

**Modelo análogo de *Silly Putty* para una colisión oblicua. Primeras aproximaciones.**

**Andres Arturo Pereira Pérez**

Universidad del Norte

*Departamento de Física y Geociencias*

Barranquilla, Atlántico

Mayo de 2020

**Modelo análogo de *Silly Putty* para una colisión oblicua. Primeras aproximaciones.**

**Andres Arturo Pereira Pérez**

Director

**Camilo Montes Rodriguez**

Codirector

**Alfredo Enrique Lora Melendez**

*Trabajo de grado para optar al título de: **Geólogo***

Universidad del Norte

*Departamento de Física y Geociencias*

Barranquilla, Atlántico

26 de mayo de 2020

## **Agradecimientos**

El autor expresa su agradecimiento a:

Al profesor Camilo Montes, director del trabajo de grado y al profesor Alfredo Lora, codirector del trabajo de grado, por su acompañamiento, comentarios y colaboración en la ejecución del proyecto.

A mis compañeros Carlos Ortiz, Daniel Fernández y Edgar Núñez por sus colaboraciones en el montaje experimental.

A estudiantes de geología de la promoción 2018-I por ayudar en la recolección y ordenamiento de los datos.

## Resumen

Con el objeto de estudiar el comportamiento desde el punto de vista de los mecanismos de deformación subyacente en colisión entre dos placas tectónicas, en este trabajo se presenta una modelación computacional de este fenómeno. Para ello se implementaron cuatro modelos experimentales con el objeto de i) reconocer patrones de deformación en un evento de colisión oblicua con materiales de comportamiento dúctil, y ii) analizar la influencia que tiene el ángulo de convergencia y la tasa de deformación. La idea central en los cuatro modelos consiste en hacer colisionar dos bloques de *Silly Putty*, ubicándolos en una plataforma inclinada que permite variar el ángulo de inclinación entre  $10^\circ$  y  $20^\circ$  y de esta manera variar la velocidad de colisión. Las cuatro configuraciones experimentales estudiadas se obtuvieron mediante la elección de dos ángulos de convergencia ( $20^\circ$  y  $40^\circ$ ). Para calcular la deformación progresiva en ambos bloques como una función del estiramiento, el acortamiento, la deformación por corte y por torsión, se usaron marcadores de deformación en la superficie de los bloques. Los resultados obtenidos se procesaron y visualizaron con el código computacional SSPX, cuyos fundamentos descansan en la mecánica de medios continuos. El análisis de los resultados muestra que existe una correlación entre el ángulo de convergencia inicial y la deformación de los bloques. según la cual, un ángulo de convergencia mayor favorece el grado de rotación y la deformación. Los resultados obtenidos en este trabajo evidencian las similitudes existentes con los obtenidos a partir de la reconstrucción palinspástica propuesta en trabajos previos orientados al estudio de la colisión continental del norte de los andes. y el margen caribe (Montes et al., 2019). En este orden de ideas, lo propuesto aquí establece nuevos y valiosos aportes a considerar en futuros proyectos sobre este tema.

**Palabras clave:** Modelo análogo, deformación, Colisión oblicua, margen del Caribe.

## **Abstract**

With the aim to study the behavior from the mechanisms of underlying deformation in a collision between two tectonic plates, this work shows computational modeling of this phenomenon. For this, four experimental models were implemented to i) recognize deformation patterns in an oblique collision event with ductile behavior materials, and ii) analyze the influence of the convergence angle and the deformation rate. The main idea in the four models is to collide two Silly Putty blocks, placing them on an inclined platform that allows the inclination angle to be varied between  $10^\circ$  and  $20^\circ$  and modify the collision speed. The four experimental configurations studied were obtained by choosing two convergence angles ( $20^\circ$  and  $40^\circ$ ). To calculate the progressive deformation in both blocks as a function of stretching, shortening, shear, and torsional deformation. Deformation markers were used on the surface of the blocks. The results obtained were processed and visualized with the SSPX computer code, whose foundations are supported by the mechanics of continuous media. The analysis of the results shows that there is a correlation between the initial convergence angle and the deformation of the blocks. according to which, a greater angle of convergence favors the degree of rotation and deformation. The results obtained in this work show the existing similarities with those obtained from the palinspastic reconstruction proposed in previous works oriented to the study of the continental collision of the northern Andes and the Caribbean margin (Montes et al., 2019). In this order of ideas, what is proposed here establishes new and valuable contributions to consider in future projects on this topic.

**Keywords:** Analogue model, strain, oblique collision, Caribbean margin.

**Tabla de contenido**

<b>Resumen.....</b>	<b>4</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>7</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>8</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Metodología.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Materiales.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Configuración del modelo.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3 Recolección y análisis de datos.....</b>	<b>15</b>
<b>3. Resultados .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Deformación interna.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 Rotación .....</b>	<b>25</b>
<b>4. Discusión .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 Análisis de deformación.....</b>	<b>28</b>
<b>4.2 Aproximación con el norte de los Andes y el margen Caribe.....</b>	<b>28</b>
<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>30</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>31</b>
<b>Apéndice A .....</b>	<b>35</b>

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> Materiales utilizados en la elaboración del bloque A.....	13
<b>Tabla 2.</b> Materiales Utilizados en la Elaboración del Bloque B.....	13
<b>Tabla 3.</b> comparación de los resultados de deformación en tres intervalos de tiempo para el bloque A.....	20
<b>Tabla 4.</b> comparación de los resultados de deformación en tres intervalos de tiempo para el bloque B.....	20

## Lista de figuras

- Figura 1.** Configuración inicial de los materiales. El bloque A se desliza sobre la superficie inclinada por acción gravitacional hasta colisionar con el bloque B. La plastilina funciona como anclaje para evitar que el bloque B también se deslice.....11
- Figura 2.** Representación esquemática del montaje experimental que se realizó en este experimento. Se logra apreciar en el costado izquierdo el mecanismo que permite asegurar la plataforma con el ángulo deseado. Las dimensiones de la base permiten realizar dos experimentos, pero es necesario dos cámaras fotográficas.....14
- Figura 3.** Variables tomadas en cuenta. **a)** ángulo de colisión entre ambos bloques. **b)** ángulo de inclinación de la plataforma.....16
- Figura 4.** Secuencias Fotográficas progresivas de la deformación de los bloques en tres intervalos de tiempo para cada experimento. **A)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **B)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . **C)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **D)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ .....17
- Figura 5.** Elipses de distorsión finita (con diámetro inicial de  $\approx 8\text{mm}$ ) sobrepuestas en el estado final de deformación para cada experimento. **a)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **b)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . **c)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **d)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . **e)** Diagrama rosa con la orientación de los ejes de máximo estiramiento y **f)** acortamiento para el bloque B.....18
- Figura 6.** Evolución de la deformación por estiramiento en tres intervalos de tiempo de cada experimento. **A)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **B)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . **C)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **D)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . Valores más positivos representan mayor estiramiento (adimensional).....21
- Figura 7.** Evolución de la deformación por acortamiento en tres intervalos de tiempo de cada experimento. **A)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **B)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . **C)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **D)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . Valores más negativos representan acortamiento mayor (adimensional)..... 22
- Figura 8.** Evolución de la máxima deformación por cizallamiento en tres intervalos de tiempo de cada experimento. **A)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **B)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . **C)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **D)** Inclinación de



20° y ángulo de colisión de 40°. Valores más positivos representan mayor cizallamiento (adimensional).....23

**Figura 9.** Evolución de la deformación por rotación (en grados) en tres intervalos de tiempo de cada experimento. **A)** Inclinación de 10° y ángulo de colisión de 20°. **B)** Inclinación de 10° y ángulo de colisión de 40°. **C)** Inclinación de 20° y ángulo de colisión de 20°. **D)** Inclinación de 20° y ángulo de colisión de 40°. Valores más negativos representan mayor rotación en sentido antihorario.....24

**Figura 10.** dilatación progresiva de los bloques A y B. **A)** dilatación para experimentos con inclinación de 20°. **B)** dilatación para experimentos con inclinación de 10°. Resultados positivos indican incremento en el área, valores negativos representan compresión.....25

**Figura 11.** Rotación progresiva a partir del promedio de los marcadores de deformación del bloque B. las líneas en color negro representan los experimentos con ángulo de colisión de 20° y en color rojo los experimentos con ángulo de colisión de 40°.....26

**Figura 12.** Comparación entre la reconstrucción palinspástica propuesta por Montes *et al.* (2019) y los resultados del modelo análogo desde un estado inicial hasta uno final.....29

## **Introducción.**

Los modelos análogos son aproximaciones experimentales usados en las ciencias de la Tierra para investigar fenómenos geológicos y procesos geodinámicos en laboratorios; permiten representar uno o más componentes específicos del sistema terrestre con el uso de geometrías, reologías y condiciones simplificadas de límites o contornos (Schellart y Strak, 2016). Esta metodología permite la observación de procesos de deformación en un laboratorio mediante el uso de materiales análogos cuidadosamente seleccionados que desempeñan el papel de las rocas en la realidad. La comparación de un estado inicial no deformado con cualquier estado en el proceso de deformación nos permite medir la deformación finita e infinitesimal (Koyi, 1997), permitiendo comprender la formación y evolución en zonas de convergencia de placas (p. ej. Peltzer y Tapponnier, 1988; Tapponnier, *et al.*, 1982).

Para modelar fenómenos de colisión se debe considerar que el desplazamiento relativo entre placas litosféricas normalmente da como resultado deformación oblicua en los límites de placa. Esto se debe a que los límites de placa presentan formas irregulares y rara vez se encuentran paralelas o perpendiculares a la trayectoria del movimiento (Díaz-azpiroz, 2016). Además, existen grandes áreas de deformación tanto en zonas límites de placa como en zonas de intra-placa que no pueden ser representados como simples bloques litosféricos que mantienen un comportamiento rígido (Molnar y Tapponnier, 1975; Peltzer y Tapponnier, 1988). Alrededor del 14 % de la superficie del planeta no se puede considerar como rígida (Kreemer *et al.*, 2014). Por tal motivo, es necesario la realización de proyectos enfocados en el comportamiento dúctil que presentan las placas continentales durante procesos de deformación oblicua.

En este trabajo se modeló la deformación en 2D durante la colisión oblicua de dos bloques con comportamiento dúctil en una plataforma inclinada. Estos experimentos tienen como objetivo modelar colisiones oblicuas con materiales simples como el *Silly Putty*, a partir de una configuración experimental sencilla. Con estos experimentos podemos examinar como el ángulo de colisión y la velocidad de colisión influyen en los resultados de deformación oblicua (estiramiento, acortamiento, rotación). Finalmente, se busca una breve comparación de los resultados obtenidos con un evento de colisión oblicua presente entre el margen del Caribe y el norte de los Andes. Este estudio presenta una interpretación de los resultados experimentales usando un análisis de deformación sencilla.



**Figura 1.** Configuración inicial de los materiales. El bloque B se desliza sobre la superficie inclinada por acción gravitacional hasta colisionar con el bloque A. La plastilina funciona como anclaje para evitar que el bloque B también se deslice.

## 2. Metodología

El modelo realizado no fue escalado para ningún caso en particular, consiste en la colisión de dos bloques de comportamiento dúctil situados en una superficie inclinada (Figura 1). El primer bloque (Bloque A) se caracteriza por ser más rígido y de menor densidad. El segundo bloque (bloque B) tiene un comportamiento más dúctil y es de mayor densidad que el bloque A.

### 2.1. Materiales

Este modelo se trabajó con materiales de fácil obtención y que permitieran tener un comportamiento dúctil. El *Silly Putty* es un material viscoelástico que consiste en mezclar una emulsión de acetato de polivinilo y tetraborato de sodio (Bermudez *et al.*, 1998; Golinelli *et al.*, 2017) y puede fabricarse de forma casera a partir de pegamento blanco y bórax. Posee largas moléculas de polímero se encuentran enredadas y están unidas por enlaces de hidrógeno débiles. Si se le aplica un bajo esfuerzo, los enlaces pueden romperse en una escala de tiempo relativamente larga y los hilos pueden desenredarse comportándose como un material viscoso. Los enlaces de hidrógeno pueden reformarse en la misma escala de tiempo y si el esfuerzo se aplica rápidamente, se rompen relativamente pocos enlaces y el material se comporta como un sólido elástico (Bermudez, *et al.*, 1998; Wilkes, 1981). Tanto esta característica y la accesibilidad en la fabricación son las razones por las que se usó como material base de ambos bloques con algunas ligeras variaciones entre ellas.

**Tabla 1***Materiales utilizados en la elaboración del bloque A*

<b>Materiales</b>	<b>Volumen (ml)</b>	<b>Función</b>
Solución de tetraborato de sodio (BÓRAX) al 1.13 M	80	Rigidez
Jabón líquido	45	Consistencia
Pegamento blanco	90	Cohesión

Para el bloque A se mezcló 45 ml de jabón líquido con 90 ml de pegamento blanco hasta obtener una mezcla homogénea y se le añadió lentamente 80 ml de solución de Bórax al 1.13M mientras se agita el material hasta que se absorba la solución (Tabla 1). El bloque B se preparó de forma similar, con la diferencia en la solución de bórax la cual es 0.04M y con la adición 45 ml de bentonita diluida al 0.64M (Tabla 2).

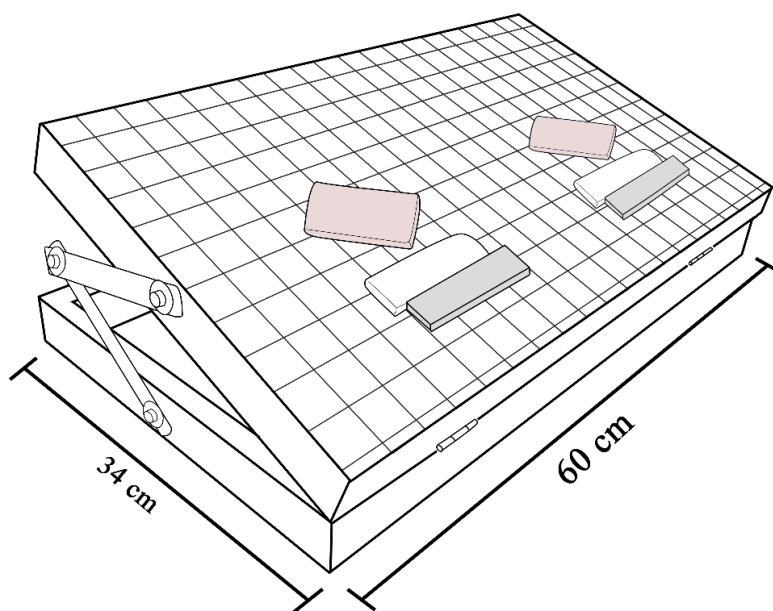
**Tabla 2***Materiales utilizados en la elaboración del bloque B*

<b>Materiales</b>	<b>Volumen (ml)</b>	<b>Función</b>
Solución de tetraborato de sodio (BÓRAX) al 0.04 M	80	Rigidez
Jabón líquido	45	Consistencia
Pegamento blanco	90	Cohesión
Solución de bentonita al 0.64M	45	Aumentar la densidad

## **2.2. Configuración del modelo**

La configuración experimental consiste en una plataforma inclinada de 34.0 x 60.0 cm, construida exclusivamente para la realización de este experimento de tal manera que permitiera realizar dos pruebas de forma simultánea (Figura 2). La plataforma se construyó con dos marcos de madera de iguales dimensiones unidos por una bisagra en uno de sus extremos. Esta

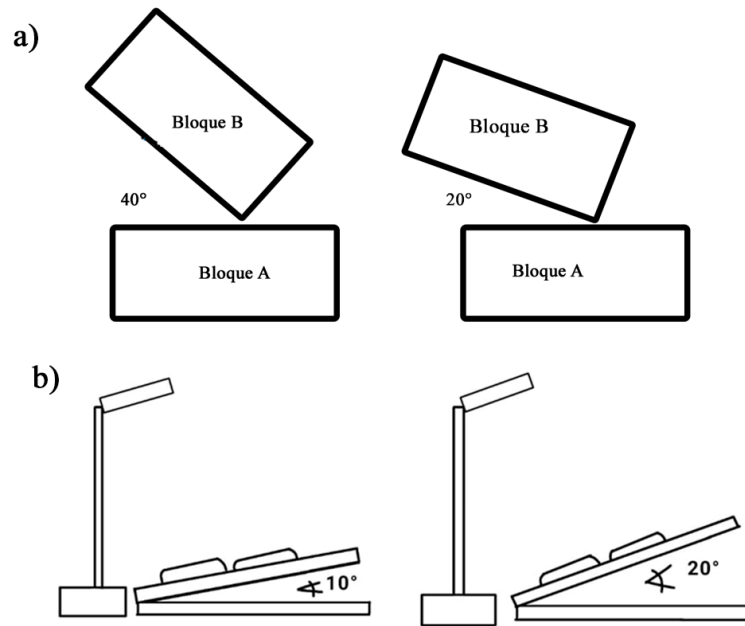
plataforma tiene además un brazo con un mecanismo que controla y asegura el ángulo de inclinación a conveniencia. En el marco superior se instaló una lámina de acrílico con las mismas dimensiones y se le dibujaron cuadrículas 3.0 x 3.0 cm. El acrílico se cubre con papel vinilo adhesivo transparente para proporcionar una superficie más uniforme y se lubricó con jabón líquido para reducir la fuerza de fricción. Las variables que se tuvieron en cuenta fueron la velocidad de colisión y el ángulo de colisión entre los bloques. La velocidad de colisión se controló modificando la inclinación de la plataforma en  $10^\circ$  y  $20^\circ$  y el ángulo de colisión entre ambos materiales que se tomó fue de  $20^\circ$  y  $40^\circ$  (Figura 3). Los bloques se elaboraron con una dimensión aproximada de 12.0 x 5.0 cm. El bloque A se ubicó en la sección inferior de la plataforma apoyado sobre un bloque de plastilina de 11.5 x 4.5 cm para mantenerlo en reposo mientras el bloque B se acomoda en la parte superior de la plataforma permitiéndole deslizarse por acción de la gravedad.



**Figura 2.** Representación esquemática del montaje experimental que se realizó en este experimento. Se logra apreciar en el costado izquierdo el mecanismo que permite asegurar la plataforma con el ángulo deseado. Las dimensiones de la base permiten realizar dos experimentos, pero es necesario dos cámaras fotográficas.

### 2.3. Recolección y análisis de datos

Para la recolección de datos, se utilizaron pequeños papeles circulares como marcadores de deformación ubicados de manera uniforme en cada bloque. Se tomaron fotografías cada 30 segundos con smartphones de igual resolución ubicados de forma paralela a la plataforma y con una aplicación llamada *Lapse it*, permitiendo registrar la variación de los marcadores en el tiempo. Se utilizó el software libre *ImageJ* (Ferreira y Rasband, 2012) para digitalizar los marcadores de distorsión de cada secuencia fotográfica en un plano cartesiano de dos dimensiones. Finalmente, para registrar los resultados de deformación y los vectores de desplazamiento, se empleó el software libre *SSPX*. Este es una aplicación Macintosh, Cocoa / Universal para calcular la deformación de los datos de desplazamiento/velocidad en dos y tres dimensiones (Cardozo & Allmendinger, 2009). Con este software se logró calcular la deformación de ambos bloques, comparando los marcadores de deformación desde un estado inicial a un estado final (deformación finita) y de forma progresiva. Para obtener un mejor entendimiento de la teoría utilizada en los cálculos de distorsión realizados por *SSPX* se puede revisar los trabajos de Allmendinger *et al.* (2012), Cardozo y Allmendinger (2009) ó Means (1976). Los valores son interpolados mediante el método de vecino más cercano (knn) tomando como parámetros el número de vecinos  $k = 6$  y la resolución de celdas de 3 mm. Estos parámetros se definieron después de comparar los resultados para diferentes valores de  $k$  y se consideraron como los más adecuados porque permitían obtener resultados coherentes sin mucho ruido y con poco solapamiento entre clases.



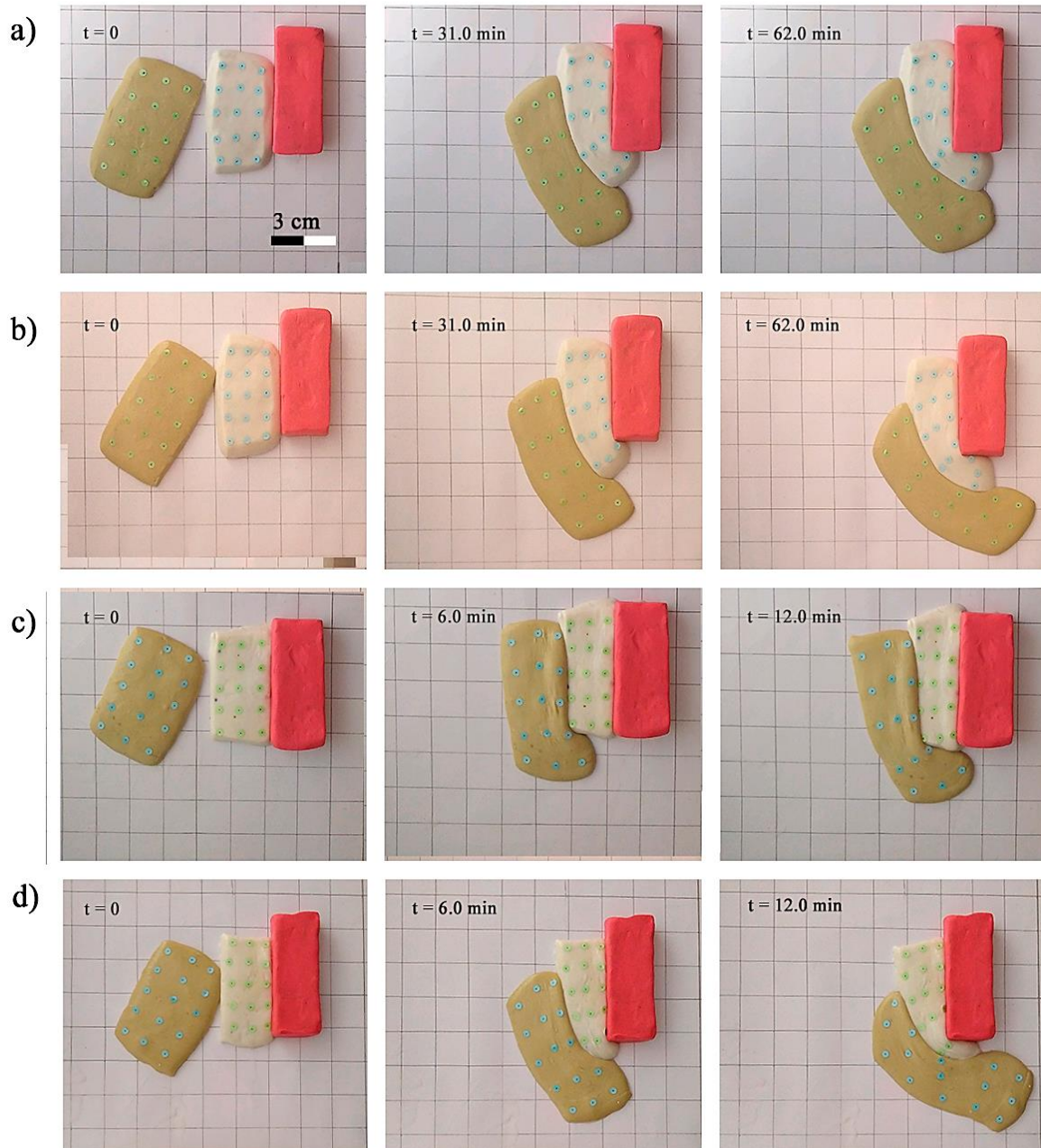
**Figura 3.** Variables tomadas en cuenta. **a)** ángulo de colisión entre ambos bloques. **b)** ángulo de inclinación de la plataforma.

### 3. Resultados

Se realizaron cuatro modelos experimentales (figura 4): a) con inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$  (i10o20), b) inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$  (i10o40), c) inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$  (i20o20) y finalmente d) con inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$  (i20o40). Inicialmente se tomaron las mediciones en unidad de píxel y luego fueron escalas a milímetros usando como referencia la distancia de las cuadrículas de la plataforma. El tiempo límite que se necesitó para registrar la colisión en cada experimento cambió considerablemente según el ángulo de inclinación de la plataforma. En los experimentos con inclinación de  $10^\circ$  se registraron datos durante 62 minutos mientras que los experimentos con inclinación de  $20^\circ$  solo fue necesario tomar datos

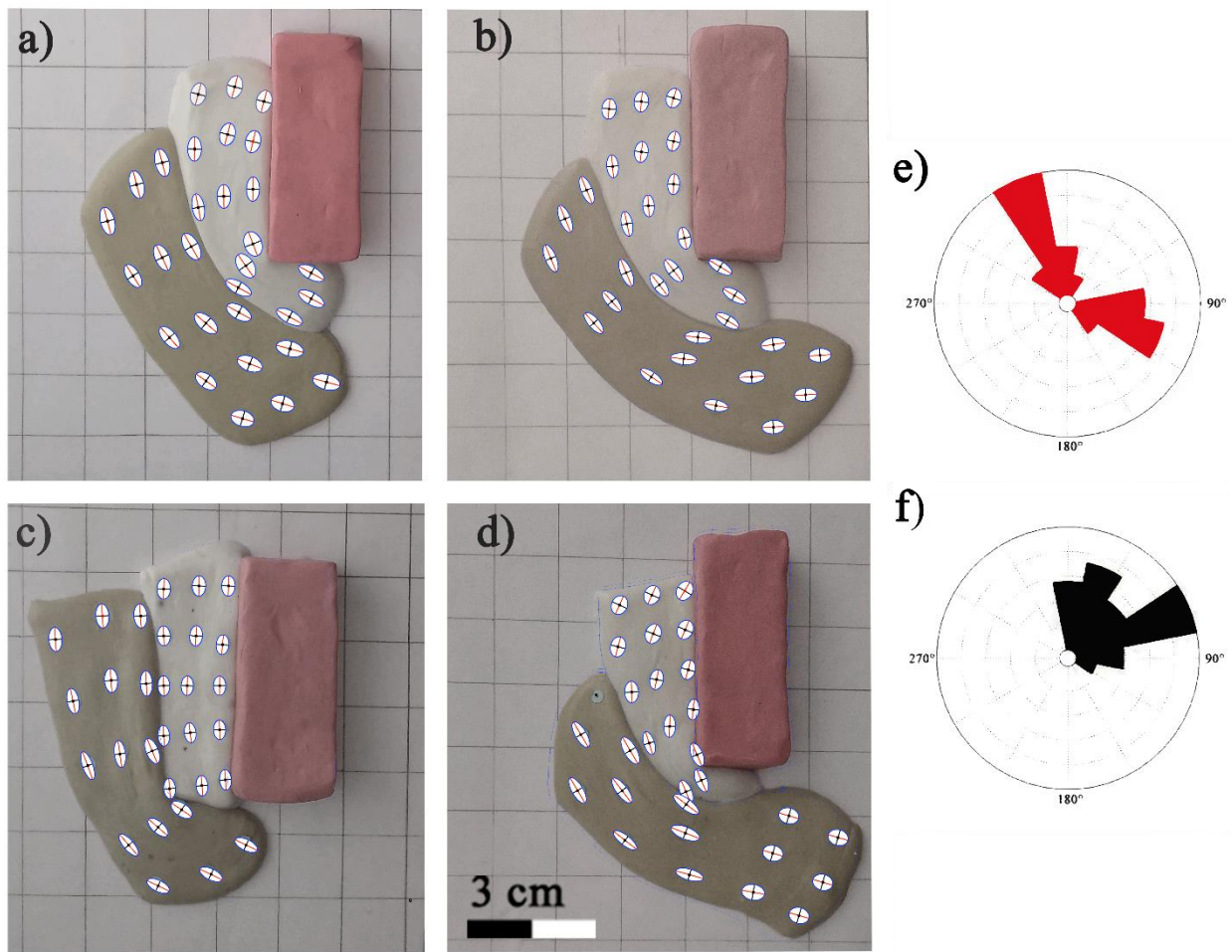


durante 12 minutos. Por otro lado, los experimentos con un ángulo de colisión de  $40^\circ$  (fig. 4b y 4d) se caracterizan por tener un desplazamiento mayor del Bloque B después de la colisión.



**Figura 4.** Secuencias Fotográficas progresivas de la deformación de los bloques en tres intervalos de tiempo para cada experimento. **A)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **B)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . **C)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **D)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ .

### 3.1. Deformación interna



**Figura 5.** Elipses de distorsión finita (con diámetro inicial de  $\approx 8\text{mm}$ ) sobrepuestas en el estado final de deformación para cada experimento. **a)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **b)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . **c)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **d)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . **e)** Diagrama rosa con la orientación de los ejes de máximo estiramiento y **f)** acortamiento para el bloque B.

Los resultados de deformación interna (distorsión) corresponden a reconstrucciones de la distorsión utilizando el programa SSPX. Esta deformación se caracterizó teniendo en cuenta los parámetros de extensión, acortamiento, deformación por cizalla y rotación (figuras 6 a 9). La deformación finita interna se ilustró con elipses de distorsión en cada marcador de

los bloques (figura 5). Estas elipses de distorsión presentan el eje de estiramiento ( $\epsilon_{\text{máx}}$ ) y acortamiento ( $\epsilon_{\text{mín}}$ ). La orientación de los ejes de distorsión es similar en cada experimento revelando dos tendencias de aproximadamente  $104^\circ$  y de  $330^\circ$  para  $\epsilon_{\text{máx}}$ , y  $14^\circ$  y  $240^\circ$  para  $\epsilon_{\text{mín}}$  (figura 5e y 5f). Nótese que la orientación de  $\epsilon_{\text{máx}}$  y  $\epsilon_{\text{mín}}$  por definición son perpendiculares entre sí y están orientadas en la dirección donde la deformación por cizalla es cero (Ramsay, y Hubber, 1983).

También se obtuvo la deformación progresiva en función del estiramiento, acortamiento, deformación por cizalla y rotación (figuras 6 a 9). La tabla 3 y 4 muestran los valores de deformación promedios obtenidos en los bloques A y B respectivamente en tres intervalos de tiempo. El bloque B muestra dos valores significativos en función del estiramiento, para un ángulo de colisión de  $20^\circ$ , la deformación es de aproximadamente 50% y para un ángulo de colisión de  $40^\circ$  la deformación llega a ser del 60%. A diferencia del bloque B, el bloque A tiene mayor estiramiento en los modelos con la inclinación de la plataforma de  $20^\circ$  (tabla 3). La deformación por acortamiento es relativamente similar en cada una de las configuraciones, con un acortamiento promedio del 20% en el bloque A y del 30% en el bloque B. este acortamiento ocurre principalmente a lo largo del margen de los bloques (figura 7). El bloque A posee valores de máxima deformación por cizalla ( $\gamma_{\text{máx}}$ ) de mayor valor en los experimentos con inclinación de  $10^\circ$ , pero en el bloque B los valores de mayor magnitud se relacionan con el ángulo de colisión de  $40^\circ$ . Además, la figura 8 indica una zona donde la deformación es mayor ubicado entre el límite del bloque A.

**Tabla 3***Comparación de los resultados de deformación en tres intervalos de tiempo para el bloque A.*

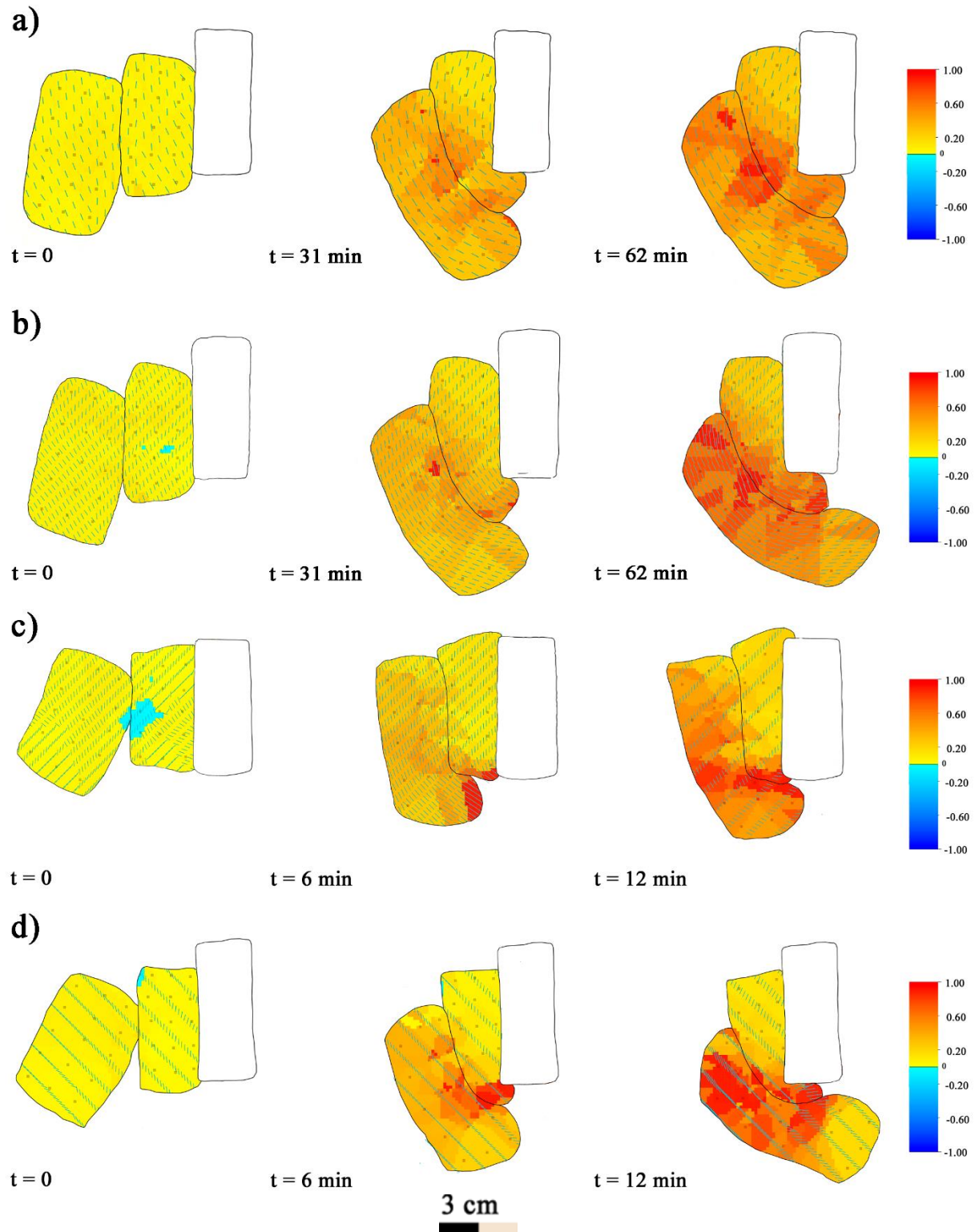
<b>Experimento</b>	<b>t (min)</b>	<b>Velocidad (mm/s) *</b>	<b><math>\epsilon_{\max}^*</math></b>	<b><math>\epsilon_{\min}^*</math></b>	<b><math>\gamma_{\max}^*</math></b>	<b>Rotación (°) *</b>	<b><math>\Delta</math> (dilatación)</b>
i10 o20	5.0	0.023	0.05	-0.03	0.07	2.4	-0.09
	31.0	0.009	0.25	-0.19	0.47	-16.3	-0.13
	62.0	0.006	0.38	-0.23	0.63	-20.5	-0.10
i10 o40	5.0	0.013	0.05	-0.06	0.10	1.4	-0.05
	31.0	0.005	0.24	-0.19	0.44	-16.6	-0.09
	62.0	0.004	0.42	-0.24	0.68	-27.2	-0.04
i20 o20	1.0	0.023	0.008	-0.015	0.023	0.8	-0.03
	6.0	0.023	0.12	-0.19	0.33	-0.4	-0.15
	12.0	0.020	0.20	-0.26	0.51	-0.6	-0.19
i20 o40	1.0	0.022	0.01	-0.02	0.03	0.1	-0.02
	6.0	0.017	0.10	-0.15	0.27	-8.5	-0.14
	12.0	0.016	0.23	-0.22	0.49	-20.5	-0.15

\*valores promedio a partir de los resultados de cada marcador para el bloque A.

**Tabla 4.***Comparación de los resultados de deformación en tres intervalos de tiempo para el bloque B.*

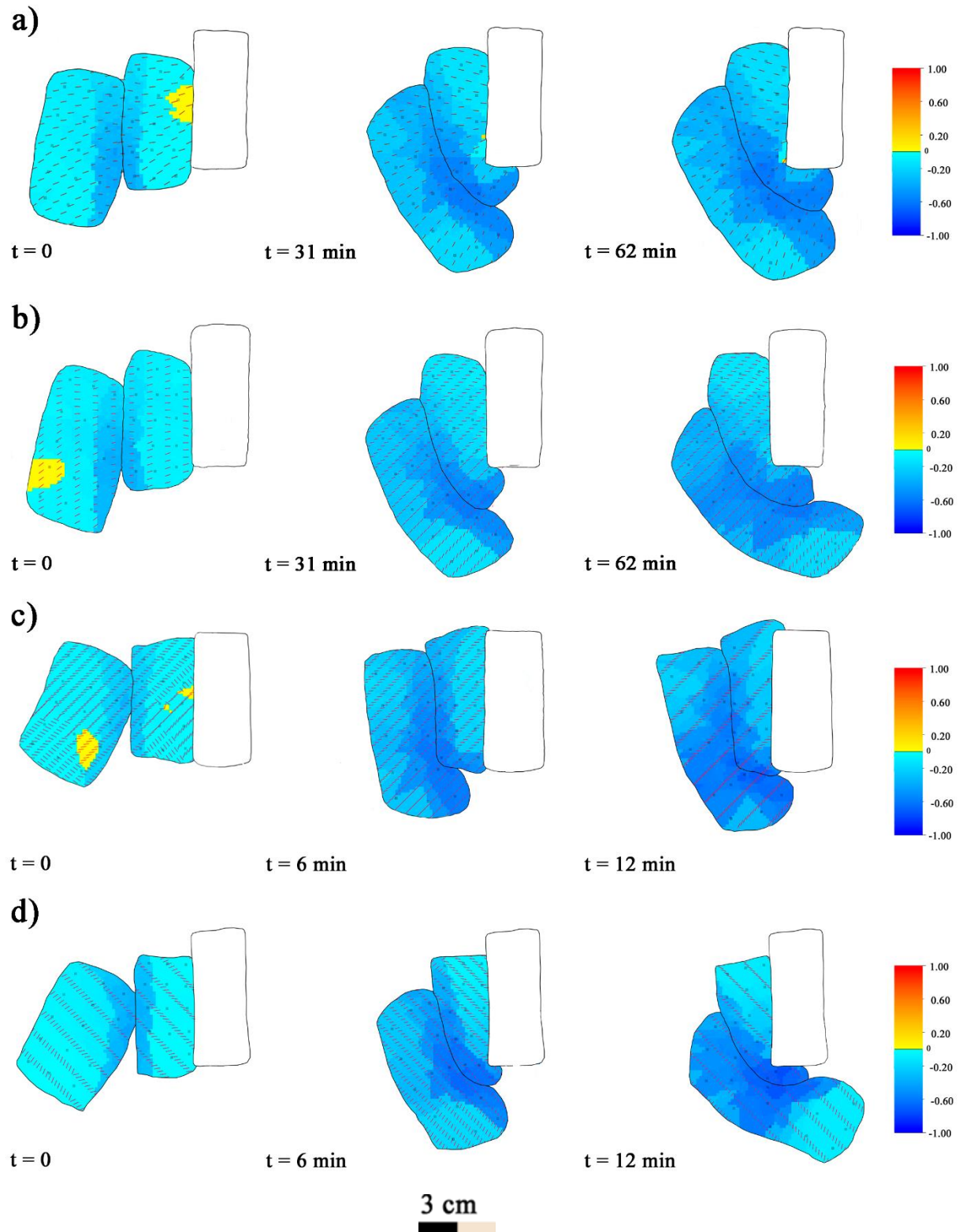
<b>Experimento</b>	<b>t (min)</b>	<b>Velocidad (mm/s)</b>	<b><math>\epsilon_{\max}</math></b>	<b><math>\epsilon_{\min}</math></b>	<b><math>\gamma_{\max}</math></b>	<b>Rotación (°)</b>	<b><math>\Delta</math> (dilatación)</b>
i10 o20	5.0	0.16	0.06	-0.07	0.13	-10.5	-0.06
	31.0	0.04	0.36	-0.21	0.61	-49.9	-0.02
	62.0	0.02	0.48	-0.24	0.67	-50.8	0.04
i10 o40	5.0	0.11	0.07	-0.06	0.12	-14.1	-0.02
	31.0	0.04	0.32	-0.22	0.55	-53.4	0.04
	62.0	0.03	0.59	-0.28	0.89	-62.5	0.15
i20 o20	1.0	0.47	0.04	-0.03	0.07	-0.9	-0.02
	6.0	0.18	0.32	-0.25	0.60	-31.6	-0.05
	12.0	0.12	0.50	-0.29	0.84	-46.6	-0.01
i20 o40	1.0	0.73	0.05	-0.05	0.09	-6.8	-0.03
	6.0	0.28	0.36	-0.26	0.64	-54.4	-0.03
	12.0	0.22	0.63	-0.30	0.98	-67.3	0.05

\*valores promedio a partir de los resultados de cada marcador para el bloque B.

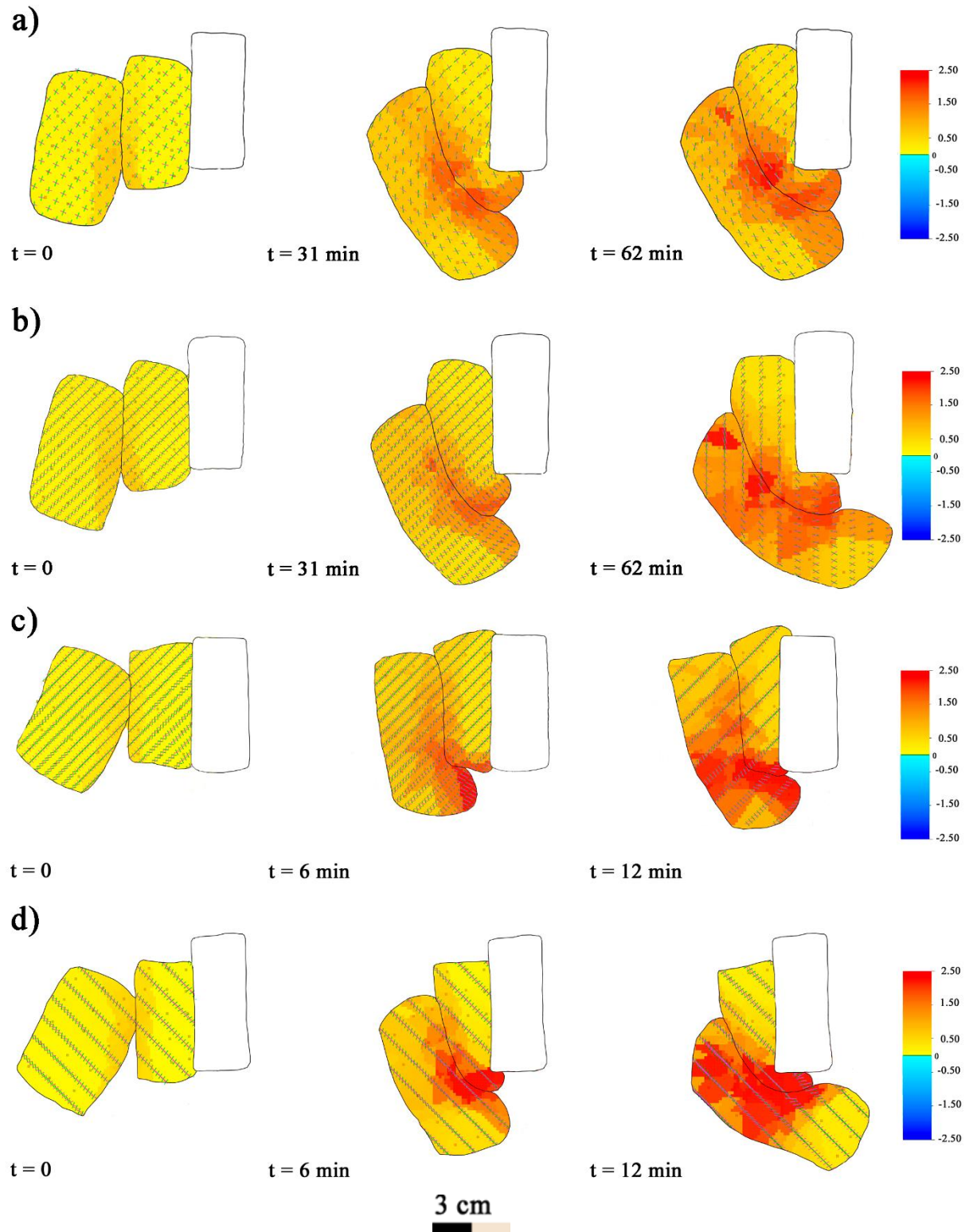


**Figura 6.** Evolución de la deformación por estiramiento en tres intervalos de tiempo de cada experimento. **a)** Inclutación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **b)** Inclutación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . **c)** Inclutación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **d)** Inclutación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . Valores más positivos representan mayor estiramiento (adimensional).

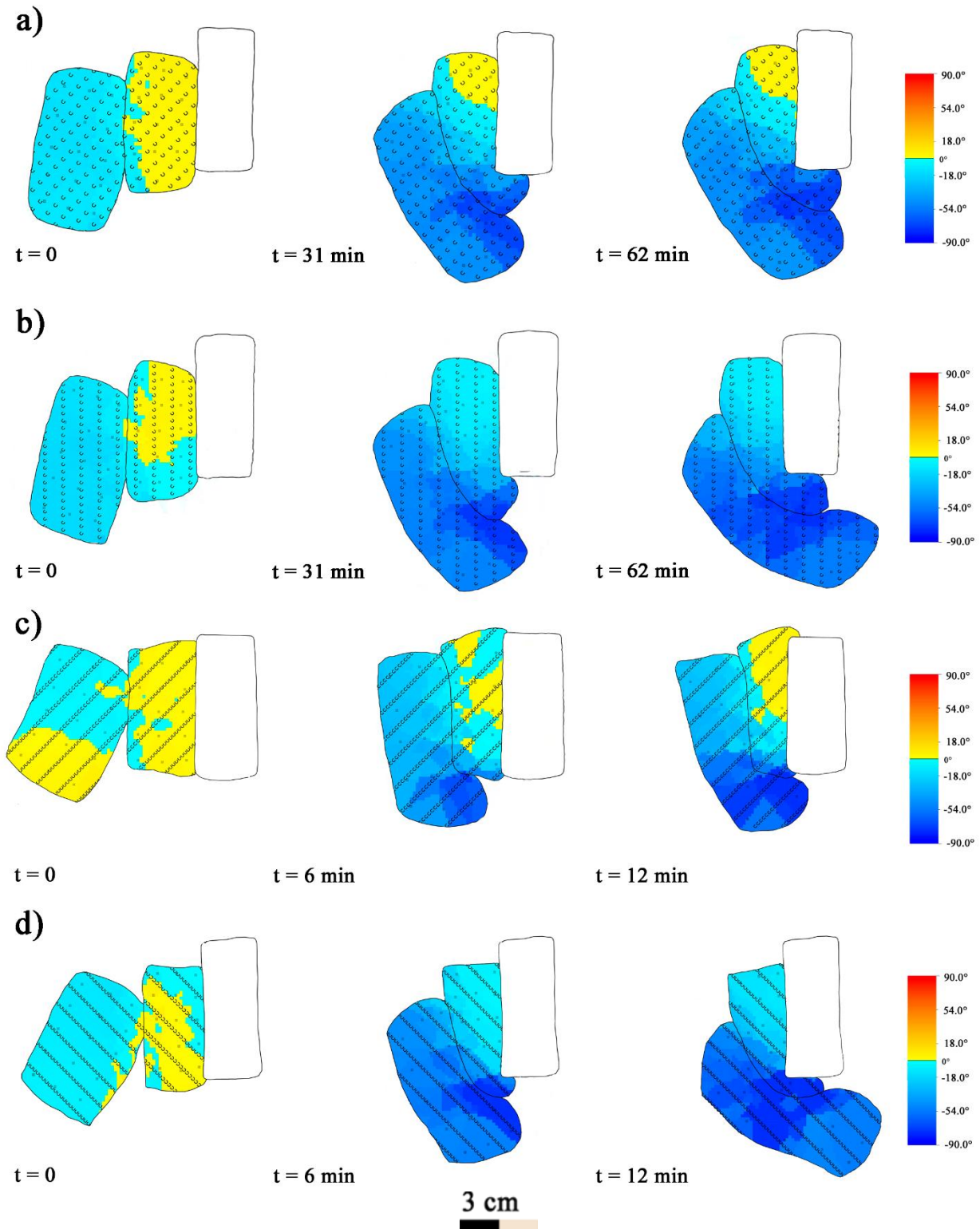




**Figura 7.** Evolución de la deformación por acortamiento en tres intervalos de tiempo de cada experimento. **a)** Inclínación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **b)** Inclínación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . **c)** Inclínación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **d)** Inclínación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . Valores más negativos representan acortamiento mayor (adimensional).

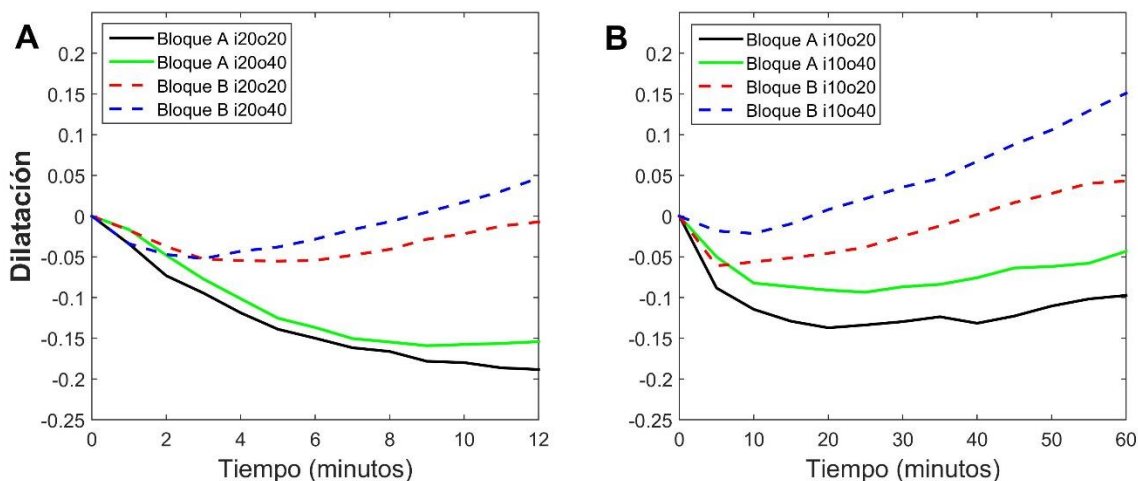


**Figura 8.** Evolución de la máxima deformación por cizallamiento en tres intervalos de tiempo de cada experimento. **a)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **b)** Inclinación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . **c)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **d)** Inclinación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . Valores más positivos representan mayor cizallamiento (adimensional).



**Figura 9.** Evolución de la deformación por rotación (en grados) en tres intervalos de tiempo de cada experimento. **a)** Inclínación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **b)** Inclínación de  $10^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . **c)** Inclínación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $20^\circ$ . **d)** Inclínación de  $20^\circ$  y ángulo de colisión de  $40^\circ$ . Valores más negativos representan mayor rotación en sentido antihorario.





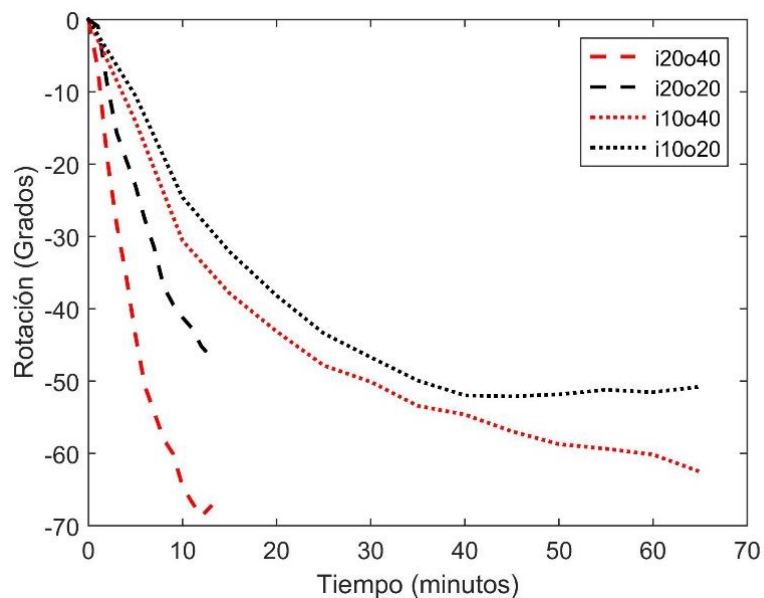
**Figura 10.** dilatación progresiva de los bloques A y B. **A)** dilatación para experimentos con inclinación de 20°. **B)** dilatación para experimentos con inclinación de 10°. Resultados positivos indican incremento en el área, valores negativos representan compresión.

La dilatación también es un buen indicador de diferentes comportamientos de deformación y se utilizan para resaltar la deformación progresiva de la superficie. La dilatación para los bloques A y B se estimó a partir de la variación del área de los bloques (Figura 10). El bloque A presenta alcanzó una compresión de 15.4% y 18.8% para una inclinación de 20°, i20-c40 e i20-c20 respectivamente; para una inclinación de 10° la compresión final alcanzada fue 4.3% y 9.7% para i10-c40 e i10-c20 respectivamente. En contraste, el bloque B inicia con un breve proceso de compresión menor al 5% en todos los casos y luego empieza a expandirse un 15.1% en i10-c20 y 4.3% en i10-c40.

### 3.2. Rotación

La rotación del Bloque B se estimó usando el promedio de los valores de rotación definidos por SSPX para cada uno de los marcadores en los diferentes experimentos realizados (Figura 9 y 11). La rotación del Bloque B en los experimentos con ángulo de colisión de 20° es

de alrededor de  $50^\circ$  ( $d \approx 46.6^\circ$ ,  $b \approx 51.5^\circ$ ); la rotación en los experimentos con ángulo de colisión de  $40^\circ$  es superior a  $60^\circ$  ( $a \approx 62.5^\circ$ ,  $c \approx 68.7^\circ$ ). Los valores negativos indican rotación en sentido antihorario. La rotación del bloque A tiene el mismo sentido, pero la rotación estimada es inferior a los  $30^\circ$ .



**Figura 11.** Rotación progresiva a partir del promedio de los marcadores de deformación del bloque B. las líneas en color negro representan los experimentos con ángulo de colisión de  $20^\circ$  y en color rojo los experimentos con ángulo de colisión de  $40^\circ$ .

## 4. Discusión

### 4.1. Análisis de deformación

Los resultados experimentales obtenidos evidencian como la evolución de los bloques dependen principalmente del ángulo de convergencia inicial. Comparando las diferentes configuraciones establecidas se presentaron variaciones de alrededor del 10% en los valores de deformación interna y entre el 11% y 20% en la rotación de los experimentos con diferente ángulo de convergencia. Las velocidades resultantes de la inclinación de la plataforma no

influyeron significativamente en la colisión. El ángulo de convergencia inicial permite que la colisión tenga un comportamiento de colisión oblicua la cual puede ser dividida en dos componentes, una perpendicular y otra paralela al borde de convergencia de los bloques. La componente perpendicular genera acortamiento en ambos bloques, por otra parte, la componente paralela produce deformación por cizalla alrededor de la zona de colisión y debido a las propiedades del *Silly Putty*, los bloques se adhieren al entrar en contacto y la deformación se distribuye como si se tratara de un solo elemento. Sin embargo, el bloque A es ligeramente más rígido y al tener el borde posterior fijo por la plastilina su deformación interna es relativamente menor.

La morfología resultante de los bloques es muy similar a un oroclinal. De acuerdo con Carey (1955), esta estructura se produce cuando un sistema orogénico ha sido flexionado en un plano horizontal hasta tener la forma de un codo o herradura. Cuanto mayor es el ángulo de convergencia mayor es el grado de rotación y la deformación del oroclinal en el bloque B. Moresi *et al.* (2014), establece que en un evento de colisión con un microcontinente se genera concentración de la deformación en el límite entre la zona donde domina del acortamiento y la extensión. Esta zona de transición genera el cizallamiento que conduce a la formación de un oroclinal. Asumiendo que la región con predominancia en el acortamiento comprende el margen de la colisión con el bloque A, y la región de dominio del estiramiento se puede asociar con la fracción sin colisionar del bloque B que mantiene el desplazamiento, es posible observar la zona de transición con mayor concentración de la deformación en la figura 8,

La variación en el cambio del área indica una etapa de contracción al inicio de la colisión en el bloque B y una posterior dilatación que están relacionadas con el comportamiento dúctil del material. Se plantea que la contracción se debe a un engrosamiento vertical del material porque el

acortamiento y el estiramiento del bloque es similar al inicio de la deformación. Sin embargo, a medida que la deformación continua, el estiramiento se hace mucho mayor que el acortamiento por lo tanto el bloque se adelgaza aumentando su área. Este análisis es interpretativo porque Lastimosamente no se registró el comportamiento vertical con el fin de simplificar las mediciones, pero es posible apreciar pequeñas estrías y acumulamiento en los bloques, alrededor de la zona de colisión.

Si bien los datos obtenidos son muy representativos, se debe tener en cuenta algunas características que ayuden a mejorar y profundizar las mediciones. En primer lugar, es necesario aumentar la densidad de marcadores para tener una mejor resolución del análisis y mejorar la extrapolación de los datos.

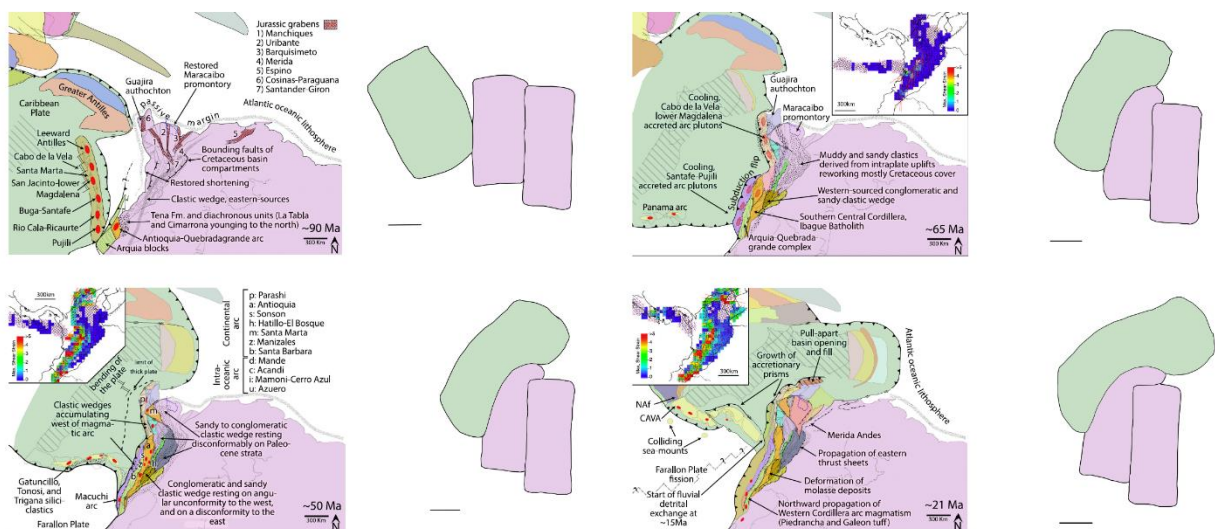
Usar smartphones para capturar las fotografías tiene el inconveniente que estas sufren un fenómeno de distorsión óptica al poseer lentes de tipo gran angular. Esta distorsión se produce por como la geometría de la lente afecta la manera que la luz pasa por ella y se proyecta en el sensor del dispositivo (Cedrés, 2016). Para reducir la distorsión se intentó ubicar los bloques en el centro de la captura y se evitaron los bordes porque la distorsión aumenta del centro hacia afuera.

#### **4.2. Aproximación con el norte de los Andes y el margen Caribe**

A pesar de que el modelo no fue escalado, es posible hacer una comparación cualitativa del comportamiento en el límite entre el Norte de los Andes y el Caribe (figura 12). Diferentes autores (Higgs, 2009; Man, 2002; Montes *et al.*, 2019; Pindell y Kennan, 2001) sugieren que la placa del Caribe ha migrado en dirección este-noreste con respecto a Suramérica fija a lo largo del Cretácico y el Cenozoico. La penetración de la placa del Caribe entre las placas americanas

pudo haberse producido por la flexión de la placa a una escala litosférica (Burke *et al.*, 1978), acercándose a Suramérica con una falla de rumbo (sistema de fallas de Romeral) y colisionando de forma oblicua con sentido dextral a lo largo del margen del Ecuador y Colombia hasta la Guajira (Higgs, 2009).

El estilo de deformación es muy similar a los resultados obtenidos en el modelamiento. Los datos de declinación paleo magnética tomados en el norte de los Andes y la placa Caribe (ver *Key piercing points and strain datasets* de Montes *et al.*, 2019), indican rotación de ambos bloques en sentido horario (con sectores donde la rotación puede alcanzar a los 90°) por la migración del Caribe. Burke *et al.* (1978) estimó un acortamiento aproximado del 30% para la placa Caribe entre la isla la Española y la península de la Guajira ocasionado por la convergencia con las placas de Norteamérica y Suramérica. Además, a partir del Paleoceno se presenta extensión al sureste del Caribe en sentido este-oeste dando origen a la cuenca de Granada (Bird *et al.*, 1993).



**Figura 12.** Comparación entre la reconstrucción palinspástica propuesta por Montes *et al.* (2019) y los resultados del modelo análogo desde un estado inicial hasta uno final.

## 5. Conclusiones

Los materiales utilizados en este trabajo (Silly putty modificado) permiten simular la deformación de cuerpos dúctiles durante un evento de colisión oblicua a bajas tasas de deformación, estimando la deformación interna en relación con el estiramiento, acortamiento, deformación por cizalla y rotación en sentido antihorario. Hay una correlación positiva entre el ángulo de convergencia y la magnitud de rotación. La deformación se caracteriza por tener dos dominios de deformación. El primer dominio se encuentra limitado por el margen del bloque A (acortamiento) y el segundo dominio comprende mayor extensión del bloque B en la zona que no colisiona. La zona de transición genera cizallamiento y favorece la formación del oroclinal.

Al comparar parcialmente este modelo con la convergencia entre el norte de los Andes y la placa Caribe, se observan similitudes en la deformación, la extensión del Caribe en sentido este-oeste originando la cuenca de Granada, acortamiento relativamente perpendicular al margen de colisión y rotación tanto del Caribe como del norte de los Andes en sentido horario por la colisión oblicua y la migración del Caribe. Por lo tanto, se puede considerar que este modelo ofrece un primer análisis que permita entender el comportamiento de colisiones oblicuas además de apoyar las hipótesis presentadas sobre la evolución y la deformación del norte de los Andes y el Caribe.

## Referencias

- Allmendinger, R., Cardozo, N., y Fisher, D. (2011). *Finite strain. In Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors*. Cambridge: Cambridge University Press.  
doi:10.1017/CBO9780511920202.010
- Bermudez, V. D. Z., Almeida, P. P. De, y Seita, J. F. (1998). How To Learn and Have Fun with Poly ( Vinyl Alcohol ) and White Glue. 75(11). *Journal of Chemical Education* 1998 75 (11), 1410. doi: 10.1021/ed075p1410
- Bird, D. E., Hall, S. A., Casey, J. F., y Millegan, P. S. (1993). Interpretation of magnetic anomalies over the Grenada Basin. *Tectonics*, 12(5), 1267-1279.
- Burke, K., Fox, P. J., y Şengör, A. M. C. ( 1978), Buoyant ocean floor and the evolution of the Caribbean. *J. Geophys. Res.*, 83( B8).doi: 10.1029/JB083iB08p03949
- Cardozo, N., y Allmendinger, R. W. (2009). SSPX: A program to compute strain from displacement/velocity data. *Computers & Geosciences*, 35(6), 1343-1357.
- Carey, S. W. (1955). The orocline concept in geotectonics-Part I. *In Papers and proceedings of the Royal Society of Tasmania. Vol. 89*, pp. 255-288.
- Cedrés, D. E. S. (2016). Análisis, estimación y corrección de la distorsión de lentes en imágenes y vídeos. Aplicaciones en visión por ordenador (Doctoral dissertation, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria).

- Díaz-Azpiroz, M., Brune, S., Leever, K. A., Fernández, C., & Czeck, D. M. (2016). Tectonics of oblique plate boundary systems. *Tectonophysics*, 693. doi: 10.1016/j.tecto.2016.07.028
- Ferreira, T., y Rasband, W. (2012). ImageJ user guide. *ImageJ/Fiji*, 1, 155-161.
- Golinelli, N., Spaggiari, A., y Dragoni, E. (2017). Mechanical behaviour of magnetic Silly Putty: Viscoelastic and magnetorheological properties. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(8). <https://doi.org/10.1177/1045389X15591655>
- Higgs, R. (2009). Caribbean-South America oblique collision model revised. *Geological Society, London, Special Publications*, 328(1), 613-657.
- Koyi, H. (1997), Analogue modelling: from a qualitative to a quantitative technique; a historical outline. *Journal of Petroleum Geology*, 20: 223-238.
- Kreemer, C., Blewitt, G., Klein, E.C. (2014). A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15 (10), 3849–3889.
- Lakes, R.S. (2009) *Viscoelastic Materials*. Cambridge University Press, New York. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626722>
- Mann, P., Calais, E., Ruegg, J. C., DeMets, C., Jansma, P. E., y Mattioli, G. S. (2002). Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations. *Tectonics*, 21(6), 7-1.
- Means, W. D. (1976). *Stress and strain: Basic Concepts of Continuum Mechanics for Geologists* (1st ed.). Springer-Verlag New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9371-9>



- Molnar, P., y Tapponnier, P. (1975). Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science* 189 (4201), 419–426.
- Montes, C., Rodriguez, A. F., Rodriguez-corcho, A. F., Bayona, G., y Hoyos, N. (2019). Continental margin response to multiple arc-continent collisions: The northern Andes-Caribbean margin. *Earth-Science Reviews*, 198(September), 102903.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102903>
- Moresi, L., Betts, P. G., Miller, M. S., y Cayley, R. A. (2014). Dynamics of continental accretion. *Nature*, 508(7495), 245-248.
- Peltzer, G., y Tapponnier, P. (1988). Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia collision: An experimental approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B12), 15085-15117.
- Pindell, J.L., y Kennan, L. (2001). Kinematic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean. *Transactions, Petroleum systems of deep-water basins: global and Gulf of Mexico experience. GCSSEPM 21st Annual Research Conference, Houston, Texas, GCSSEPM*, 193-220.
- Ramsay J. G., y Huber M. I. (1983). *The techniques of modern structural geology, vol 1. Strain analysis*. Academic Press, London, 307 pp.
- 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.  
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.03.009>

Tapponnier, P., Peltzer, G. L. D. A. Y., Le Dain, A. Y., Armijo, R., y Cobbold, P. (1982).

Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10(12), 611-616.

Wilkes, G. L. (1981). An overview of the basic rheological behavior of polymer fluids with an emphasis on polymer melts. *Journal of Chemical Education* 1981 58 (11), 880.

doi:10.1021/ed058p880

## **Apéndice A. Videos suplementarios**

Este proyecto cuenta con videos suplementarios donde se muestra la deformación progresiva de cada experimento los cuales pueden ser revisados en el siguiente enlace:

[https://drive.google.com/drive/folders/118R\\_IextSP5BeykgsTDec4-KuznWchJp?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/118R_IextSP5BeykgsTDec4-KuznWchJp?usp=sharing)