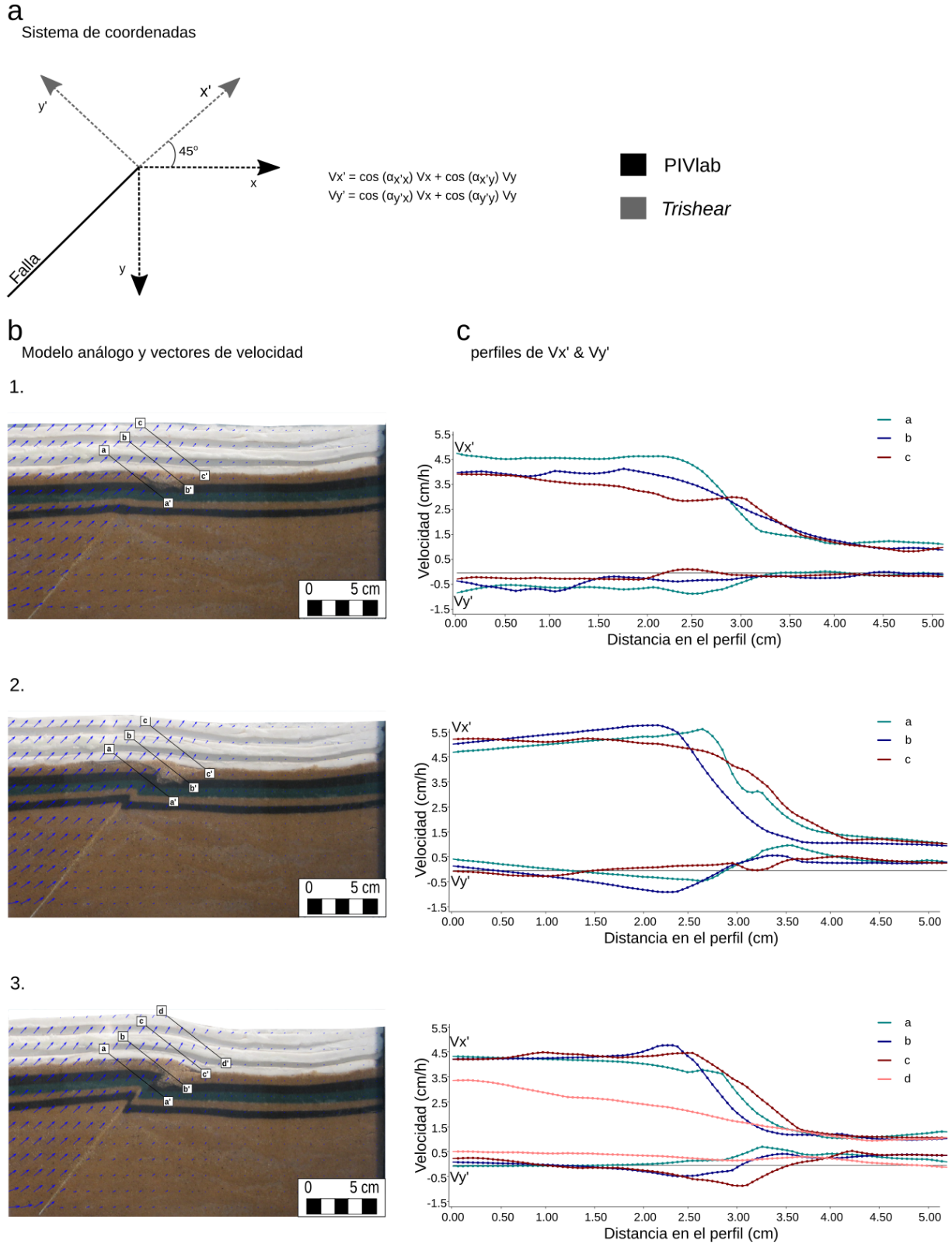


Figura 5. a) Figura ilustrando el cambio de coordenadas, desde el sistema original correspondiente al PIVlab (en negro) al sistema de coordenadas *Trishear* (en gris). Las ecuaciones usadas fueron originalmente propuestas por Allmendinger (1998). Este último sistema es el que se utiliza para generar los perfiles perpendiculares a la falla principal dentro del limbo frontal para 3 estudios del modelo análogo. Vx' es la componente de velocidad paralela a la falla principal, mientras que Vy' es la componente perpendicular; b) Fotografía del experimento y ubicación de los perfiles realizados; c) Gráficos para Vx' y Vy' vs Distancia en los perfiles a, b, c y d indicados en las fotografías, para cada estadio del modelo: 1) 1 cm de acortamiento; 2) 1.9 cm de acortamiento; 3) 2.9 cm de acortamiento.

evolución de nuestro modelo análogo. Para comparar con el modelo cinemático *Trishear*, se modificó el sistema de coordenadas de los valores de velocidad para las componentes horizontal (V_x) y vertical (V_y) de los vectores, de la siguiente manera (ver también Fig. 5a):

$$V_{x'} = \cos\alpha_{(x'x)} V_x + \cos\alpha_{(x'y)} V_y$$

$$V_{y'} = \cos\alpha_{(y'x)} V_x + \cos\alpha_{(y'y)} V_y$$

La figura 5b incluye las tres etapas seleccionadas del modelo análogo con la ubicación de los perfiles construidos y los vectores de velocidad obtenidos por PIVlab. La Figura 5c muestra gráficos tanto de la componente paralela a la falla ($V_{x'}$) como de la componente perpendicular a la falla ($V_{y'}$) de los vectores de velocidad, utilizando el sistema de coordenadas *Trishear* para cada uno de los perfiles.

En las etapas uno y dos del plegamiento, representadas en los paneles 1 y 2 (Fig. 5b), seleccionamos tres perfiles de velocidad. El perfil a-a' se ubica más cerca de la terminación de la falla, el perfil c-c' se ubica en la parte superior y el perfil b-b' se ubica entre ambos (Figs. 5b.1, 5b.2). Para una etapa avanzada del plegamiento, representada en el panel 3 (Fig. 5b), decidimos realizar cuatro perfiles, siendo el perfil d-d' el que se encuentra en la parte superior (Fig. 5b.3).

Los perfiles para $V_{x'}$ son similares para todas las etapas (Fig. 5c). Todos ellos exhiben una disminución gradual de la componente de velocidad paralela a la falla hasta llegar al pie de la falla. Mientras que el bloque colgante presenta los valores más altos más cerca de la terminación de la falla, al cruzar el eje de la falla, los perfiles muestran una reducción abrupta de la magnitud de $V_{x'}$, como se ve por ejemplo en el perfil a-a' del Panel 1 (Fig. 5c.1). A medida que se agranda la zona de *Trishear*, la reducción de $V_{x'}$ se vuelve gradual, como se muestra en la etapa avanzada, en particular para el perfil d-d' que corta transversalmente la pasta de azúcar (Fig. 5c.3). En cuanto a las gráficas para $V_{y'}$, la componente perpendicular a la falla, su magnitud es mucho menor que $V_{x'}$, y en general tiende a cero (Fig. 5c). Sin embargo, en todos los casos, el componente $V_{y'}$ tiene valores ligeramente negativos, consistentes con asunciones teóricas del modelo *Trishear* (Zehnder y Allmendinger 2000).

Para analizar la geometría *Trishear* que mejor se ajusta, probamos diferentes ángulos apicales de *Trishear* para la etapa final del pliegue a través de la versión en desarrollo del software Andino 3D (Cristallini et al. 2016–2020, Cristallini et al. 2021). Este software calcula la velocidad a partir de las ecuaciones introducidas por Zehnder y Allmendinger (2000). Para ello, genera una grilla de puntos y obtiene paso a paso el campo de velocidades. Siempre se supone una zona de *Trishear* simétrica. El usuario introduce los parámetros para el método cinemático (P/S , ángulo apical, pasos totales y buza-

miento de falla). La geometría de un pliegue de propagación de fallas obtenido aplicando el método *Trishear* se compara con el banco seleccionado en el modelo análogo.

Mostramos los resultados de esta comparación para diferentes ángulos apicales en la Figura 6. La terminación de la falla puede propagarse hacia la cobertura a medida que se desliza, como así también lo hace su zona de *Trishear* relacionada. La tasa de movimiento está controlada por la relación propagación/deslizamiento (P/S). El significado geológico de la relación P/S es discutible. Estudios previos han vinculado la relación P/S con la reología de las capas (Hardy y Ford 1997, Allmendinger 1998). En este sentido, relaciones P/S altas se han relacionado con una cobertura relativamente fuerte, mientras que relaciones P/S bajas están asociadas con una cobertura comparativamente débil. En este trabajo, se utilizó una $P/S = 2$ para producir el mejor ajuste entre los resultados del experimento con la cinemática de *Trishear*. Sin embargo, la misma estructura podría haberse aproximado con otra relación P/S combinada con un conjunto alternativo de variables. Otras relaciones P/S no fueron evaluadas debido a que el foco del trabajo se concentra en el ángulo apical de *Trishear*.

Comparamos las geometrías resultantes obtenidas con el software Andino 3D con el banco del modelo experimental resaltado en rosa (Fig. 6). Puntualmente, se utiliza una capa cercana al *tip line* porque es más sensible a las variaciones en el ángulo apical (Allmendinger 1998). Usando el método de cuadrados mínimos, sugerimos que la curva generada con un ángulo apical de 80° se aproxima mejor a la geometría de la capa rosa en la Zona de *Trishear* (Fig.6). Utilizando este ángulo apical, realizamos una comparación entre los vectores de velocidad calculados por PIV en el modelo análogo y los obtenidos después de aplicar el modelo *Trishear* (Fig. 7). La

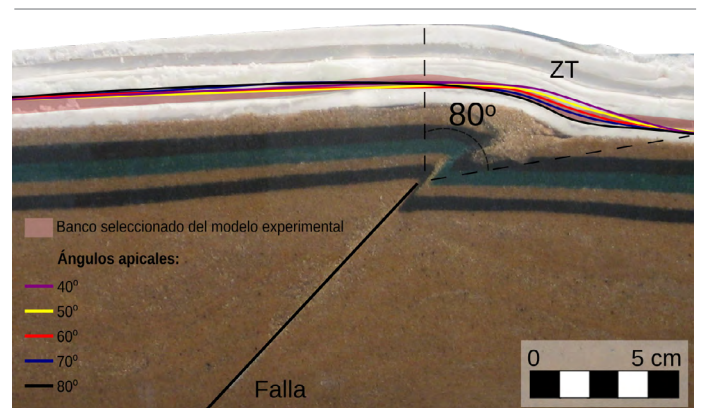


Figura 6. Curvas (líneas coloreadas) obtenidas modelando un pliegue por propagación de falla a partir del método de *Trishear* en el limbo frontal utilizando el programa Andino 3D, usando diferentes ángulos apicales. Tomando como referencia el banco rosado, el mejor ajuste utilizando el método de mínimos cuadrados se obtiene aplicando un ángulo apical de 80° (curva negra). P/S siempre es igual a dos.

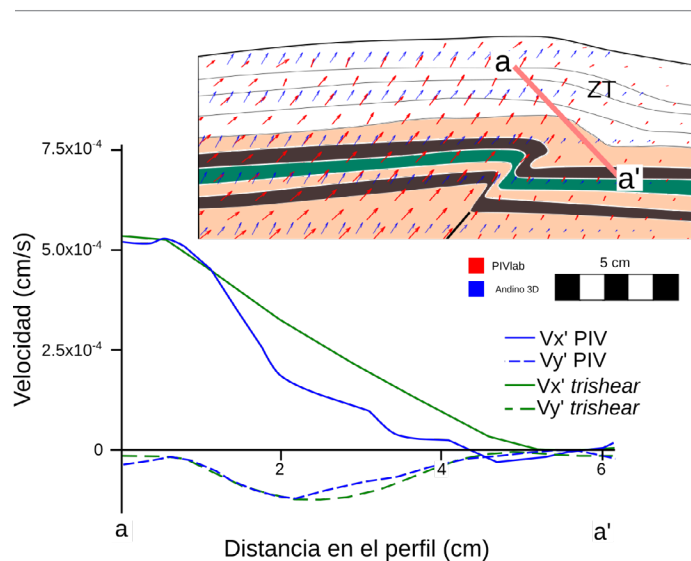


Figura 7. Figura esquemática del estadio final del modelo análogo. Los vectores rojos representan el campo cinemático obtenido con el PIV, y los vectores azules son aquellos generados con el *Trishear* en el Andino 3D, aplicando un ángulo apical de 80° . El gráfico exhibe las variaciones de cada componente del vector velocidad vs distancia en el perfil analizado, para el modelo experimental (en azul) y el *Trishear* teórico (en líneas verdes). Se indica la posición de la Zona de *Trishear* (ZT).

Figura 7 muestra que existe un muy buen ajuste entre ambos campos de velocidad para el limbo frontal. El gráfico ilustra la variación para ambas componentes del vector velocidad, la paralela (V_x') y la perpendicular a la falla (V_y'). El procedimiento es similar al realizado para la Figura 5, pero esta vez el resultado se muestra incluyendo la variación para el *Trishear* teórico. Las tendencias observadas en cada caso son muy similares, tanto para V_x' como para V_y' .

Hasta ahora, los resultados del modelo análogo se compararon con el modelo cinemático *Trishear* del limbo delantero. Como proponen Cristallini y Allmendinger (2002), se puede aplicar un enfoque similar a cualquier curvatura de la falla. Este método, llamado *Backlimb Trishear*, se puede utilizar para simular el limbo dorsal del pliegue. Para este caso, consideramos la etapa avanzada del plegamiento como la etapa óptima para realizar una comparación cinemática con el método *Backlimb Trishear*, ya que el limbo dorsal está bien desarrollado.

Utilizando el método *Backlimb Trishear* generamos el campo cinemático teórico con el software Andino 3D. Aplicamos diferentes ángulos apicales de *Backlimb Trishear*, probando cuál presenta menos diferencias en comparación con el experimento. En este sentido, el mejor valor del ángulo apical para aproximar las velocidades en el modelo análogo será el que tenga menos diferencias con el campo cinemático análogo. Para la comparación cuantitativa, trazamos la resta de las velocidades de los modelos cinemáticos a las velo-

idades del modelo análogo, para comparar ambos campos cinemáticos (Fig. 8). Si bien la región analizada en la Figura 8 involucra tanto el limbo dorsal como el frontal, la aplicación del *Backlimb Trishear* no modifica los resultados del limbo frontal. Tanto para la componente horizontal como vertical de los vectores de velocidad (V_x y V_y), los mejores resultados se obtienen aplicando un ángulo apical de 75° .

DISCUSIÓN

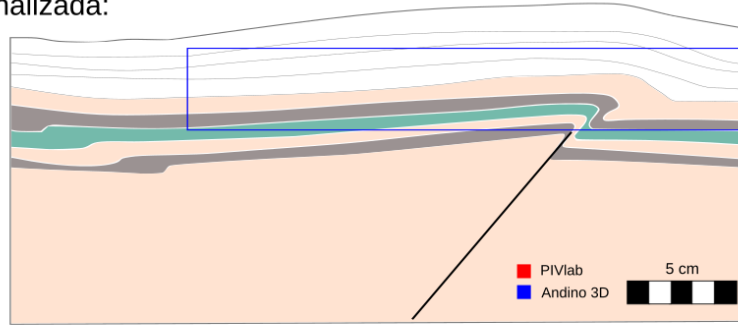
El modelado análogo es una herramienta útil para comprender la cinemática del plegamiento, ya que permite un análisis paso a paso de las diferentes fases durante la construcción de la estructura (p. ej., Schrank et al. 2008, Perrin et al. 2013, Oriolo et al. 2015, Ritter et al. 2016). Dado que estamos estudiando procesos geológicos a una escala geométrica y cinemática reducida a condiciones de laboratorio (Hubbert 1937, Schellart y Strak 2016), existen algunas simplificaciones, como se discuten en diferentes artículos (p. ej., Deus et al. 2011, Reber et al. 2020). Nuestro experimento, a pesar de sus limitaciones inherentes (por ejemplo, una lámina de plástico rígido para simular una falla de basamento preexistente, sin transporte lateral de material fuera de las secciones 2D, las láminas de pasta de azúcar están separadas entre ellas por superficies de baja fricción y un escalamiento dinámico aproximado), sirve para analizar y comparar el campo cinemático con el propuesto por el método teórico *Trishear* para pliegues por propagación de falla. En particular, la geometría observada en ciertos prototipos de campo (Fig. 1), puede aproximarse bien con el ejemplo experimental presentado (Fig. 9). Entre las mayores similitudes, se encuentran la mayor curvatura de los bancos en la zona cercana a la rampa en el bloque colgante y la inclinación suave en el sector superior del limbo frontal.

Cabe señalar que el modelo análogo descrito en este trabajo no representa la generalidad de los pliegues por propagación de falla y existen otros métodos para aproximar la geometría de estos pliegues como, por ejemplo, mediante la migración de superficies axiales siguiendo el esquema clásico de Suppe y Medwedeff (1990).

Pudimos encontrar algunas similitudes entre los resultados proporcionados por nuestro modelo con simulaciones previas realizadas por otros autores (Cardozo et al. 2003, Miller y Mitra, 2011, Hughes y Shaw 2015). La deformación se localiza principalmente a lo largo de la falla principal, en el retrocorrimento, y también, se distribuye por toda el área por delante de la falla en el limbo delantero y en las capas superiores del limbo trasero. Similares observaciones fueron

a

Región analizada:



b

V_x' análogo - V_x' cinemático

V_y' análogo - V_y' cinemático

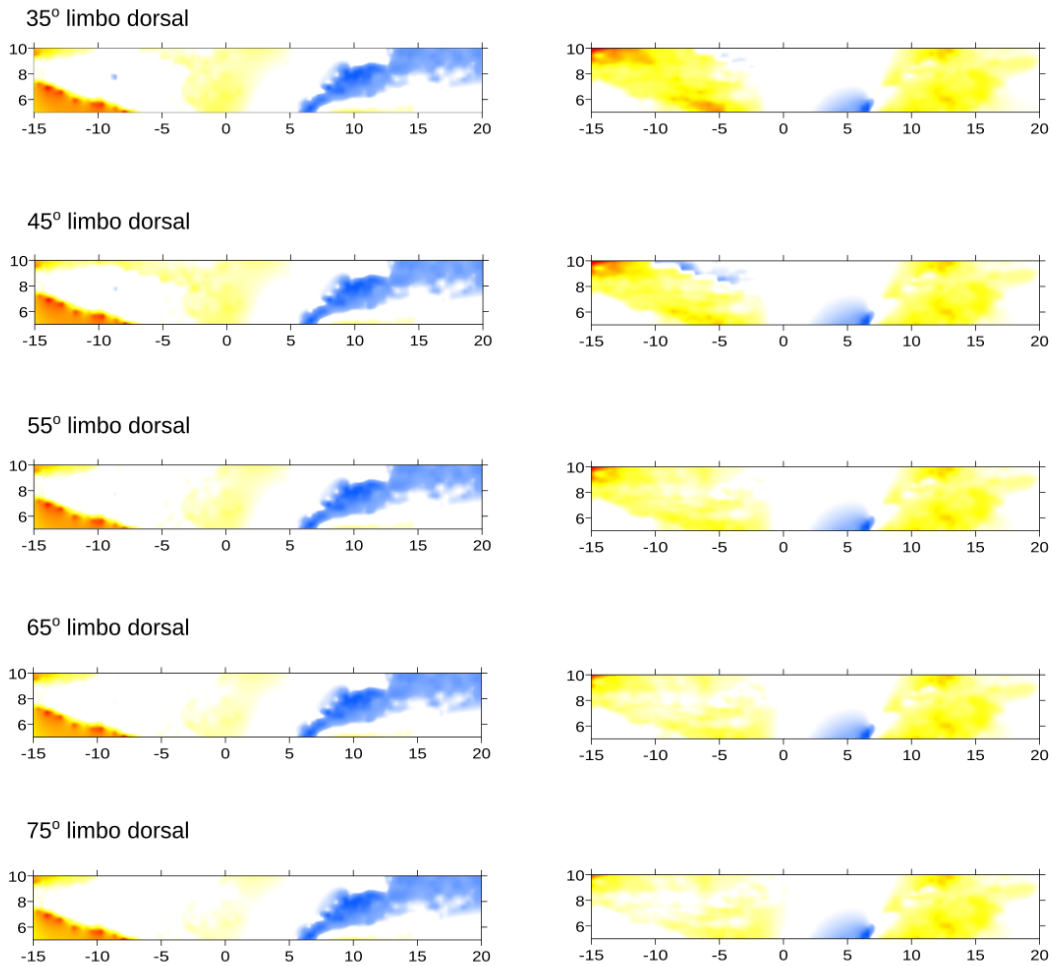


Figura 8. Resultante de la sustracción de las velocidades obtenidas por el método de *Backlimb Trishear* a las velocidades del modelo análogo, aplicando diferentes valores para el ángulo apical. La columna de la izquierda muestra los resultados de la sustracción de para la componente horizontal del vector velocidad (V_x) y la columna de la derecha, la sustracción de la componente vertical (V_y). Para ambos casos, los mejores resultados se obtienen al aumentar el ángulo apical. En todos los casos, el ángulo apical en el *Trishear* frontal es de 80° .

realizadas a través de modelos numéricos de elementos discretos (p. ej., Hughes y Shaw 2015, Fig. 10). En particular, si el pliegue se simula usando un medio mecánico homogéneo,

se replica mejor el modelo *Trishear* en los pliegues por propagación de falla (Hughes y Shaw 2015). Aunque nuestro experimento presenta dos capas mecánicas, con el paquete de

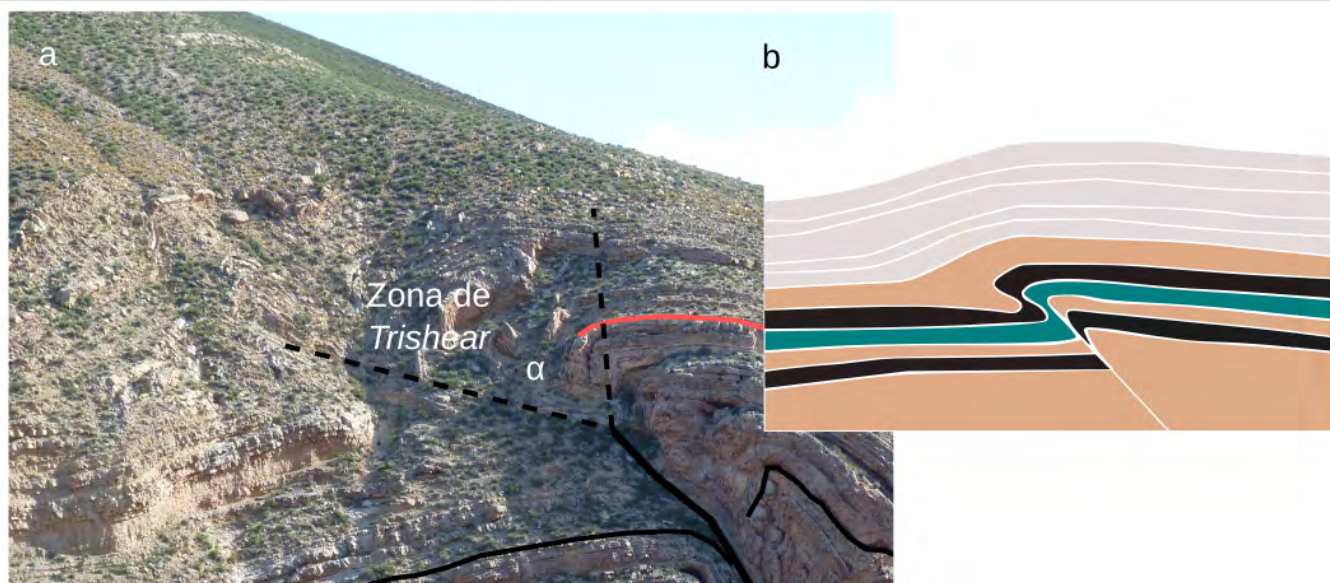


Figura 9. a) Pliegue por propagación de falla desarrollado en las areniscas del Subgrupo Pirgua, en la Provincia de Jujuy, Argentina; b) Esquema de la fase final del modelo análogo.

arena actuando como un basamento rígido y la pasta de azúcar actuando como una sucesión dúctil, existen similitudes entre los dos enfoques. Por ejemplo, los perfiles que cruzan las capas de arena más cerca del tip line muestran una disminución abrupta de V_x' -la componente paralela a la falla del vector velocidad- aún en etapas avanzadas del experimento (perfiles a-a' y b-b' en la Fig. 5c.3). Estos perfiles son muy similares a los obtenidos para las primeras etapas del modelo análogo cuando la zona *Trishear* no está bien desarrollada (Fig. 5c.1). Sin embargo, los perfiles que representan el mismo componente en las capas superiores de pasta de azúcar muestran que la reducción es gradual, similar al patrón esperado en las zonas de *Trishear* (perfil d-d' en la Fig. 5c.3). El patrón obtenido en estos perfiles (Figs. 5, 7) se asemeja a los presentados por Cardozo et al. (2003) para materiales incompresibles, es decir, la velocidad perpendicular a la falla varía ligeramente, mientras que la componente paralela decrece casi linealmente a lo largo de la zona de *Trishear* (Cardozo et al. 2003). El componente V_y' en nuestro modelo análogo también muestra valores ligeramente negativos.

Se estima que la reología de las rocas sometidas a deformación se refleja en el valor del ángulo apical. Es muy probable que los ángulos bajos de *Trishear* indiquen una deformación intensa limitada en capas fuertes de la cobertura, mientras que los ángulos grandes de *Trishear* pueden estar indicando zonas de deformación relativamente extensas en capas relativamente débiles (Allmendinger 1998, Conneally et al. 2017). Dado que la pasta de azúcar se asemeja a una cobertura débil, el ángulo apical encontrado de 80° respalda tal afirmación. No descartamos que el uso de valores de

ángulo apical *Trishear* asimétrico pudiera combinarse para aproximar la geometría del pliegue en el experimento. Este estudio se centra en el ángulo apical porque, como explicó anteriormente Allmendinger (1998), variaciones en la relación P/S provoca mayores cambios en la geometría de las capas. En cuanto al modelo cinemático de *Backlimb Trishear*, para esta clase de plegamientos un ángulo apical mayor logra aproximar mejor los valores de velocidad. Se puede observar (Fig.4, columna a) que la rotación del campo cinemático no es muy concentrada en el limbo dorsal, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en este experimento.

Modelos realizados previamente en nuestro laboratorio muestran que la utilización de los materiales influye en la geometría observada en el experimento. Si el anticlinal se genera a partir de capas de parafina, en lugar de la pasta azucarada utilizada en este trabajo, la geometría resultante no puede ser aproximada por el método de *Trishear*. Por el contrario, la propuesta tradicional de Suppe y Medwedeff (1990) funciona mejor, ya que las charnelas son muy angulares, siendo correctamente representadas por medio de la migración de bandas kink. Anticlinales realizados en arena en su totalidad, por su parte, muestran que pueden ser correctamente representados por medio de un *trishear* frontal, siempre que el ángulo apical sea pequeño, es decir, menor a 20° . Restan mayores estudios en este material.

En cuanto a la velocidad aplicada para la deformación del experimento, es importante trabajar con velocidades bajas. Velocidades altas (mayores a 10 cm/h) en ensayos previos fomentan el fracturamiento de los materiales, evitando la formación de una zona continua, como lo plantea el método de *trishear*.

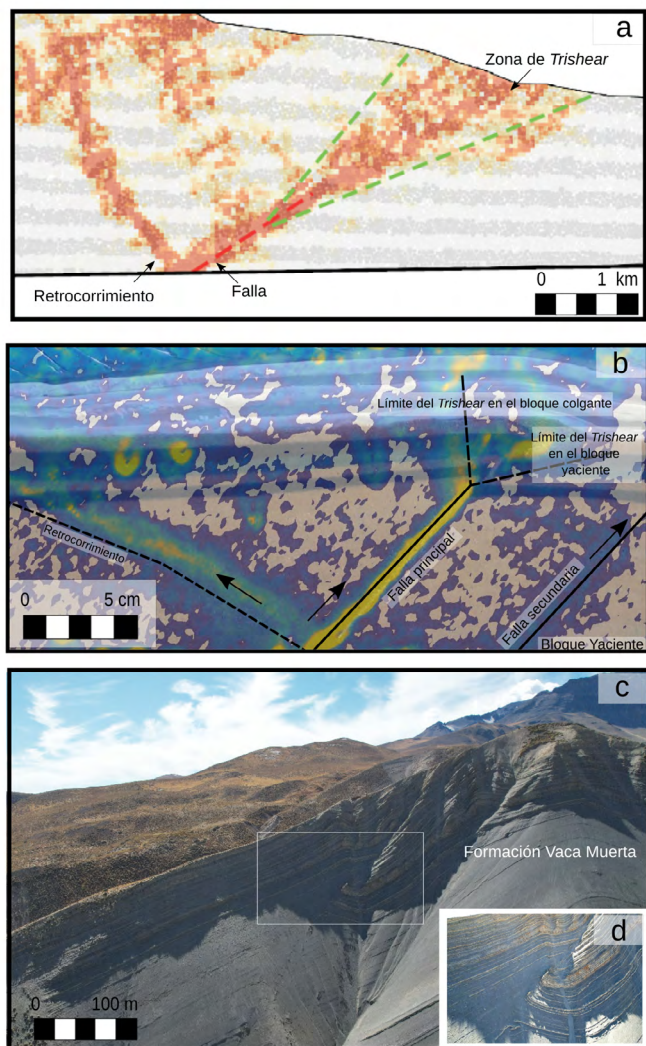


Figura 10. a) Modelo numérico de elementos discretos de Hughes y Shaw (2015). La simulación corresponde a una falla que se propaga y presenta en su terminación una zona triangular donde ocurre el plegamiento y el aumento del espesor de las capas involucradas. La deformación interna se localiza ante todo en la zona de falla y en la superficie axial correspondiente al limbo dorsal (Hughes y Shaw 2015); b) Modelo análogo (3.4 cm de acortamiento). La figura muestra las estructuras y la elipticidad calculada a partir de la velocimetría. La deformación interna también se localiza a lo largo de la falla principal, el retrocorrimiento y se distribuye por el área aledaña a la falla en la zona frontal y las capas superiores que integran el limbo dorsal; c) Plegue por propagación de falla localizado en la faja plegada y corrida de Malargüe, en Mendoza, Argentina. La falla se propagó hasta producir el breakthrough; d) Fotografía detallada de ese mismo plegue.

CONCLUSIONES

Elaboramos un modelo análogo en 2D bajo condiciones de laboratorio para evaluar la compatibilidad geométrica y cinemática de los pliegues por propagación de falla con el modelo teórico de *Trishear*. Las imágenes obtenidas fueron procesadas con la técnica de correlación óptica de imágenes usando PIVlab.

Los vectores de velocidad reproducen efectivamente el movimiento de las partículas como un pliegue por propagación de falla.

El modelo muestra una buena correlación con la geometría, la cinemática y los patrones de deformación derivados del modelo *Trishear* y de los ejemplos de modelos numéricos presentados anteriormente.

La componente de velocidad perpendicular a la falla tiende a cero en todo el perfil, obteniendo valores absolutos menores que la componente paralela del vector velocidad y siendo negativa en algunos de los perfiles.

Para la componente paralela a la falla, la reducción se torna más gradual, mostrando una buena correlación con la cinemática del método *Trishear*.

Probamos diferentes valores de ángulo apical *Trishear* para evaluar la geometría observada en nuestro modelo. El ángulo apical de 80° se adapta bien a la geometría final.

Las velocidades de nuestro modelo análogo se pueden aproximar aplicando un ángulo apical *Trishear* alto en el limbo frontal.

A modo de corolario, nuestros resultados proporcionan restricciones para la comprensión de la evolución geométrica y cinemática de los pliegues de propagación de fallas. Este trabajo destaca que el método cinemático aproxima correctamente tanto el campo cinemático como la geometría obtenida en los modelos análogos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el apoyo de un proyecto de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) - proyecto BID PICT 2019–3834. Asimismo, se agradece el apoyo del IDEAN (Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber), el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Universidad de Buenos Aires (UBA). Agradecemos a LA. TE. Andes por la licencia académica del software Andino 3D y a Eugenio Sewchuk por la asistencia en la elaboración de los modelos análogos. Le agradecemos al Doctor José Mescua y los revisores anónimos las sugerencias realizadas, que mejoraron significativamente nuestro manuscrito.

REFERENCIAS

- Adam, J., Lohrmann, J., Hoth, S., Kukowski, N. y Oncken, O. 2002. Strain variation and partitioning in thrust wedges: high-resolution data from scaled sandbox experiments by 2D–3D PIV analysis. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 42: 123-126.

- Adam, J., Urai, J.L., Wieneke, B., Oncken, O., Pfeiffer, K., Kukowski, N., Lohrmann, J., Hoth, S., van der Zee, W. y Schmatz, J. 2005. Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting - New insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques. *Journal of Structural Geology* 27: 283-301.
- Allmendinger, R.W. 1998. Inverse and forward numerical modeling of Trishear fault propagation folds. *Tectonics* 17: 640-656.
- Allmendinger, R., Zapata, T., Manceda, R. y Dzelalija, F. 2004. Trishear kinematic modeling of structures, with examples from the Neuquén Basin, Argentina. En: Mc Clay, K. (ed.), *Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 82: 356-371.
- Bazalgette, L. y Petit, J.P. 2007. Fold amplification and style transition involving fractured dip-domain boundaries: Buckling experiments in brittle paraffin wax multilayers and comparison with natural examples. *Geological Society Special Publication* 270: 157-169.
- Brandes, C. y Tanner, D.C. 2014. Fault-related folding: A review of kinematic models and their application. *Earth-Science Reviews* 138: 352-370.
- Bonanno, E., Bonini, L., Basili, R., Toscani, G. y Seno, S. 2017. How do horizontal, frictional discontinuities affect reverse fault-propagation folding? *Journal of Structural Geology* 102: 147-167.
- Cardozo, N., Bhalla, K., Zehnder, A. y Allmendinger, R. 2003. Mechanical models of fault propagation folds and comparison to the Trishear kinematic model. *Journal of Structural Geology* 25: 1-18.
- Cardozo, N. y Aanonsen, S. 2009. Optimized Trishear inverse modeling. *Journal of Structural Geology* 31(6): 546-560.
- Cardozo, N., Jackson, C. A. L. y Whipp, P. S. 2011. Determining the uniqueness of best-fit Trishear models. *Journal of Structural Geology* 33(6): 1063-1078.
- Cobbold, P.R. y Jackson, M.P.A. 1992. Gum rosin (colophony): A suitable material for thermomechanical modelling of the lithosphere. *Tectonophysics* 210: 255-271.
- Conneally, J., Childs, C. y Nicol, A., 2017. Monocline formation during growth of segmented faults in the Taranaki Basin, offshore New Zealand. *Tectonophysics* 721: 310-321.
- Cristallini, E. y Allmendinger, R. 2001. Pseudo 3-D modeling of Trishear fault-propagation folding. *Journal of Structural Geology* 23: 1883-1899.
- Cristallini, E. y Allmendinger, R. 2002. Backlimb Trishear: a kinematic model for curved folds developed over angular fault bends. *Journal of Structural Geology* 24: 289-295.
- Cristallini, E., Hernández, R., Balciunas, D., Nigro, J. y Dellmans, M. 2016-2020. *Andino3D Software (1.0.78.0). LATE ANDES 2020*.
- Cristallini, E., Sanchez, F., Balciunas, D., Mora, A., Ketcham, R., Nigro, J., Hernandez, J. y Hernandez, R. 2021. Seamless low-temperature thermochronological modeling in Andino 3D, towards integrated structural and thermal simulations. *Journal of South American Earth Sciences* 105: 102851.
- Cristallini, E., Tomezzoli, R., Pando, G., Gazzera, C., Martinez, J., Quiroga, J., Marianoso, B., Bechis, F., Barredo, S. y Zambrano, O. 2009. Controles Precuyanos en la estructura de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 248-264.
- Darnault, R. y Hill, K.C. 2020. Four-dimensional analog and geometrical modeling of the Hides anticline, Papua New Guinea: Structure of a giant gas field. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 104: 961-985.
- Davy, P. y Cobbold, P. 1988. Indentation tectonics in nature and experiment. 1. Experiments scaled for gravity. *Bulletin of the Geological Institutions of the University Uppsala, NS*, 14: 129-141.
- Deus H.M., Bolacha E., Vasconcelos C. y Fonseca P. E. 2011. Analogue modelling to understand geological phenomena. VI Proceedings of the GeoSciEd, Johannesburg.
- Fan, X., Jia, D., Yin, H., Shen, L., Liu, J., Cui, J., Chuang, S. y Yang, S. 2020. Analogue modeling of the northern Longmen Shan thrust belt (eastern margin of the Tibetan plateau) and strain analysis based on Particle Image Velocimetry. *Journal of Asian Earth Sciences* 198: 104238.
- Erslev, E.A. 1991. Trishear fault-propagation folding. *Geology* 19: 617-620.
- Grothe, P. R., Cardozo, N., Mueller, K. y Ishiyama, T. 2014. Propagation history of the Osaka-wan blind thrust, Japan, from Trishear modeling. *Journal of Structural Geology* 58: 79-94.
- Guohai, J. y Groshong, R. H. 2006. Trishear kinematic modeling of extensional fault-propagation folding. *Journal of Structural Geology* 28: 170-183.
- Hardy, S. y Allmendinger, R.W. 2011. Trishear: A review of kinematics, mechanics, and applications. En: McClay, K., Shaw, J. y Suppe, J. (eds.), *Thrust Fault-Related Folding*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 94: 1306.
- Hardy, S. y Finch, E. 2007. Mechanical stratigraphy and the transition from Trishear to kink-band fault-propagation fold forms above blind basement thrust faults: A discrete-element study. *Marine and Petroleum Geology* 24: 75-90.
- Hardy, S. y Ford, M. 1997. Numerical modeling of Trishear fault propagation folding. *Tectonics* 16: 841-854.
- Hoth, S., Adam, J., Kukowski, N. y Oncken, O. 2006. Influence of erosion on the kinematics of bivergent orogens: Results from scaled sandbox simulations. *Special Paper of the Geological Society of America* 398: 201-225.
- Hubbert, M. 1937. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Bulletin of the Geological Society of America* 48: 1459-1520.
- Hughes, A.N. y Shaw, J.H. 2015. Insights into the mechanics of fault-propagation folding styles. *Bulletin of the Geological Society of America* 127(11-12): 1752-1765.
- Jabbour, M., Dhont, D., Hervouët, Y. y Deroin, J.P. 2012. Geometry and kinematics of fault-propagation folds with variable interlimb angle. *Journal of Structural Geology* 42: 212-226.

- Johnson, K.M. y Johnson, A.M. 2002. Mechanical analysis of the geometry of forced folds. *Journal of Structural Geology* 24: 401-410.
- Koyi, H. 1997. Analogue modelling: From a qualitative to a quantitative technique - A historical outline. *Journal of Petroleum Geology* 20: 223-238.
- Krýza, O., Závada, P. y Lexa, O. 2019. Advanced strain and mass transfer analysis in crustal-scale oroclinal buckling and detachment folding analogue models. *Tectonophysics* 764: 88-109.
- Marshak, S., Haq, S.S.B. y Sen, P. 2019. Ramp initiation in fold-thrust belts: Insight from PIV analysis of sandbox models. *Journal of Structural Geology* 118: 308-323.
- Means, W.D., 1976. *The Strain Ellipsoid. I: Stress and strain: basic concepts of continuum mechanics for geologists.* Springer-Verlag, 139-150, New York.
- Michon, L. y Merle, O. 2003. Mode of lithospheric extension: Conceptual models from analogue modeling. *Tectonics* 22.
- Miller, J.F. y Mitra, S. 2011. Deformation and secondary faulting associated with basement-involved compressional and extensional structures. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 95: 675-689.
- Mitra, S. 1990. Fault-propagation folds. Geometry, kinematic evolution, and hydrocarbon traps. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 74: 921-945.
- Mitra, S. y Miller, J.F. 2013. Strain variation with progressive deformation in basement-involved Trishear structures. *Journal of Structural Geology* 53: 70-79.
- Mitra, S. y Mount V.S. 1998. Foreland basement-involved structures. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 82: 70-109.
- Mukherjee, S., Talbot, C.J. y Koyi, H.A. 2010. Viscosity estimates of salt in the Hormuz and Namakdan salt diapirs, Persian Gulf. *Geological Magazine* 147: 497-507.
- Li, J. y Mitra, S. 2017. Geometry and evolution of fold-thrust structures at the boundaries between frictional and ductile detachments. *Marine and Petroleum Geology* 85: 16-34.
- Liu, C., Yin, H. y Zhu, L. 2012. TrishearCreator: A tool for the kinematic simulation and strain analysis of Trishear fault-propagation folding with growth strata. *Computers and Geosciences* 49: 200-206.
- Louis, L., Wong, T.F. y Baud, P. 2007. Imaging strain localization by X-ray radiography and digital image correlation: Deformation bands in Rothbach sandstone. *Journal of Structural Geology* 29: 129-140.
- Oriolo, S., Cristallini, E.O., Japas, M.S. y Yagupsky, D.L. 2015. Estructura neógena de la Precordillera Andina, Argentina: Aportes de modelos análogos. *Andean Geology* 42: 20-35.
- Panien, M., Schreurs, G. y Pfiffner, A. 2006. Mechanical behaviour of granular materials used in analogue modelling: insights from grain characterisation, ring-shear tests and analogue experiments. *Journal of Structural Geology* 28: 1710-1724.
- Perrin, C., Clemenzi, L., Malavieille, J., Molli, G., Taboada, A. y Dominguez, S. 2013. Impact of erosion and décollements on large-scale faulting and folding in orogenic wedges: Analogue models and case studies. *Journal of the Geological Society of London* 170: 893-904.
- Plotek, B., Guzmán, C., Cristallini, E. y Yagupsky, D. 2021. Analysis of fault bend folding kinematic models and comparison with an analog experiment. *Journal of Structural Geology* 146.
- Reber, J.E., Cookeand M.L. y Dooley, T.P. 2020. What model material to use? A Review on rock analogs for structural geology and tectonics, *Earth-Science Reviews* 202: 103107.
- Ritter, M.C., Leever, K., Rosenau, M. y Oncken, O. 2016. Scaling the sandbox—Mechanical (dis) similarities of granular materials and brittle rock. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121: 6863-6879.
- Rosas, F.M., Duarte, J.C., Almeida, P., Schellart, W.P., Riel, N. y Terrinha, P. 2017. Analogue modelling of thrust systems: Passive vs. active hanging wall strain accommodation and sharp vs. smooth fault-ramp geometries. *Journal of Structural Geology* 99: 45-69.
- Rudolf, M., Rosenau, M., Ziegenhagen, T., Ludwikowski, V., Schucht, T., Nagel, H. y Oncken, O. 2019. Smart speed imaging in digital image correlation: Application to seismotectonic scale modeling. *Frontiers in Earth Science* 6: 00248.
- Saffar, M. Al. 1993. Geometry of fault-propagation folds: method and application. *Tectonophysics* 223: 363-380.
- Saha, P., Bose, S. y Mandal, N. 2016. Sandbox modelling of sequential thrusting in a mechanically two-layered system and its implications in fold-and-thrust belts. *Journal of Geodynamics* 100: 104-114.
- Sarno, L., Carravetta, A., Tai, Y.C., Martino, R., Papa, M.N. y Kuo, C.Y. 2018. Measuring the velocity fields of granular flows – Employment of a multi-pass two-dimensional particle image velocimetry (2D-PIV) approach. *Advanced Powder Technology* 29: 3107-3123.
- Schellart, W.P. 2000. Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: Scaling implications for their usage in analogue modelling. *Tectonophysics* 324: 1-16.
- Schellart, W.P. 2002. Analogue modelling of large-scale tectonic processes: An introduction. *Journal of the Virtual Explorer* 7: 00045.
- Schellart, W.P. y Strak, V. 2016. A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. *Journal of Geodynamics* 100: 7-32.
- Schrank, C.E., Boutelier, D.A. y Cruden, A.R. 2008. The analogue shear zone: From rheology to associated geometry. *Journal of Structural Geology* 30: 177-193.
- Schuh-Senlis, M., Thieulot, C., Cupillard, P. y Caumon, G. 2020. Towards the application of Stokes flow equations to structural restoration simulations. *Solid Earth* 11: 1909-1930.
- Shaw, J.H., Novoa, E. y Connors, C.D. 2005. Structural controls on growth stratigraphy in contractional fault-related folds. *American Association of Petroleum Geologists Memoir* 400-412.
- Stotwiński, M., Adamuszek, M. y Burliga, S. 2020. Numerical study of tectonic structure evolution in a multi-layer evaporite sequence. *Journal of Structural Geology* 134: 104011.
- Sun, M., Yin, A., Yan, D., Ren, H., Mu, H., Zhu, L. y Qiu, L. 2018. Role of

- pre-existing structures in controlling the Cenozoic tectonic evolution of the eastern Tibetan plateau: New insights from analogue experiments. *Earth and Planetary Science Letters* 491, 207-215.
- Suppe, J. y Medwedeff, D. A. 1984. Fault-propagation folding. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 16: 670.
- Suppe, J. y Medwedeff, D.A. 1990. Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 83: 409-454.
- Sveen, J.K. 2004. An introduction to MatPIV v. 1.6.1. *World Wide Web Internet Web Inf Syst.* 27 p.
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A.Y., Armijo, R. y Cobbold, P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. *Geology* 10, 611-616.
- Thielicke, W. y Sonntag, R. 2021. Particle Image Velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab. *Journal of Open Research Software* 9: 1-14.
- Thielicke, W. y Stamhuis, E.J. 2014. PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*. <https://doi.org/10.5334/jors.bl.j>
- Wallace, W.K. y Homza, T.X. 2004. Detachment folds versus fault-propagation folds, and their truncation by thrust faults. In K. R. McClay, (Ed), *Thrust tectonics and hydrocarbon systems: Am. Assoc. Petrol. Geol. Memoir* 82: 324-355.
- Weijermars, R., Jackson, M.P.A. y Vendeville, B. 1993. Rheological and tectonic modeling of salt provinces. *Tectonophysics* 217(1-2): 143-174.
- White, D.J., Take, W.A. y Bolton, M.D. 2003. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Geotechnique* 53: 619-631.
- Woodward, N. B. 1997. Low-amplitude evolution of break-thrust folding. *Journal of Structural Geology* 19: 293-301.
- Yagupsky, D. 2010. Metodología para el estudio de sistemas compresivos y de sus controles estructurales. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, p. 203.
- Yan, D.P., Xu, Y.B., Dong, Z. Bin, Qiu, L., Zhang, S. y Wells, M. 2016. Fault-related fold styles and progressions in fold-thrust belts: Insights from sandbox modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121: 2087-2111.
- Zanon, M.L. y Gomes, C.J.S. 2019. Sandbox models of fault-bend folding: A new investigation with a pre-existing fault ramp. *Journal of Structural Geology* 127: 103864
- Zehnder, A. y Allmendinger, R. 2000. Velocity field for the Trishear model. *Journal of Structural Geology* 22: 1009-1014.
- Zhao, H., Guo, Z. y Yu, X. 2017. Strain modelling of extensional fault-propagation folds based on an improved non-linear Trishear model: A numerical simulation analysis. *Journal of Structural Geology* 95: 60-76.
- Zulauf, J. y Zulauf, G., 2004. Rheology of plasticine used as rock analogue: The impact of temperature, composition and strain. *Journal of Structural Geology* 26: 725-737.