



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE GEOCIENCIAS

**ANÁLISIS MEDIANTE MODELOS ANALÓGICOS DEL
SISTEMA DE CUENCAS *PULL-APART* EN LA PARTE SUR
DEL GOLFO DE CALIFORNIA**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
LENIN IVÁN VALDEZ BARRERA

DIRECTOR DE TESIS
DR. LUIS
MARIANO CERCA MARTÍNEZ
CENTRO DE GEOCIENCIAS

JURIQUILLA, QUERÉTARO, .OCTUBRE...2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

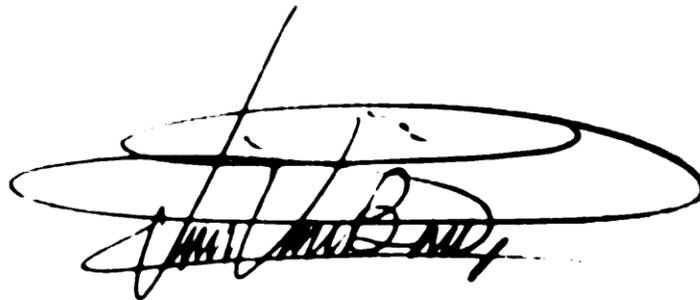
DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Declaración de Ética

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la legislación Universitaria. Con base en de las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguró mediante mi firmar al alcance que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Toda la actividad de, o referencias a, la obra de otros autores aparecerán de vida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales”.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Lenin Iván Valdez Barrera', is written over a large, horizontal, hand-drawn oval. The signature is fluid and cursive, with the first name 'Lenin' being the most prominent.

Lenin Iván Valdez Barrera

A mi madre...
Nelly y Juana, las quiero mucho...

Agradecimientos

Agradezco profundamente al Dr. Luís Mariano Cerca Martínez por haberme dado la oportunidad de trabajar con él, su apoyo, asesoría y confianza, elementos que sirvieron para poder lograr este trabajo tan importante en mi desarrollo como profesional.

A los integrantes de mi comité: Dr. Ángel Francisco Nieto Samaniego, Dr. Thierry Calmus, Dr. Jesús Arturo Martín Barajas, Dr. Juan Contreras Pérez por su atención y comentarios constructivos en la revisión de esta tesis.

A mi madre, Nelly Barrera Treviño, que siempre ha estado a mi lado acompañándome en todos mis proyectos, gracias por tu apoyo incondicional, cariño y fe.

Gracias Diana, te amo.

De las cosas que existen las que desconozco son las imprescindibles...

Lenin Valdez

Resumen

El sistema de cuencas *pull-apart* en la parte sur del Golfo de California se localiza en el límite transformante entre las placas Pacífico y Norteamérica, asociado al *rift* oblicuo del Mioceno medio. De Norte a Sur el sistema de cuencas *pull-apart* comprende las cuencas Guaymas, Carmen, Farallón, Pescadero y Alarcón. La medición de las características geométricas de las cuencas *pull-apart* como la propone Gürbüz (2014), muestra significativas diferencias en el L (largo), W (ancho) y el ángulo agudo α de cada cuenca. El análisis de trabajos previos permite interpretar que los factores que influyen en la geometría de las cuencas incluyen entre otros, fallas preexistentes, variaciones en velocidad y dirección en el desplazamiento del bloque de Baja California y el flujo de la corteza dúctil. Se proponen dos series experimentales, modelos de dos capas en escala cortical (quebradiza-dúctil), que nos permiten examinar posibles explicaciones para la evolución de las cuencas tipo aguja, Z y romboidal en la parte sur del Golfo de California. Específicamente estos modelos análogos, exploran variaciones en: a) geometría de las fallas, haciendo variar el ángulo agudo α 25°, 30°, 45° y 90°, b) variaciones en el movimiento del bloque de Baja California, induciendo variaciones en la oblicuidad del desplazamiento respecto al desplazamiento de las fallas de rumbo 0°, 5°, 7° y 11° y c) el flujo de la corteza dúctil, reduciendo la resistencia al flujo de la capa dúctil. La serie I, consiste de 16 experimentos, que combinan los ángulos de oblicuidad y de ángulo α . En la serie experimental II, en ocho experimentos se combinan las variaciones del ángulo de oblicuidad y α , donde adicionalmente se reduce la viscosidad de la capa inferior dúctil. Los experimentos son de carácter mecánico y no contemplan efectos isostáticos, de subsidencia ni térmicos. Tomando en cuenta estas limitaciones los experimentos reproducen apropiadamente las características geométricas de las cuencas *pull-apart* L, W, α y d formadas en un régimen transtensivo y son consistentes con las leyes de escalamiento geométrico propuestas en otros trabajos. El principal efecto del desplazamiento oblicuo es una componente extensional en las fallas de rumbo. La disminución de la viscosidad en la capa inferior dúctil modifica considerablemente la geometría de la cuenca. Finalmente los resultados se comparan con las cuencas en la parte sur del Golfo de California.

Abstract

The pull-apart basin system of the southern Gulf of California is located in the transform plate boundary between the Pacific and North America and is associated to oblique rifting that started from the middle Miocene. From north to south the pull-apart basin system comprises Guaymas, Carmen, Farallon, Pescadero, and Alarcon basins. The measurement of the basin geometry as proposed by Gürbüz (2014) show significant morphological differences among them. The analysis of previous works allow to interpret that influencing factors include, among others, pre-existing faults, variations in the displacement of the Baja California block, and flow of the ductile crust. Two experimental series of two-layer (brittle-ductile) models allow to examine possible explanations for the evolution of the different morphologies observed. Specifically, analogue models explore variations in: a) pre-existing fault geometry by varying the acute angle α of 25°, 30°, 45°, and 90°, b) variations in the Baja California Block by varying the angle of oblique displacement induced with respect to strike-slip faults between 0°, 5°, 7°, and 11° and; c) the flow of the ductile crust by reducing flow resistance of the ductile layer. Series I consisted of 16 experiments in which the combinations of the angles of obliquity and acute α were tested. In series II, eight experiments combining the acute angle and two obliquity angles (0° and 11°) were performed adding a ductile layer with lower viscosity. The experiments are purely mechanic and do not contemplate isostatic, subsidence, and thermal effects. In spite of these limitations the experiments properly reproduced the geometry of pull-apart basins formed in a transtensive regime, and are consistent with geometric scaling laws proposed previously. The main effect of the oblique displacement is an extensional component in the strike-slip faults. A lower flow resistance of the ductile layer considerably modified the basin geometry. The results are finally compared with the basins in the southern Gulf of California.

Contenido

Declaración de Ética	I
Agradecimientos.....	III
Resumen	IV
Abstract.....	V
Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas	15
Capítulo 1.- Generalidades.....	16
1.1.- Introducción	16
1.2.-Justificación.....	17
1.3.- Objetivos	18
1.3.1.- Objetivos generales.....	18
1.3.2.- Objetivos particulares	18
1.4- Las cuencas <i>pull-apart</i>	18
1.4.1.-Definición	18
1.4.2.-Aspectos geométricas de las cuencas <i>pull-apart</i>	19
1.4.3.-Modelo para el desarrollo de una cuenca <i>pull-apart</i>	20
1.4.4.-Aspectos mecánicos.....	21
Capítulo 2.- Marco geológico y tectónico del Golfo de California.....	23
2.1.- Marco tectónico regional	23
2.2.- Geología del Golfo de California	29
2.3.- Geofísica disponible para la parte Sur del Golfo de California	31
Capítulo 3.- Consideraciones importantes para la construcción de los modelos análogos a las cuencas <i>pull-apart</i> del Golfo Sur.....	36
Capítulo 4.- Estrategia de Modelado	41
4.1.- Justificación.....	41
4.2- Modelos analógicos de procesos a escala cortical	41
4.3- Escalamiento	42
4.4- Estrategia de modelado.....	42
4.5.- Serie experimental I.....	43
4.6.- Serie experimental II.....	44
4.7.- Materiales	46

4.8.- Diseño de los experimentos	47
4.9.- Medición de la deformación	55
4.10.- Técnica de franjas	59
Capítulo 5.- Resultados.....	63
5.1.- Observaciones generales de la deformación vista en planta.....	65
5.2.- Resultados serie experimental I	68
5.2.1.- Resultados serie experimental I, experimentos ángulo α 25°	68
5.2.2.- Resultados serie experimental I experimentos ángulo α 30°	68
5.2.3.- Resultados serie experimental I experimentos ángulo α 45°	69
5.2.4.- Resultados serie experimental I experimentos ángulo α 90°	69
5.3.- Resultados serie experimental II.....	69
5.3.1.- Resultados serie experimental II experimentos con ángulo α 25°	70
5.3.2.- Resultados serie experimental II, experimentos con ángulo α 30°	71
5.3.3.- Resultados serie experimental II, experimentos con ángulo α 45°	71
5.3.4.- Resultados serie experimental II, experimentos con ángulo α 90°	72
5.4.- Observaciones generales de la deformación vista en los modelos de elevación digital.....	73
5.4.1- Observaciones generales de la deformación vista en los modelos de elevación digital, serie experimental I.....	75
5.4.2.- Observaciones generales de la deformación vista en los modelos de elevación digital, Serie experimental II	78
5.5.- Resultados, medición de la deformación, características geométricas de las cuencas <i>pull-apart</i> según la propuesta Gürbüz (2014).	84
5.5.1.- Ángulo agudo α vs % deformación (series experimentales “I” y “II”).....	85
5.5.2.- Longitud de cuenca (L) vs % deformación (serie experimental “I” y “II”).....	85
5.5.3.- Ancho de cuenca (W) vs % deformación (serie experimental “I” y “II”).....	88
5.5.4.- Extensión de cuenca (E) vs % deformación (series “I” y “II”).....	88
5.5.5.- Profundidad de cuenca (d) vs % deformación (serie experimental “I” y “II”)	88
Capítulo 6.- Discusión	92
6.1.- Comparación del arreglo geométrico experimental	92
6.2.- Validación de nuestro arreglo geométrico experimental	93
6.4.- Implicaciones para el sistema de cuencas pull-apart del Golfo Sur	97
Capítulo 7.- Conclusiones.....	100
7.1.- Series experimentales.....	100
7.2.- Sobre el Golfo Sur	101
8. - Bibliografía	103
9.- Anexos	111
9.1.- Perfiles de las cuencas	111

9.2.- Montajes serie experimental "I"113
 9.2.1.- Montajes ángulo $\alpha 25^\circ$ 113
 9.2.2.- Montajes ángulo $\alpha 30^\circ$ 117
 9.2.3.- Montajes ángulo $\alpha 45^\circ$ 121

9.3.- Montajes serie experimental "II"129
 9.3.1.- Montajes ángulo $\alpha 25^\circ$ 129
 9.1.3.- Montajes ángulo $\alpha 30^\circ$ 131
 9.3.2.- Montajes ángulo $\alpha 45^\circ$ 133
 9.3.4.- Montajes ángulo $\alpha 90^\circ$ 135

9.4.- Modelos de elevación, serie experimental "I"137
 9.4.1 Modelos de elevación ángulo $\alpha 25^\circ$ 137
 9.4.2.- Modelos de elevación ángulo $\alpha 30^\circ$ 140
 9.4.3.- Modelos de elevación ángulo $\alpha 45^\circ$ 142
 9.4.4.- Modelos de elevación ángulo $\alpha 90^\circ$ 144

9.5.- Modelos de elevación, serie experimental "II"146
 9.5.1 Modelos de elevación ángulo $\alpha 25^\circ$ 146
 9.5.2.- Modelos de elevación ángulo $\alpha 30^\circ$ 147
 9.5.3.- Modelos de elevación ángulo $\alpha 45^\circ$ 148
 9.5.4.- Modelos de elevación ángulo $\alpha 90^\circ$ 149

Índice de Figuras

Figura 1. Modelo geométrico de una cuenca <i>pull-apart</i> , (Gürbüz, 2014).	19
Figura 2. Modelo geométrico y de la formación de una cuenca <i>pull-apart</i> , (Gürbüz, 2014; modificado de Mann, 2007).	20
Figura 3. Mapa tectónico regional del Golfo de California tomado de Ferrari et al. (2013). Línea amarilla punteada define el límite de la Provincia extensional del Golfo (Stock y Hodges, 1989). Flecha azul, vector de desplazamiento para Baja California propuesto por Dixon et al. (2000). El ángulo entre al eje del <i>rift</i> y el vector de desplazamiento de Baja California.	23
Figura 4. Muestra las temporalidades del modelo de dos fases cinemáticas de evolución del margen por cizalla que afectó la Península de Baja California. A) configuración de los segmentos activos de dorsal (rosa) Oeste de Baja California, previo a que se abandonen 12.3 Ma. B) Movimiento que se considera para la placa entre los 12.3-6 Ma, cinemáticamente particionado en movimiento a rumbo dextral (325 km) en fallas al Oeste de Baja California y el <i>rifting</i> ortogonal del Golfo de California (90 Km), conocida como la fase del “proto-Golfo”. C) fallamiento de 6-0 Ma al Oeste de Baja California que se piensa que ceso y todo el movimiento de la placa se localizó en el Golfo de California que acomodo 345 km de movimiento transtensional, tomado de Fletcher et al. (2007).	25
Figura 5. Mapa de la evolución tectónica del NW de México, donde se resumen las estructuras principales y las edades de extensión en el margen conjugado de Golfo de California. PV- Puerto Vallarta, Hua- Huajicori, JM- Jesús María, (Ferrari et al., 2013).	27
Figura 6. Modelo de evolución tectónica para el Golfo de California; MG- Placa Magdalena, NAM- Placa de Norteamérica, PAC- Placa Pacífico, tomado de Sutherland et al. (2012).	28
Figura 7. Mapa regional geológico-tectónico de la parte Sur del Golfo de California y sus márgenes adyacentes, muestra la distribución de la corteza continental sumergida (en azul) (Ferrari et al., 2013). La geología se compila de los trabajo de Ferrari et al. (2007; 2013). En blanco la corteza oceánica, la ubicación del límite corteza oceánica-continental tomada de Lonsdale y Kluesner (2010). Mapa tomado de Duque-Trujillo et al., 2014.	30
Figura 8. Sur del Golfo de California. Mapa que muestra le ubicación de la sección sísmica Alarcón y las cuencas mayores observadas en la región, (Sutherland et al., 2012).	32
Figura 9. Vista de la sección sísmico multicanal, Sutherland et al (2012).	33
Figura 10. Mapa del experimento “PESCADOR”, Sur del Golfo de California, de Norte a Sur los perfiles (en líneas punteadas, puntos blancos y rojos); “Guaymas”, “Alarcón” y	

“Cabo-PV (Cabo-Puerto Vallarta); “G” (bloque Guaymas), “C” (bloque Carmen), “F” (Farallón), “P” (Pescadero), “A” (Alarcón), (Lizarralde et al., 2007).	34
Figura 11. Modelos de litosférico a partir de velocidades sísmicas de los segmentos “Guaymas”, “Alarcón” y “Cabo-PV” (Cabo-Puerto Vallarta), (Lizarralde et al., 2007)...	35
Figura 12. Mapa que muestra la parte Sur del Golfo de California donde se muestra delimitadas con línea negra las cuencas: A) Guaymas, B) Carmen, C) Farallón, D) Pescadero, y E) Alarcón y sus zonas transformes (Eakins et al., 2004); en líneas punteadas blancas, las secciones que se utilizaron para obtener la profundidad máxima de las cuencas.....	37
Figura 13. Muestra el contexto en el que consideramos la formación de las cuencas <i>pull-apart</i> en el Golfo Sur, en el límite de placas micro placa Baja California-Placa Norteamericana , en una zona de falla lateral derecha, donde el desplazamiento de la micro placa Baja California puede tener una variación de 0-10° respecto a las fallas de rumbo.....	38
Figura 14. Muestra a escala aproximada un perfil de resistencia de una corteza con 2 capas, quebradiza y dúctil, reología “ <i>Crème brûlée</i> ” (e.g., Corti et al., 2003).	42
Figura 15. Vista en planta del arreglo experimental, donde se esquematizan las principales características; 1.-placa de acrílico móvil, 2.- la flecha negra representa el movimiento de la placa acrílica, 3.- variación experimental del movimiento, 5° 7° y 11°, 4.- ángulo “ α ” propuesto (es el ángulo agudo entre la discontinuidad de velocidad y la variación angular que une los dos segmentos verticales entre las placas) 5.-en línea punteada la discontinuidad de velocidad, 6.- muestra la posición del motor.....	43
Figura 16. Muestra las principales características de la “mesa experimental” utilizada para la realización de los experimentos en el “Laboratorio de Mecánica Multiescalar de Geosistemas” (LAMG) del Centro de Geociencias (CeGeo).....	45
Figura 17. Modelo teórico simplificado de la formación de una cuenca <i>pull-apart</i> en una zona de flexura en una falla maestra de sentido lateral derecho, la formación de la cuenca se dará en la zona donde se da el relevo derecho de fallas, Mann et al. (1983). 2, Arreglo geométrico propuesto en este trabajo, se muestra el sentido de falla lateral derecha, la formación de la cuenca <i>pull-apart</i> se dará en la zona de traslape indicada con el símbolo “ α ”	48
Figura 18. a) Muestra la estratificación de los materiales en nuestro arreglo experimental, b) muestra en una imagen sísmica tomada de Piñero-Lajas, (2008), el cambio que se observa del comportamiento de las ondas sísmicas entre la parte somera y profunda de la corteza. También muestra la relación de escala y de comportamiento mecánico entre el modelo y el sistema natural.....	49
Figura 19. a) Muestra la disposición de los materiales parte del “set up”, la placa acrílica sujeta a las placas de triplay sobre las cuales se sobre pones una capa de silicón, b) muestra a los materiales de la base del “set up” cubiertos por la capa de arena de cuarzo.	50

Figura 20. Elementos del arreglo experimental: a) b) y c) y d).	51
Figura 21. Muestra las curva de flujo del silicón rosa (down corning 3179 dilatant compound) a diferentes tasas de deformación ($\dot{\epsilon}$) utilizado en la Serie I.....	52
Figura 22. Muestra la curvas de flujo del silicón gris con 25% de arena de cuarzo en peso (SGM 36) a diferentes tasas de deformación ($\dot{\epsilon}$) utilizado en la Serie "II".....	52
Figura 23. Muestra una comparación de un perfil de resistencia de un experimento de escala litosférica (cuatro capas) y del perfil de resistencia en la litósfera natural (Brun, 1999).	54
Figura 24. Perfiles de resistencia de la Serie I y Serie II de este trabajo con el perfil de resistencia de la corteza que presenta una reología de 2 capas (Corti et al., 2003).....	55
Figura 25. Imagen que muestra un experimento bajo luz blanca. 2, bajo luz con franjas.	56
Figura 26. Ángulo de iluminación utilizado para las fotografías en luz blanca y en franjas. 1.-proyector de luz, ángulo de 27° , 2.-Posición de la cámara que se usó para tomar las fotografías, 3.- Mesa de trabajo.	56
Figura 27. Muestra en una de nuestras fotografías las características geométricas de las cuencas <i>pull-apart</i> que se consideran en este trabajo, incluyen la propuesta de Gürbüz (2014), L (largo de la cuenca), W (ancho de cuenca) α (ángulo agudo alfa) y la medición que se propone en este trabajo E (extensión de cuenca).....	58
Figura 28. Figura que esquematiza la máxima deformación (5%) aplicada a nuestros experimentos.....	58
Figura 29. Muestra los siete series de deformación (fotografías) que se utilizaron para cuantificar la evolución de las características geométricas en todos nuestros experimentos L, W, α y "E", usando el programa "Image J".....	59
Figura 30. Muestra la superposición de dos ondas de la misma frecuencia y amplitud; a) en un punto en que están en fase, la amplitud resultante es el doble y la intensidad es el cuádruple, b) en un punto donde están en oposición de fase la amplitud y la intensidad don cero (Cabrera et al., 2000).	59
Figura 31. Muestra la máscara de franjas binarias (franjas blancas y negras) y un esquema de lo que se considera como el periodo utilizado.....	60
Figura 32. Esquema que muestra la proyección de la máscara binaria sobre una superficie ya deformada y la relación que presenta la diferencia "A-B" en "B-C", que es básicamente lo que se mide con las fotografías, la diferencia de esa relación en diferentes grados de deformación.	61
Figura 33. Muestra los siete estados de deformación (fotografías im00003, im000025, im000053, im000075, im000103, im000125 y im000149) que se utilizaron para cuantificar la evolución de la altura "d", en todos los experimentos (0%, 0.75% 1.5%, 2.5%, 3.4%, 4.3% y 5% de deformación) (Barrientos et al., 2008).....	62

- Figura 34. Muestra la fotografía antes del proceso en “ZEBRA” y en “SURFER”, los modelos de elevación generados, y la interpretación de estructuras que se realizó a todas las imágenes seleccionadas. 62
- Figura 35. Figura que muestra la imagen del estado 5% de deformación del experimento “45” (experimento con ángulo “ α ” de 45°, y cero ángulo de transtensión u oblicuidad) izquierda imagen fotográfica 147, derecha interpretación de las estructuras que se observan en la fotografía, al centro fallas normales asociadas a la cuenca, en los extremos fallas laterales asociadas a las fallas de rumbo. 66
- Figura 36. Figura que muestra la imagen del estado 5% de deformación del experimento “45” (experimento con ángulo “ α ” de 45°, y cero ángulo de transtensión u oblicuidad) izquierda imagen fotográfica 147, derecha interpretación de las estructuras que se observan en la fotografía, al centro fallas normales asociadas a la cuenca, en los extremos fallas laterales asociadas a las fallas de rumbo. 67
- Figura 37. Muestra la imagen del estado 5% de deformación del experimento “2 25” (experimento de la serie “II” con ángulo α de 25°, y cero ángulo de transtensión u oblicuidad) izquierda imagen fotográfica 147, derecha interpretación de las estructuras que se observan en la fotografía, al centro fallas normales asociadas a la cuenca, en los extremos fallas laterales asociadas a las fallas de rumbo. 70
- Figura 38. Muestra la imagen del estado 5% de deformación del experimento “2 30” (experimento de la serie experimental “II” con ángulo α de 30°, y cero ángulo de transtensión u oblicuidad) izquierda imagen fotográfica 147, derecha interpretación de las estructuras que se observan en la fotografía, al centro fallas normales asociadas a la cuenca, en los extremos fallas laterales asociadas a las fallas de rumbo. 71
- Figura 39. Figura que muestra la imagen del estado 5% de deformación del experimento “2 45” (experimento de la serie experimental “II” con ángulo α de 45°, y cero ángulo de transtensión u oblicuidad) izquierda imagen fotográfica 147, derecha interpretación de las estructuras que se observan en la fotografía, al centro fallas normales asociadas a la cuenca, en los extremos fallas laterales asociadas a las fallas de rumbo. 72
- Figura 40. Figura que muestra la imagen del estado 5% de deformación del experimento “2 90” (experimento de la serie experimental “II” con ángulo α de 90°, y cero ángulo de transtensión u oblicuidad) izquierda imagen fotográfica 147, derecha interpretación de las estructuras que se observan en la fotografía, al centro fallas normales asociadas a la cuenca, en los extremos fallas laterales asociadas a las fallas de rumbo. 73
- Figura 41. Muestra las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas *pull-apart* y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva. 74
- Figura 42. Muestra el experimento “25” y las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos

rasgos de las cuencas <i>pull-apart</i> y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva asociadas a las fallas de rumbo.	76
Figura 43. Experimento “90 05”. Muestra las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas <i>pull-apart</i> y su escala de colores que indican alturas, se observan lóbulos asociados a las fallas de rumbo (Flecha roja).	77
Figura 44. Muestra al experimento “30 11” y las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas <i>pull-apart</i> y su escala de colores que indican alturas, se observan lóbulos asociados a las fallas de rumbo (Flecha roja).	77
Figura 45. Muestra al experimento “2 90”, las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), escala de colores que indican alturas, vista en planta muestra los distintos rasgos de las cuencas <i>pull-apart</i> , con flechas rojas se muestra la presencia de dos fallas de rumbo, en círculos se resaltan lóbulos asociados a las fallas de rumbo.	78
Figura 46. Experimento “2 25”, las características generales de los modelos de elevación, deformación (%), escala de colores (alturas), muestra los distintos rasgos de las cuencas <i>pull-apart</i> , con flechas rojas se muestra la presencia de dos fallas de rumbo, en círculos se resaltan lóbulos asociados a las fallas de rumbo.	79
Figura 47. Muestra al experimento “2 45 11”, las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), escala de colores que indican alturas, vista en planta muestra los distintos rasgos de las cuencas <i>pull-apart</i> , con flechas rojas se muestra la presencia de dos fallas de rumbo, en círculos se resaltan lóbulos asociados a las fallas de rumbo.	80
Figura 48. Muestra al experimento “2 90 11”, las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), escala de colores que indican alturas, vista en planta muestra los distintos rasgos de las cuencas <i>pull-apart</i> , con flechas rojas se muestra la presencia de dos fallas de rumbo, en círculos se resaltan lóbulos asociados a las fallas de rumbo.	80
Figura 49. Muestra las curvas de nivel del experimento “90”, modelo de elevación a partir del que se produjeron los perfiles “a-b” y “c-d” (líneas rojas) en las zonas de falla acotadas como “A” y “B”.	81
Figura 50. Muestra las curvas de nivel del experimento “90 11”, modelo de elevación a partir del que se produjeron los perfiles “a-b” y “c-d” (líneas rojas) en las zonas de falla acotadas como “A” y “B”.	82
Figura 51. Muestra las curvas de nivel del experimento “2 90”, modelo de elevación a partir del que se produjeron los perfiles “a-b” y “c-d” (líneas rojas) en las zonas de falla acotadas como “A” y “B”.	83

Figura 52. Muestra las curvas de nivel del experimento “2 90 11”, modelo de elevación a partir del que se produjeron los perfiles “a-b” y “c-d” (líneas rojas) en las zonas de falla acotadas como “A” y “B”.....	83
Figura 53. Muestra las gráficas 3, 4, 5, 6 (serie I), 7,8 ,9 y 10, (serie II) donde se muestra la magnitud del ángulo α en grados, respecto a los diferentes porcentajes de deformación (% de extensión), en línea negra el ángulo propuesto en nuestro arreglo experimental.....	86
Figura 54. Gráficas 15, 16, 17, 18 (serie experimental I), 19, 21 y 22, (serie experimental II) donde se muestra la magnitud del largo de cuenca (L) en mm, respecto a los diferentes porcentajes de deformación (% de extensión).....	87
Figura 55. Gráficas 19, 21, 22, 23 (serie I), 24, 25 y 26 (serie II) donde se muestra la magnitud del ancho de cuenca (W) en mm, respecto al porcentaje de deformación (% de extensión).....	89
Figura 56. Gráficas 27, 28, 29, 30 (serie I), 31, 32, 33 y 33 (serie II), donde se muestra la magnitud de la extensión de cuenca (E), respecto a los diferentes porcentajes de deformación (% de extensión).....	90
Figura 57. Gráficas 35, 36, 37, 38 (serie I) 39, 40, 41 y 42 (serie II), donde se muestra la magnitud de la profundidad de cuenca (d), respecto a los diferentes porcentajes de deformación (% de extensión).....	91
Figura 58. Muestra el histograma de frecuencias calculado para la proporción largo/ancho, que se calcularon las cuencas medidas por Aydin y Nur (1982).	94
Figura 59. Grafica L/W propuesta por Aydin y Nur (1982), donde comparamos datos de otras cuencas <i>pull-apart</i> medidas en la zona norte de la falla de Anatolia en Turquía, Gürbüz (2010), datos de cuencas experimentales Basile y Brun (1999) con nuestros datos (círculos anaranjados y rojos) y los medidos en el Golfo Sur (círculos azules)..	95
Figura 60. Grafica L/W/d propuesta por Gürbüz (2010), donde comparamos datos de otras cuencas <i>pull-apart</i> medidas en la zona norte de la falla de Anatolia en Turquía, Gürbüz (2010) (esferas anaranjadas) nuestros modelos (esferas amarillas) y los medidos en el Golfo Sur (esferas verdes).....	96
Figura 61. Perfil transversal W-E de la cuenca “Guaymas” donde se muestra la profundidad máxima y sus variaciones variación (en m).....	111
Figura 62. Perfil transversal W-E de la cuenca “Carmen” donde se muestra la profundidad máxima y sus variaciones variación (en m).....	111
Figura 63. Perfil transversal W-E de la cuenca “Farallón” donde se muestra la profundidad máxima y sus variaciones variación (en m).....	111
Figura 64. Perfil transversal W-E de la cuenca “Pescadero” donde se muestra la profundidad máxima y sus variaciones variación (en m).....	112

Figura 65. Perfil transversal W-E de la cuenca “Alarcón” donde se muestra la profundidad máxima y sus variaciones variación (en m).....	112
Figura 66. La imagen muestra el montaje “25” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	113
Figura 67. La imagen muestra el montaje “25 05” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	114
Figura 68. La imagen muestra el montaje “25 07” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	115
Figura 69. La imagen muestra el montaje “25 11” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	116
Figura 70. La imagen muestra el montaje “30” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	117
Figura 71. La imagen muestra el montaje “30 05” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	118
Figura 72. La imagen muestra el montaje “30 07” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	119
Figura 73. La imagen muestra el montaje “30 11” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	120
Figura 74. La imagen muestra el montaje “45” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	121
Figura 75. La imagen muestra el montaje “45 05” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	122
Figura 76. La imagen muestra el montaje “45 07” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	123
Figura 77. La imagen muestra el montaje “45 11” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	124

Figura 78. La imagen muestra el montaje “90” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	125
Figura 79. La imagen muestra el montaje “90 05” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	126
Figura 80. La imagen muestra el montaje “90 07” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	127
Figura 81. La imagen muestra el montaje “90 11” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	128
Figura 82. La imagen muestra el montaje “2 25” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	129
Figura 83. La imagen muestra el montaje “2 25 11” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	130
Figura 84. La imagen muestra el montaje “2 30” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	131
Figura 85. La imagen muestra el montaje “2 30 11” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	132
Figura 86. La imagen muestra el montaje “2 45” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	133
Figura 87. La imagen muestra el montaje “2 45 11” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	134
Figura 88. La imagen muestra el montaje “2 90” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	135
Figura 89. La imagen muestra el montaje “2 90” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.....	136
Figura 90. Muestra los modelos de elevación del experimento “25”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas	

pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.	137
Figura 91. Muestra los modelos de elevación del experimento “25 05”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.	138
Figura 92. Muestra los modelos de elevación del experimento “25 07”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.	138
Figura 93. Muestra los modelos de elevación del experimento “25 11”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.	139
Figura 94. Muestra los modelos de elevación del experimento “30”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.	140
Figura 95. Muestra los modelos de elevación del experimento “30 05”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.	140
Figura 96. Muestra los modelos de elevación del experimento “30 07”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.	141
Figura 97. Muestra los modelos de elevación del experimento “30 11”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.	141
Figura 98. Muestra los modelos de elevación del experimento “45”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.	142
Figura 99. Muestra los modelos de elevación del experimento “45 05”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.	142
Figura 100. Muestra los modelos de elevación del experimento “45 07”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las	

cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....	143
Figura 101. Muestra los modelos de elevación del experimento “45 11”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....	143
Figura 102. Muestra los modelos de elevación del experimento “90”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....	144
Figura 103. Muestra los modelos de elevación del experimento “90 05”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....	144
Figura 104. Muestra los modelos de elevación del experimento “90 07”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....	145
Figura 105. Muestra los modelos de elevación del experimento “90 11”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....	145
Figura 106. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 25”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....	146
Figura 107. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 25 11”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....	146
Figura 108. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 30”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....	147
Figura 109. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 30 11”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....	147
Figura 110. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 45”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las	

cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....148

Figura 111. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 45 11”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....148

Figura 112. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 90”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....149

Figura 113. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 90 11”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.....149

Índice de Tablas

Tabla 1. Se muestran las mediciones (en km) que se realizaron de las cuencas <i>pull-apart</i> del Golfo Sur sobre el mapa base. (W) ancho, (L) Largo, (d) profundidad máxima de la cuenca, ángulo agudo alfa " α " y de cuenca.....	40
Tabla 2. Los 16 experimentos programados para la serie I, en vertical se muestra el porcentaje de transtensión que se aplicara sobre el experimento y en horizontal el ángulo " α " predefinido en la placa de acrílico.	45
Tabla 3. Los 8 experimentos programados para la serie "II", en vertical se muestra el porcentaje de transtensión que se aplicara sobre el experimento y en horizontal el ángulo " α " predefinido en la placa de acrílico.	45
Tabla 4. Muestra las claves que se designaron para los 16 experimentos realizados en la serie experimental I.	64
Tabla 5. Muestra las claves que se designaron para los 16 experimentos realizados en la serie experimental "II".	64

Capítulo 1.- Generalidades

1.1.- Introducción

Las cuencas *pull-apart* son depresiones estructurales que combinan características de deformación de fallas de rumbo y estructuras de extensión. La definición de las cuencas *pull-apart* ha evolucionado desde la descripción de depresiones estructurales, estructuras romboidales y rombograbens (Careys, 1958; Clayton, 1966; Belt, 1968; Freund, 1971; Crowell, 1973; Aydin y Nur, 1982; Mann et al., 1983), hasta definiciones más recientes como la de Gürbüz (2010, 2014; Modificado de Mann et al., 1983; 2007). Los trabajos para definir las cuencas *pull-apart* han descrito la geología y la geometría de las estructuras en las zonas de transcurrencia más importantes del mundo, como la falla de Anatolia (Gürbüz, 2010), el sistema del Mar Muerto (Quennell, 1958), la zona de falla alpina de Nueva Zelanda (Clayton, 1966) y el “Death Valley” (Burtchfiel y Stewart). Desde el punto de vista experimental las principales características de las cuencas de *pull-apart* han sido estudiadas con modelos numéricos (Gölke, et al., 1994; Katzman et al., 1995; Gonzáles et al., 2012) y analógicos (McClay y Dooley, 1995; Basile y Brun, 1999; Sims et al., 1999; Wu et al., 2008; Dooley y Schreus, 2012; Sukan et al., 2014; Corti y Dooley, 2015), sin embargo la geometría de estas cuencas se ha descrito y cuantificado de diferente manera. En este trabajo consideramos que en cada caso específico, deben considerarse los aspectos mecánicos y tectónicos particulares para poder explicar las diferencias geométricas entre las cuencas *pull-apart* de un mismo sistema.

Uno de los trabajos pioneros para describir las cuencas *pull-apart* es el trabajo de Aydin y Nur (1982) quienes definen los principales aspectos cinemáticos y la dependencia de su escala a través de la longitud y el ancho. Mediante el análisis de la relación largo y ancho (L/W) proponen una ley de escala para 70 cuencas alrededor del mundo. Posteriormente, Gürbüz (2010; 2014) definió con mayor precisión los parámetros geométricos en las cuencas *pull-apart*: L , longitud; W , ancho; d , profundidad y α , ángulo agudo (Figura 1) y somete sus observaciones al análisis propuesto por Aydin y Nur

(1982), estableciéndose así las características geométricas y los parámetros analíticos para el estudio de este tipo de cuencas.

El Golfo de California es un excelente ejemplo para entender los procesos de ruptura de la corteza continental en un sistema transtensivo que no ha cambiado de cinemática en los últimos 4 Ma (Lizarralde et al., 2007) donde actualmente existe un desplazamiento del Bloque de Baja California con un ángulo de 20° respecto al eje del *rift*, lo cual resulta en una deformación transtensiva (Figura, 3).

1.2.-Justificación

La porción Sur del Golfo de California es parte del límite transforme entre las placas Pacífico y Norteamérica (Lonsdale, 1989) y forma parte de un sistema transtensivo con la formación de cuencas *pull-apart* (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; Martín-Barajas et al., 2013), (de Norte a Sur las cuencas Guaymas, Carmen, Farallón, Pescadero y Alarcón) con diferentes geometrías y morfologías, lo que implica que se han deformado en un mismo sistema tectónico, pero con diferentes respuestas mecánicas. En este trabajo se realizaron por primera vez modelos analógicos que recrean las condiciones generales de la formación de cuencas *pull-apart* del sur del Golfo de California desde el punto de vista cinemático y mecánico:

- 1) No existen modelos análogos que recreen e integren en un solo arreglo experimental las condiciones cinemáticas y mecánicas de las cuencas *pull-apart* de la parte Sur del Golfo de California.
- 2) Se buscan las características mecánicas que explique la diferencia geométrica de las cuencas *pull-apart*.

Los modelos analógicos pueden aportar información para un mejor entendimiento del comportamiento de la corteza superior e inferior en la zona de estas cuencas en la parte Sur del *rift* del Golfo de California durante los últimos 4-3 millones de años.

1.3.- Objetivos

1.3.1.- Objetivos generales

- Determinar las características geométricas de las cuencas *pull-apart* en la parte Sur del Golfo de California, a partir de datos geofísicos y mediante modelos físicos a escala.
- Proponer las condiciones de deformación que definen la geometría de las cuencas de *pull-apart* de la parte Sur del Golfo de California; cuencas Guaymas, Carmen, Farallón, Pescadero, y Alarcón.
- Realizar modelos analógicos que ayuden a entender los factores mecánicos que controlan la evolución geométrica de las cuencas *pull-apart*.

1.3.2.- Objetivos particulares

- Desarrollar experimentos analógicos que generen cuencas *pull-apart* con variaciones geométricas y reológicas, y ayuden a entender los factores que intervienen en la formación de los diferentes tipos de cuencas *pull-apar* en un mismo sistema transforme.
- Interpretar la interacción de la corteza superior y de la corteza inferior desde un punto de vista mecánico para la formación de las cuencas y su evolución hasta su estado final.

1.4- Las cuencas *pull-apart*

1.4.1.-Definición

Las cuencas *pull-apart* son depresiones estructurales que se localizan en traslapes (Figura 1) o flexuras a lo largo de fallas de rumbo, (Gürbüz, 2014).

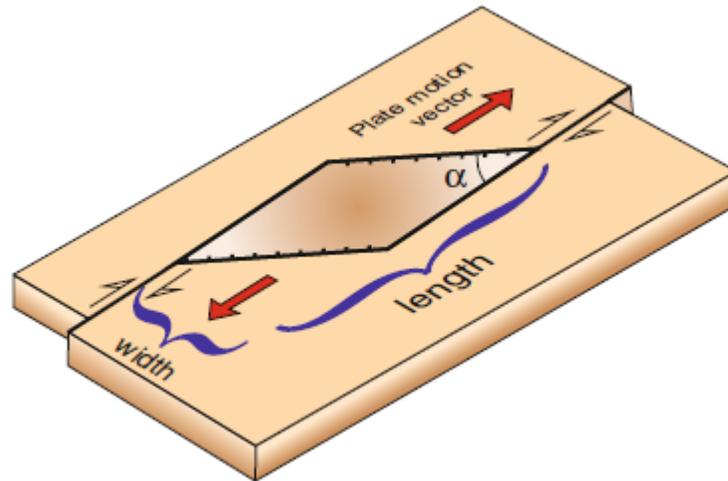


Figura 1. Modelo geométrico de una cuenca *pull-apart*, (Gürbüz, 2014).

La primera vez que se utilizó el término cuenca *pull-apart*, por Burchfiel y Stewart (1966), fue para describir la interpretación de la cuenca “Death Valley Basin”. Desde entonces el término cuenca *pull-apart* es usado y entendido para cuencas relacionadas a fallas de rumbo, tanto en ambientes marinos como terrestres (Mann et al., 1983).

Las cuencas *pull-apart* se diferencian de otras depresiones por varios elementos; su forma, que típicamente se considera romboidal, donde resalta el ángulo agudo formado entre las fallas de rumbo y la cuenca como la principal característica responsable de la forma de este tipo de cuencas y que normalmente oscila entre los 30-35°. El crecimiento de estas cuencas está íntimamente ligado al desplazamiento que ocurre en las fallas (segmentos en un sistema de rumbo), por lo que en su evolución o desarrollo estas cuencas se ligan entre sí generando patrones escalonados. La sedimentación en las cuencas *pull-apart* es muy activa y suele observarse en ella potentes secuencias de sedimentos, esto debido a la fuerte actividad tectónica a la que se asocian.

1.4.2.-Aspectos geométricas de las cuencas *pull-apart*

La forma, escala y apertura del ángulo agudo son aspectos útiles para discutir sobre el inicio de la formación y la evolución estructural de una cuenca *pull-apart* (Gürbüz, 2010). Gürbüz (2010; 2014) propone una serie de características geométricas para las cuencas *pull-apart*, estas características son el largo L, ancho W, ángulo agudo α y

profundidad “d” (Figura 1). La relación que existe entre estos parámetros, refleja en una cuenca *pull-apart* aspectos de su evolución estructural, por lo que propone 3 principales estados o tipos de cuencas, de menor a mayor evolución; (1)- tipo aguja (*Spindle-shape*), (2)- en Z (*Lazy Z- Shaped*) y (3)- romboidal (*Rhomboidal*) (Figura 2).

1.4.3.-Modelo para el desarrollo de una cuenca *pull-apart*

Existen numerosos sinónimos de cuencas *pull-apart* (Mann, 2007) en los que se reproducen las características tectónicas, estructurales, geométricas y geomorfológicas en la naturaleza. Tectónicamente, las cuencas están localizadas a lo largo de fallas de rumbo y zonas transformes; estructuralmente, se forman cuando las fallas de rumbo se flexuran o traslapan; geoméricamente se forman cuando el traslape de las fallas de rumbo es paralelo o sub-paralelo entre sí, mientras que las fallas secundarias que delimitan la cuenca son oblicuas a las fallas principales y terminan por dar la forma característica. Todas estas características de las cuencas *pull-apart* se muestran en el diagrama idealizado en la Figura 2 (Gürbüz, 2014).

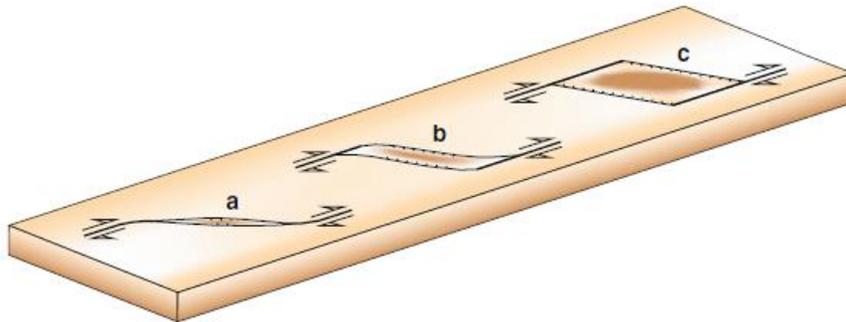


Figura 2. Modelo geométrico y de la formación de una cuenca *pull-apart*, (Gürbüz, 2014; modificado de Mann, 2007).

Mann et al. (1983) propone que la secuencia de estados en un *pull-apart* evoluciona de la siguiente manera: (1) en rígido, fallas de rumbo en zonas de límites de placa, donde se genera la nucleación de un *pull-apart* alargado, generando cinturones paralelos a las fallas de rumbo, la cual es oblicua al desplazamiento; (2) la apertura inicia a través del relajamiento y apertura de las fallas en la zona de flexura produciendo cuencas tipo aguja (*spindle-shaped*) definidas y a menudo bisectadas por fallas laterales con

componente oblicuo (componente normal y de rumbo) conectando el final discontinuo de las fallas de rumbo con la cuenca; (3) incrementado el desplazamiento finito en las fallas de rumbo se producen cuencas que coloquialmente llamamos en “S” (“*lazy-S*”), término para cuencas entre fallas izquierdas, y en “Z” (“*lazy-Z*”) para cuencas entre fallas derechas (relevos izquierdo y derecho en extensión); (4) cuencas tipo romboidal o “rombo grabens” (“*rhomboidals*” o “*rhomb-grabens*”) resultan del alargamiento de una cuenca con forma en “S” o “Z” debido a al incremento del desplazamiento a rumbo y característicamente contiene dos o más depresiones sub-circulares dentro del piso de la cuenca; y (5) la prolongación del desplazamiento a rumbo a lo largo de varias decenas de millones de años en las fallas que delimitan la cuenca, pueden producir pequeñas y estrechas dorsales ortogonales a las fallas de rumbo donde se produce nueva corteza oceánica; el ancho de la cuenca no incrementa significativamente, la mayoría de los *pull-apart* tienen una relación largo/ancho muy baja, esto es una consecuencia de su corta vida en zonas de fallas de rumbo donde la evolución es muy rápida y está controlada por la separación y el desplazamiento que existe entre las fallas, esta evolución se esquematiza en la Figura 2.

1.4.4.-Aspectos mecánicos

El mecanismo básico de desarrollo de una cuenca *pull-apart* puede ser definido como una extensión simple y local entre el traslape de dos fallas de rumbo (Fig. 2). Fallas de rumbo y “*riedel shear*” son dos alternativas que se han propuesto como mecanismos para la formación de una cuenca *pull-apart*. En el mecanismo “*riedel shear*” las cuencas *pull-apart* se desarrollan a lo largo de fallas de “*riedel*” conectadas entre sí mediante fallas de rumbo que cortan el basamento, donde la apertura de la cuenca se da por la componente oblicua presente en el sistema y el desplazamiento en las fallas de rumbo. Desde el punto de vista de la deformación, la cizalla se focaliza en rocas débiles tal como evaporitas o esquistos por encima de las fallas de rumbo presentes en el basamento. Las cuencas *pull-apart* a través de su deformación y la interacción de las fallas de rumbo pueden desarrollar escalonamiento, coalescencia y ligamientos entre sí (Gürbüz, 2014).

Independientemente del mecanismo de formación, la extensión con la que se desarrolla una cuenca de tipo *pull-apart* depende de la reología local de la corteza. El aumento en

el desplazamiento de las fallas de rumbo causa que las fallas normales de la cuenca se enlacen con otras fallas normales en la corteza superior frágil, en la corteza inferior dúctil el acomodamiento ocurre mediante su adelgazamiento que produce la extensión continua y progresiva de la cuenca. En Gürbüz, 2014 también se menciona que para la formación de una cuenca *pull-apart*, juega un papel importante el despegue mecánico que existe entre la parte quebradiza de la corteza y la parte inferior dúctil de la corteza y la parte superior del manto menos resistente (Petrinin y Sobolev, 2006).

Capítulo 2.- Marco geológico y tectónico del Golfo de California

2.1.- Marco tectónico regional

El Golfo de California contiene el límite de placas transtensivo, que originó la separación de la península de Baja California de la parte Sur-occidental de Norteamérica (Figura 3). En el Mioceno medio la deformación extensional afectó la provincia extensional del Golfo (Stock y Hodges, 1989; Gans, 1997; Axen y Fletcher, 1998), pero algún proceso durante el lapso entre el Mioceno medio y el Mioceno tardío focalizó la deformación en el *rift* oblicuo del Golfo de California, donde actualmente la deformación es dominada por fallas de rumbo conectadas entre sí por cuencas *pull-apart* (Lonsdale, 1989; Stock y Hodges, 1989; Oskin et al., 2001; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007).

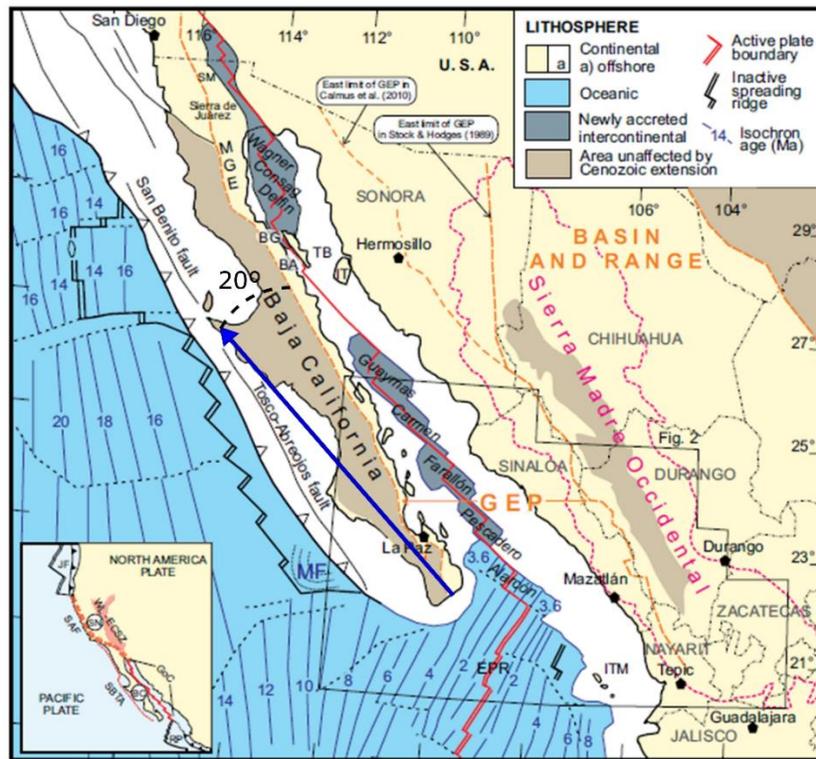


Figura 3. Mapa tectónico regional del Golfo de California tomado de Ferrari et al. (2013). Línea amarilla punteada define el límite de la Provincia extensional del Golfo (Stock y Hodges, 1989). Flecha azul, vector de desplazamiento para Baja California propuesto por Dixon et al. (2000). El ángulo entre al eje del *rift* y el vector de desplazamiento de Baja California.

La evolución del Golfo de California está relacionada a la transferencia de la península de Baja California de la placa de Norteamérica a la placa Pacífico. Este proceso inicio hace 12 Ma e impuso un movimiento hacia el NW de Baja California que activó la localización de la mayoría del movimiento de las placas Pacífico y Norteamérica en la provincia extensional del Golfo (Stock y Hodges, 1989). La cronología en el comienzo de la focalización de la extensión es aún controversial; se ha sugerido que la extensión oblicua fue precedida por una serie de extensión ortogonal conocida como el estado “proto-golfo” que fue acompañada por las primeras incursiones marinas hace 12–6 Ma (Stock y Hodges, 1989; Henry y Aranda-Gómez, 2000; Umhoefer et al., 2002; Aragón-Arreola y Martin-Barajas, 2007).

Existen dos modelos que coinciden en que el *rift* inició aproximadamente en el Mioceno medio (14-12 Ma), después de que terminó la subducción de las micro placas Guadalupe y Magdalena en el margen oeste de Baja California.

En el primer modelo, la extensión continental en el Golfo de California ocurrió en dos fases: en la primer fase inició un *rift* ortogonal o “proto-golfo”, seguida por un evento de transtensión (un movimiento de cizalla derecha) dentro del Golfo de California que inició hace 6.5 Ma. El modelo implica que entre los 12.5 y 6.5 Ma, el movimiento entre las placas Pacífico y Norteamérica se particionó en pura extensión dentro del Golfo y desplazamiento dextral puro al Oeste de la península de Baja California (Spencer y Normark, 1979; 1989; Michaud et al., 2004; 2010), a lo largo del sistema de fallas Tosco-Abreojos. El segundo modelo fue propuesto inicialmente por Fletcher et al. (2007), quienes documentaron que en el movimiento a lo largo del sistema de fallas Tosco-Abreojos ocurrió menor desplazamiento del que se creía, proponiendo que el *rift* oblicuo con movimiento lateral derecho estuvo en marcha dentro del Golfo de California desde hace 12.5 Ma (Figura 4). Desde entonces otros autores han documentado transtensión lateral derecha en la parte Norte del Golfo de California (e.g. Seiler et al., 2010; Bennett y Oskin, 2014). Sin embargo existe un acuerdo que el comienzo del *rift* amplio tipo *Basin & Range* ocurrió entre los 25-14 millones de años. (Balestrieri et al, 2017).

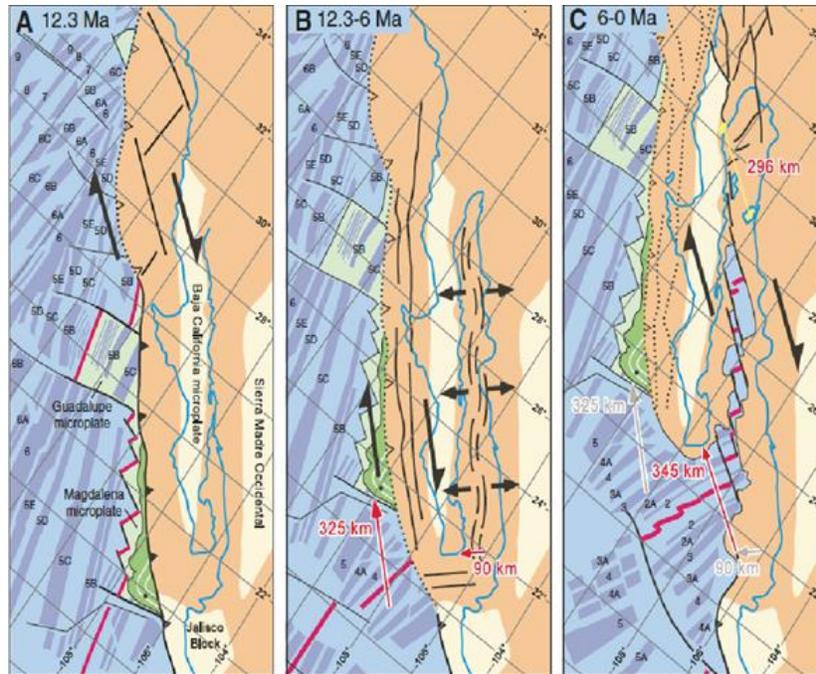


Figura 4. Esta serie de diagramas muestra las temporalidades del modelo de dos fases cinemáticas de evolución del margen por cizalla que afectó la Península de Baja California. A) configuración de los segmentos activos de dorsal (rosa) Oeste de Baja California, previo a que se abandonen 12.3 Ma. B) Movimiento que se considera para la placa entre los 12.3-6 Ma, cinemáticamente particionado en movimiento a rumbo dextral (325 km) en fallas al Oeste de Baja California y el *rifting* ortogonal del Golfo de California (90 Km), conocida como la fase del “proto-Golfo”. C) fallamiento de 6-0 Ma al Oeste de Baja California que se piensa que ceso y todo el movimiento de la placa se localizó en el Golfo de California que acomodo 345 km de movimiento transtensional, tomado de Fletcher et al. (2007).

Un tercer grupo de trabajos ha demostrado que la extensión en el Golfo inició antes de que finalizara la subducción. Se ha reportado extensión del Oligoceno tardío-Mioceno medio en el margen NE del Golfo, en el estado de Sonora (Gans, 1997; Mcdowell et al., 1997; Wong et al., 2010) y recientemente se ha reportado también en el margen SE del Golfo en los estados de Sinaloa y Nayarit (Ferrari et al., 2013) y en el sur del Golfo (Duque-Trujillo et al., 2015).

Ferrari et al. (2013) y Bryan et al. (2014) proponen que el Golfo de California evoluciono a través de tres diferentes estados de *rift*: (1) fase de *rift* amplio con inicios en el Oligoceno tardío en un región que abarca la Sierra Madre Occidental (SMOc) y la parte

este de la península de Baja California, (2) focalización de la deformación extensional en el área del actual Golfo alrededor de los 18 Ma, (3) desarrollo de deformación transtensional a lo largo de la corteza más adelgazada siguiendo el acoplamiento entre la placa Pacífico y la micro placa Baja California después de finalizar la subducción, (Balestrieri et al., 2017), (Figura 5).

A pesar de que el estilo de deformación por extensión Cuencas y Sierras afectó extensas áreas del Oeste de México después del Eoceno tardío, se considera que la extensión en la región del Golfo de California comenzó alrededor de los 14-12.5 Ma (Umhoefer, 2011). La extensión a lo largo de la parte Sur de la provincia extensional del Golfo comenzó entre el Oligoceno tardío y el Mioceno temprano pero se focalizó en lo que actualmente es el Golfo de California en el Mioceno medio, y es a los 12.5 Ma cuando la cinemática del *rift* se vuelve más oblicua (Ferrari et al., 2013).

La provincia extensional del Golfo representa la última y más visible etapa de *rifting*, conducido por la divergencia oblicua de la península de Baja California (Stock y Hodges, 1989; Gans, 1997; Oskin y Stock, 2003; Fletcher et al., 2007). Existen dudas acerca de que este último episodio de *rift* y el vulcanismo asociado fueron principalmente controlados por las fuerzas de límite de placas y el arrastre progresivo de Baja California hacia el NW por efecto de la placa Pacífico debido a una Surgencia astenosférica dentro de la brecha del *slab* producida por un despegue de la parte inferior de la zona subducida (Ferrari et al., 2013).

En los últimos 30 millones de años, el oeste mexicano ha sido dominado por extensión en la litósfera que fue producida por diferentes mecanismos geodinámicos. El cambio ocurrido hace 12.5 Ma fue la relación de la dinámica entre las placas Pacífico y Norteamérica, que resulta en la focalización de la apertura en la parte más occidental de un amplia y adelgazada parte de la litósfera y en un cambio de la cinemática de la deformación, imponiendo un alto grado de oblicuidad. En este contexto la provincia extensional del Golfo, solo puede ser distinguida de los episodios previos de extensión por su componente de deformación lateral derecha, por lo cual es más propio llamarla provincia extensional del Golfo (PEG o GEP por sus iniciales en inglés), (Stock y Hodges, 1989).

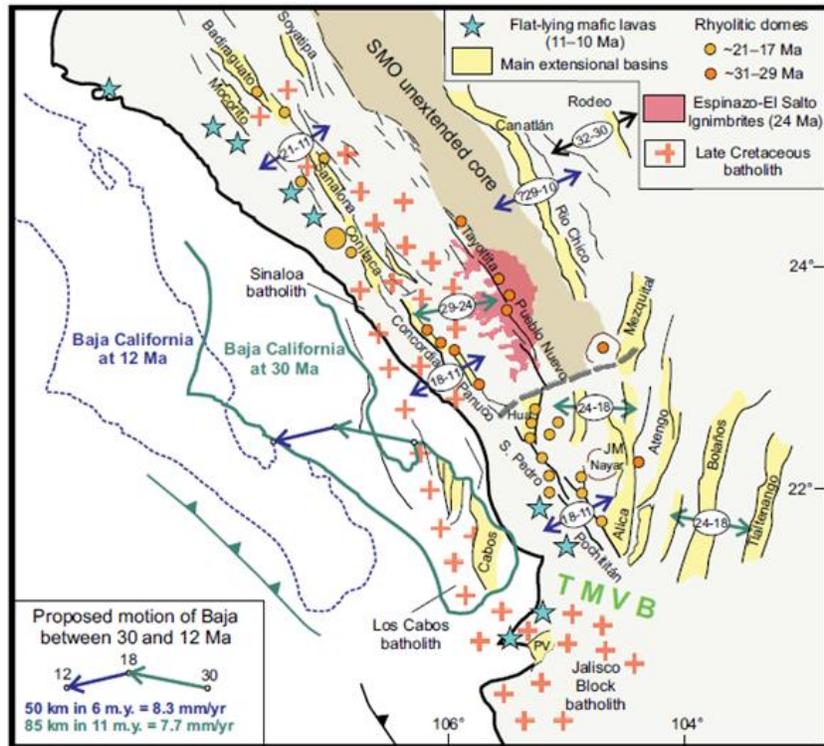


Figura 5. Mapa de la evolución tectónica del NW de México, donde se resumen las estructuras principales y las edades de extensión en el margen conjugado de Golfo de California. PV- Puerto Vallarta, Hua- Huajicori, JM- Jesús María, (Ferrari et al., 2013).

Se ha propuesto que el cambio en la cinemática en la última serie de extensión del Golfo de California, (de extensión ortogonal a transtensión) ocurrió en el Mioceno tardío, entre los 12.5-11.5 Ma (Lonsdale, 1991), 6 Ma (Lizarralde et al., 2007), 12 Ma (Sutherland et al., 2012) y 12.5 Ma (Ferrari et al., 2013). Esta evolución en el cambio de la cinemática se ha descrito ampliamente mediante varios modelos (Stock y Hodges, 1989; Lonsdale, 1991; 1989; Umhoefer et al., 2002; Oskin y Stock, 2003; Fletcher et al., 2007) que coinciden en que este cambio, inició sincrónico al estado del proto-Golfo e implicó cambios principales que Sutherland et al. (2012) resume de la siguiente manera; a los 14-12 Ma, la extensión continental oblicua comienza en la parte sur del proto-Golfo, la expansión del piso oceánico en la dorsal Magdalena-Pacífico se vuelve más lenta así como la subducción de la placa Magdalena por debajo de Norteamericana; 8-7 Ma, la extensión continental oblicua continúa en la parte Sur del proto-Golfo de California, las cuencas del Golfo sur empiezan a cambiar su estilo de formación por la

componente oblicua cada vez más presente, la expansión del piso oceánico y la subducción al Oeste de Baja California terminan y el sistema de fallas Tosco-Abreojos se activa; 4-3 Ma, la actividad de la ruptura continental (*rift*) se vuelve lenta e inicia la expansión del piso oceánico en la parte Sur del Golfo de California, el movimiento en el sistema de fallas Tosco-Abreojos continúa y funciona como medio de acomodamiento (Figura 6).

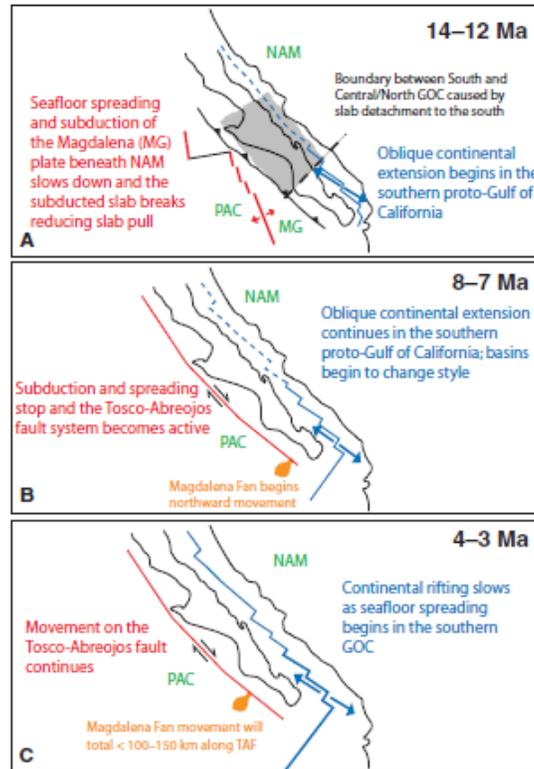


Figura 6. Modelo de evolución tectónica para el Golfo de California; MG- Placa Magdalena, NAM- Placa de Norteamérica, PAC- Placa Pacífico, tomado de Sutherland et al. (2012).

La apertura de las cuenca *pull-apart* en el Sur del Golfo de California está relacionada a la historia descrita previamente, sin embargo estas son sincrónicas, es decir que estas iniciaron su apertura al mismo tiempo a lo largo del Golfo de California. Las cuencas Pescadero y Alarcón aquellas más sureñas dentro del sistema, presentan el inicio de su apertura en el Mioceno medio, asociado a un vulcanismo que generó el deposito 1-2 km de ignimbritas y lavas, y su comportamiento como verdaderos centros de extensión y creación de piso oceánico en el Mioceno tardío (Lizarralde et al., 2007). Las cuencas

Guaymas, Carmen y Farallón inician su apertura como cuencas *pull-apart* en la extensión que ocurrió a los 6 Ma, pero con el aumento de la velocidad de las placas a los 3.5 Ma estas se convirtieron en centros de expansión propiamente dichos (Lonsdale, 1989).

2.2.- Geología del Golfo de California

La extensión y composición de la de la corteza que se encuentra en la parte sur de la PEG (Stock y Hodges, 1989), se ha estudiado de manera indirecta, mediante la observación e interpretación de estructuras, secciones sísmicas de multi-canal (MCS) y perfiles sísmicos de refracción del proyecto MARGINS (Lizarralde et al., 2007; Páramo et al., 2008; Lonsdale y Kluesner, 2010; Kluesner, 2011; Sutherland et al., 2012), así como por dragados y dataciones que soportan correlaciones estratigráficas (Duque-Trujillo et al., 2014; Ferrari et al., 2007, 2013).

En la mayoría de las secciones sísmicas multi-canal en la parte sur del Golfo se observa que el basamento *pre-rift* muestran velocidades típicas de rocas cristalinas, que son interpretadas como rocas intrusivas pertenecientes al Batolito Peninsular (Páramo et al., 2008; Sutherland et al., 2012).

En los márgenes conjugados de la cuenca Alarcón, Sutherland et al. (2012) han reconocido un horizonte distintivo de reflexión que se ha interpretado como sucesión volcánica o volcanoclástica del Grupo Comondú, anterior a la formación de las cuencas. Una información directa acerca de rocas de la corteza continental *pre-rift* en la boca del Golfo de California proviene de exposiciones en las islas Tres Marías, localizadas a unos 100 km de la costa de Nayarit. En las islas afloran migmatitas del Jurásico Medio (163-170 Ma) y ortogneises que definen el basamento cristalino, el cual es cortado por intrusiones cretácicas (80.8-83.4 Ma) de composición granítica-tonalítica que están a su vez cubiertas por ignimbritas, brechas volcánicas y lavas del Cretácico (71.6-80.6 Ma) y del Eoceno (55.4 Ma) (Pompa-Mera et al., 2013). Sedimentos deformados y ligeramente deformados anteriores a la mayoría de las fases del *rift* también se reconocen en todas las cuencas a lo largo del Golfo, con un espesor que incrementa hacia el centro del Golfo (Sutherland et al., 2012).

Las cuencas Farallón y Pescadero como centros de dispersión han producido mucho menos corteza oceánica que la dorsal de la cuenca de Alarcón, donde la formación de corteza oceánica comenzó hace 3.7-3.5 Ma de Sur a norte (Lonsdale, 1989; 1995).

Se puede observar las unidades geológicas antes descritas mediante el mapa regional geológico-tectónico de la parte Sur del Golfo de California y sus márgenes adyacentes que se muestra en Duque-Trujillo et al. (2014) (Figura 7), que incluye información recopilada de Ferrari et al. (2005; 2007, y 2013).

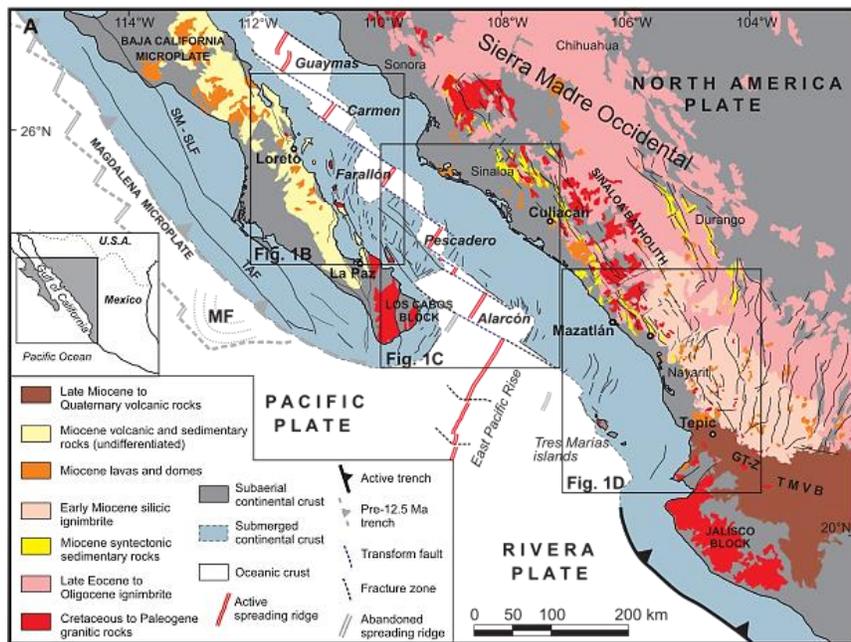


Figura 7. Mapa regional geológico-tectónico de la parte Sur del Golfo de California y sus márgenes adyacentes, muestra la distribución de la corteza continental sumergida (en azul) (Ferrari et al., 2013). La geología se compila de los trabajo de Ferrari et al. (2007; 2013). En blanco la corteza oceánica, la ubicación del límite corteza oceánica-continental tomada de Lonsdale y Kluesner (2010). Mapa tomado de Duque-Trujillo et al., 2014.

2.3.- Geofísica disponible para la parte Sur del Golfo de California

Sutherland et al. (2012), describe una línea sísmica compuesta, de rumbo NW-SE que se extiende a lo largo de unos 800 km desde su parte NW en la cuenca de la Paz hasta su parte SE en el margen continental al sur de Nayarit (Figura 8). A lo largo de esta línea sísmica, resalta que, en la parte NW en las cuencas La paz, Foca, y Cerralvo Este (kilómetro 180-320 de la sección) el basamento es compuesto, volcánico y plutónico, (como también se observa en un estudio de la cuenca Farallón (Piñero-Lajas, 2008). Estas cuencas están constituidas estructuralmente por una serie de altos y bajos delimitados por fallas normales. Las cuencas están rellenas de sedimentos hemipelágicos que se pueden diferenciar en cuatro unidades con respecto a su relación a las fallas que las afectan (Figura 9).

Hacia la parte central del perfil sísmico, Sutherland et al. (2012) propone dos zonas (kilómetro 330-350 y 460-480) donde las señales se interpretan como de transición, entre corteza continental y corteza oceánica. La parte central de la sección (kilómetros 350-460) entre la zona de la cuenca de Alarcón, y el frente norte del bloque Tamayo, interpreta toda esta zona como la influencia de la cresta del *East Pacific Rise* (EPR) sobre la cuenca Alarcón, constituida de corteza oceánica joven de una edad aproximada de 3.5 Ma (Figura 9).

En la parte Sur de la sección (kilómetros 580-760), se observa el bloque y la cuenca "Tamayo", la cuenca Nayarit y la cuenca San Blas, delimitadas entre sí por una serie de fallas no normales que definen las cuencas y los pilares, con un basamento compuesto por rocas volcánicas y plutónicas (Sutherland et al., 2012; Duque-Trujillo et al., 2013), mientras que el relleno de las cuencas consiste de sedimentos pelágicos de los que se distinguen al menos tres episodios de depósito, diferenciados por el alcance de las fallas que los afectan y por discontinuidades en los estratos observables en las secciones sísmicas (Figura 9).

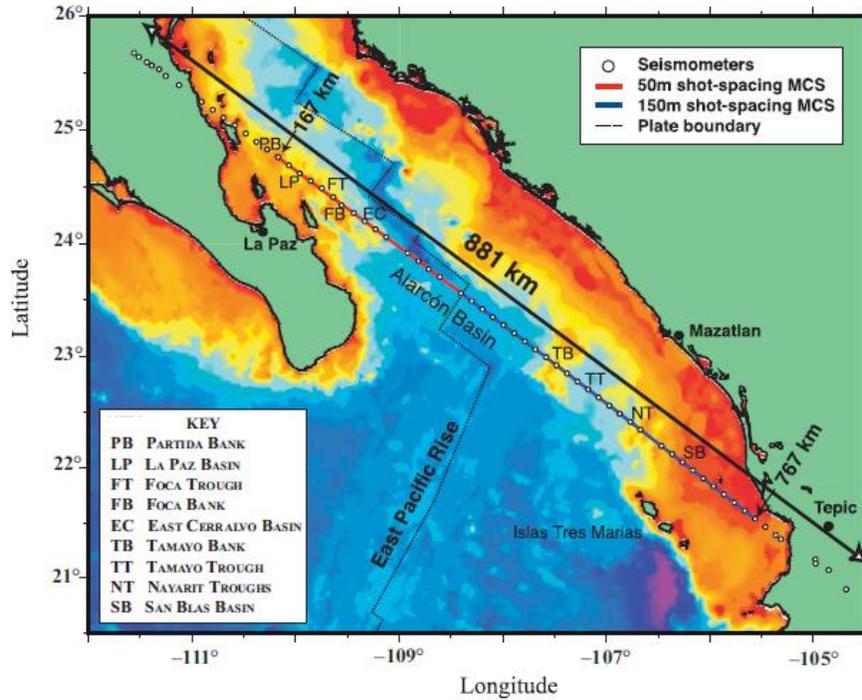


Figura 8. Sur del Golfo de California. Mapa que muestra le ubicación de la sección sísmica Alarcón y las cuencas mayores observadas en la región, (Sutherland et al., 2012).

Lizarralde et al. (2007) presenta tres modelos de densidad cortical basados en velocidades sísmicas a escala litosférica: Guaymas, Alarcón y Cabo-PV (Cabo-Puerto Vallarta) (Figuras 10 y 11), de los cuales las principales observaciones son las siguientes:

1.- El Golfo de California tiene una apertura con una magnitud aproximada de 300 km y muestra variaciones importantes en el ancho de la zona extendida y en el volumen de magmatismo emitido a lo largo y ancho del *rift*. Se observa que en los perfiles Guaymas y Alarcón (Figura 11) una geometría simétrica, mientras que la parte Sur, en la sección Cabo-PV (Figura 11), se observa una geometría que se cataloga como asimétrica.

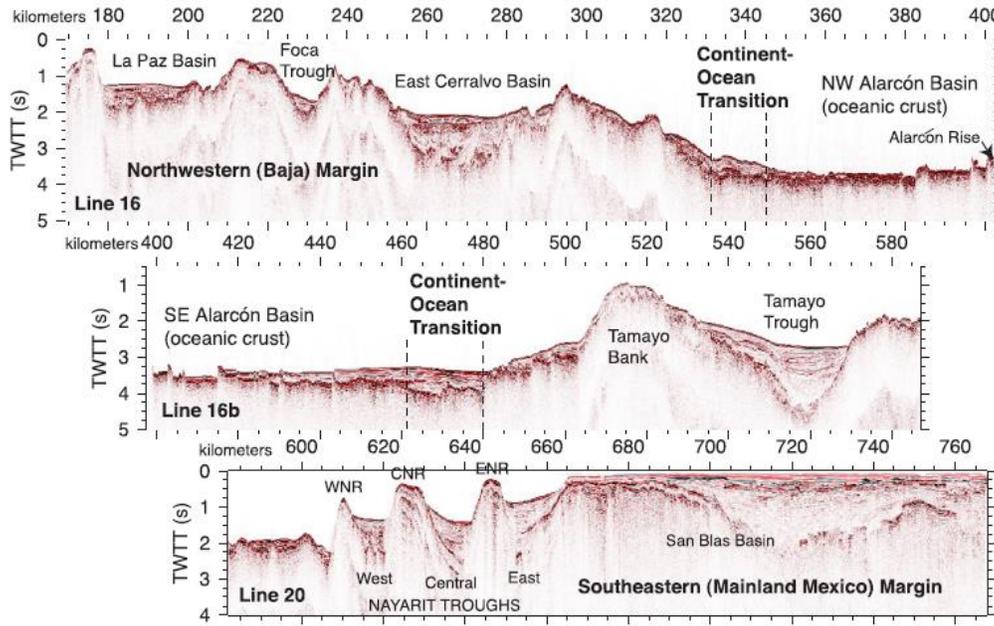


Figura 9. Vista de la sección sísmica multicanal, Sutherland et al (2012).

2.- Los centros de dispersión en la parte sur de la provincia extensional del Golfo (Golfo Sur) (Figura 10), tienen edades de apertura diferentes debido a diferencias estructurales genéticas; por ejemplo, la cuenca de Guaymas (que se encuentra en el segmento Guaymas (Lizarralde, 2007) (Figura 11), se encuentra construida sobre una corteza transicional que funciona como un *rift* estrecho, que ha tenido una fuerte actividad magmática desde que ocurrió la ruptura continental y produjo la formación de 280 km de nueva corteza ígnea, donde se registraron tasas de extensión de 48 mm año^{-1} lo que implica que la ruptura de la litosfera en esta zona ocurrió hace 6 Ma, (Figura 11). En contraste el segmento Alarcón, en el centro de dispersión del dominio sur-central” (Lizarralde et al., 2007) (Figura 11), funciona como un *rift* amplio, este segmento experimentó 350 km de extensión, produciendo 135 km de corteza oceánica de 6 km de espesor desde hace 2-3 Ma.

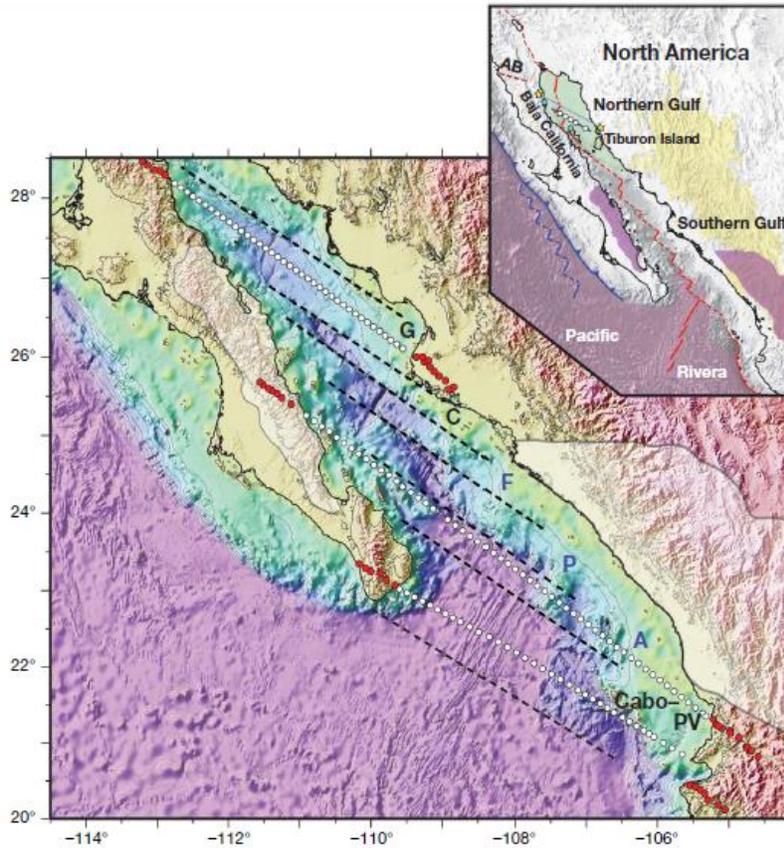


Figura 10. Mapa del experimento “PESCADOR”, Sur del Golfo de California, de Norte a Sur los perfiles (en líneas punteadas, puntos blancos y rojos); “Guaymas”, “Alarcón” y “Cabo-PV (Cabo-Puerto Vallarta); “G” (bloque Guaymas), “C” (bloque Carmen), “F” (Farallón), “P” (Pescadero), “A” (Alarcón), (Lizarralde et al., 2007).

3.- El segmento Cabo-PV, muestra cuencas oceánicas un margen pasivo propiamente constituido, esta zona presenta una geometría asimétrica por lo que se infiere que se generó como un *rift* estrecho. En este segmento la extensión del piso oceánico inicio 1 millón de años antes de que la propagación del EPR influyera en la parte interna del Golfo hace 3 Ma. (Lizarralde et al., 2007), (Figura 11).

Capítulo 2.- Marco geológico y tectónico del Golfo de California

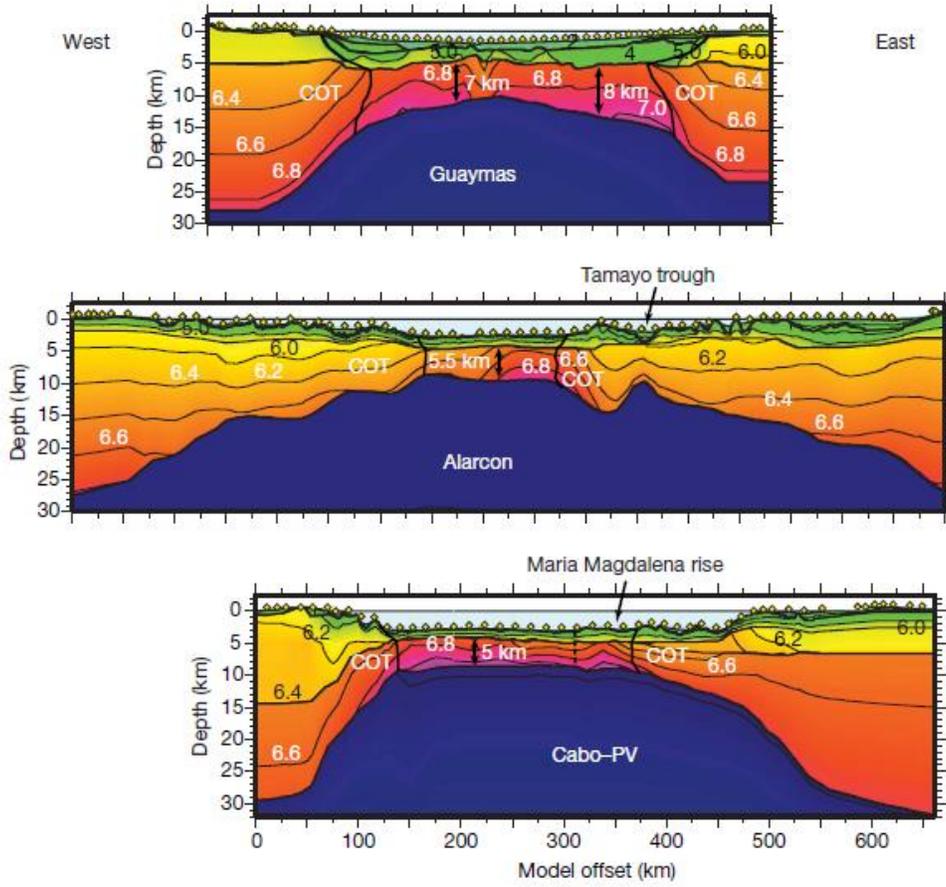


Figura 11. Modelos de litosférico a partir de velocidades sísmicas de los segmentos “Guaymas”, “Alarcón” y “Cabo-PV” (Cabo-Puerto Vallarta), (Lizarralde et al., 2007).

Capítulo 3.- Consideraciones importantes para la construcción de los modelos análogos a las cuencas *pull-apart* del Golfo Sur.

Este trabajo tiene como uno de sus objetivos principales elaborar una serie de modelos análogos a las cuencas *pull-apart* del Golfo Sur; de Norte a Sur: Guaymas, Farallón, Carmen, Pescadero y Alarcón. Estas cuencas forman parte del mismo límite transtensivo entre las placas Pacífico y Norteamericana (Lonsdale, 1989; Stock y Hodges, 1989; Oskin et al., 2001; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007) y presentan significativas diferencias geométricas.

Estas diferencias geométricas que se deben de considerar para construir los modelos análogos a las cuencas del Golfo Sur, pueden ser en función de aspectos como los siguientes: todas estas cuencas iniciaron su formación hace 4-3 Ma en una corteza continental previamente adelgazada (hoy día existe corteza oceánica) (Lonsdale, 1989; 1999; Aragón- Arreola, 2007, Lizarralde et al., 2007; Sutherland et al., 2012) por lo que es importante tomar en cuenta que parte de la deformación que las originó sucedió principalmente en la corteza superior-inferior.

También debe contemplarse para el análisis de los modelos de este trabajo, los diferentes estilos de *rift* que presenta la parte Sur del Golfo de California (Lizarralde et al., 2007), puesto que las cuencas Guaymas, Carmen y Farallón (Figuras 10, 11 y 12) se encuentran en el segmento Guaymas (Lizarralde et al., 2007) que estructuralmente se comporta como *rift* estrecho y donde la corteza (la corteza continental, transicional y oceánica) se muestra simétrica en sus márgenes (Figuras 10 y 11), mientras que la cuenca Pescadero se encuentra en la zona de transición entre los segmentos Guaymas y Alarcón, que podría verse como una zona de transición entre un estilo de *rift* estrecho y uno ancho. La cuenca de Alarcón se ubica en el segmento Alarcón que tiene un comportamiento estructural de un *rift* amplio donde la corteza se muestra simétrica en sus márgenes (Figuras 10, 11 y 12) (Lizarralde et al., 2007).

El movimiento relativo que experimentan las placas Pacífico y Norteamericana y particularmente el que existe entre la micro placa Baja California respecto a la placa Norteamericana, es un factor más a considerar, ya que este desplazamiento relativo con

Capítulo 3.- Consideraciones importantes para la construcción de los modelos análogos a las cuencas pull-apart del Golfo Sur.

movimiento lateral derecho, transfiere su deformación a través de diferentes fallas cerca de la costa Este de Baja California (Nava-Sánchez et al, 2001) y no únicamente mediante el sistema transforme del Golfo de California, lo que indica que la microplaca de Baja California funciona como un bloque semi-rígido semi-independiente, que se mueve hacia el NW a distintas velocidades, con variaciones de 5-12° en su desplazamiento (Dixon et al., 2000), pero con un vector general en común, que también ha variado en algunos grados a través del tiempo y entre las distintas zonas del bloque.

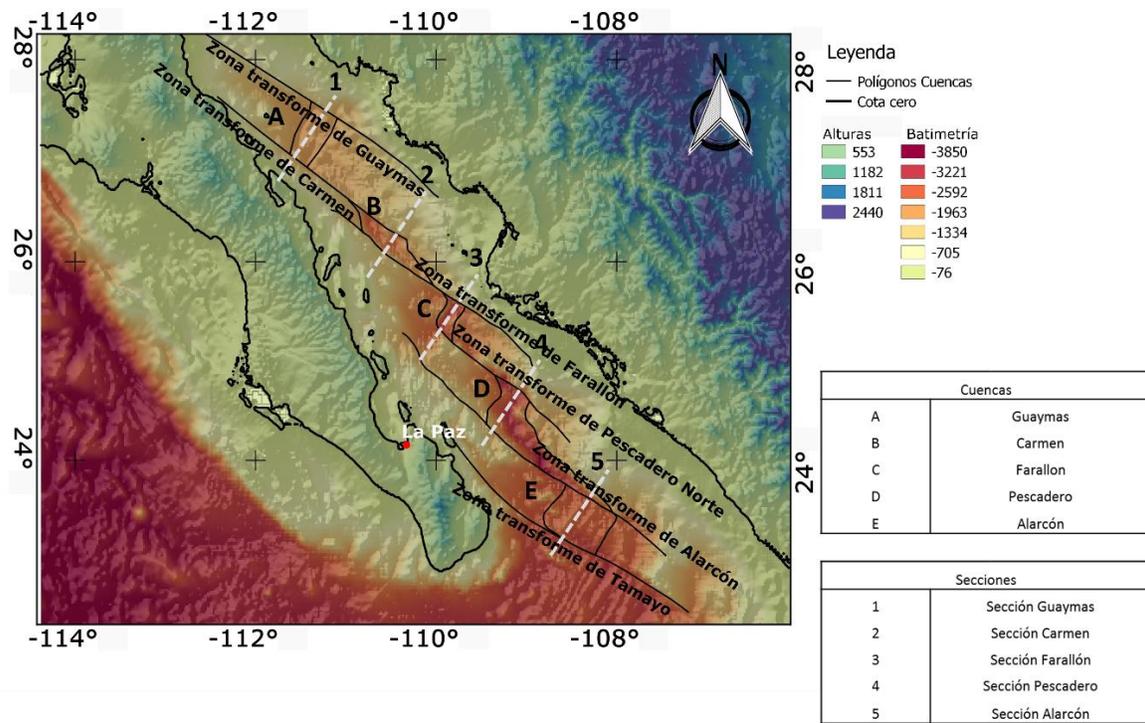


Figura 12. Mapa que muestra la parte Sur del Golfo de California donde se muestra delimitadas con línea negra las cuencas: A) Guaymas, B) Carmen, C) Farallón, D) Pescadero, y E) Alarcón y sus zonas transformes (Eakins et al., 2004); en líneas punteadas blancas, las secciones que se utilizaron para obtener la profundidad máxima de las cuencas.

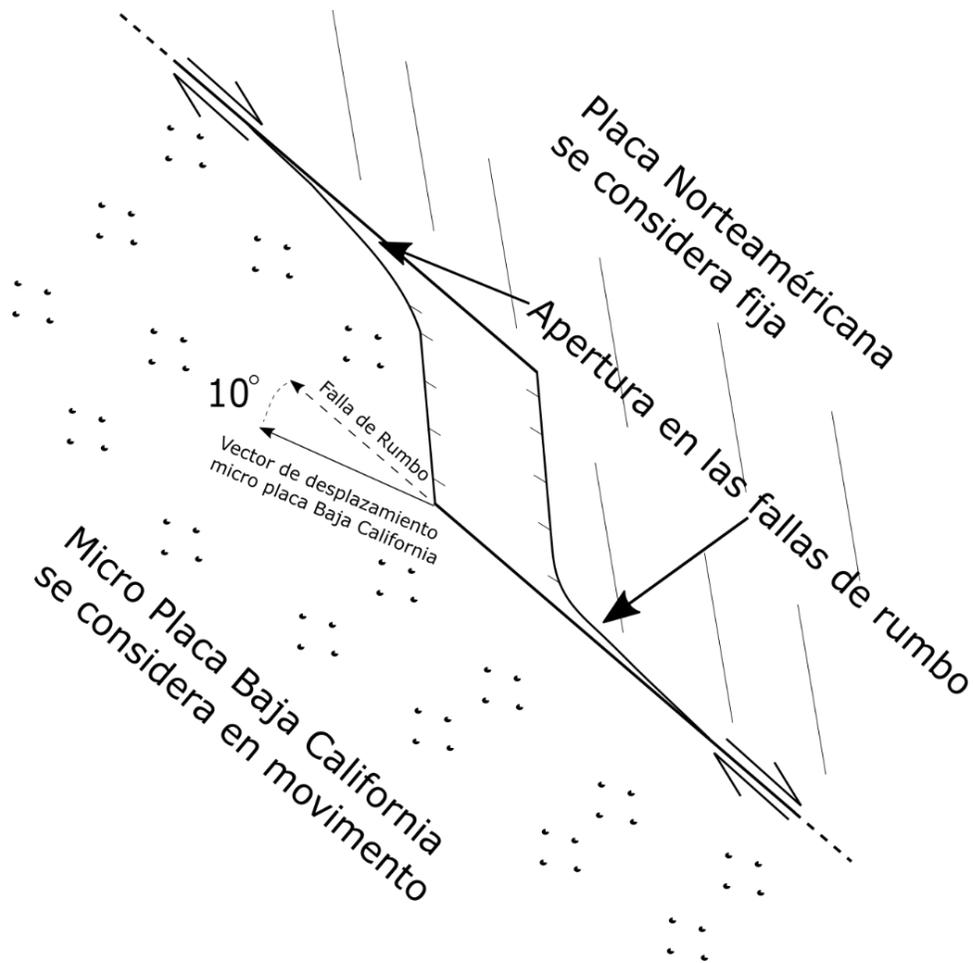


Figura 13. Muestra el contexto en el que consideramos la formación de las cuencas *pull-apart* en el Golfo Sur, en el límite de placas micro placa Baja California-Placa Norteamericana, en una zona de falla lateral derecha, donde el desplazamiento de la micro placa Baja California puede tener una variación de $0-10^\circ$ respecto a las fallas de rumbo.

Por ejemplo Plattner et al. (2007), muestra que la velocidad de movimiento de la parte Sur de la Península de Baja California es superior al de la parte Norte. Estas variaciones pueden incidir en la geometría de las cuencas *pull-apart* y a través del comportamiento de las fallas de rumbo, como lo muestra Nava-Sánchez et al. (2001), reporta en la parte

Capítulo 3.- Consideraciones importantes para la construcción de los modelos análogos a las cuencas pull-apart del Golfo Sur.

central del Golfo de California fallas normales asociadas a pilares y cuencas en donde también se observa una componente lateral. Estos factores influyen de manera importante en las características geométricas de las cuencas *pull-apart* del Golfo Sur; en el ancho (W) el largo (L), el ángulo agudo α y la profundidad máxima de las cuencas (d) y por lo tanto en el estilo y de cuenca como ilustramos en la Figura 13, en esta figura se presenta una vista en planta del contexto en el que consideramos la formación de las cuencas *pull-apart* en el Golfo Sur, en el límite micro placa Baja California-Placa Norteamericana, en una zona de falla lateral derecha, donde el desplazamiento de la micro placa Baja California puede tener una variación de 0-10° respecto a las fallas de rumbo del sistema.

También es importante conocer la geometría y la ubicación de las cuencas. Para generar esta información se utilizó un DEM (Modelo digital de elevación, por sus siglas en inglés) que se obtuvo del sitio *web* de la NOAA (*National Oceanic y Atmospheric Administration*) y se trabajó para realizar el mapa base de donde obtuvimos las mediciones de las cuencas *pull-apart*. Sobre el DEM se elaboró un mapa de la batimetría del Golfo Sur georeferenciado (en grados, minutos y segundos) y escalado en metros, lo cual nos permite realizar medidas sobre el mismo (Figura 12). Con estas características que otorgamos a nuestro mapa base (Figura 12), utilizando las herramientas de “medir objeto” y “crear perfil” del *software* “QGIS” pudimos realizar las mediciones pertinentes en planta según la propuesta de Gürbüz (2014), (w) ancho, (L) Largo y el ángulo agudo α en las cuencas *pull-apart* del Golfo Sur y con los perfiles (Figuras 57-61) obtuvimos la magnitud del eje Z, es decir la profundidad máxima de la cuenca (d), Gürbüz (2014).

Con base en estas mediciones se obtuvieron los resultados de la tabla, 1. La proporción entre en ancho (W) y largo (L) que muestran las cuencas medidas según la propuesta de Gürbüz (2014) muestra que: la cuenca Guaymas tiene un ancho (W) de 48.4 km, un largo (L) de 73.5 km, un ángulo agudo α de 88° y se cataloga como una cuenca romboidal; la cuenca “Carmen” tiene un ancho (W) de 37.3 km, un largo (L) de 146.9 km, un ángulo agudo alfa α de 42° y se cataloga como una cuenca aguja; la cuenca Farallón tiene un ancho (W) de 28.9 km, un largo (L) de 48.9 km, un ángulo agudo α de 78° y se cataloga como una cuenca romboidal; la cuenca Pescadero tiene un ancho (W)

Capítulo 3.- Consideraciones importantes para la construcción de los modelos análogos a las cuencas pull-apart del Golfo Sur.

de 69.2 km, un largo (L) de 221.2 km, un ángulo agudo α de 52° y se cataloga como una cuenca en Z; la cuenca Alarcón tiene un ancho (W) de 63.1 km, un largo (L) de 83.8 km, un ángulo agudo α de 87° y se cataloga como una cuenca romboidal (tabla, 1).

Cuenca	W (km)	L (km)	d (km)	α (°)	Tipo
Guaymas	48.4	73.5	2.25	88	Romboidal
Carmen	37.3	146.9	2.68	42	Aguja
Farallón	28.9	48.9	3.02	83	Romboidal
Pescadero	69.2	221.2	3.45	52	en "Z"
Alarcón	63.1	83.8	2.65	87	Romboidal

Tabla 1. Se muestran las mediciones (en km) que se realizaron de las cuencas *pull-apart* del Golfo Sur sobre el mapa base. (W) ancho, (L) Largo, (d) profundidad máxima de la cuenca, ángulo agudo alfa α y de cuenca.

Capítulo 4.- Estrategia de Modelado

4.1.- Justificación

Mediante la construcción de modelos analógicos se pretende observar las diferencias geométricas en cuencas *pull-apart* de dos capas, quebradiza y dúctil, sometidas a transtensión. Se exploran dos casos particulares: 1) una corteza dúctil relativamente resistente a la deformación y 2) una corteza dúctil relativamente poco resistente a la deformación con una reología suavizada (por ejemplo, Corti et al., 2003). Las series experimentales propuestas en este trabajo pretenden responder dos preguntas fundamentales para entender la evolución del Golfo de California, parte Sur: 1) ¿Cuál es la importancia de las variaciones en la dirección de desplazamiento del bloque de Baja California en la evolución de las cuencas de *pull-apart*?, y 2) ¿Cómo influye el flujo de la corteza dúctil propuesto en la zona norte del Golfo de California en la evolución de las cuencas *pull-apart*? Los experimentos físicos son puramente mecánicos y de escala cortical. Las diferencias en la deformación observada dependen principalmente de cambios en la cinemática y en la resistencia del material viscoso que simula la corteza dúctil. No se toman en cuenta efectos isostáticos o térmicos.

4.2.- Modelos analógicos de procesos a escala cortical

La metodología del modelado analógico consiste en reproducir en escala de laboratorio los perfiles de resistencia de la litósfera, estos han sido utilizados para observar y representar el comportamiento mecánico de las rocas (Ranalli, 1995). En este sentido los modelos analógicos pueden representar las variaciones simulando solo dos niveles: la corteza superior y la corteza inferior (Figura 14).

Los modelos analógicos son apropiados para el estudio de la deformación en niveles superiores de la corteza donde los materiales tienden a tener un comportamiento quebradizo. Sin embargo se restringen a simular resultados de la deformación ya que son incapaces de reproducir efectos de subsidencia y de transferencia térmica (Brun, 1999).

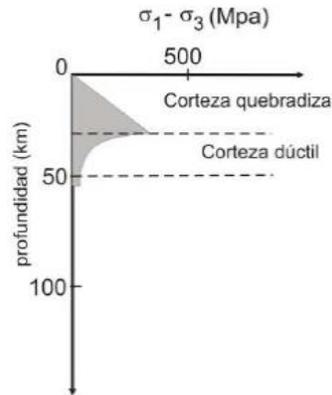


Figura 14. Muestra a escala aproximada un perfil de resistencia de una corteza con 2 capas, quebradiza y dúctil, reología “*Crème brûlée*” (e.g., Corti et al., 2003).

4.3- Escalamiento

El escalamiento consiste en reproducir de manera apropiada: a) la geometría de las cuencas de *pull-apart*, (escalamiento geométrico), b) la velocidad de la deformación de las cuencas en el Golfo de California Sur, (escalamiento cinemático), c) el comportamiento mecánico, (escalamiento dinámico). Cuando se cumplen estas tres condiciones se espera que los experimentos respondan a la deformación de manera análoga a como lo hacen los materiales naturales (Brun, 1999).

4.4- Estrategia de modelado

El arreglo experimental consiste de una placa móvil de acrílico con una geometría que reproduce una falla de basamento con forma de zig-zag sobre una mesa metálica. El modelo mide 40 cm de ancho por 50 cm de largo. La placa de acrílico móvil se encuentra sujeta a un actuador que generara un desplazamiento de falla lateral derecha. Se espera que el borde externo de la placa de acrílico actúe como una discontinuidad de velocidad que forme una cuenca *pull-apart* en la zona donde se propone un ángulo α (Figura 15).

Los modelos tienen el objetivo de reproducir los diferentes tipos de cuencas *pull-apart*, romboidal, aguja y Z, (Gürbüz, 2014). Adicionalmente, se pretende explorar los efectos que tiene la transtensión en los sistemas transformes. Se proponen dentro de nuestro arreglo experimental cuatro diferentes ángulos α ; 90°, 45°, 30° y 25° para la forma de

la placa acrílica donde se espera aparezca la cuenca *pull-apart* (Figura 15). Por otro lado, se exploran cambios pequeños en la orientación del desplazamiento de la placa móvil que provocan variaciones en la cinemática de la deformación en la cuenca; a rumbo (0° de oblicuidad), con 5° , 7° y 11° grados de oblicuidad. De esta manera se obtendrán diferentes combinaciones que nos permitirán observar cuales son las características geométricas que influyen más en el resultado (tabla 2).

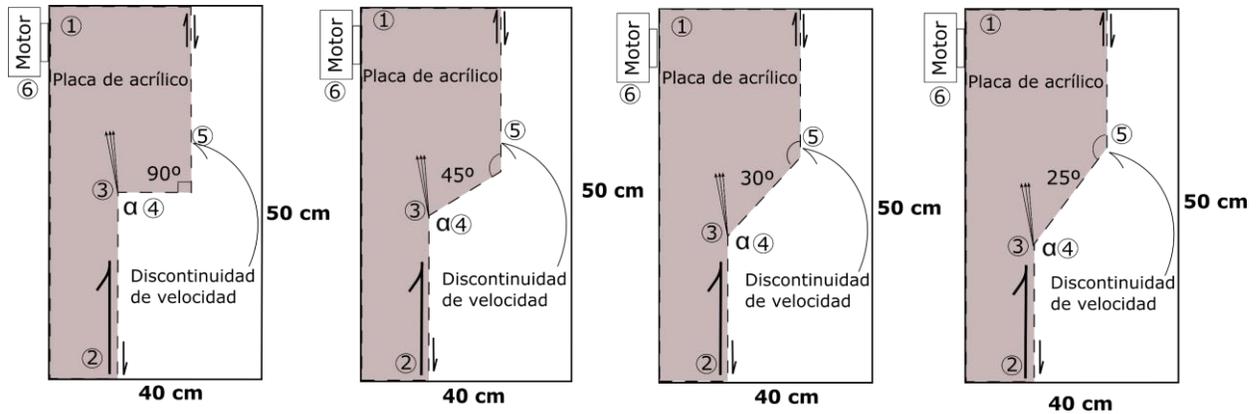


Figura 15. Vista en planta del arreglo experimental, donde se esquematizan las principales características; 1.-placa de acrílico móvil, 2.- la flecha negra representa el movimiento de la placa acrílica, 3.- variación experimental del movimiento, 5° 7° y 11° , 4.- ángulo “ α ” propuesto (es el ángulo agudo entre la discontinuidad de velocidad y la variación angular que une los dos segmentos verticales entre las placas) 5.-en línea punteada la discontinuidad de velocidad, 6.- muestra la posición del motor, , modificado de McClay (1995).

Se proponen dos series experimentales descritas en los siguientes subtemas, como serie experimental I y serie experimental II.

4.5.- Serie experimental I

La serie experimental I consiste de 16 experimentos con las características que se presentan en la tabla 2. Para esta serie se utilizó un material que reproduce una corteza dúctil relativamente resistente con respecto a la corteza quebradiza. Se pretende

recrear la formación de cuencas *pull-apart* en un contexto donde existe un desacople relativamente bajo entre la corteza superior y la corteza inferior.

4.6.- Serie experimental II

La serie experimental II consiste de ocho experimentos con las características que se presentan en la tabla 2. En esta serie se utilizó un material que reproduce una corteza inferior relativamente dúctil con respecto a una corteza superior quebradiza.

Todos los experimentos propuestos en este trabajo se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Geosistemas (LAMG) en el Centro de Geociencias (CeGeo). Este laboratorio cuenta con un área específica para la realización de modelado analógico y una de sus principales herramientas de trabajo es una mesa experimental (Figura 16), que por sus características permite deformar los modelos con un arreglo de motores de pasos y actuadores a los cuales se les puede fijar paredes y placas acrílicas. El desplazamiento lento y constante está controlado mediante el software Labview en las direcciones X, Y y en cualquier sentido requerido. De esta manera se generaran los desplazamientos de extensión (e) y transtensión (oblicuidad) que se aplicaran a los experimentos.

Matriz de experimentos, cuencas "pull-apart" serie "I"				
	Angulo de la falla (α)			
Oblicuidad ($^{\circ}$)	90	45	30	25
0	x	x	x	x
5	x	x	x	x
7	x	x	x	x
11	x	x	x	x

Tabla 2. Los 16 experimentos programados para la serie I, en vertical se muestra el porcentaje de transtensión que se aplicara sobre el experimento y en horizontal el ángulo “ α ” predefinido en la placa de acrílico.

Matriz de experimentos, cuencas "pull-apart" serie "II"				
	Angulo de la falla (α)			
Oblicuidad ($^{\circ}$)	90	45	30	25
0	x	x	x	x
5				
7				
11	x	x	x	x

Tabla 3. Los 8 experimentos programados para la serie “II”, en vertical se muestra el porcentaje de transtensión que se aplicara sobre el experimento y en horizontal el ángulo “ α ” predefinido en la placa de acrílico.

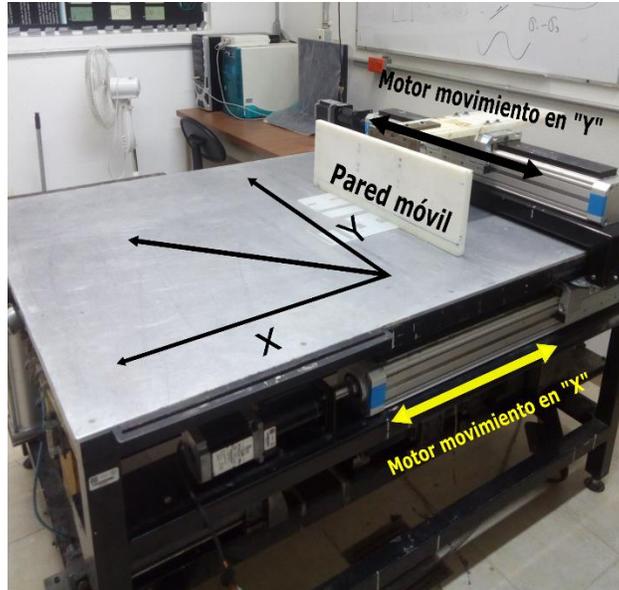


Figura 16. En la fotografía se muestra las principales características de la mesa experimental utilizada para la realización de los experimentos en el Laboratorio de Mecánica Multiescalar de Geosistemas (LAMG) del Centro de Geociencias (CeGeo).

4.7.- Materiales

Los materiales que se utilizarán para la realización de este arreglo experimental son los siguientes:

Para representar las capas con un comportamiento quebradizo, es decir que tengan un comportamiento Mohr-Coulomb (Byerlee, 1978):

$$\tau = 50 + (\tan 31^\circ) \sigma \quad (1.0)$$

En esta ecuación τ es el esfuerzo de cizalla y σ es el esfuerzo normal al plano de falla.

Se utilizó arena de cuarzo seca cribada, con un tamaño de 420 micrones aproximadamente y con una densidad aparente (ρ) de 1400 kg/m³ y cuyo ángulo de fricción (ϕ) se encuentra en un rango de 30°-33° cuando la cohesión es despreciable (50 Pa). Este es un material adecuado para representar la corteza quebradiza ya que en una relación típica de escala geométrica entre el modelo y el sistema natural: $L^* = 10^{-6}$. Se requiere de un material análogo con una cohesión insignificante en comparación con el esfuerzo diferencial ($\sigma_1 - \sigma_3$), dado por:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2/3 \rho g z \quad (1.1)$$

Donde σ_1 es el esfuerzo principal compresivo máximo, σ_3 el esfuerzo principal compresivo mínimo, ρ es la densidad de la capa, g es la aceleración y z es el espesor de la capa. En los modelos esta relación se conserva, ya que la cohesión en la arena debería ser muy pequeña (50 Pa en nuestro caso) y un coeficiente de fricción interna $\mu = 0.58$ (Smith et al., 2005; Brun, 1999).

Para representar capas con un comportamiento dúctil utilizamos dos tipos de silicón, 1) PDMS de alta densidad (down corning 3179 dilatant compound) y 2) una mezcla de silicón (SGM 36) con arena de cuarzo al 25 % en peso, con densidades respectivas 1140 kg/cm³ y 1600 kg/cm³ y viscosidades dinámicas, que se determinaron mediante pruebas en un viscosímetro conicilíndrico a diferentes tasas de deformación (Figuras 21 y 22). De acuerdo con la tasa de deformación ($\dot{\epsilon}$) que se utilizó, la viscosidad

dinámica de los materiales varia, dada por la siguiente ecuación de ley de potencias (Goetze y Evans, 1979; Smit, 2005):

$$\dot{\epsilon} = A \exp (- Q/ RT) (\sigma_1 - \sigma_3)^n \quad (1.2)$$

Donde ($\dot{\epsilon}$) es la tasa de deformación, (Q) la energía de activación, (R) la constante del gas universal, (T) la temperatura absoluta, (A) es una constante del material, ($\sigma_1 - \sigma_3$) es el diferencial de esfuerzo y (n) el exponencial de esfuerzo. Esta ecuación expresa la deformación en rocas con flujo dúctil y permite calcular las condiciones específicas de los materiales que se someten a esfuerzos. Sin embargo, en este trabajo el diferencial de esfuerzos se calculó mediante pruebas de viscosidad a diferentes tasas de deformación, los resultados se presentan en las figuras 21 y 22, estas gráficas nos muestran la relación que existe entre la tasa de deformación y el diferencial de esfuerzo ($\log \dot{\epsilon} / \log \sigma$). Esta herramienta se utilizó ya que no contamos con las técnicas de laboratorio para poder calcular (- Q/ RT) de los materiales viscosos que utilizamos.

La tasa de deformación ingenieril (γ) en capas dúctiles (Smit et al., 2005) está dado por:

$$\gamma = v/ Td \quad (1.3)$$

Donde v es la velocidad de desplazamiento y Td es el espesor de la capa dúctil, Por lo tanto el esfuerzo de cizalla en las capas dúctiles puede escribirse como:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \tau = nv/Td \quad (1.4)$$

4.8.- Diseño de los experimentos

Las cuencas *pull-apart* se generan en zonas donde las fallas maestras se han traslapado o flexurado (Gürbüz, 2014), por lo que nuestro arreglo experimental, se idealiza de la siguiente manera (Figura 17):

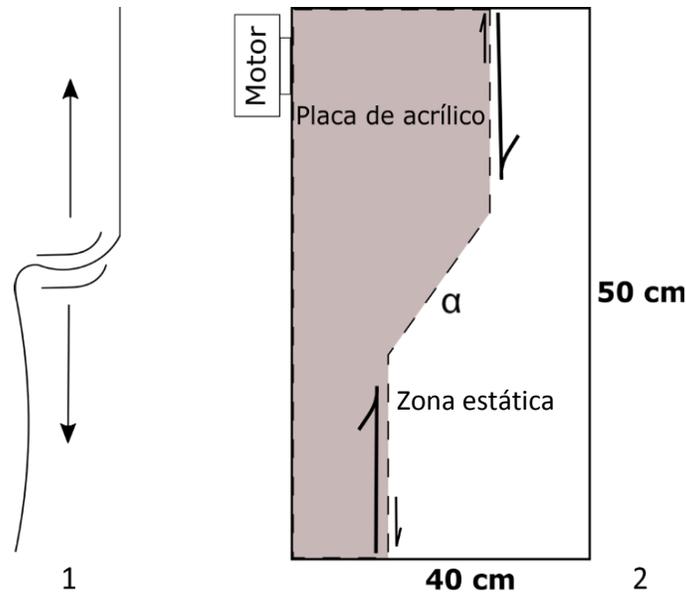


Figura 17. Modelo conceptual de la formación de una cuenca *pull-apart* en una zona de flexura en una falla maestra de sentido lateral derecho, la formación de la cuenca se dará en la zona donde se da el relevo derecho de fallas, Mann et al. (1983). 2, Arreglo geométrico propuesto en este trabajo, se muestra el sentido de falla lateral derecha, la formación de la cuenca *pull-apart* se dará en la zona de traslape indicada con el símbolo α .

En el arreglo experimental propuesto se pretende replicar principalmente la mecánica de la formación y el desarrollo de las cuencas *pull-apart* que se muestra en la Figura 17. El arreglo experimental es parecido al propuesto por McClay y Dooley, (1995), Basile y Brun (1999), y se usaron materiales análogos a la parte superior de la litosfera con una escala que corresponde a un centímetro por cada kilómetro, (Figura 18).

Para simular la parte superior de la corteza se utilizó una capa de arena de cuarzo tamizada hasta llegar a un tamaño aproximado de 420 μ . Para simular la parte inferior de la corteza se utilizaron dos materiales, silicón rosa (down corning 3179 dilatant compound) para la Serie I, y una mezcla de silicón gris (SGM 36) y arena de cuarzo al 25% en peso para la Serie II

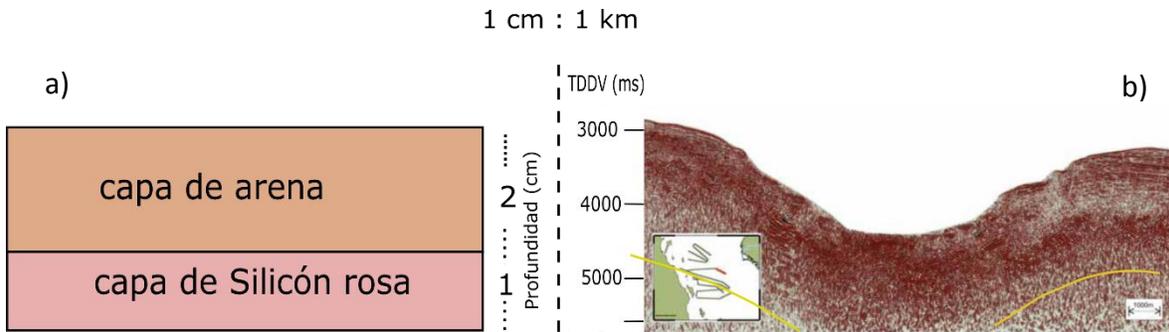


Figura 18. a) Muestra la estratificación de los materiales en nuestro arreglo experimental, b) muestra en una imagen sísmica tomada de Piñero-Lajas, (2008), el cambio que se observa del comportamiento de las ondas sísmicas entre la parte somera y profunda de la corteza. También muestra la relación de escala y de comportamiento mecánico entre el modelo y el sistema natural.

La construcción del modelo incluyó (Figura 20): a) la colocación sobre la mesa de trabajo una placa de acrílico de 0.3 cm de grosor con la forma que se aprecia en la Figura 17, de 30 x 25 cm. En sus extremos se encuentra unida con dos placas de triplay de 20 x 10 cm y 25 x 20 cm, ambas con un grosor de 0.3 cm. b) sobre el borde de las placas de acrílico y triplay respecto a la mesa metálica (Figura 19), se coloca una capa de silicón que simula el comportamiento mecánico de la corteza inferior (silicón rosa “down corning 3179 dilatant compound” o silicón SGM 36, para las dos series experimentales respectivamente). La capa de silicón tiene un grosor de 1 cm, una longitud de 50 cm por 6 cm de ancho.

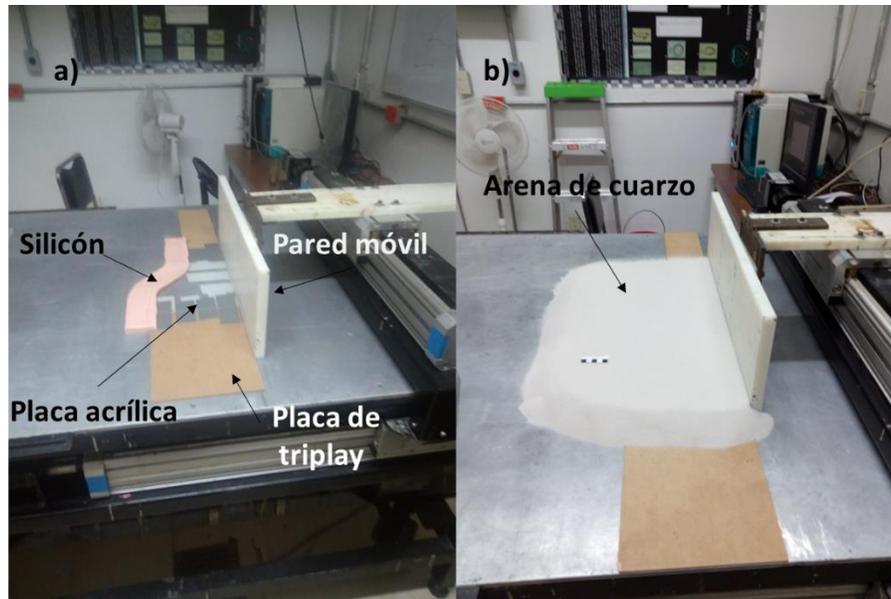


Figura 19. a) Muestra la disposición de los materiales parte del “set up”, la placa acrílica sujeta a las placas de triplay sobre las cuales se sobre pones una capa de silicón, b) muestra a los materiales de la base del “set up” cubiertos por la capa de arena de cuarzo.

Sobre los materiales mencionados se añadió una capa de arena de cuarzo de 2 cm de grosor. La capa de arena cubre un área con forma aproximadamente rectangular con dimensiones de 50 cm de largo por 40 cm de ancho. La frontera del modelo se encuentra confinada con arena (Figura 19). La placa basal de acrílico se encuentra sujeta a una placa plástica de color blanco (Figura 20) que funciona como una pared móvil puesto que se encuentra sujeta a los motores de la mesa de trabajo, que mediante software se controlara el movimiento de la misma.

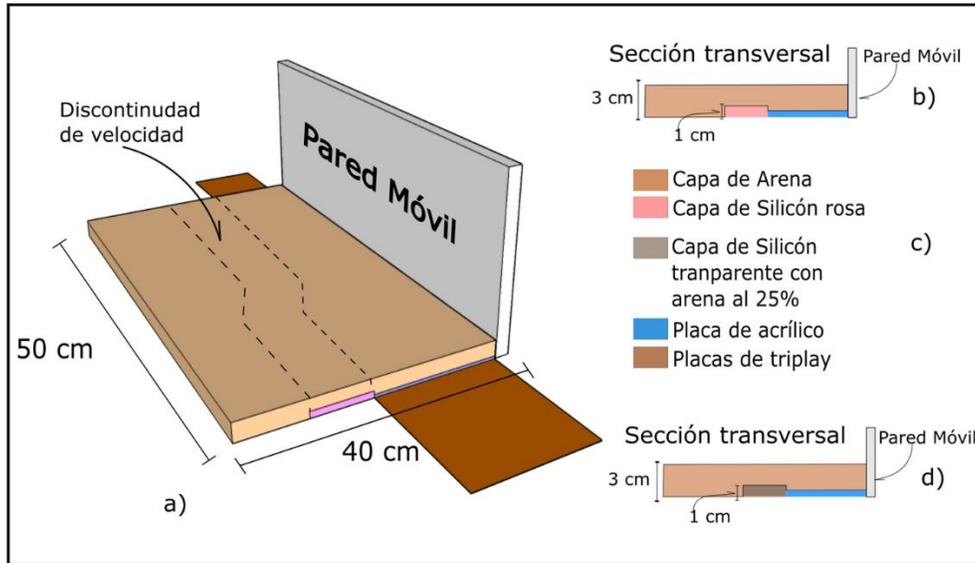


Figura 20. Elementos del arreglo experimental: a) vista completa en 3D del arreglo, b) sección transversal serie "I", c) leyenda y d) transversal serie "I".

Todos los experimentos, tanto de la **Serie I** como de la **Serie II** se deformaron por 5 horas a una velocidad de 0.6 cm/h. Considerando esta velocidad, los espesores y la viscosidad de los materiales (Figuras 21 y 22) se puede calcular el diferencial de esfuerzos ($\sigma_1 - \sigma_3$) a partir de los perfiles de resistencia (Serie I y Serie II):

1.- Para la capa superior la relación es la siguiente (ecuación 1.2):

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2/3 \rho g z \quad (1.2)$$

Sustituyendo:

Donde la densidad de la arena (ρ) es iguala a 1400 kg/m³ la aceleración de la gravedad ($g=9.8$ m/s²) y "z" es el espesor de la capa:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2/3 (1400 \text{ kg/m}^3) (9.8 \text{ m/s}^2) (0.02 \text{ m})$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 183 \text{ Pa}$$

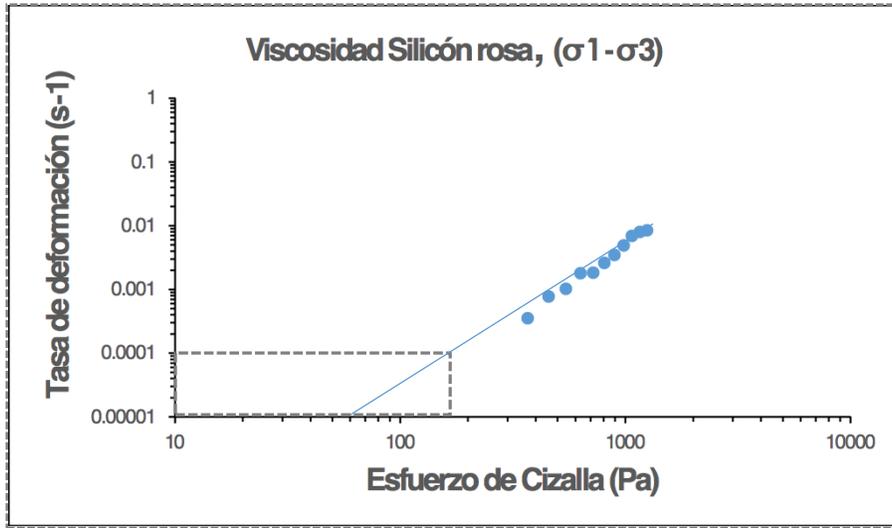


Figura 21. Muestra las curva de flujo del silicón rosa (down corning 3179 dilatant compound) a diferentes tasas de deformación ($\dot{\epsilon}$) utilizado en la Serie I.

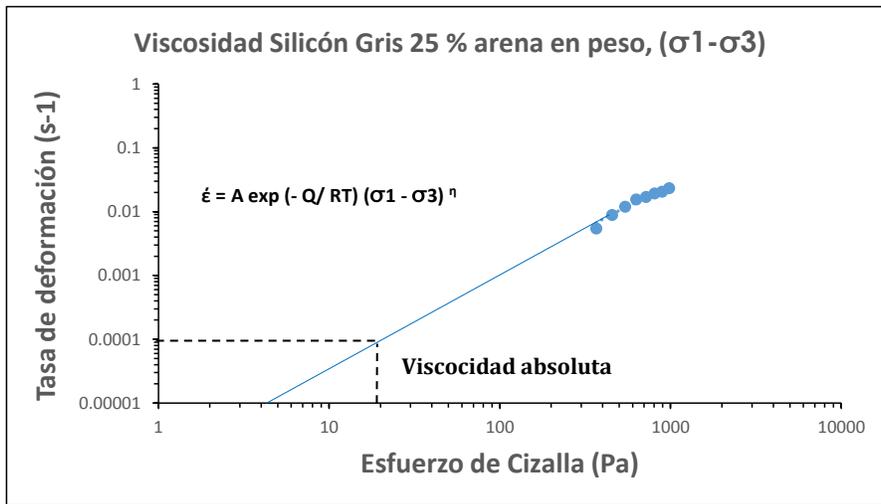


Figura 22. Muestra la curvas de flujo del silicón gris con 25% de arena de cuarzo en peso (SGM 36) a diferentes tasas de deformación ($\dot{\epsilon}$) utilizado en la Serie "II".

Para los materiales dúctiles esta relación se expresa de la siguiente manera:

En la **Serie I** utilizamos el silicón rosa con una viscosidad dinámica que para la tasa de deformación experimental $\dot{\epsilon} = 0.166 \times 10^{-3}$ corresponde a 9×10^5 Pa*s y con un espesor equivalente a un centímetro (1 cm), donde al sustituir observamos lo siguiente:

$\dot{\epsilon}$ se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Tasa de deformación } \dot{\epsilon} = v / Td$$

Donde v es la velocidad con que se deforma el material y Td es el grosor de la capa viscosa, por lo que la tasa sería (ver figura 21):

$$\dot{\epsilon} = (0.6 \text{ cm/h}) / (1 \text{ cm})$$

$$\dot{\epsilon} = (0.166 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}) / (1 \text{ cm})$$

$$\dot{\epsilon} = 0.166 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{Se sustituye en } \sigma_1 - \sigma_3 = \eta \dot{\epsilon},$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (893576.64 \text{ Pa*s}) (0.166 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1})$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 103.65 \text{ Pa}$$

En la **Serie II** utilizamos el silicón gris (SGM 36) con un valor de viscosidad para la tasa de deformación experimental de 18 Pa*s. El espesor del silicón es de 1 cm, donde al sustituir observamos lo siguiente (ver figura 22):

$$\text{Se sustituye en } \sigma_1 - \sigma_3 = \eta \dot{\epsilon},$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (102550.5 \text{ Pa*s}) (0.166 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1})$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 17 \text{ Pa}$$

Los perfiles de resistencia se realizan introduciendo los valores del diferencial del esfuerzo ($\sigma_1 - \sigma_3$) respecto a la profundidad de las capas de cada material (Figura 20).

Comparando los perfiles de resistencia de los materiales usados en este trabajo (Figura 23) con los que se podrían encontrar en un sistema parecido en la naturaleza (Figura 24), podemos observar que el comportamiento de los materiales en las tasas de deformación en estos experimentos es comparable con dichos sistemas.

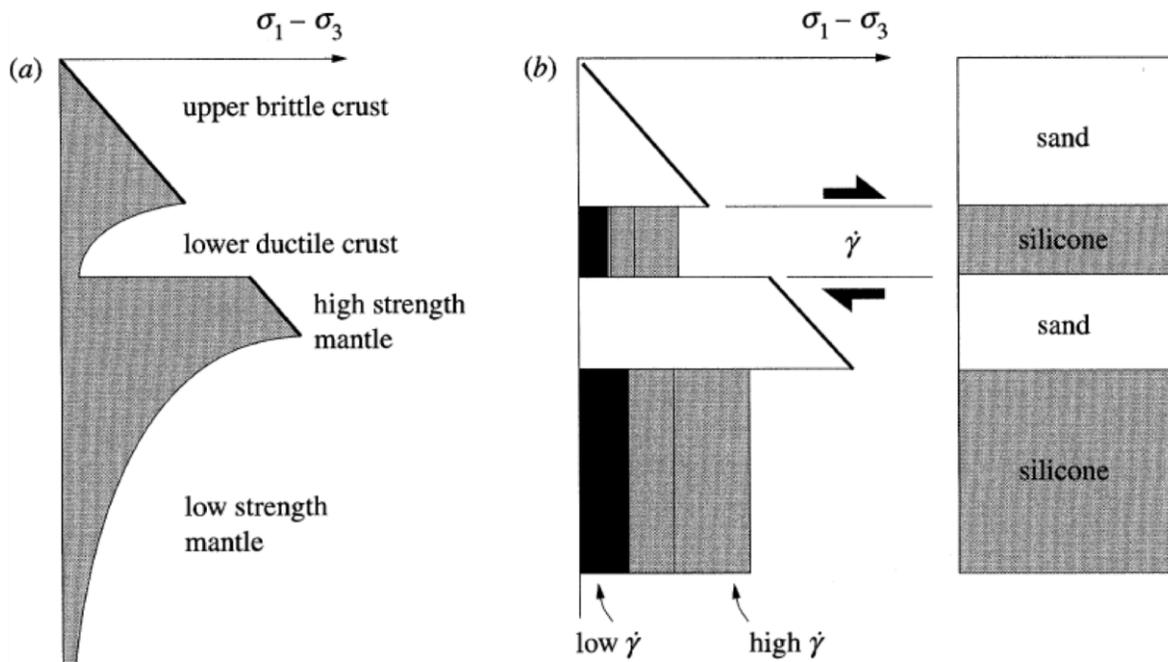


Figura 23. Muestra una comparación de un perfil de resistencia de un experimento de escala litosférica (cuatro capas) y del perfil de resistencia en la litósfera natural (Brun, 1999).

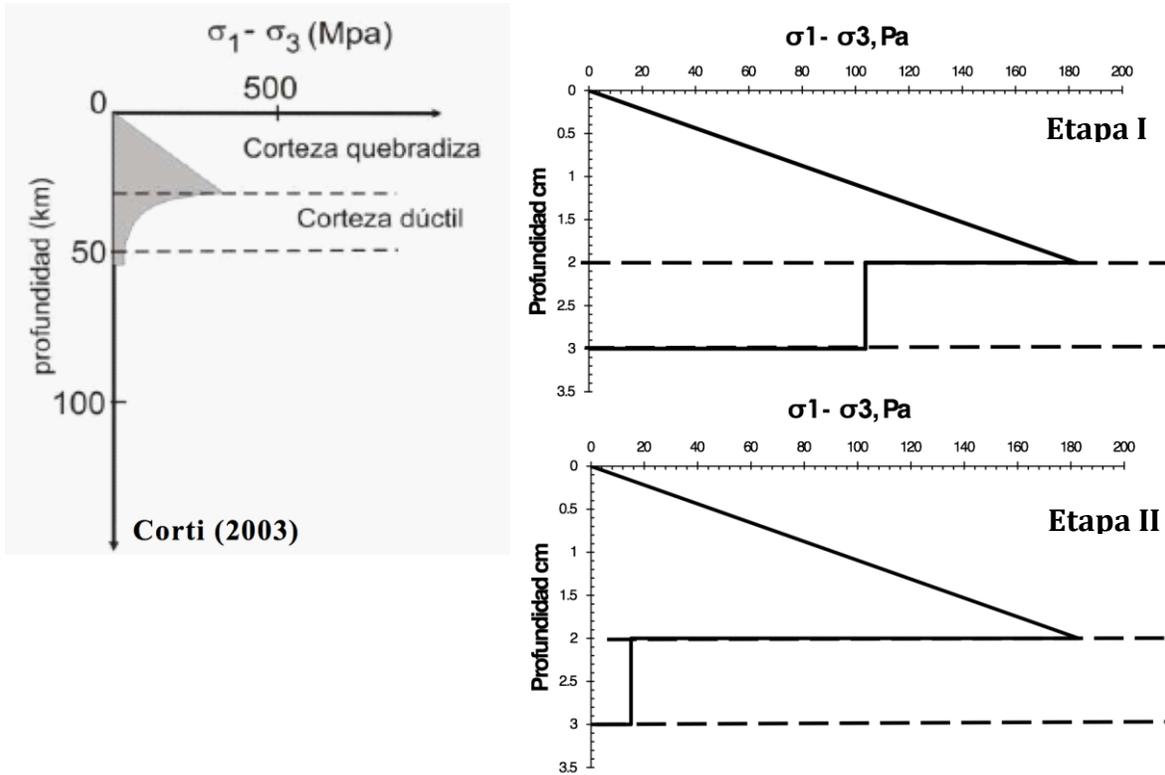


Figura 24. Perfiles de resistencia de la Serie I y Serie II de este trabajo con el perfil de resistencia de la corteza que presenta una reología de 2 capas (Corti et al., 2003).

4.9.- Medición de la deformación

Existen dos aspectos de la deformación interesantes en las cuencas *pull-apart* generadas mediante los experimentos presentados; 1) la deformación que se puede medir en planta o sobre un plano “x, y” (una fotografía), como los desplazamientos en fallas de rumbo y el ancho y largo de la cuenca y 2) la deformación que se puede medir en el eje “Z” (altura), la profundidad de la cuenca.

La deformación que se generó en los experimentos, se registró mediante fotografías tomadas con un sensor CCD (Charge Coupled Device) (Figura 25), de alta resolución (de marca Lumenera) colocada sobre unos rieles a una altura de dos metros (2 m) en el techo del laboratorio (LAMMG) y a un metro y medio (1.5 m) de altura sobre la mesa de trabajo (Figura 26) y se utilizó el software LuCam para controlar el tiempo de los disparos fotográficos.



Figura 25. Imagen que muestra un experimento bajo luz blanca. 2, bajo luz con franjas.

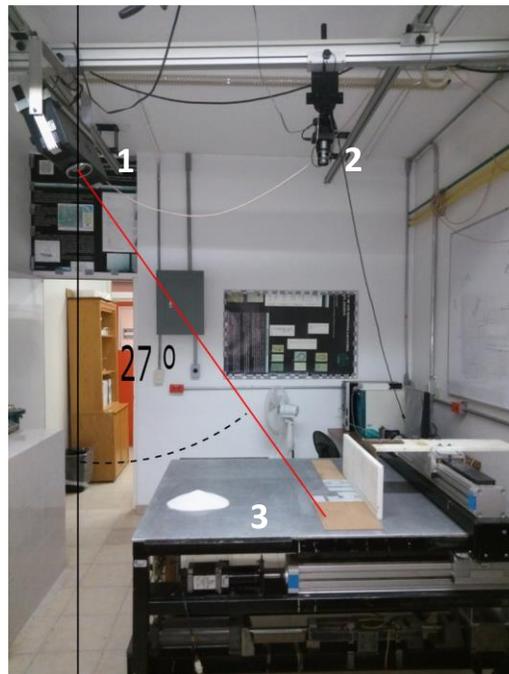


Figura 26. Ángulo de iluminación utilizado para las fotografías en luz blanca y en franjas. 1.- proyector de luz, ángulo de 27° , 2.-Posición de la cámara que se usó para tomar las fotografías, 3.- Mesa de trabajo.

Se tomaron un total de 150 fotografías por experimento, dos fotografías por minuto (2 fotografías/minuto), se tomaron 75 fotografías iluminadas con luz blanca y 75 con franjas binarias blanco-negro en intervalos de cinco minutos (5 minutos). La luz se

proyectó con un ángulo de iluminación de 27° (Figura 26). La luz blanca se utilizó para registrar la deformación en planta y la luz con franjas (negras y blancas) se utilizó para observar la evolución de la profundidad de la cuenca (altura). La técnica de franjas se explicará de manera detallada en el siguiente apartado.

Para medir la deformación en planta en las cuencas *pull-apart* que se generaron en los experimentos se utilizó los parámetros geométricos propuestos por Gürbüz (2014), que son el largo de la cuenca (L), ancho de la cuenca (W) y el ángulo agudo alfa (α) (Figura 1).

Sin embargo, en este trabajo, además de utilizar las principales características geométricas de las cuencas *pull-apart* propuestas por Gürbüz (2014), agregamos la medición de una característica que ha sido contemplada en otros trabajos y que denominamos extensión de cuenca (E) (véase Figura 27), se suma con el objetivo de saber si esta característica está en función de la cantidad de deformación que experimentan las otras o si es independiente, por lo que en este trabajo se contemplan cuatro características geométricas que consideramos en las cuencas *pull-apart* generadas en los experimentos análogos (Figura 27).

El arreglo experimental en todos los casos se deformó hasta un máximo de 5% de extensión (Figura 28), comparando el estado final con el estado inicial del mismo con el parámetro de elongación;

$$e = (l_f - l_i) / l_i$$

La medición de las características geométricas se realizó usando el programa Image J, que nos permite mediante un escalamiento simple entre la equivalencia de pixeles (px) y milímetros (mm) obtener las dimensiones reales de los experimentos en fotografías y sobre estas realizar las respectivas mediciones (en milímetros) (figuras 27 y 29). Para cuantificar el cambio en las características geométricas L (largo), W (ancho), α (ángulo agudo alfa) y E (extensión de cuenca) de las cuencas *pull-apart* generadas en nuestros experimentos, se seleccionaron de cada experimento siete fotografías en diferentes series de deformación (im000000, im000026, im000051, im000076, im000101,

im000126, im000147) que equivalen al 0%, 0.75%, 1.5%, 2.5%, 3.4%, 4.3% y 5% de deformación (Figura 29).

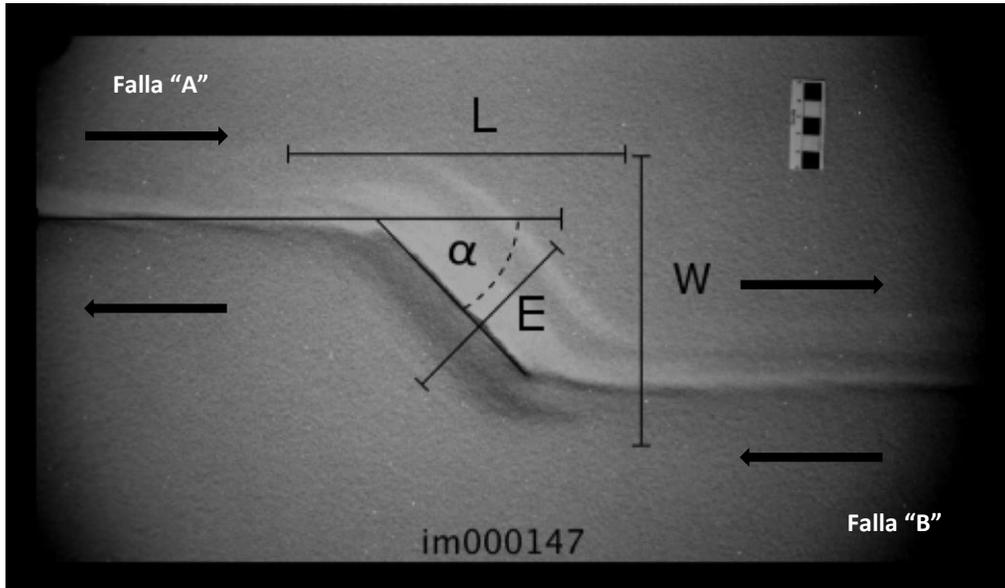


Figura 27. Muestra en una de nuestras fotografías las características geométricas de las cuencas *pull-apart* que se consideran en este trabajo, incluyen la propuesta de Gürbüz (2014), L (largo de la cuenca), W (ancho de cuenca) α (ángulo agudo alfa) y la medición que se propone en este trabajo E (extensión de cuenca).

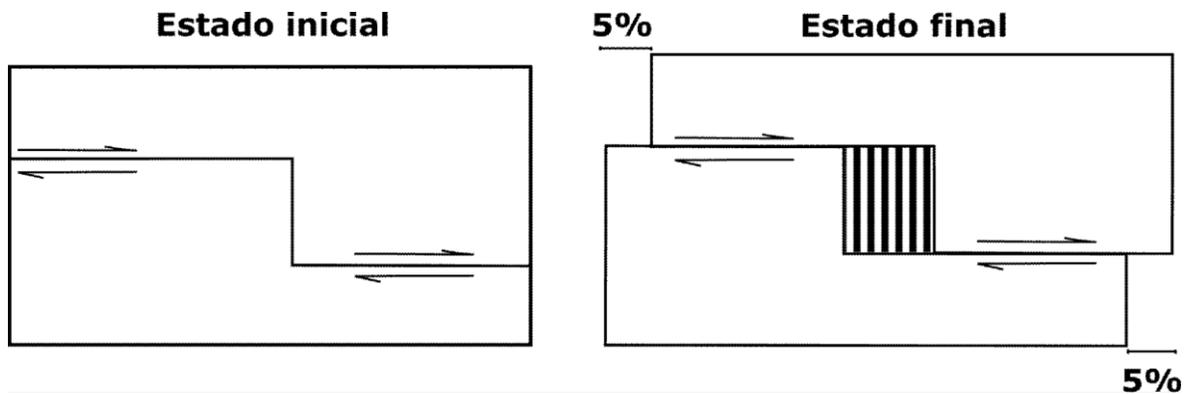


Figura 28. Figura que esquematiza la máxima deformación (5%) aplicada a nuestros experimentos.

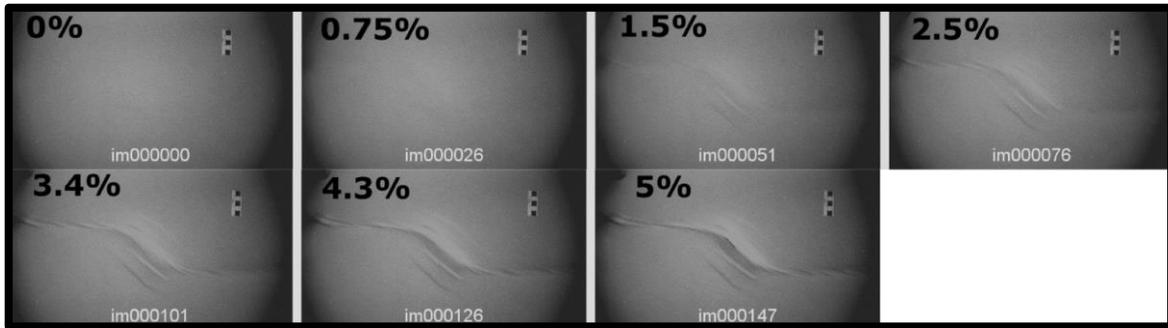


Figura 29. Muestra los siete series de deformación (fotografías) que se utilizaron para cuantificar la evolución de las características geométricas en todos nuestros experimentos L, W, α y “E”, usando el programa “Image J”.

4.10.- Técnica de franjas

La técnica de franjas nos permite la medición de la componente de deformación fuera del plano y está sustentada teóricamente en los principios de interferometría. Este fenómeno, denominado *interferencia* (Figura 30), parte de la observación de la periodicidad en la distribución de la luz en regiones claras u oscuras que pueden o traslaparse. Esta característica recibe el nombre de *franjas de interferencia* (Cabrera et al., 2000).

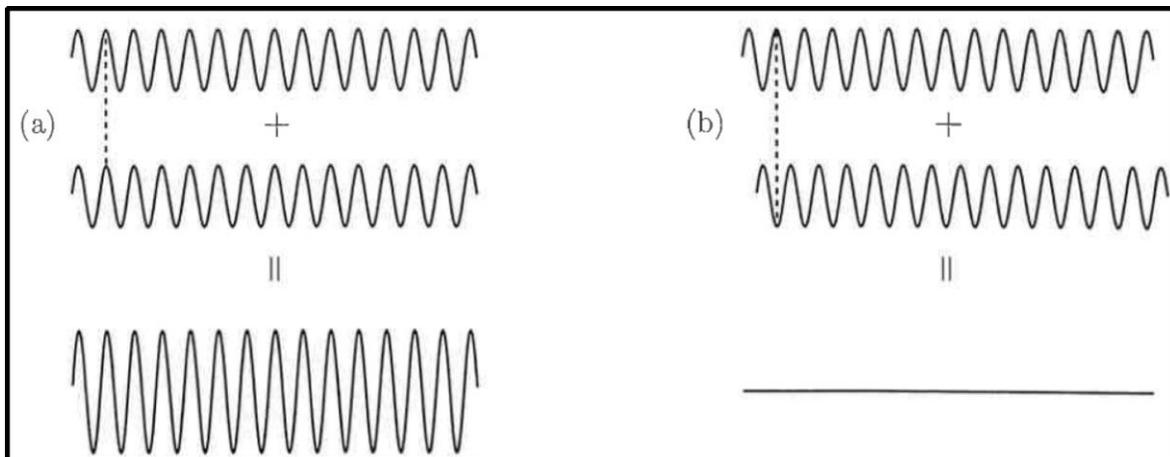


Figura 30. Muestra la superposición de dos ondas de la misma frecuencia y amplitud; a) en un punto en que están en fase, la amplitud resultante es el doble y la intensidad es el cuádruple, b) en un punto donde están en oposición de fase la amplitud y la intensidad don cero (Cabrera et al., 2000).

La técnica que se utilizó en este trabajo tiene como principal objetivo conocer la variación que aporta la deformación en la profundidad de las cuencas d *pull-apart* (Gürbüz, 2010). Se basa en la proyección de luz por medio de una máscara binaria de franjas blancas (transparente, luz blanca) y franjas negras (Figura 31) sobre la superficie del modelo a deformar, con un periodo de dos milímetros (2 mm), donde un periodo está compuesto por dos franjas una blanca y una negra, las cuales representan una longitud de onda completa. El objetivo consiste en la proyección de las franjas sobre el modelo, las cuales reflejen las desviaciones que se generaran sobre la superficie del modelo debido a la deformación, que en su estado inicial carece de variaciones significativas en su altura.

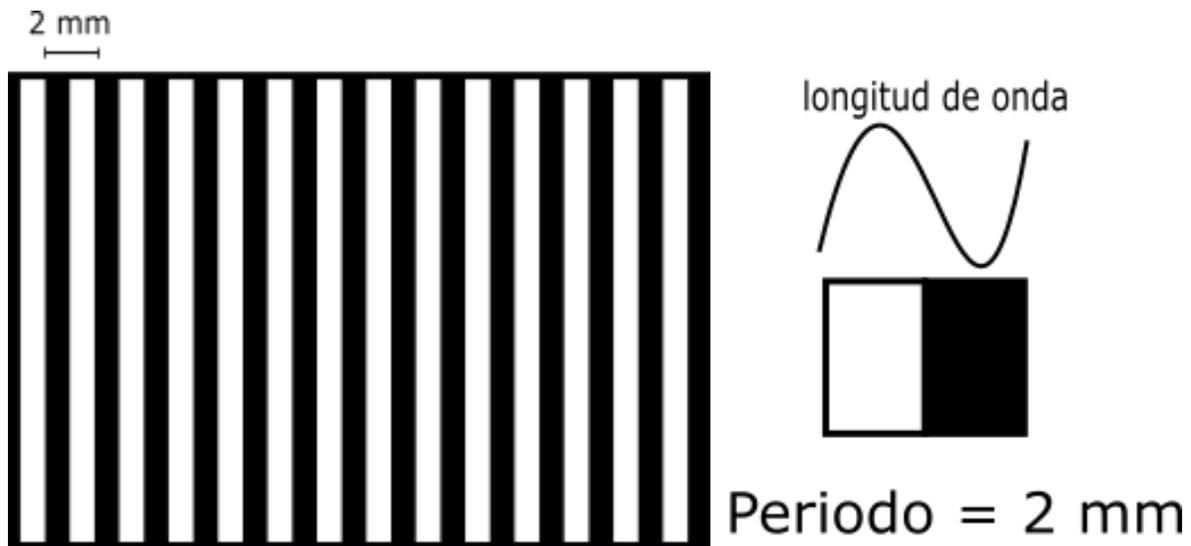


Figura 31. Muestra la máscara de franjas binarias (franjas blancas y negras) y un esquema de lo que se considera como el periodo utilizado.

Cuando la superficie tiene alguna desviación, como el salto en “A” que se muestra en la Figura 32, la franja en lugar de caer en “A” cae en “C” debido al desplazamiento. Una cámara arriba del modelo captará que la franja se ha desplazado lateralmente una distancia “B-C”, en estas condiciones la distancia “B-C” está condicionada por la relación “A-B” (Figura 32) (Barrientos et al., 2008).

El principal objetivo de la técnica de franjes es conocer la cantidad de deformación en el eje “Z” en los diferentes estados de los experimentos y observar la diferencia en la

profundidad entre estos. Lo anterior se logró utilizando el software ZEBRA, este programas permite una vez seleccionadas las fotografías adecuadas (fotografías con franjas blancas-negras, Figura 33), de todos los experimentos permite obtener la diferencia de altura denominada “d” (Gürbüz, 2010) comparando el estado inicial (la fotografía con 0% de deformación) que se asume como una superficie plana o con variaciones de altura poco significativa, con los otros seis estados subsecuentes en los cuales ya existe una diferencia de altura respecto al nivel cero o estado inicial.

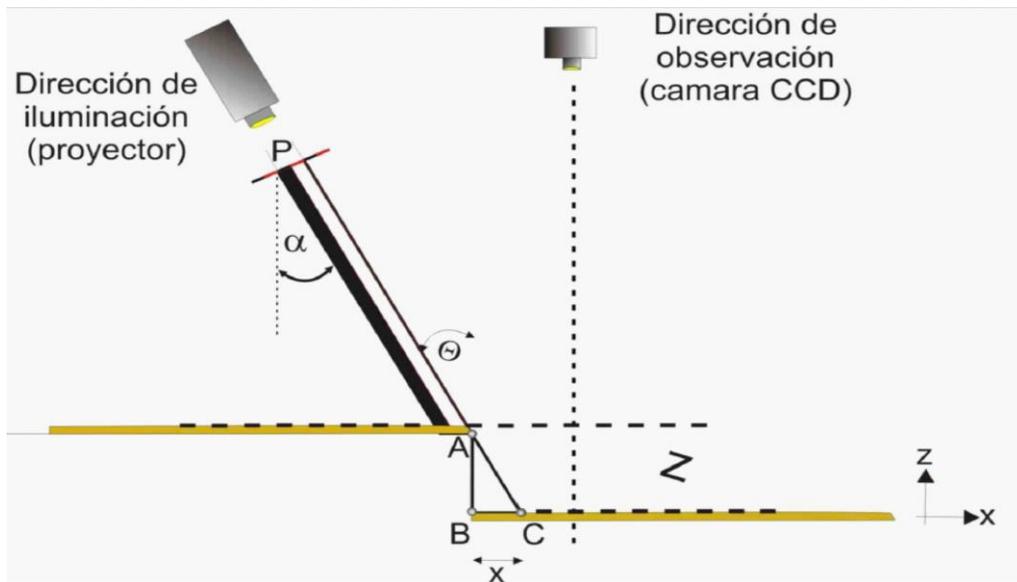


Figura 32. Esquema que muestra la proyección de la máscara binaria sobre una superficie ya deformada y la relación que presenta la diferencia “A-B” en “B-C”, que es básicamente lo que se mide con las fotografías, la diferencia de esa relación en diferentes grados de deformación.

Primeramente, se realiza en las imágenes un proceso de escalamiento utilizando la equivalencia que existe entre pixeles (px) y milímetros (mm), y la comparación de los diferentes estados de deformación. A partir de los resultados de elevación se producen una serie de *grids* de los cuales con ayuda del software *SURFER* con la herramienta “mapeo 3D” se generan los respectivos modelos de elevación digital. A partir de estos modelos podemos conocer la profundidad máxima “d” que se genera en cada estado de deformación a lo largo del desarrollo de las cuencas *pull-apart* generadas en los experimentos (Figura 34).

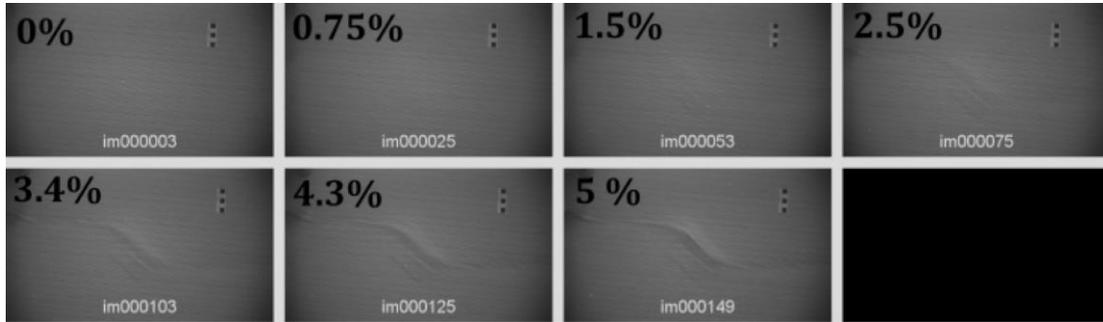


Figura 33. Muestra los siete estados de deformación (fotografías im000003, im000025, im000053, im000075, im000103, im000125 y im000149) que se utilizaron para cuantificar la evolución de la altura “d”, en todos los experimentos (0%, 0.75% 1.5%, 2.5%, 3.4%, 4.3% y 5% de deformación) (Barrientos et al., 2008).

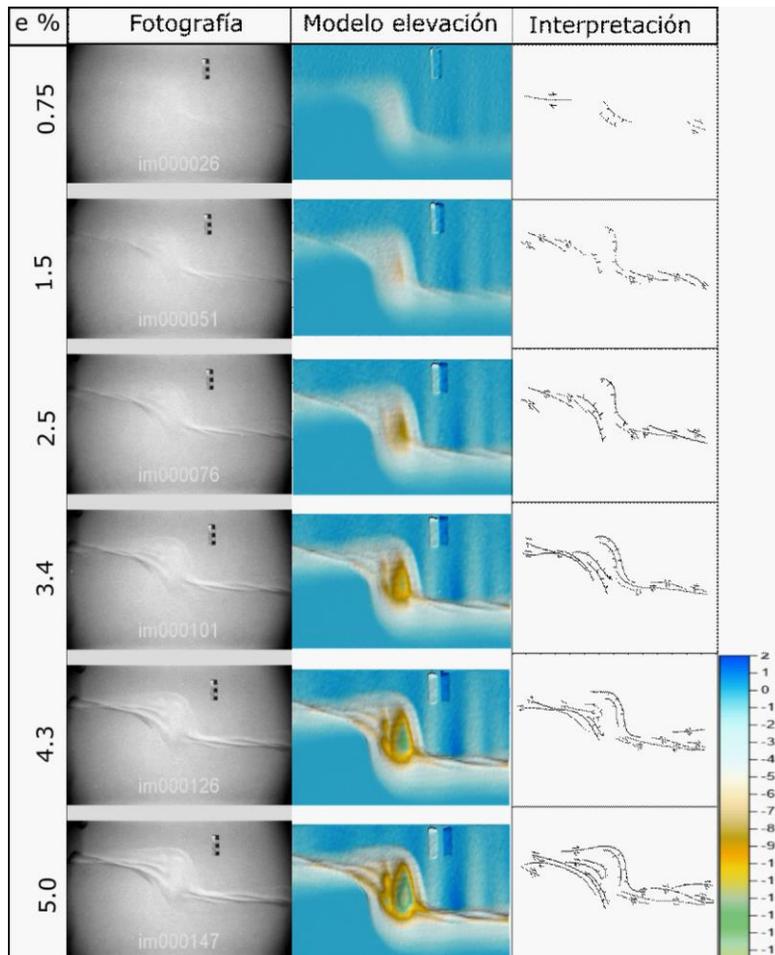


Figura 34. Muestra la fotografía antes del proceso en “ZEBRA” y en “SURFER”, los modelos de elevación generados, y la interpretación de estructuras que se realizó a todas las imágenes seleccionadas.

Capítulo 5.- Resultados

Las series experimentales reprodujeron de manera apropiada las características geométricas de las cuencas *pull-apart* que se forman sobre un traslape entre dos fallas de rumbo, con una debilidad preexistente en la litosfera en una zona sometida a transtensión. La geometría de la placa móvil reproduce esta condición como se ha hecho en los experimentos consultados en la literatura (por ejemplo McClay y Dooley, 1995; Basile y Brun, 1999; Wu et al., 2009). De acuerdo al modelo conceptual propuesto, la evolución de las cuencas *pull-apart* del Golfo de California en su parte Sur tiene algunas peculiaridades geométricas. En primer lugar, el vector de desplazamiento del bloque de Baja California varía ligeramente entre 5° y 10° (Dixon et al., 2000). Esto ha provocado que la traza de las fallas de rumbo no sea exactamente paralela al desplazamiento y ha resultado en una componente transtensiva que afecta al sistema de cuencas *pull-apart*. Los resultados experimentales exploran esta situación por lo que, se añade una componente extensional al movimiento de rumbo predominante para la formación de las cuencas experimentales. Esta componente está soportada por las observaciones de la geometría reportada de las fallas de rumbo (Nava-Sánchez et al., 2001) que muestra fallas normales asociadas con el desplazamiento lateral. Debido a que las variaciones en el desplazamiento del bloque de Baja California son pequeñas, para la serie experimental I consideramos un ángulo de oblicuidad del desplazamiento de la placa móvil con respecto a la orientación de las fallas de rumbo de 0 , 5 , 7 y 11° . La oblicuidad del desplazamiento se determina con la relación entre la velocidad V_x y V_y , (Persaud et al., 2016). Se mantuvieron constantes todas las variables exceptuando el ángulo de oblicuidad y el ángulo " α " definido como el ángulo agudo de la cuenca extensional con respecto a las fallas de rumbo. De esta manera, la serie experimental I consiste de 16 experimentos. En algunos casos se duplicaron los experimentos para observar la reproducibilidad de la serie; sin embargo, se discuten solamente un ejemplo de cada variación experimental. En la tabla 4, se muestran las variaciones angulares que conforman la primera serie experimental y las claves que en función de estas características se le asignó a cada experimento (ej., ángulo " α " de 45° y 11° de oblicuidad, "45 11").

Matriz de experimentos, cuencas "pull-apart" serie "I"				
	Angulo de la falla (α)			
Oblicuidad ($^{\circ}$)	90	45	30	25
0	90	45	30	25
5	90 05	45 05	30 05	25 05
7	90 07	45 07	30 07	25 07
11	90 11	45 11	30 11	25 11

Tabla 4. Muestra las claves que se designaron para los 16 experimentos realizados en la serie experimental I.

Recientemente, se ha discutido que la reología de la corteza inferior en los márgenes del Golfo de California se encuentra debilitada y la evidencia indica que ha fluido hacia la parte interna del Golfo (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; Martín-Barajas, 20103; Persaud et al., 2017). Esta condición se muestra como un adelgazamiento y levantamiento hacia la parte extendida en la interpretación geológica de las imágenes sísmicas del perfil Delfín-Tiburón (Martín-Barajas et al., 2103). La segunda serie experimental explora la influencia de una reología debilitada para la corteza inferior en la geometría resultante de las cuencas de *pull-apart*. En este caso se realizaron 8 experimentos cuyas condiciones y claves se muestran en la tabla, 5.

Matriz de experimentos, cuencas "pull-apart" serie "II"				
	Angulo de la falla (α)			
Oblicuidad ($^{\circ}$)	90	45	30	25
0	2 90	2 45	2 30	2 25
5				
7				
11	2 90 11	2 45 11	2 30 11	2 25 11

Tabla 5. Muestra las claves que se designaron para los 16 experimentos realizados en la serie experimental "II".

5.1.- Observaciones generales de la deformación vista en planta

En general, todos los experimentos realizados reproducen las características geométricas de una cuenca *pull-apart*, con variaciones relevantes introducidas por la variación angular y el cambio de reología. Para la descripción de la evolución estructural de cada experimento se analizaron 150 fotografías en planta por experimento y se seleccionaron siete (7) series específicas para la comparación de los experimentos.

Las principales estructuras que podemos observar en las fotografías de nuestros experimentos son aquellas que están relacionadas con la formación de una cuenca de *pull-apart*, fallas normales asociadas a la zona de la cuenca y fallas laterales (“A” y “B”) asociadas a las fallas de rumbo propias de estos sistemas (Figura 35 y 36).

En todos los experimentos la deformación es apreciable a partir del Estado 0.75% de deformación, y comienza en la zona de la cuenca que se aprecia en la parte central de las fotografías, la cuenca se desarrolla y delimita conforme aumenta la de deformación, las fallas laterales son apreciables de manera subsecuente a partir del Estado 1.5% de deformación y se definen conforme esta aumenta, se observan en las zonas exteriores de la fotografías, fuera de la zona de influencia de la cuenca (ver anexo, Figuras 66-81).

La cuenca, en los experimentos deformados a rumbo, sin ángulo de oblicuidad (sin transtensión) inicia como una zona de depresión sin fallas normales bien definidas, que aparecen y se van desarrollando y definiendo al aumentar la deformación. En los experimentos deformados con ángulo de oblicuidad (transtensión) la cuenca inicia como una serie de pequeñas fallas normales (con componente oblicuo) con arreglo en “echelon” que aumentan de tamaño y se definen con el aumento de deformación (ver Anexo, Figuras 66-81).

Las fallas de rumbo en los experimentos deformados sin ángulo de oblicuidad, se observan en su inicio como un par de fallas laterales con un arreglo en “echelon” muy discreto, que con el aumento de la deformación aumentan de tamaño y progresivamente se unen en una sola falla “maestra” que se define en el punto máximo de deformación (Figura 35). En los experimentos deformados con ángulo de oblicuidad

se observan en el inicio como una serie (2-3) de fallas con un arreglo en “echelon” bien definido, que con el aumento de la deformación aumentan de tamaño y se asocian a una zona de falla que se desarrolla y define en una sola falla maestra (Figura 35 y 36).

Los montajes ayudan a comparar las características de deformación entre los mismos estados de deformación de los diferentes experimentos, por lo que además de poder cuantificar las características geométricas de las cuencas *pull-apart* mediante unidades de distancia (mm), también se pudieron observar diferencias en los estilos de deformación entre estos, es decir, pudimos observar que debido a su configuración, los experimentos durante su desarrollo presentaron diferentes estructuras asociadas al ángulo “ α ” y a la cantidad de transtensión que a continuación se describen.

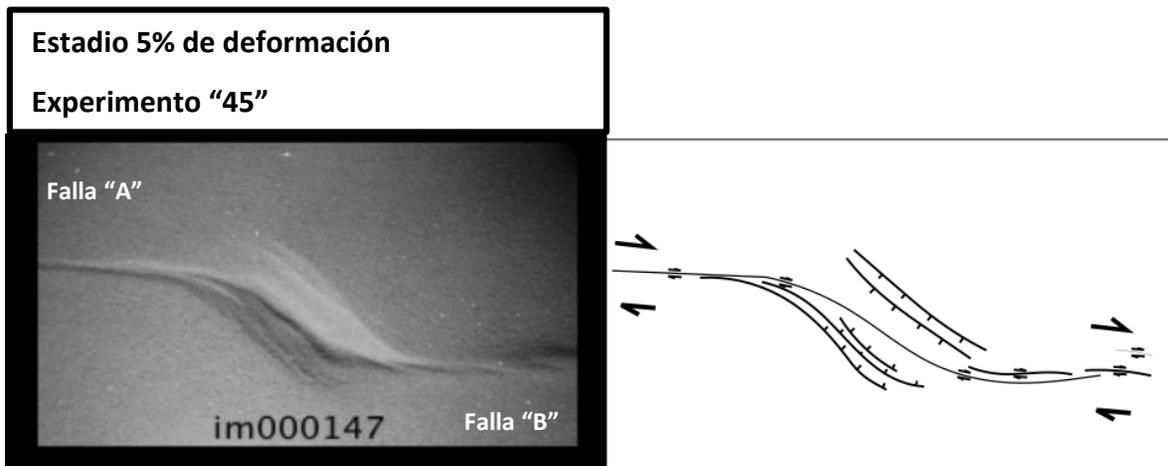


Figura 35. Figura que muestra la imagen del estado 5% de deformación del experimento “45” (experimento con ángulo “ α ” de 45°, y cero ángulo de transtensión u oblicuidad) izquierda imagen fotográfica 147, derecha interpretación de las estructuras que se observan en la fotografía, al centro fallas normales asociadas a la cuenca, en los extremos fallas laterales asociadas a las fallas de rumbo.

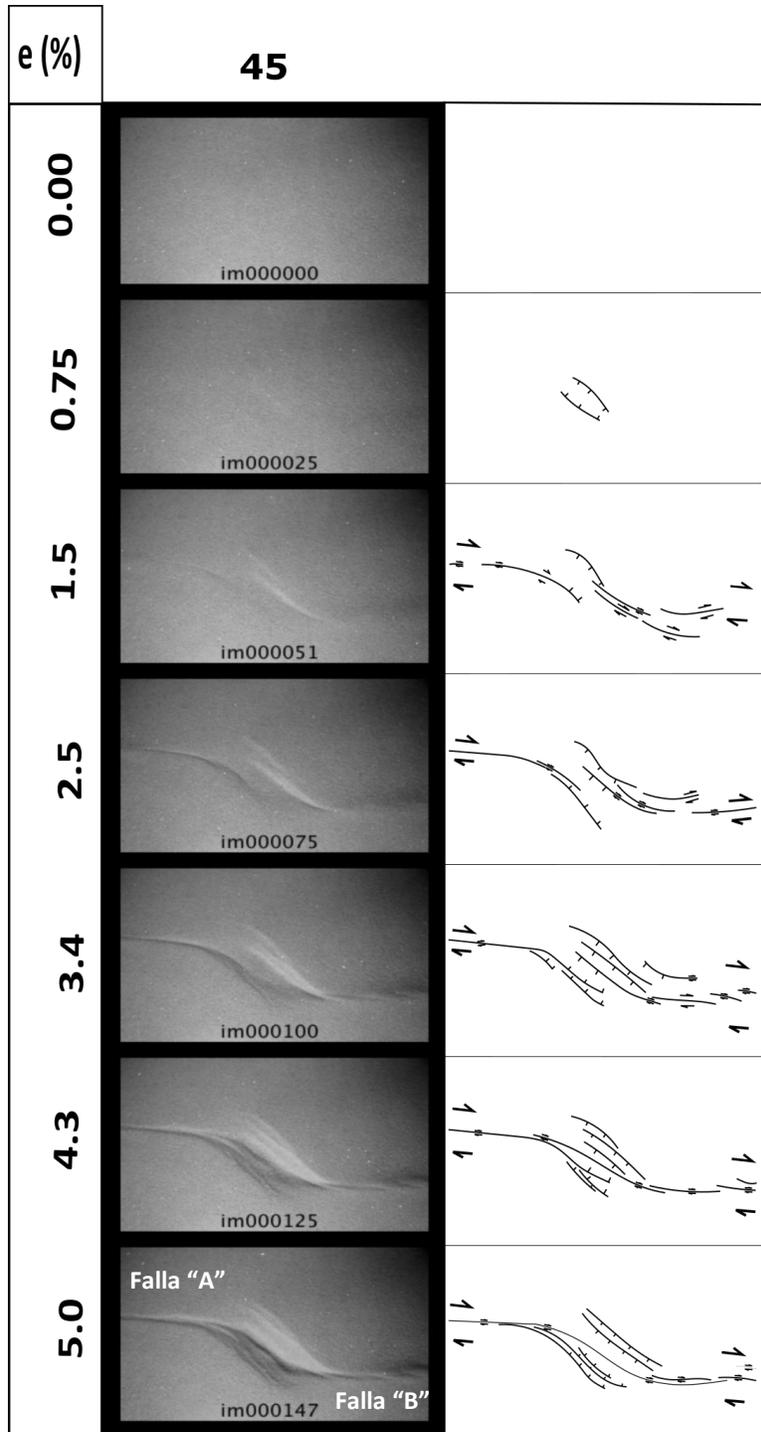


Figura 36. Figura que muestra la imagen del estado 5% de deformación del experimento “45” (experimento con ángulo “ α ” de 45°, y cero ángulo de transtensión u oblicuidad) izquierda imagen fotográfica 147, derecha interpretación de las estructuras que se observan en la fotografía, al centro fallas normales asociadas a la cuenca, en los extremos fallas laterales asociadas a las fallas de rumbo.

5.2.- Resultados serie experimental I

En la serie experimental I, los experimentos propuestos con 25 y 30° de ángulo α , generaron cuencas *pull-apart* tipo aguja, los experimento con 45° de ángulo α cuencas tipo Z y los experimentos con 90° de α cuencas tipo romboidal.

Cuando el ángulo de oblicuidad es igual a cero, las cuencas se muestran bien definidas y restringidas con pocas estructuras asociadas fuera de la cuenca, la deformación se observa concentrada mayormente en la cuenca.

En general se puede observar que a medida que el ángulo de oblicuidad aumenta, aumenta el largo (L) y el ancho (W) de la cuenca, de igual manera aumenta la cantidad de estructuras asociadas, incide más en las fallas laterales asociadas a las fallas de rumbo que en las fallas normales dentro de la cuenca.

5.2.1.- Resultados serie experimental I, experimentos ángulo α 25°

Se describen los experimentos 25, 25 05, 25 07 y 25 11, aquellos con ángulo “ α ” de 25°, que formaron cuencas *pull-apart* tipo aguja. En este tipo de *pull-apart* la cuenca está formada por fallas normales con componente lateral. La cuenca es delgada y elongada. Con el aumento del ángulo de oblicuidad, la cuenca se observa más elongada (figuras 66-69).

5.2.2.- Resultados serie experimental I experimentos ángulo α 30°

Se describen los experimentos con ángulo α de 30°, deformados con 0°, 5°, 7° y 11° de oblicuidad. Estos experimentos formaron cuencas *pull-apart* tipo aguja. En el experimento con ángulo de oblicuidad 0°, produce una cuenca con forma ligeramente en “Z”. En esta serie de experimentos la cuenca se muestra alargada pero amplia.

En estos experimentos el aumento del ángulo de oblicuidad se ve reflejado en la posición de la cuenca respecto a las fallas de rumbo. En el experimento deformado a rumbo la cuenca se muestra pequeña, al aumentar el ángulo de oblicuidad la cuenca tiende a volverse elongada (más larga en ración a su ancho), (Figuras 70-73).

5.2.3.- Resultados serie experimental I experimentos ángulo α 45°

Se describen los experimentos con ángulo α de 45°, y con 0°, 5°, 7° y 11° de oblicuidad. Todos los experimentos formaron cuencas *pull-apart* tipo "Z". En estos experimentos la cuenca se muestra restringida, menos elongada que en los experimentos con 25° 30° de ángulo α (Figura 36).

En esta serie de experimentos el aumento del ángulo de oblicuidad afecta directamente el ancho y largo de la cuenca, de manera que en los experimentos con cero y 5° de oblicuidad, la cuenca se observa restringida y pequeña, mientras que en los experimentos con 7° y 11° de oblicuidad, se observan cuencas anchas y elongadas (Figuras 74-77).

5.2.4.- Resultados serie experimental I experimentos ángulo α 90°

Se describen los experimentos con ángulo α 90° y sus diferentes ángulos de oblicuidad. Todos los experimentos de esta serie generaron cuencas *pull-apart* tipo romboidal. En estos experimentos la cuenca se muestra bien delimitada la deformación se localiza muy bien en la zona de la cuenca.

En esta serie de experimentos el aumento del ángulo de oblicuidad está relacionado directamente con el tamaño de la cuenca, ya que con el aumento de la oblicuidad, el largo y ancho de la cuenca incrementan (Figuras 78-81).

5.3.- Resultados serie experimental II

En la serie experimental II, los experimentos con ángulo α propuesto de 25°, 30° y 45° formaron cuencas tipo aguja, el experimento con 90° de ángulo α propuesto y cero grados de oblicuidad formó una cuenca en Z, mientras que el experimento con 90 grados de ángulo α propuesto y 11° de oblicuidad formó cuencas tipo romboidal.

En esta serie de experimentos se observa un evidente aumento en el largo (L) de la cuenca en relación a su ancho (W). En general se observan cuencas más suaves y elongadas respecto a la serie experimental I.

Cuando el ángulo de oblicuidad es igual a cero, las cuencas se observan suaves y restringidas, con una apertura muy discreta y con pocas estructuras asociadas fuera de la cuenca. Con el aumento el aumento del ángulo de oblicuidad la apertura de la cuenca se hace mayor, las cuencas se vuelven más amplias y menos elongadas y se observan más estructuras asociadas fuera de la cuenca.

5.3.1.- Resultados serie experimental II experimentos con ángulo α 25°

Se describen los experimentos “2 25” y “2 25 11”. Estos experimentos formaron cuencas *pull-apart* tipo aguja. Particularmente estos experimentos generaron cuencas muy estrechas y elongadas, sub-paralelas y restringidas en relación a la separación que existe entre las a las fallas de rumbo (Figura 37).

En este par de experimentos el aumento en el ángulo de oblicuidad influye directamente en tres características, 1) en el tamaño de la cuenca (L/W), 2) en la cantidad y longitud de las fallas de rumbo y 3) la elongación de la cuenca. (Figuras 82 y 83). Lo que implica que cuando el ángulo de oblicuidad es de 11°, la cuenca presenta un largo y ancho (L/W) mayor.

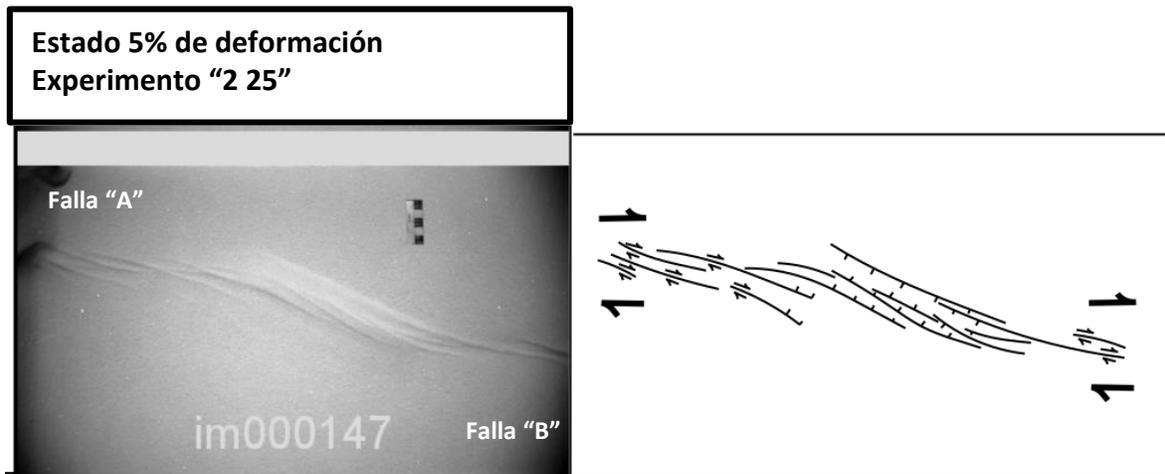


Figura 37. Muestra la imagen del estado 5% de deformación del experimento “2 25” (experimento de la serie II con ángulo α de 25°, y cero ángulo de transtensión u oblicuidad) izquierda imagen fotográfica 147, derecha interpretación de las estructuras que se observan en la fotografía, al centro fallas normales asociadas a la cuenca, en los extremos fallas laterales asociadas a las fallas de rumbo.

5.3.2.- Resultados serie experimental II, experimentos con ángulo α 30°

En los experimentos “2 30” y “2 30 11”, se formaron cuencas *pull-apart* tipo aguja, cuencas elongadas y delgadas (Figura 38).

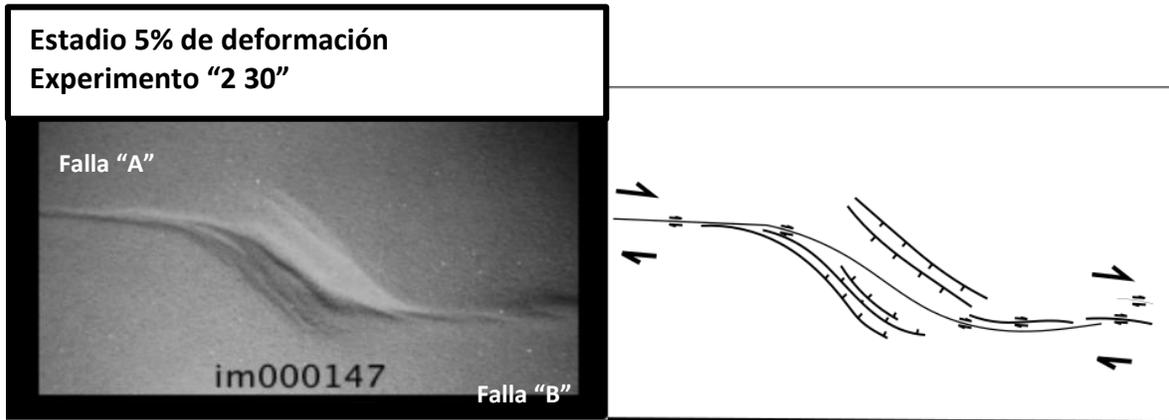


Figura 38. Muestra la imagen del estado 5% de deformación del experimento “2 30” (experimento de la serie experimental II con ángulo α de 30°, y cero ángulo de transtensión u oblicuidad) izquierda imagen fotográfica 147, derecha interpretación de las estructuras que se observan en la fotografía, al centro fallas normales asociadas a la cuenca, en los extremos fallas laterales asociadas a las fallas de rumbo.

Cuando el ángulo de oblicuidad es 0°, la cuenca se observa poco elongada. Se genera una mayor cantidad de fallas normales con una propagación discreta y arreglo en “echelon”.

Cuando el ángulo de oblicuidad es de 11°, la cuenca se observa elongada, ancha y larga. Se generan menor cantidad de fallas normales que tienden a tener una propagación mayor y arreglo en echelon. Se genera mayor cantidad de fallas laterales que no se ligan entre sí en su totalidad (Figuras 84 y 85).

5.3.3.- Resultados serie experimental II, experimentos con ángulo α 45°

Se describen los experimentos “2 45” y “2 45 11”. Los experimentos formaron cuencas *pull-apart* tipo “Z”, (Figura 39).

Cuando el ángulo de oblicuidad es 0° , la cuenca se observa poco elongada y amplia. Se generan pocas estructuras, tanto fallas normales como fallas de rumbo, con un arreglo coherente con la forma de la cuenca.

Cuando el ángulo de oblicuidad de 11° , la cuenca se observa elongada, con una forma en Z. Se genera mayor cantidad de estructuras, fallas normales así como fallas de rumbo, las fallas normales se aprecian con un arreglo en echelon que se va definiendo conforme la deformación aumenta. Con el aumento de la deformación las fallas de rumbo se definen y orientan en un mismo sentido pero nunca se unen totalmente en una falla mayor (Figuras 86 y 87).

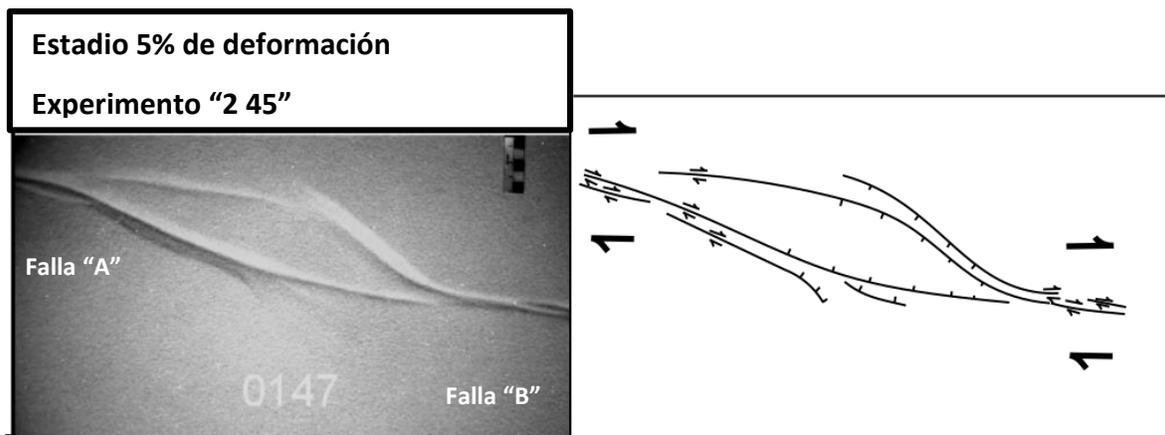


Figura 39. Figura que muestra la imagen del estado 5% de deformación del experimento “2 45” (experimento de la serie experimental II con ángulo α de 45° , y cero ángulo de transtensión u oblicuidad) izquierda imagen fotográfica 147, derecha interpretación de las estructuras que se observan en la fotografía, al centro fallas normales asociadas a la cuenca, en los extremos fallas laterales asociadas a las fallas de rumbo.

5.3.4.- Resultados serie experimental II, experimentos con ángulo $\alpha 90^\circ$

Se describen los experimentos “2 90” y “2 90 11”. El experimento “2 90” formó cuencas *pull-apart* tipo “Z”, cuencas poco elongadas. El experimento “2 90 11” formó cuencas *pull-apart* tipo romboidal, cuencas elongadas y amplias (Figura 40).

Cuando el ángulo de oblicuidad es 0° , la cuenca se observa elongada y delgada. Se genera una menor cantidad de estructuras, fallas normales así como fallas de rumbo.

Cuando el ángulo de oblicuidad es de 11° , la cuenca se observa amplia con una forma definida en Z, es mayor en su largo y ancho (L/W) (Figuras 88 y 89).

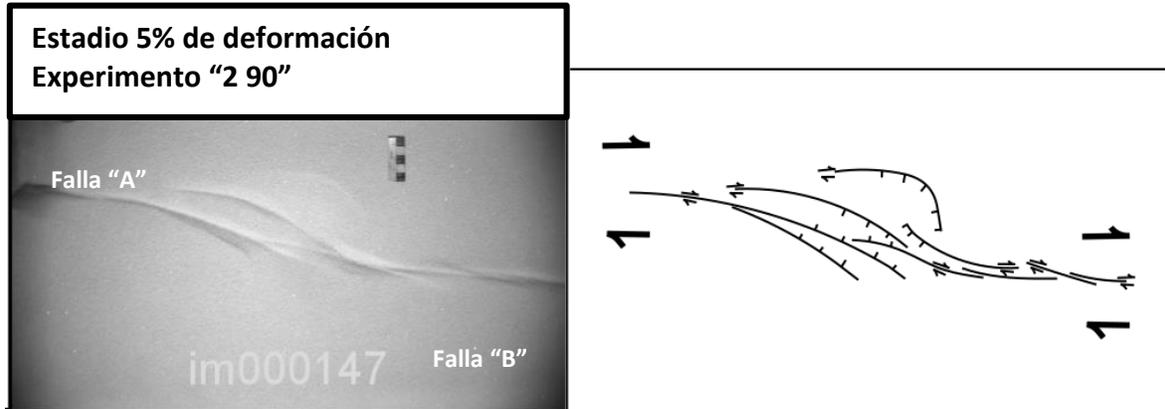


Figura 40. Figura que muestra la imagen del estado 5% de deformación del experimento “2 90” (experimento de la serie experimental II con ángulo α de 90° , y cero ángulo de transtensión u oblicuidad) izquierda imagen fotográfica 147, derecha interpretación de las estructuras que se observan en la fotografía, al centro fallas normales asociadas a la cuenca, en los extremos fallas laterales asociadas a las fallas de rumbo.

5.4.- Observaciones generales de la deformación vista en los modelos de elevación digital

Los modelos digitales 3D obtenidos a partir de los modelos analógicos, se realizaron con el objetivo de realizar observaciones a cerca de la deformación en el eje “z”, es decir profundidad de cuenca “d”, (Aydin y Nur 1982; Gürbüz 2010; 2014), observaciones sobre el comportamiento de las estructuras de las cuencas *pull-apart* en la componente vertical. Los modelos digitales 3D son apropiados ya que están dotados de una escala de colores (mm) que nos ayuda a distinguir los movimientos positivos (aumento de su posición respecto al nivel base, altura) y negativos (disminución de su posición respecto al nivel base, profundidad) que causa la deformación en los materiales partir del nivel

de referencia, que es la superficie de los experimentos antes de deformar. Estos colores cambian a partir de un nivel base que se designó previamente en el *software*, tonos azules que indican un cambio de posición positiva o altura respecto al nivel base (azul claro a azul fuerte progresivamente) y tonos café que indican un cambio de posición negativa o profundidad respecto al nivel base (tonos café, amarillo y verde progresivamente) (Figura 41).

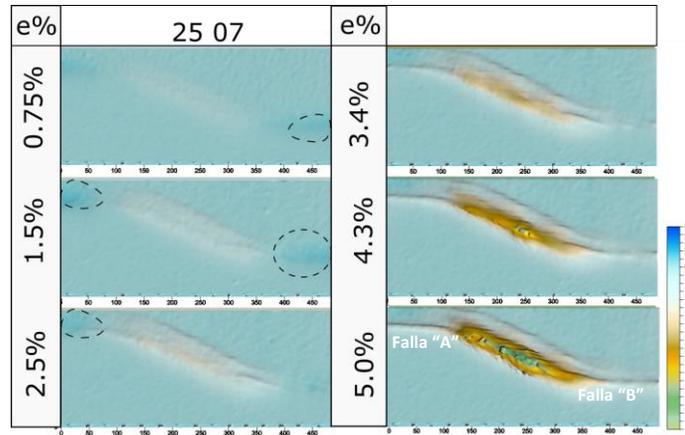


Figura 41. Muestra las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas *pull-apart* y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

Los principales rasgos que muestran los modelos de elevación digital 3D, son en primer lugar, aquellos que están relacionados a la formación de las cuencas *pull-apart*, como fallas normales y fallas de rumbo en las zonas de falla "A" y "B" (Figura 41). Todos estos rasgos se observan marcados y delimitados, y pueden llegar a tener magnitudes de 2 a 20 mm (Figura 41). Existen también de manera secundaria, rasgos que se observan de una manera mucho más discreta, desniveles asociados a imperfecciones en el nivel base originadas al momento de la preparación del arreglo experimental, imperfecciones que a medida que la deformación progresa experimentan un reacomodo que genera ondulaciones que se observan como zonas altas y bajas con apenas un par de milímetros de diferencia, zonas planas del bloque móvil y la zona estática relacionadas a la cuenca ni a las fallas de rumbo. Estos rasgos serán omitidos en nuestras

descripciones ya que no forman parte de las estructuras genéticas asociadas a las cuencas *pull-apart*.

En general, los modelos de elevación 3D de los experimentos muestran que podemos encontrar dos tipos de estructuras: a) estructuras que experimentan la disminución de su nivel base, aquellas asociadas a la cuenca, las fallas normales que la delimitan y las fallas de rumbo en ciertos casos; b) estructuras que experimentan el aumento de su nivel base, aquellas asociadas a las fallas de rumbo en condiciones especiales.

5.4.1- Observaciones generales de la deformación vista en los modelos de elevación digital, serie experimental I

Una característica fundamental que se debe registrar en los experimentos es la diferencia de altura entre el nivel de referencia inicial y el piso de la cuenca. En los experimentos deformados con ángulo de oblicuidad igual a 0° , el piso de la cuenca es uniforme y amplio, con mayor ángulo de oblicuidad se observa como una zona restringida y uniforme que migra conforme la deformación aumenta hacia la parte de la cuenca, coherentemente con el desplazamiento del bloque móvil, zona de la falla “B” (Figuras 42 y 43). Cuando el ángulo de oblicuidad aumenta, la cuenca se observa menos uniforme y, en algunos casos se generan dos niveles, el primero con una profundidad intermedia y el segundo donde se alcanza la profundidad máxima.

Las fallas de rumbo “A” y “B”, en los experimentos que de deformación con ángulo de oblicuidad igual a 0° y con ángulo α de 25° , 45° y 90° , muestran asociada a su traza una zona de levantamiento, en forma de lóbulo que se desarrolla debido a la fricción que se genera entre los dos bloques. Cuando aumenta el ángulo de oblicuidad bajo los mismos valores de ángulo α , las fallas de rumbo se muestran con una traza amplia y abierta donde se puede observar una pequeña disminución del nivel base (Figura 42 y 43, ver en anexo Figuras 94, 98 y 102).

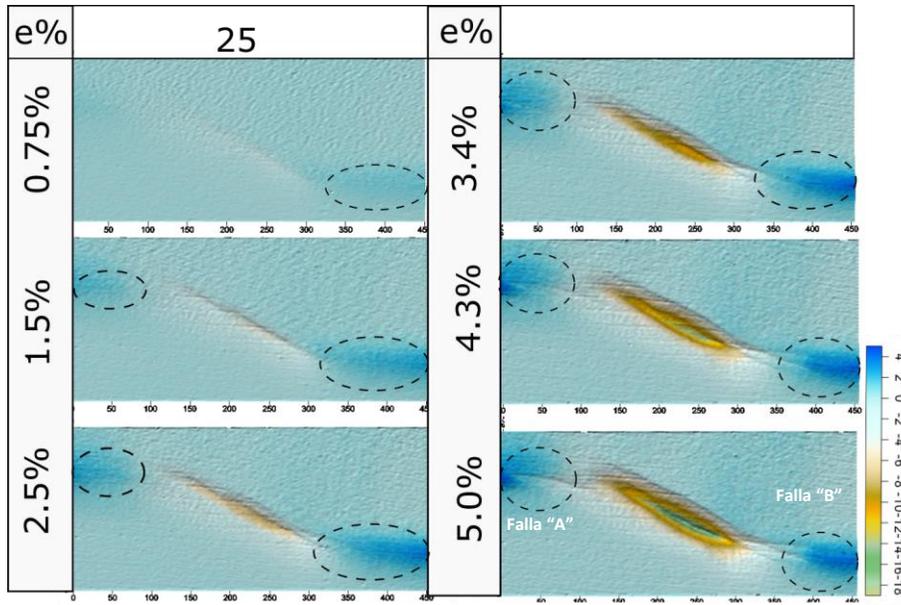


Figura 42. Muestra el experimento “25” y las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas *pull-apart* y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva asociadas a las fallas de rumbo.

Los experimentos con ángulo α de 30° , en todos los casos de oblicuidad generan fallas de rumbo con trazas amplias y abiertas, donde se puede observar una ligera disminución del nivel base, producto de una componente de extensión presente (Figura 44 y en anexo Figuras 94-97).

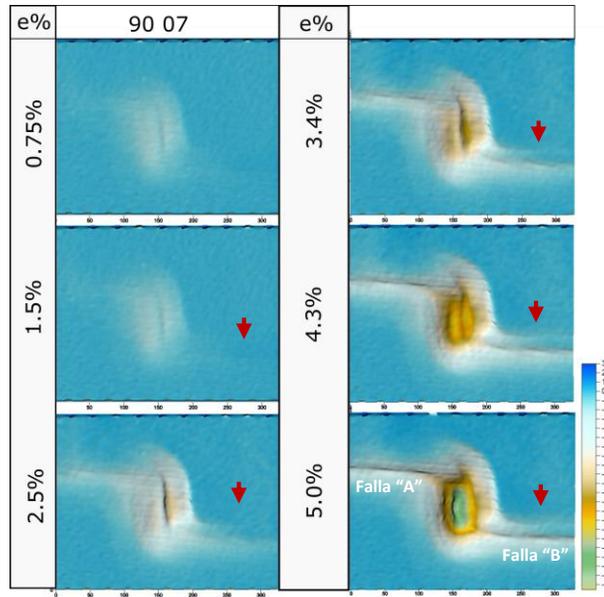


Figura 43. Experimento “90 05”. Muestra las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas *pull-apart* y su escala de colores que indican alturas, se observan lóbulos asociados a las fallas de rumbo (Flecha roja).

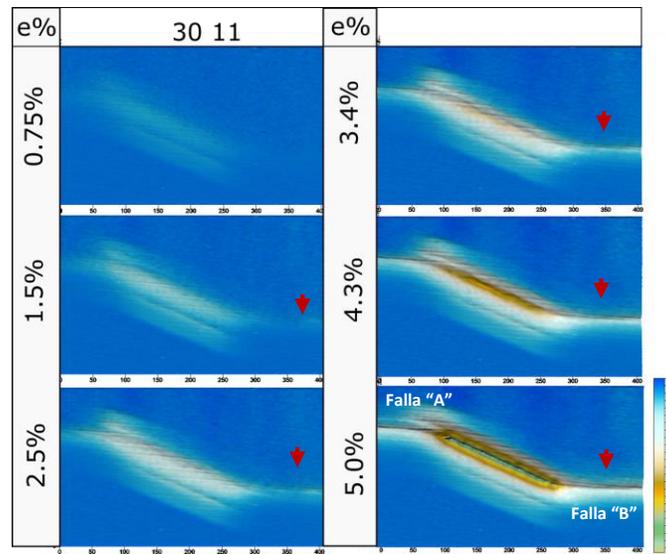


Figura 44. Muestra al experimento “30 11” y las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas *pull-apart* y su escala de colores que indican alturas, se observan lóbulos asociados a las fallas de rumbo (Flecha roja).

5.4.2.- Observaciones generales de la deformación vista en los modelos de elevación digital, Serie experimental II

En esta serie experimental, en la cual se utilizó una corteza inferior con mayor fluidez, se observan diferencias geométricas en las cuencas *pull-apart* respecto a la serie experimental I.

La cuenca en todos los experimentos de esta serie, se muestra menos profunda respecto a sus pares de la serie experimental I (experimentos con mismo ángulo α y de oblicuidad). Su forma tiende a ser menos uniforme ya que solo se observa coherente con el ángulo α adyacente al bloque móvil (Figura 45 y 46). Solo en el caso del experimento “2 90 11” la cuenca generó doble piso, por lo cual esta característica se asocia al incremento del ángulo de oblicuidad alto (Figura 46).

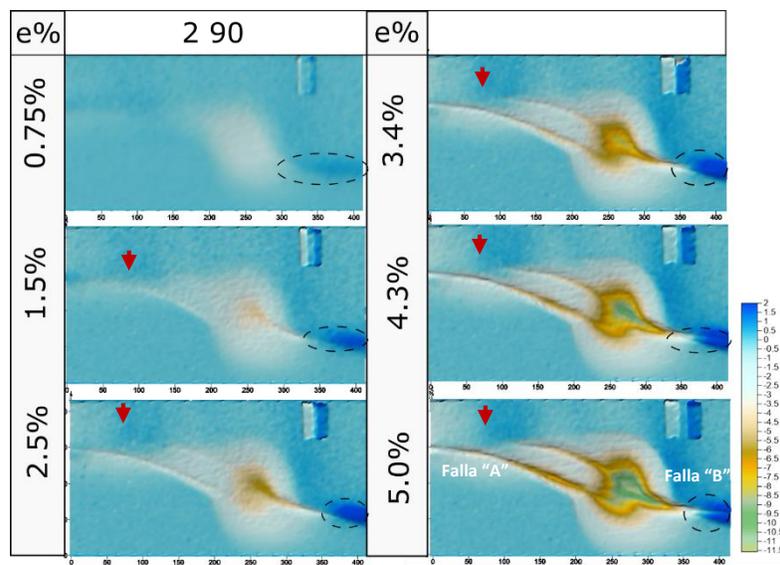


Figura 45. Muestra al experimento “2 90”, las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), escala de colores que indican alturas, vista en planta muestra los distintos rasgos de las cuencas *pull-apart*, con flechas rojas se muestra la presencia de dos fallas de rumbo, en círculos se resaltan lóbulos asociados a las fallas de rumbo.

Las fallas de rumbo en la serie experimental II se comportan de manera particular, en los experimentos “2 25”, “2 25 11” y “2 30” y “2 30 11” se observa que en la zona de falla “A” (Figura 45, en anexos Figuras 107, 107, 108 y 109, flechas rojas) se desarrollan una

serie de fallas de rumbo (2-4 fallas de rumbo). Con el aumento del ángulo de oblicuidad se integran casi por completo y de una manera ordenada en una sola falla mayor, mientras que en la zona de falla B se puede apreciar que las fallas de rumbo están en todos los estados de deformación relacionadas a una falla de rumbo mayor que presenta un lóbulo de levantamiento (Figura 46)

En los experimentos “2 45”, “2 45 11” (Figura 47), “2 90” (Figura 45) y “2 90 11” (Figuras 48), la zona de la falla “A” está siempre asociada a un par de fallas que en su punto más lejano tienden a unirse en una sola falla mayor. En la zona de falla “B” se observa siempre la presencia de dos o más fallas que están mejor incluidas en una falla de rumbo mayor que conforme aumenta el ángulo de oblicuidad y el grado de deformación se define y crece sin tener lóbulos de levantamiento asociados (en anexo ver Figuras 110, 111, 112 y 113).

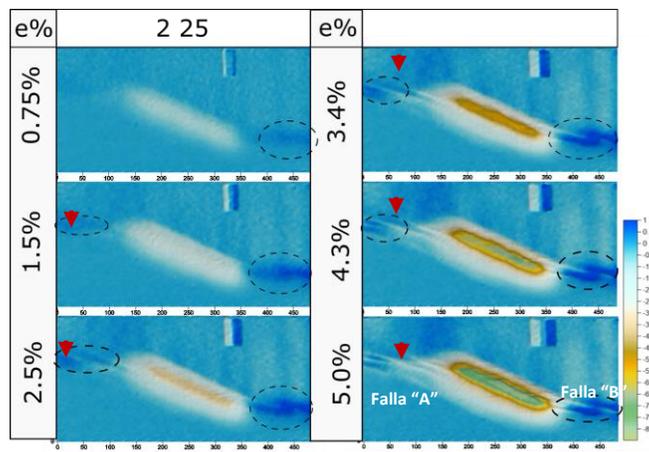


Figura 46. Experimento “2 25”, las características generales de los modelos de elevación, deformación (%), escala de colores (alturas), muestra los distintos rasgos de las cuencas *pull-apart*, con flechas rojas se muestra la presencia de dos fallas de rumbo, en círculos se resaltan lóbulos asociados a las fallas de rumbo.

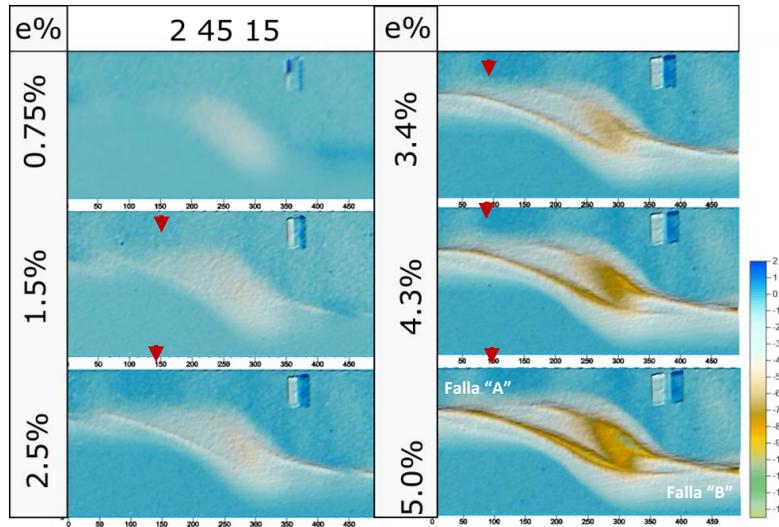


Figura 47. Muestra al experimento “2 45 11”, las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), escala de colores que indican alturas, vista en planta muestra los distintos rasgos de las cuencas *pull-apart*, con flechas rojas se muestra la presencia de dos fallas de rumbo, en círculos se resaltan lóbulos asociados a las fallas de rumbo.

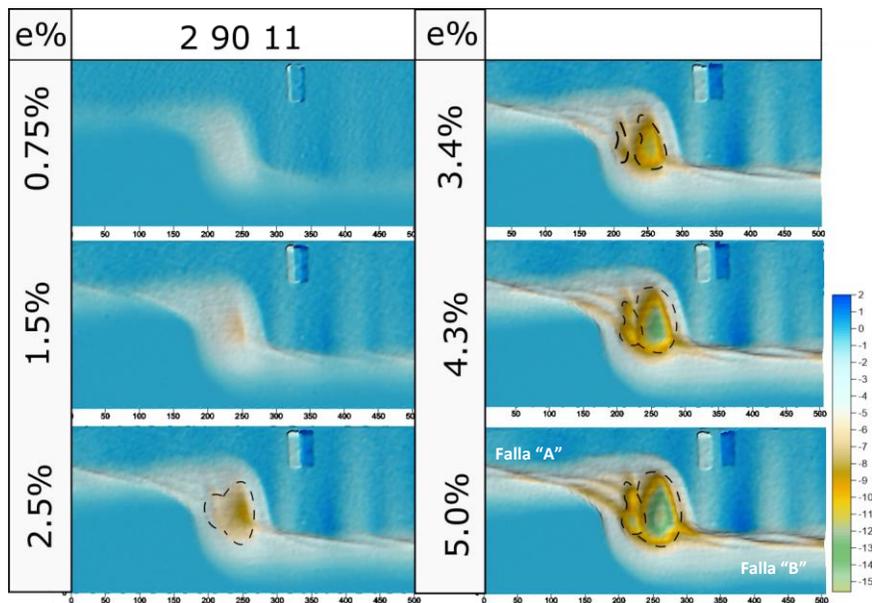


Figura 48. Muestra al experimento “2 90 11”, las características generales de los modelos de elevación, estado de deformación (%), escala de colores que indican alturas, vista en planta muestra los distintos rasgos de las cuencas *pull-apart*, con flechas rojas se muestra la presencia de dos fallas de rumbo, en círculos se resaltan lóbulos asociados a las fallas de rumbo.

Para tener una mejor perspectiva del comportamiento de la deformación en las fallas y su respuesta a la transtensión, se extrajeron perfiles transversales a las zonas de falla “A” y “B” en los experimentos “90”, “90 11” (Figuras 49 y 50) de la serie experimental I y en los experimentos “2 90” y “2 90 11” de la serie “II” (Figuras 451y 52), donde podemos observar lo siguiente:

En el perfil “a-b” en la zona “A” del experimento “90” (Figura 49), se observa una depresión de 2 mm en la superficie, lo que implica que en esta zona existe una componente de transtensión. En el perfil “c-d” en la zona de falla “B” observamos un levantamiento de 3 mm en la superficie.

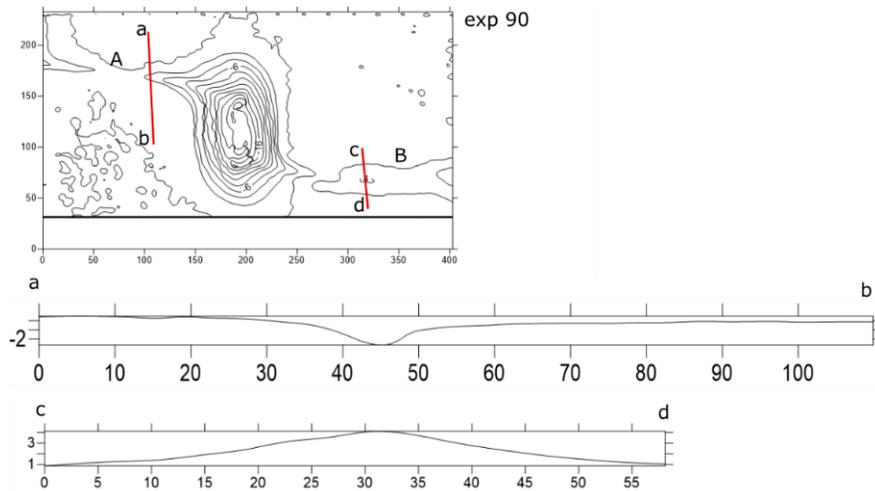


Figura 49. Muestra las curvas de nivel del experimento “90”, modelo de elevación a partir del que se produjeron los perfiles “a-b” y “c-d” (líneas rojas) en las zonas de falla acotadas como “A” y “B”.

En el perfil “a-b” en la zona de falla “A” del experimento “90 11” (Figura 50), se observa un descenso del nivel base de la superficie de 5 mm. En el perfil “c-d” en la zona de falla “B” se observa un descenso de la superficie de 6 mm y se observa una apertura de la zona mayor a la del perfil “a-b”, lo que implica que la zona de falla “B” de este experimento es geoméricamente más susceptible a la transtensión.

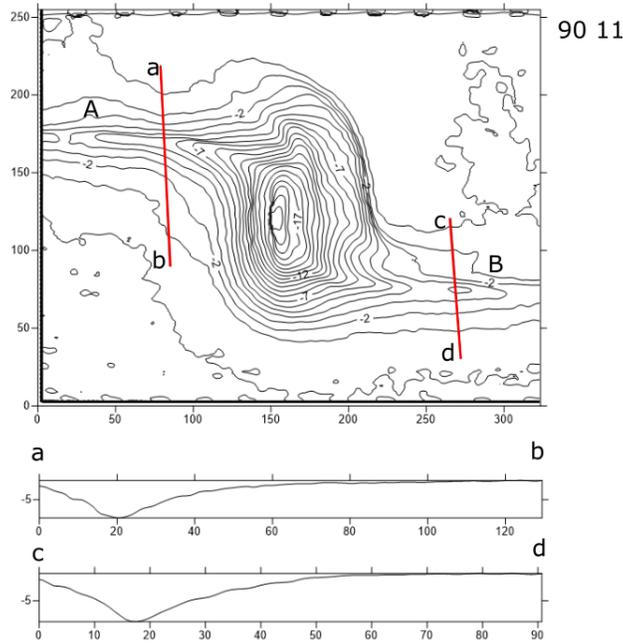


Figura 50. Muestra las curvas de nivel del experimento “90 11”, modelo de elevación a partir del que se produjeron los perfiles “a-b” y “c-d” (líneas rojas) en las zonas de falla acotadas como “A” y “B”.

En el perfil “a-b” en la zona de falla “A” del experimento “2 90” (Figura 51), observamos que hay dos zonas de máxima profundidad la menor de unos 2 mm y la más profunda de 6 mm, asociadas a dos fallas de rumbo, en una zona que denota una componente de apertura mayor a la observada en los perfiles de los experimentos de la serie experimental I. En el perfil “c-d” de la zona de falla “B” (Figura 51) observamos que a la zona de falla que presenta un descenso del nivel base de 1 mm, está asociada a dos zonas de levantamiento a ambos lados del plano de falla que sobresalen 2 mm sobre el nivel base, estas zonas de levantamiento corresponden a lo que en las descripciones en planta llamamos lóbulos asociados a las fallas de rumbo.

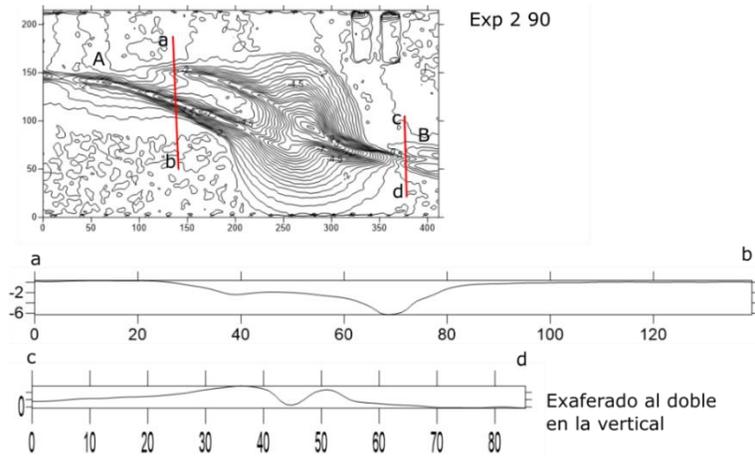


Figura 51. Muestra las curvas de nivel del experimento “2 90”, modelo de elevación a partir del que se produjeron los perfiles “a-b” y “c-d” (líneas rojas) en las zonas de falla acotadas como “A” y “B”.

En el perfil “a-b” en la zona de falla “A” del experimento “2 90 11” (Figura 52), observamos un descenso del nivel base en la zona de la falla de 4 mm, la zona se muestra extendida con una componente extensional importante mayor a la de los perfiles antes descritos. En el perfil “c-d” de la zona falla “B” (Figura 52), se observan dos zonas de máxima profundidad, la menor con 4 mm y la mayor con 6 mm, asociadas a la partición de la falla de rumbo mayor en dos fallas menores por efectos de la transtensión

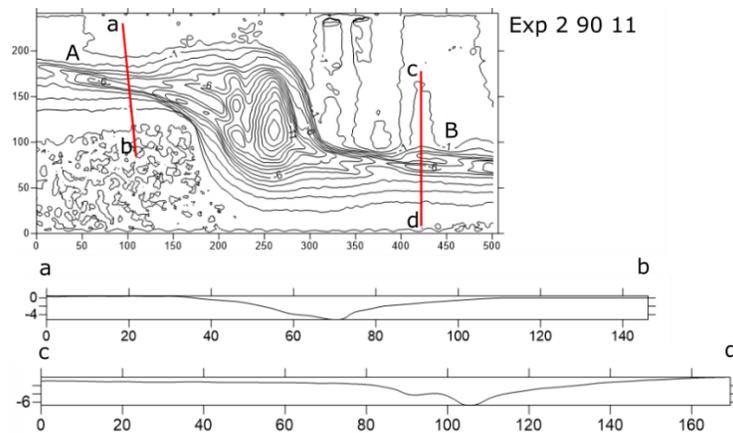


Figura 52. Muestra las curvas de nivel del experimento “2 90 11”, modelo de elevación a partir del que se produjeron los perfiles “a-b” y “c-d” (líneas rojas) en las zonas de falla acotadas como “A” y “B”.

En general podemos apreciar que la profundidad y la amplitud de la apertura que se observa en las zonas de las fallas de rumbo están directamente ligadas a la transtensión, así como como la cantidad de fallas asociadas a las zonas transformes. Lo anterior significa que cuando la transtensión es mayor existe una tendencia a formar mayor cantidad de fallas de rumbo que se puede apreciar tanto en planta así como en los perfiles. En planta se observa que en los experimentos con menor ángulo de oblicuidad, las fallas de rumbo se presentan en menor cantidad y siempre asociadas a una falla de rumbo mayor. En los experimentos con ángulo de oblicuidad mayor se observan que se genera mayor cantidad de fallas de rumbo. En los perfiles podemos observar que en los experimentos con ángulo de oblicuidad de 0° , la profundidad generada en las zonas de falla de rumbo y la componente de extensional son menores que la que se observa en los experimentos con ángulo de oblicuidad mayor.

5.5.- Resultados, medición de la deformación, características geométricas de las cuencas *pull-apart* según la propuesta Gürbüz (2014).

En este apartado describiremos de manera cuantitativa las principales diferencias que observamos en las características geométricas de las cuencas *pull-apart*; “W” (ancho de la cuenca), “L” (longitud de la cuenca), “d” (profundidad de cuenca), ángulo agudo α según la propuesta de Gürbüz (2014), además de un nuevo parámetro que proponemos en este trabajo, “E” (extensión de cuenca). Se describen para las diferentes condiciones de nuestros modelos, con diferente ángulo α propuesto 25, 30, 45 y 90° , así como los progresivos grados de oblicuidad 0 (a rumbo o “strike slip”), 3° , 7° y 11° . La manera en que presentamos estos datos es mediante gráficas (x, y) donde se compara la deformación vista en los diferentes estados propuestos, (0%, 0.75%, 1.5%, 2.5%, 3.4%, 4.3% y 5%, contra la magnitud medida de los diferentes rasgos geométricos en las dos series experimentales I y II.

5.5.1.- Ángulo agudo α vs % deformación (series experimentales “I” y “II”)

Podemos observar que en la serie experimental I conformada por los experimentos 25”, “25 03”, “25 07” “25 11”, “30”, “30 03”, “30 07” “30 11”, “45”, “45 03”, “45 07” “45 11”, “90”, “90 03”, “90 07” “90 11”, el ángulo α resultante es mayor en los experimentos donde el arreglo experimental con ángulo de oblicuidad de 0° . Se observa poca dispersión en los en los datos medidos de ángulo α , lo que implica que esta parámetro es sensible al aumento de deformación pero no al aumento del ángulo de oblicuidad (Figura 53, gráficas 3, 4, 5 y 6).

En los experimentos de la serie experimental II, “2 25”, “2 25 11” “2 30”, “2 30 11” “2 45”, “2 45 11”, “2 90” y “2 90 11”, el ángulo α que se formó presenta una magnitud menor que en los experimentos de la serie I, llegan al valor propuesto solo en los “set up” con 25° y 30° de ángulo α . En esta serie los experimentos con ángulo α menor y deformados con 11° de oblicuidad reproducen de manera más efectiva esta característica (“25 11”, “30 11”, “45 11”, “90 11”) (Figura 53, gráficas 7, 8, 9 y 10).

5.5.2.- Longitud de cuenca (L) vs % deformación (serie experimental “I” y “II”)

En los experimentos de la serie experimental I, la longitud de cuenca L presenta valores mayores cuando el ángulo α es de 25° y 30° y la oblicuidad de 7° y 11° , (Figura 54, gráficas 11, 12, 13 y 14).

En los experimentos de la serie experimental “II”, L presenta valores mayores que en los experimentos de la serie experimental I, es decir la serie experimental II generó cuencas más largas. Se observa también que L, es mayor en los experimentos con ángulo α bajo (25° y 30°) y que fueron deformados a rumbo (0°), y presenta valores menores en los experimentos con ángulo α mayor y que fueron deformados con 11° de oblicuidad (Figura 54, gráficas 15, 16, 17 y 18).

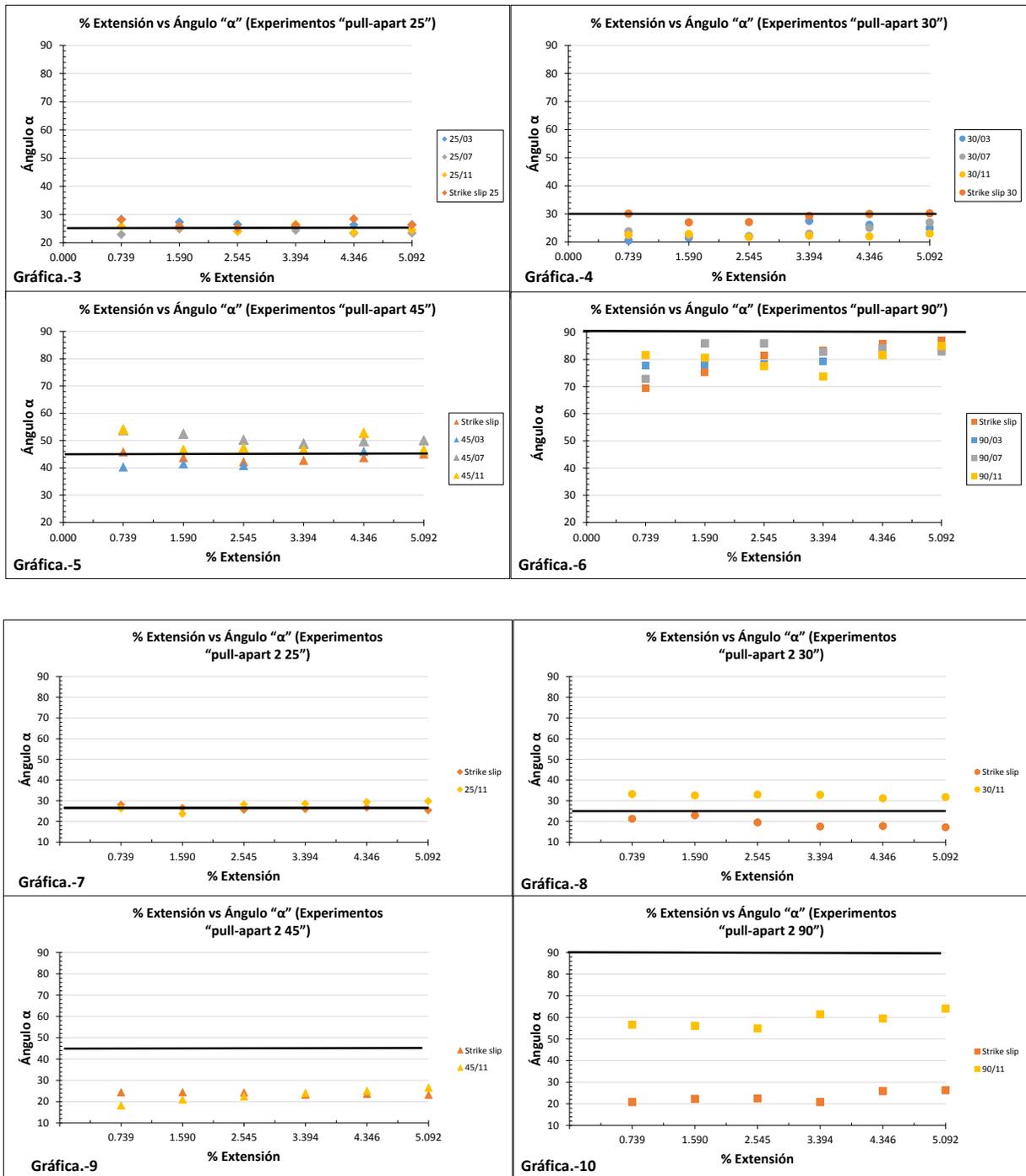


Figura 53. Muestra las gráficas 3, 4, 5, 6 (serie I), 7,8,9 y 10, (serie II) donde se muestra la magnitud del ángulo α en grados, respecto a los diferentes porcentajes de deformación (% de extensión), en línea negra el ángulo propuesto en nuestro arreglo experimental.

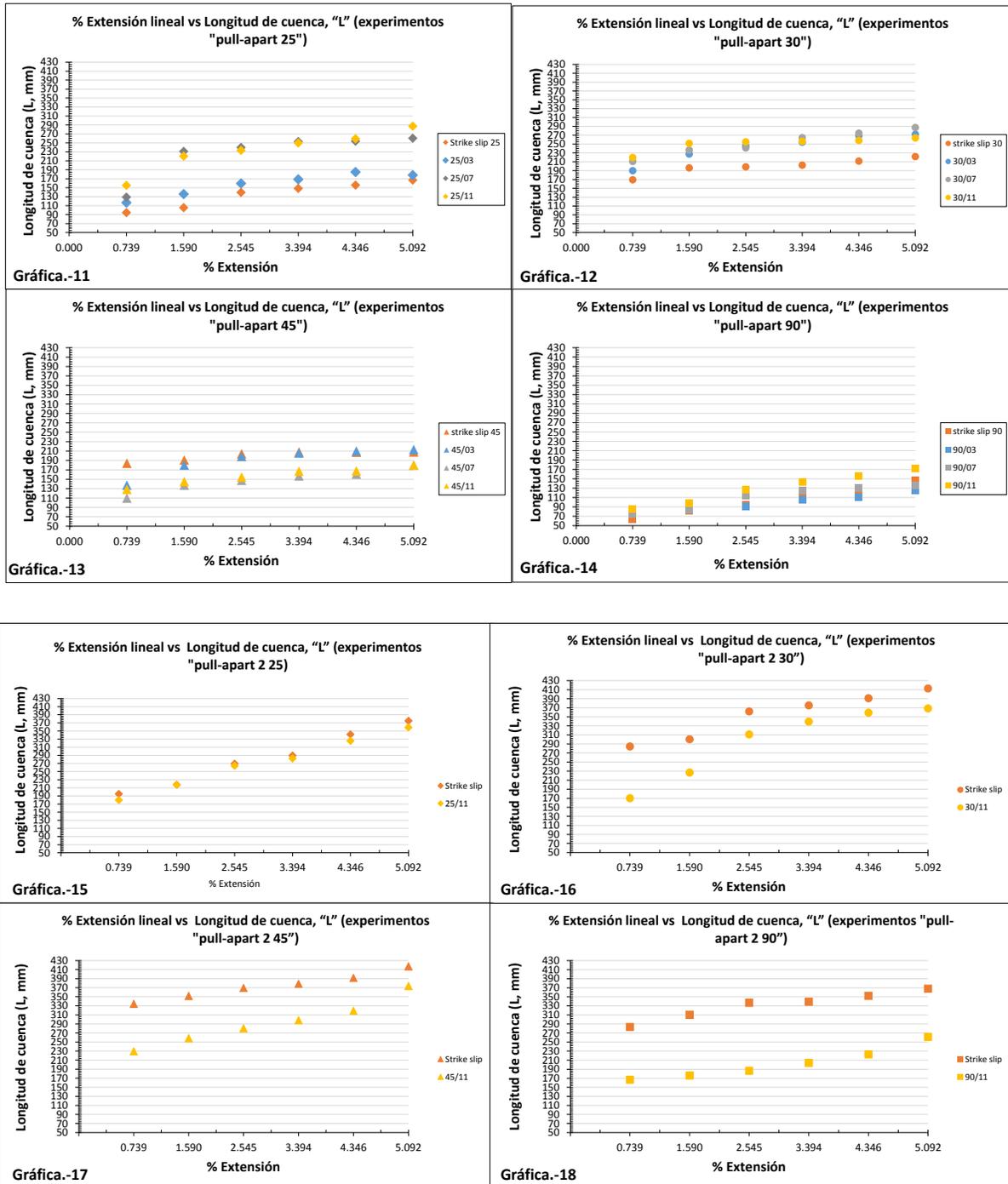


Figura 54. Gráficas 15, 16, 17, 18 (serie experimental I), 19, 21 y 22, (serie experimental II) donde se muestra la magnitud del largo de cuenca (L) en mm, respecto a los diferentes porcentajes de deformación (% de extensión).

5.5.3.- Ancho de cuenca (W) vs % deformación (serie experimental "I" y "II")

W presenta valores mayores en los experimentos deformados con alto grado de oblicuidad (7° y 11°) y con ángulo α mayor. Esta característica se comporta de la misma manera en los experimentos de la serie experimental I y II. Los valores de W son mayores en los experimentos de la serie experimental II respecto a los valores medidos en los experimentos de la serie I, es decir los experimentos de la serie II forman cuencas más anchas por lo que se deduce que esta característica geométrica es sensible al cambio de la reología de la capa inferior dúctil que se utilizó en la serie experimental II (Figura 55, gráficas 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 y 26).

5.5.4.- Extensión de cuenca (E) vs % deformación (series "I" y "II")

E presenta valores mayores conforme aumenta el grado de oblicuidad y el ángulo α propuesto, en las series experimentales I y II. También observamos que E es mayor en los experimentos de la serie II respecto a los experimentos de la serie I, lo que implica que esta característica es muy sensible al cambio de reología de la capa inferior (Figura 56, gráficas 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 y 34).

5.5.5.- Profundidad de cuenca (d) vs % deformación (serie experimental "I" y "II")

Desde el inicio de la deformación (d) es mayor en los experimentos con ángulo de oblicuidad alto (7° y 11°) y con ángulo α de 45° y 90° . Esta característica es consistente en las dos series experimentales. Además podemos observar que la serie I genera cuencas más profundas en comparación a las generadas en la serie II. Este efecto puede ser debido a que en los experimentos de la serie I cuentan con una capa inferior dúctil que fluye poco por lo que la deformación se focaliza en las zonas donde hace efecto la discontinuidad de velocidad y donde se formará la cuenca, mientras que en los experimentos de la serie II, esta capa inferior dúctil fluye más, propiciando que la deformación se distribuya de diferente manera sin focalizarse tanto en la zona de la cuenca (Figura 57, gráficas 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41 y 42).

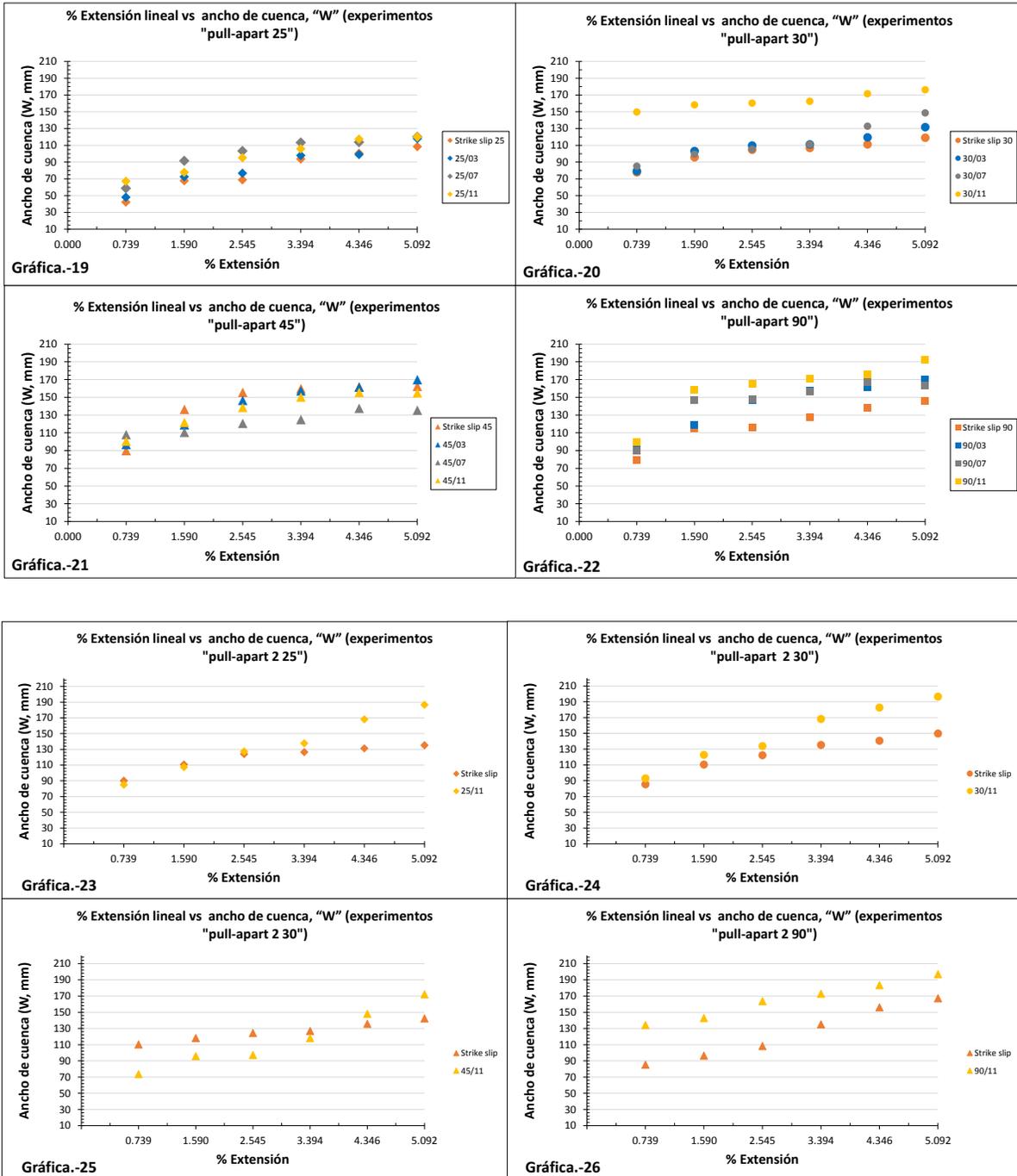


Figura 55. Gráficas 19, 21, 22, 23 (serie I), 24, 25 y 26 (serie II) donde se muestra la magnitud del ancho de cuenca (W) en mm, respecto al porcentaje de deformación (% de extensión).

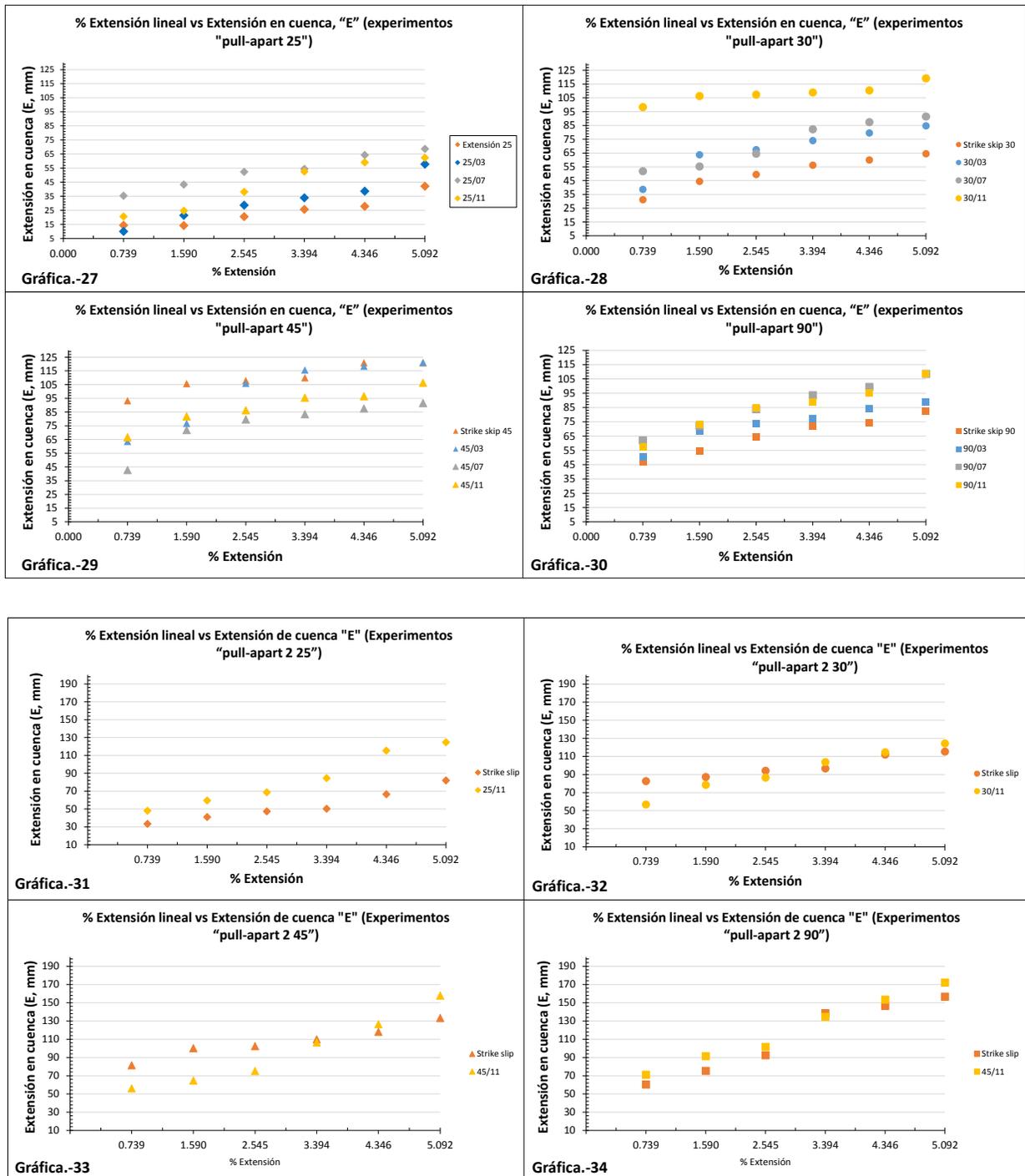


Figura 56. Gráficas 27, 28, 29, 30 (serie I), 31, 32, 33 y 33 (serie II), donde se muestra la magnitud de la extensión de cuenca (E), respecto a los diferentes porcentajes de deformación (% de extensión).

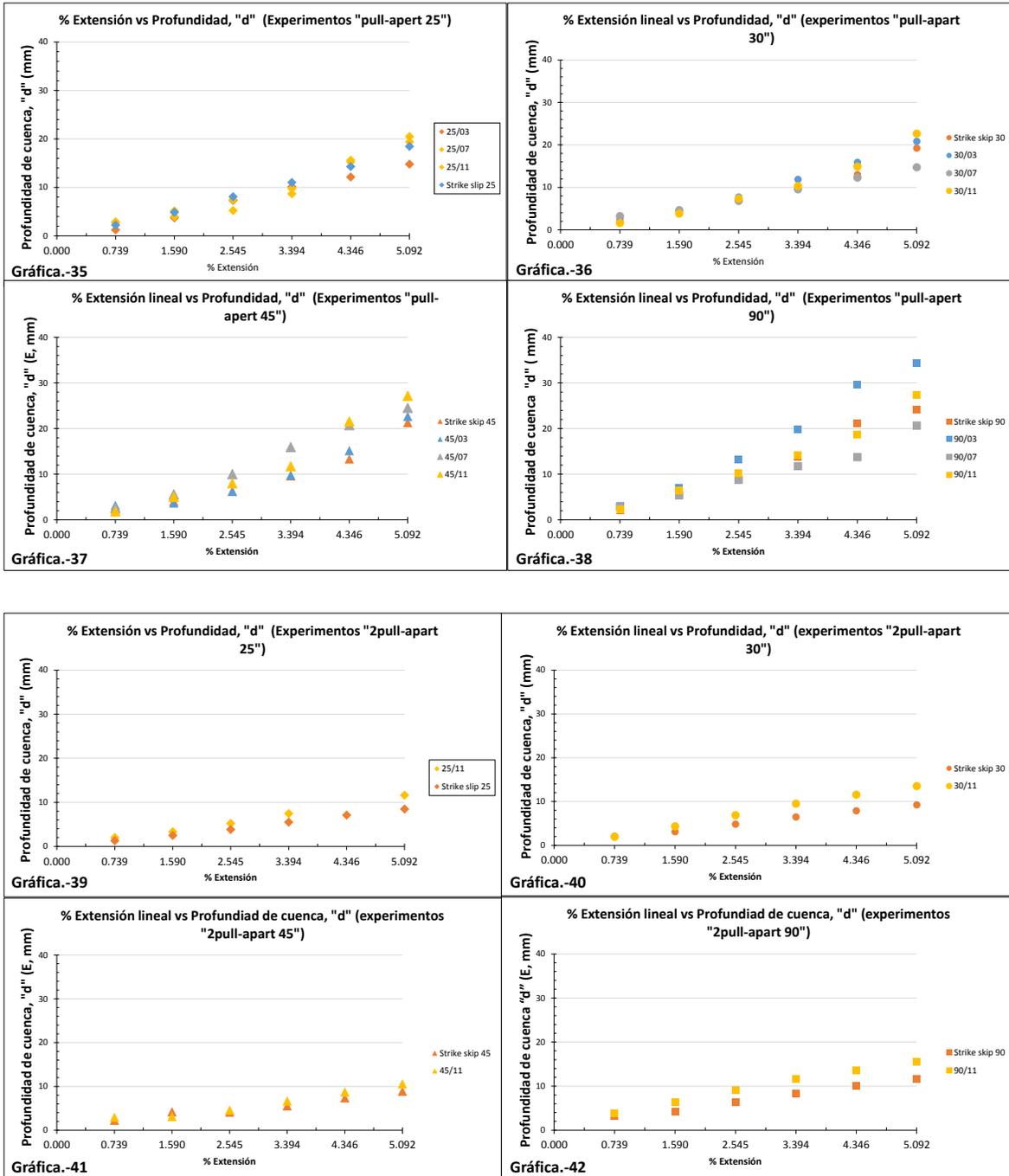


Figura 57. Gráficas 35, 36, 37, 38 (serie I) 39, 40, 41 y 42 (serie II), donde se muestra la magnitud de la profundidad de cuenca (d), respecto a los diferentes porcentajes de deformación (% de extensión).

Capítulo 6.- Discusión

6.1.- Comparación del arreglo geométrico experimental

En el arreglo experimental de este trabajo se exploraron dos condiciones de frontera que no se habían considerado previamente:

- 1) La influencia de cambios en la cinemática del bloque móvil, que en este trabajo, resulta en una componente extensional en las fallas de rumbo. Otros autores aplican localmente la componente oblicua añadiendo una diferencia angular con respecto a las fallas de rumbo en la discontinuidad de velocidad que representa la cuenca, sin cambiar el desplazamiento lateral de la placa móvil (McClay y Dooley, 1995; Wu et al., 2009). En los experimentos de este trabajo la oblicuidad se aplica a toda la placa móvil, combinando la velocidad de dos motores perpendiculares, lo que resulta en ángulos entre 0° (a rumbo), 5° , 7° y 11° que tendrán efectos en todo el arreglo experimental y no solo de manera local.
- 2) Los efectos de una menor resistencia al flujo de la capa dúctil. No se encontraron trabajos que exploren de manera sistemática la influencia de la resistencia al flujo de la corteza dúctil en el mismo arreglo experimental. El flujo de la corteza dúctil ha sido sugerido en diversas zonas del Golfo de California: a) con evidencia sísmica se ha propuesto que la corteza inferior continuó fluyendo después de la ruptura continental hacia el margen oriente del Golfo como una compensación a la cizalla o a las variaciones del espesor cortical (Lewis et al., 2001; Persaud et al., 2003); b) con evidencias de reflexión sísmica y geología estructural el flujo ha sido relacionado con el extremo adelgazamiento cortical, desde el Mioceno tardío al Plioceno en la parte norte del Golfo de California, lo cual produce una geometría de Complejo Metamórfico (González-Fernández et al., 2005; Martín-Barajas et al., 2013); c) por último, la presencia de fallas de bajo ángulo llevaron a Geoffroy y Pronost (2010) a sugerir que el flujo de la corteza inferior está asociado a una exhumación localizada activa después del inicio de las anomalías magnéticas en el Sur del Golfo de California. La serie experimental II explora esta condición.

Adicionalmente, se discuten las implicaciones de:

- 3) Una variación más completa en el ángulo α que se llevó de 25°, 30°, 45° hasta 90°. En trabajos previos se han propuesto solo dos diferentes variaciones (Dooley y Schreurs 2012; Corti y Dooley, 2015).
- 4) Una medición detallada y sistemática de los valores de las características geométricas L, W, d, E, durante la deformación. Se presentan los datos numéricos usando la misma metodología para comparar los experimentos y el caso natural. Se corroboró la propuesta de escalamiento geométrico de Aydin y Nur.

6.2.- Validación de nuestro arreglo geométrico experimental

Antes de hacer una comparación con las cuencas del sur del Golfo de California, se discute la validación del escalamiento geométrico de los experimentos. Todos los desarrollos experimentales necesariamente simplifican e idealizan los procesos geológicos. En nuestro caso, las cuencas experimentales representan un sistema puramente mecánico que no llega a la ruptura cortical. Esta es una limitación importante para comparar las características geométricas debido a que las cuencas del sur del Golfo de California, presentan de acuerdo a algunos autores una oceanización incipiente (ver mapa de Ferrari et al., 2013 y 2107) o al menos la presencia de volcanismo asociado la fertilidad del manto (Lizarralde et al., 2007; Fletcher et al., 2007). Sin embargo, los parámetros geométricos son similares a otras cuencas continentales como se puede observar al comparar con los datos reportados por Gürbüz (2010). Estos datos fueron comparados con la escala geométrica propuesta por Aydin y Nur (1982) a partir de la relación L/W (largo/ancho) de 70 cuencas *pull-apart* medidas alrededor del mundo. Estos autores ajustaron una función dada por:

$$\log L = C_1 \log w + \log C_2 \quad (2.0)$$

El mejor ajuste para esta ecuación, se da cuando $C_1 = 1.0$ y $C_2 = 3.2$. Tomando en cuenta los antilogaritmos la ecuación puede ser reescrita como:

$$L \simeq 3.2 W \quad (2.1)$$

La ecuación 2.1 muestra una relación linear relativamente bien definida entre L y W en la mayoría de las cuencas medidas, donde la mayor frecuencia se encuentra entre 3 y 4 (Figura 58). Con base en estas observaciones, Aydin y Nur (1982) proponen que 3.2 es el valor que mejor se ajusta a la curva logarítmica (Figura 59), este valor refleja la proporción que existe entre L/W para la mayoría de las cuencas.

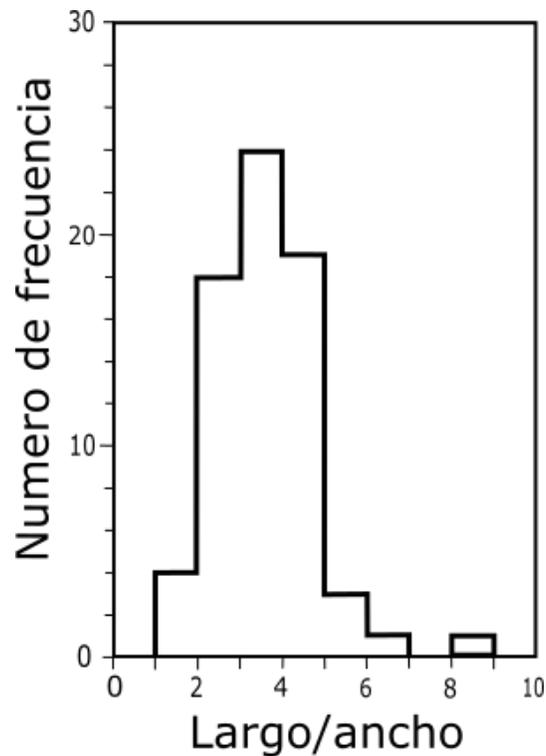


Figura 58. Muestra el histograma de frecuencias calculado para la proporción largo/ancho, que se calcularon las cuencas medidas por Aydin y Nur (1982).

Las cuencas del Golfo Sur satisfacen el escalamiento como otras cuencas medidas en la naturaleza (Aydin y Nur, 1982; Gürbüz, 2010). En cuanto a los experimentos físicos, los resultados de Basile y Brun (1999) son los únicos que reportan un ajuste a este escalamiento. En la figura 59 se muestran los datos de los experimentos de estos autores y se observa que los resultados de este trabajo presentan menor dispersión y un mejor ajuste. La similitud geométrica valida la comparación de los parámetros L y W entre los experimentos y las cuencas del Sur del Golfo.

Gürbüz sugiere en su trabajo de 2010, propone que la relación L/W tiene una proporción ligada a la profundidad de las cuencas de pull-apart, por lo que se debe

tomar en cuenta esta dimensión Z o d (profundidad). Según Gürbüz la profundidad aumenta con respecto a mayores valores de L/W. Para ilustrar esta idea Gürbüz diseño una gráfica logarítmica en 3D donde relaciona L, W y d (Figura 60).

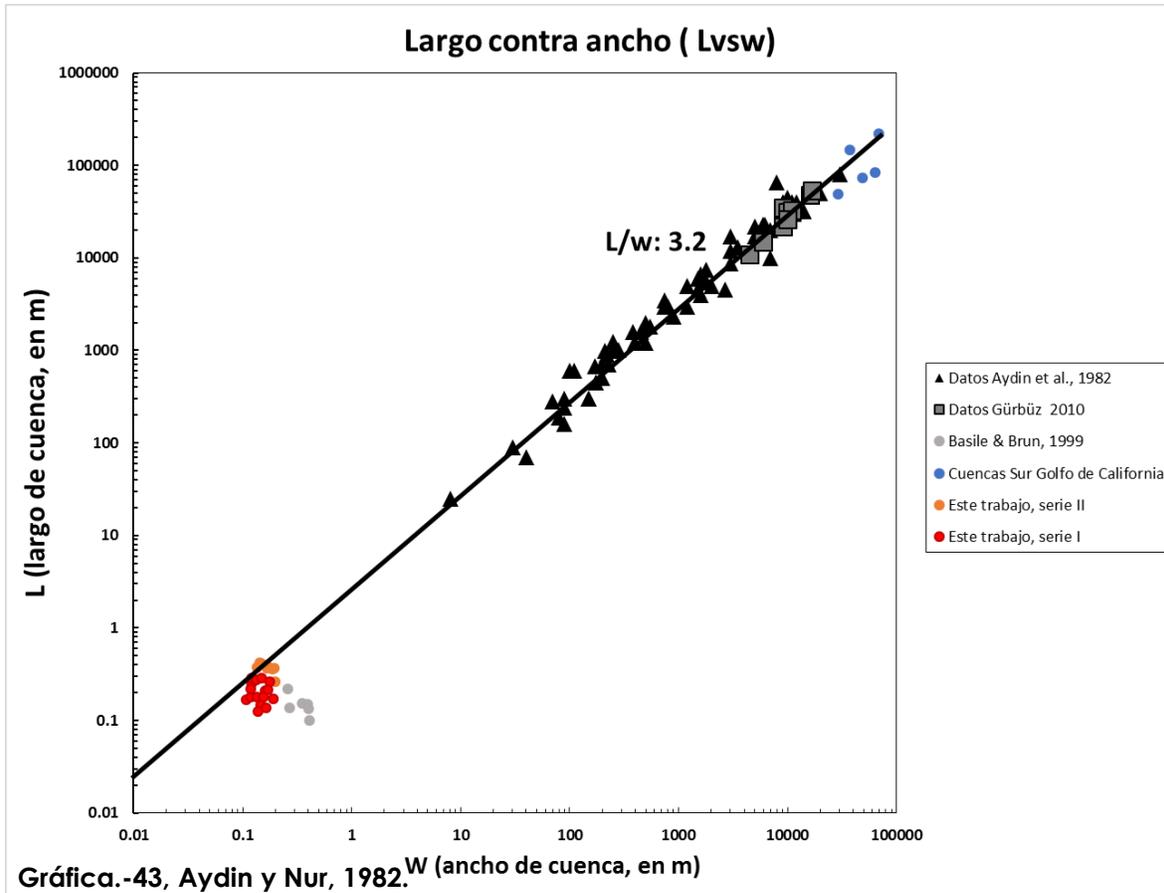
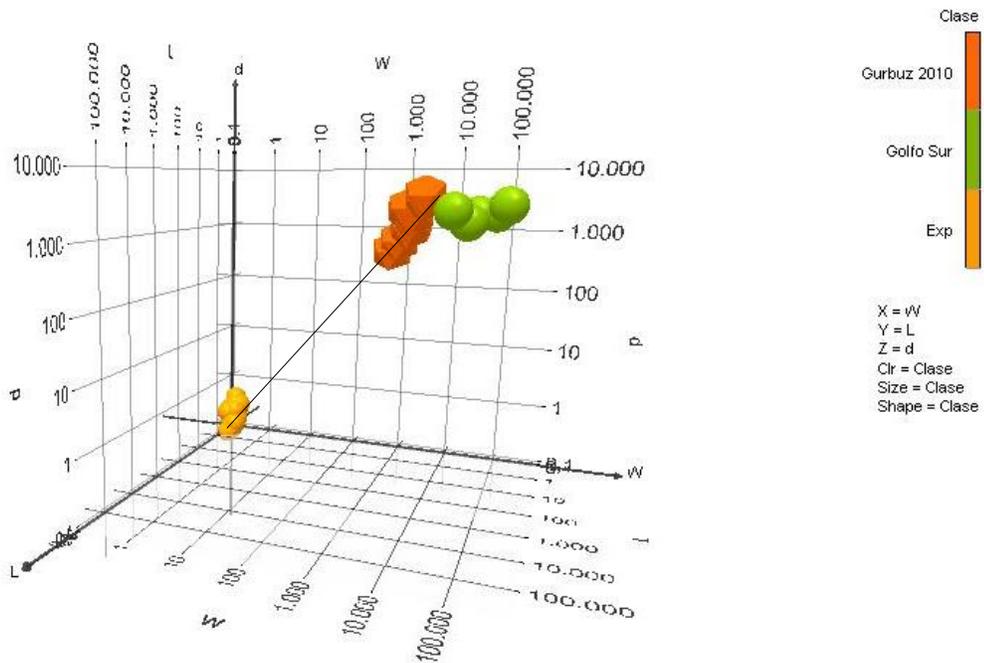


Figura 59. Grafica L/W propuesta por Aydin y Nur (1982), donde comparamos datos de otras cuencas *pull-apart* medidas en la zona norte de la falla de Anatolia en Turquía, Gürbüz (2010), datos de cuencas experimentales Basile y Brun (1999) con nuestros datos (círculos anaranjados y rojos) y los medidos en el Golfo Sur (círculos azules).

En la figura 60 se muestra una gráfica de este tipo, donde se añadieron los resultados experimentales y los datos del Golfo Sur. En general se observa un buen ajuste en los resultados experimentales. En los datos de las cuencas naturales, las del Sur del Golfo presentan una menor profundidad relativa, lo que resulta en un menor ajuste. Se considera que este desajuste puede ser el producto de dos factores:

1) la calidad de los datos de profundidad que fueron medidos utilizando la batimetría y las líneas sísmicas disponibles. En la batimetría no se consideran los rellenos sedimentarios y las líneas sísmicas son escasas.

2) los efectos isostáticos y la presencia de material volcánico nuevo en la zona de *rift*, por ejemplo Mark et al. (2014) han documentado un levantamiento asociado a la ruptura en los márgenes del rift, fenómeno que mediante el acomodo de la deformación resta profundidad a las cuencas *pull-apart* del sistema del Golfo Sur.



Gráfica.-44, Gürbüz, 2010.

Figura 60. Grafica L vs W vs d propuesta por Gürbüz (2010), donde comparamos datos de otras cuencas *pull-apart* medidas en la zona norte de la falla de Anatolia en Turquía, Gürbüz (2010) (esferas anaranjadas) nuestros modelos (esferas amarillas) y los medidos en el Golfo Sur (esferas verdes).

6.4.- Implicaciones para el sistema de cuencas pull-apart del Golfo Sur

El efecto principal de añadir una componente oblicua al sistema de *pull-apart* es que se distribuye diferente la deformación en las fallas que forman la cuenca. Con una oblicuidad mayor, las fallas de rumbo tienen una componente extensional mientras que las fallas normales tienden a volverse sub-paralelas con respecto a las fallas laterales, y su componente extensional aumenta.

Existen pocos trabajos que describen con detalle la geometría de las fallas que delimitan las cuencas de *pull-apart* en el sur del Golfo de California. Autores previos utilizaron principalmente datos de sísmica de reflexión para describir algunos rasgos generales sobre la extensión del *rift* (Paramo et al., 2008; Lizarralde et al., 2007), datos geológicos para definir la historia de deformación (Ferrari et al., 2013; 2017; Balestrieri et al., 2017), o integración de datos geofísicos para describir localmente algunos rasgos geométrico-estructurales en la parte oeste del Golfo (González et al., 2005; Piñeiro-Lajas, 2013; Nava-Sánchez et al., 2001). Sobre la parte oriental del Golfo Sur prácticamente no existen datos. En este trabajo se utilizó los datos de batimetría y sísmica disponible para describir y clasificar las cuencas *pull-apart* del Golfo Sur y sus zonas transformes aledañas.

La geometría de las fallas en la zona cercana a la costa de Santa Rosalía (Nava-Sánchez et al., 2001) se reporta como una serie de horst y grabens que los autores relacionan con la apertura del Golfo. Al llevar a cabo la interpretación de la traza de las fallas laterales que delimitan la cuenca de Guaymas se observó que coincide con la ubicación del estudio de Nava (2001). Las estructuras descritas por Nava-Sánchez son angostas (alrededor de 500 m de ancho) y muestran una importante componente horizontal. Además de esta zona, los autores observaron fallas similares cerca de las cuencas de La Giganta, Cochimie y La Paz. Esta reinterpretación justifica la exploración de los efectos de una componente oblicua en el arreglo experimental de este trabajo.

La integración de estos trabajos con los datos batimétricos recientes (Lonsdale, 2004) nos permitió idealizar y proponer un modelo geométrico de las cuencas que componen el sistema transforme del Sur del Golfo. Se dejaron de lado las fallas relacionadas con la

apertura del *rift* y centramos nuestras observaciones en el sistema de cuencas *pull-apart*, de acuerdo con las edades propuestas por Ferrari et al. (2017) y Balestrieri et al. (2017) para las estructuras de la apertura del *rift* y aquellas que pertenecen al sistema transforme del Golfo Sur.

Las condiciones de frontera que controlan la geometría de las cuencas *pull-apart* experimentales son: la geometría del basamento (homologas a fallas preexistentes) y la resistencia de la capa dúctil. Las cuencas romboidales se formaron con ángulos de 90° en los experimentos de la serie I, “90”, “90 05”, “90 07”, “90 11” y en los experimentos de la serie II “2 90 11”. En el caso del sur del Golfo de California, las cuencas Guaymas, Farallón y Alarcón son del tipo romboidal. La geometría de las cuencas Guaymas y Farallón (en la zona central del Golfo de California) podría estar influenciada por la geometría de un bloque relativamente rígido, una plataforma continental estable en la zona de Sonora, en el borde sur del cratón de Norteamérica como ha sido reportado por Valencia-Moreno et al. (2001). En efecto, las fallas transformes de la cuenca de Guaymas definen la frontera difusa entre las cuencas del Golfo Norte y el Golfo Sur. En el caso de la cuenca Alarcón, su geometría está fuertemente controlada por la extensión ortogonal que ocurrió entre el bloque de los Cabos y el bloque de Puerto Vallarta. En resumen, la forma de las cuencas romboidales del sur del Golfo estaría controlada por contrastes de resistencia en el basamento.

La cuenca Carmen es una cuenca tipo aguja, y en nuestros experimentos es comparable con los experimentos “25”, “25 05”, “25 07”, “25 11”, “30”, “30 05”, “30 07”, “30 11” de la serie I con los experimentos “2 25”, “2 25 11”, “2 30” y “2 30 11” y de la serie II experimentos donde el ángulo de oblicuidad es alto y el ángulo α es de 25° y 30° . Se considera que la forma de la cuenca Carmen pudo haber resultado de una flexura en la falla de rumbo que conectaba las cuencas Guaymas y Farallón, causada por el desplazamiento oblicuo de Baja California. Al momento no se cuenta con datos para corroborar esta hipótesis.

La cuenca Pescadero es una cuenca tipo Z, es comparable morfológicamente con los experimentos de la serie I, “45”, “45 05”, “45 07”, “45 11” y de la serie II, con los experimentos “2 45”, “2 45 11” y “2 90”. Las cuencas tipo Z presentan las condiciones

de formación experimental más complejas. La forma de la cuenca Pescadero puede estar relacionada con un ángulo de oblicuidad alto y su posición relativa en el sistema transforme, i.e., una zona de transición transtensiva entre las cuencas romboidales adyacentes a los límites de bloques rígidos. Adicionalmente, la reología de la corteza inferior podría estar debilitada por la presencia de una anomalía mantélica propuesta mediante datos sísmicos (Di Luccio et al., 2014).

La geometría de las cuencas experimentales es idealizada y simétrica, con pocas imperfecciones. Las cuencas naturales presentan una complejidad mayor. Sin embargo, ambas coinciden en sus proporciones geométricas L , W , d y α como se ha demostrado en trabajos previos (Aydin y Nur, 1982; Gürbüz, 2010).

El ángulo α en las cuencas romboidales del Golfo Sur es de 88° , 83° y 87° para Guaymas, Farallón y Alarcón, respectivamente. En los resultados experimentales, el ángulo α varía entre 82° y 88° para cuencas a rumbo y oblicuas, respectivamente. La cuenca Pescadero de tipo Z presenta un ángulo de 52° , mientras que en los experimentos las cuencas tipo Z tienen una variación de 44° a 52° . La cuenca Carmen de tipo aguja tiene un ángulo de 42° , en los experimentos la variación angular está entre los 22° y 40° .

Las bases de datos disponibles con la batimetría del fondo oceánico en la parte sur del sistema transforme del Golfo de California y los datos geofísicos en la literatura, permitieron obtener algunos de los elementos geométricos que caracterizan el sistema de cuencas *pull-apart*, relacionadas con la frontera entre las placas Pacífico y Norteamérica. Algunas limitaciones incluyen la indefinición de fallas extensionales que delimitan las cuencas, la presencia de sedimentos y de corteza oceánica insipiente. Sin embargo, los parámetros geométricos obtenidos también se comparan con otras cuencas desarrolladas en sistemas de fallas regionales a rumbo y presentan proporciones geométricas que respetan la ley de escala.

Capítulo 7.- Conclusiones

7.1.- Series experimentales

1. El arreglo experimental propuesto reproduce de manera apropiada los tipos de cuencas *pull-apart* propuestas por otros autores: aguja, Z y romboidal.
2. El ángulo α propuesto es el parámetro geométrico que mostró tener mayor influencia en la forma, geometría y cantidad de deformación en la cuenca, lo que confirma la importancia que se le da en trabajos previos.
3. El ángulo de oblicuidad en combinación con el ángulo α , modifica principalmente la geometría de la cuenca, pero también tiene efectos significativos en las fallas de rumbo, imprime en su traza una componente de extensión.
4. La reología de la capa inferior dúctil, mostró ser un factor importante, ya que modifica considerablemente la geometría de las cuencas.
5. En la serie experimental I, los experimentos con ángulo α de 25° y 30° forman cuencas tipo aguja, los de 45° cuencas tipo Z y los de 90° cuencas tipo romboidal.
6. En la serie experimental II, los experimentos con ángulo α de 25°, 30° y 45° forman cuencas tipo aguja, los de 90° con cero grados de oblicuidad cuencas tipo Z y los de 90° con 11° de oblicuidad cuencas tipo romboidal.
7. Los valores mayores de ancho de cuenca (W) fueron observados en los experimentos con ángulo α de 45° y 90° y oblicuidad de 7° y 11°.
8. La longitud de cuenca L, en la serie experimental I, presentan valores altos en los experimentos con ángulo α de 25° y 30° y oblicuidad de 7°,11°. En la serie experimental II, L es mayor que en la serie I, los experimentos deformados con 0° de oblicuidad, presentaron los valores más altos y presentan baja sensibilidad a la variación del ángulo α .
9. La extensión de cuenca (E) está controlada por el aumento de la oblicuidad y el ángulo α . Es mayor en los experimentos de la serie I en comparación con los de la serie II.
10. La relación L/d es mayor en la serie experimental II, debido al flujo de la capa dúctil que acomoda la deformación.

11. La relación $L/W/d$, que muestran las cuencas *pull-apart* en este trabajo y su variación en las gráficas propuestas por Aydin y Nur, (1982) y Gürbüz, (2010) valida el escalamiento de los experimentos. De esta manera, se considera que se puede usar los resultados experimentales para compararlos con algunas de las características geométricas de las cuencas en la parte Sur del Golfo de California.

7.2.- Sobre el Golfo Sur

1. En general podemos concluir que las diferencias morfológicas entre las cuencas del Golfo sur están en función de la diferencia en desplazamiento, que se presenta a lo largo de la micro placa de Baja California y la oblicuidad que puede producir en la zona de las cuencas. Estas diferencias también puede estar en función de la posición en la que se encuentran las cuencas dentro del Golfo Sur respecto a la península de Baja California que funciona como bloque móvil y el estilo de *rift* que afectó la corteza en el segmento en el que se formaron las cuencas.
2. Con base en los parámetros de Gürbüz (2010) las cuencas *pull-apart* se clasifican de la siguiente manera: de Norte a Sur; la cuenca Guaymas es una cuenca tipo romboidal, la cuenca Carmen tipo aguja, la cuenca Farallón tipo romboidal, la cuenca Pescadero tipo Z y la cuenca Alarcón como una cuenca tipo romboidal.
3. Las variaciones en la geometría de las cuencas pueden atribuirse a diversos factores: 1) la presencia de fallas preexistentes debido a la historia de extensión y los bloques corticales involucrados; 2) el ángulo de oblicuidad experimentado por cada cuenca debido a su posición respecto a la micro placa Baja California y el desplazamiento que experimenta; 3) al comportamiento mecánico de la corteza dúctil en la zona correspondiente, y 4) la presencia del material astenosférico ascendiendo en este sistema transforme. De esta manera, las cuencas Guaymas, Carmen y Farallón se encuentran en un segmento de corteza que se comportó como un *rift* estrecho, mientras que la cuenca Alarcón se encuentra en un segmento con un estilo de *rift* amplio.

4. La cuenca Carmen, podría deber su forma a su posición dentro de una falla de rumbo, que experimento extensión ortogonal a su desplazamiento, debido a la componente oblicua en el desplazamiento de la micro placa Baja California.
5. La cuenca Pescadero es del tipo "Z", con una geometría similar a las cuencas de este tipo formadas en la serie experimental II. Esta similitud sugiere la presencia de una corteza inferior dúctil de menor resistencia, en una zona que podría considerarse de transición entre los estilos de *rift*, amplio y estrecho, entre los segmentos Alarcón y Guaymas respectivamente.
6. La comparación de la geometría de la cuenca Alarcón con los resultados de este trabajo, sugiere que experimentó muy poca oblicuidad durante su formación. La geometría romboidal es resultado de la posición ortogonal que tiene Baja California respecto a la Dorsal del Pacífico Oriental. En este contexto, la extensión de la cuenca Alarcón fue paralela al desplazamiento que existe en las fallas de rumbo que delimitan esta cuenca.

8. - Bibliografía

- Aragón-Arreola, M. (2006). *Structural evolution of basins in the northern and central Gulf of California. Implications for rift kinematics and strain accommodation*. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California. 119 pp.
- Aragón-Arreola, M., y Martín-Barajas, A. (2007). Westward migration of extension in the northern Gulf of California, Mexico. *Geology*, 35(6), 571.
- Axen, G., y Fletcher, J. (1998). Late Miocene-Pleistocene Extensional Faulting, Northern Gulf of California, Mexico and Salton Trough, California. *International Geology Review*, 40(3), 217-244.
- Aydin, A., y Nur, A. (1982). Evolution of pull-apart basins and their scale independence. *Tectonics*, 1(1), 91-105.
- Balestrieri, M., Ferrari, L., Bonini, M., Duque-Trujillo, J., Cerca, M., Moratti, G., y Corti, G. (2017). Onshore and offshore apatite fission-track dating from the southern Gulf of California: Insights into the time-space evolution of the rifting. *Tectonophysics*.
- Barrientos, B., Cerca, M., García-Márquez, J., y Hernández-Bernal, C. (2008). Three-dimensional displacement fields measured in a deforming granular-media surface by combined fringe projection and speckle photography. *Journal Of Optics A: Pure And Applied Optics*, 10(10), 104027.
- Basile, C., y Brun, J. (1999). Transtensional faulting patterns ranging from pull-apart basins to transform continental margins: an experimental investigation. *Journal Of Structural Geology*, 21(1), 23-37.
- Belt, E. (1968). Post-Acadian rifts y related facies, eastern Canada. In E. Zen, W. White, J. Hadley y J. Thompson, *Studies in Appalachian geology, Northern y Maritime* (pp. 95-113). New York: Interscience Publishers.
- Bennett, S., y Oskin, M. (2014). Oblique rifting ruptures continents: Example from the Gulf of California shear zone. *Geology*, 42(3), 215-218.
- Bischoff, J. L. y J. W. Niemitz. (1980). Bathymetric maps of the Gulf of California. *Geological Survey Miscellaneous Investigations Series Map (U.S.) Map*, 1-1244, escala 1:649,440.
- Bischoff, J., y Henyey, T. (1974). Tectonic Elements of the Central Part of the Gulf of California. *Geological Society Of America Bulletin*, 85(12), 1893-1904.
- Brun, J.P. (1999). Narrow rifts versus wide rifts: inferences for the mechanics of rifting from laboratory experiments. *Philosophical Transactions Of The Royal Society A: Mathematical, Physical And Engineering Sciences*, 357(1753), 695-712.
- Bryan, S., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., y López-Martínez, M. (2014). Pulling apart the Mid to Late Cenozoic magmatic record of the Gulf of California: is there a Comondú Arc?. *Geological Society, London, Special Publications*, 385(1), 389-407.

- Burchfiel, B., y Stewart, J. (1966). "Pull-Apart" Origin Of The Central Segment Of Death Valley, California. *Geological Society Of America Bulletin*, 77(4), 439-442.
- Byerlee, J. (1978). Friction of rocks. *Pure And Applied Geophysics PAGEOPH*, 116(4-5), 615-626.
- Cabrera, J., Agulló-López, F., y López, F. (2000). *Óptica Electromagnética. Vol. II: Materiales y Aplicaciones* (1st ed., p. 507). Madrid: Addison Wesley.
- Careys, W. (1958). A tectonic approach to continental drift. In W. Careys, *Continental Drift: A Symposium of the Geological Department* (pp. 177-355). Hobart: Universidad de Tasmania.
- Clayton, L. (1966). Tectonic depressions along the hope fault, a transcurrent fault in North Canterbury, New Zealand. *New Zealand Journal Of Geology And Geophysics*, 9(1-2), 95-104.
- Corti, G., Bonini, M., Conticelli, S., Innocenti, F., Manetti, P., y Sokoutis, D. (2003). Analogue modelling of continental extension: a review focused on the relations between the patterns of deformation and the presence of magma. *Earth-Science Reviews*, 63(3-4), 169-247.
- Corti, G., y Dooley, T. (2015). Lithospheric-scale centrifuge models of pull-apart basins. *Tectonophysics*, 664, 154-163.
- Crowell, J. C. (1973). Origin of Late Cenozoic Basins in Southern California: Abstract. *AAPG Bulletin*, 57.
- Di Luccio, F., Persaud, P., & Clayton, R. (2014). Seismic structure beneath the Gulf of California: a contribution from group velocity measurements. *Geophysical Journal International*, 199(3), 1861-1877.
- Dixon, T., Farina, F., DeMets, C., Suarez-Vidal, F., Fletcher, J., y Marquez-Azua, B. et al. (2000). New kinematic models for Pacific-North America Motion from 3 Ma to Present, II: Evidence for a "Baja California Shear Zone". *Geophysical Research Letters*, 27(23), 3961-3964.
- Dooley, T., y Schreurs, G. (2012). Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics*, 574-575, 1-71.
- Duque-Trujillo, J., Ferrari, L., López Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., and Lonsdale, P., (2013). Early to Middle Miocene syn-extensional magmatism in the southern Gulf of California: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 45, no. 6, p. 15.
- Duque-Trujillo, J., Ferrari, L., Norini, G., y López-Martínez, M. (2014). Miocene faulting in the southwestern Sierra Madre Occidental, Nayarit, Mexico: kinematics and segmentation of the initial rifting in the southern Gulf of California. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 31(3), 283-302.
- Duque-Trujillo, J., Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., López-Martínez, M., Lonsdale, P., y Bryan, S. et al. (2015). Timing of rifting in the southern Gulf of California and its conjugate margins: Insights from the plutonic record. *Geological Society Of America Bulletin*, 127(5-6), 702-736.

Eakins, B., Lonsdale, P., Fletcher, J., y Ledesma, J. (2004). Geomorphology of the Southern Gulf of California Seafloor. *American Geophysical Union Abstracts, Meeting Abstracts*.

Fenby, S. S., y Gastil R. G. (1991), Geologic-tectonic map of the Gulf of California and surrounding areas, in *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, edited by J. P. Dauphin and B. R. Simoneit, American Association of Petroleum Geologists. Mem., 47, 79– 83.

Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S. E., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., y Solari, L. (2013). Late Oligocene to Middle Miocene rifting and synextensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, Mexico: The beginning of the Gulf of California rift. *Geosphere*, 9(5), 1161-1200.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S., López-Martínez, M., & Silva-Fragoso, A. (2017). Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.006>

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., and Bryan, S., 2007, Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relation with the evolution of the western margin of North America, in Alaniz-Álvarez, S.A., and Nieto-Samaniego, A.F., eds., *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México: Geological Society of America Special Paper 422*, p. 1–39.

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., y Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343-378.

Fletcher, J., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., y Gehrels, G. (2007). Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas. *Geological Society Of America Bulletin*, 119(11-12), 1313-1336.

Freund, R. (1971). The Hope Fault: a strike-slip fault in New Zealand. *New Zealand Geological Survey Bulletin*, 86, 1-49.

Gans, P. (1997). Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: Implications for the tectonic evolution of northwest Mexico. *Tectonics*, 16(3), 388-408.

Geoffroy, L., y Pronost, J. (2010). Late Pliocene to Early Quaternary extensional detachment in the La Paz–El Cabo area (Baja California Sur, Mexico): implications on the opening of the Gulf of California and the mechanics of oblique rifting. *Terra Nova*, 22(1), 64-69.

Goetze, C., y Evans, B. (1979). Stress and temperature in the bending lithosphere as constrained by experimental rock mechanics. *Geophysical Journal International*, 59(3), 463-478.

Gölke, M., Cloetingh, S., y Fuchs, K. (1994). Finite-element modelling of pull-apart basin formation. *Tectonophysics*, 240(1-4), 45-57.

- González-Fernández, A., Dañobeitia, J., Delgado-Argote, L., Michaud, F., Córdoba, D., y Bartolomé, R. (2005). Mode of extension and rifting history of upper Tiburón and upper Delfín basins, northern Gulf of California. *Journal Of Geophysical Research*, 110(B1).
- Gürbüz, A. (2010). Geometric characteristics of pull-apart basins. *Lithosphere*, 2(3), 199-206.
- Gürbüz, A. (2014). *Pull-Apart Basin*. *Encyclopedia of Marine Geoscience*. (pp. 1-8). Springer.
- Henry, C., y Aranda-Gomez, J. (2000). Plate interactions control middle-late Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range. *Tectonophysics*, 318(1-4), 1-26.
- Katzman, R., ten Brink, U., y Lin, J. (1995). Three-dimensional modeling of pull-apart basins: Implications for the tectonics of the Dead Sea Basin. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B4), 6295-6312.
- Kluesner, J. (2011) Marine Geophysical Study of Cyclic Sedimentation and Shallow Sill Intrusion in the Floor of the Central Gulf of California [Ph.D. Dissertation]. San Diego, California, University of California, 232 p
- Langenheim, V., y Jachen, R. (2003). Crustal structure of the Peninsular Ranges batholith from magnetic data: Implications for Gulf of California rifting. *Geophysical Research Letters*, 30(11), 51 1-4.
- Lewis, J., Day, S., Magistrale, H., Castro, R., Astiz, L., y Rebollar, C. et al. (2001). Crustal thickness of the Peninsular Ranges and Gulf Extensional Province in the Californias. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B7), 13599-13611.
- Lizarralde, D., Axen, G., Brown, H., Fletcher, J., González-Fernández, A., Harding, A., J., Holbrook, W, S., Kent, G, M., Páramo, P., Sutherland, F., Umhoefer, P, J. (2007). Variation in styles of rifting in the Gulf of California. *Nature*, 448(7152), 466-469.
- Lonsdale, P. (1989). Geology and tectonic history of the Gulf of California. In E. Winterer, M. Hussong y R. Decker, *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii* (v. N, pp. 499-521). Geological Society of America, BoulderCo. The Geology of North America.
- Lonsdale, P. (1991). Structural patterns of the Pacific floor offshore of Peninsular California. In Dauphin, J.P., Simoneit B.T. *Gulf y Peninsular Province of the Californias*. (Mem. V 47, pp. 87-125) Tulsa, Okla., U.S.A.: American Association of Petroleum Geologists.
- Lonsdale, P. (1995). Segmentation and disruption of the East Pacific Rise in the mouth of the Gulf of California. *Marine Geophysical Researches*, 17(4), 323-359.
- Lonsdale, P.F., y Kluesner, J. (2010) Routing of terrigenous clastics to oceanic basins in the Southern Gulf of California, inherited from features of the pre-spreading protogulf. San Francisco, California, *American Geophysical Union*, fall meeting supplement, abstract T33C-2265.

- Mann, P. (2007). Global catalogue, classification and tectonic origins of restraining- and releasing bends on active and ancient strike-slip fault systems. *Geological Society, London, Special Publications*, 290(1), 13-142.
- Mann, P., Hempton, M., Bradley, D., y Burke, K. (1983). Development of Pull-Apart Basins. *The Journal Of Geology*, 91(5), 529-554.
- Martín-Barajas, A., González-Escobar, M., Fletcher, J., Pacheco, M., Oskin, M., y Dorsey, R. (2013). Thick deltaic sedimentation and detachment faulting delay the onset of continental rupture in the Northern Gulf of California: Analysis of seismic reflection profiles. *Tectonics*, 32(5), 1294-1311.
- McClay, K., y Dooley, T. (1995). Analogue models of pull-apart basins. *Geology*, 23(8), 711-714.
- McDowell, F., y Keizer, R. (1977). Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlan, Mexico. *Geological Society Of America Bulletin*, 88(10), 1479.
- Munguia, L., González-Escobar, M., y Mayer-Gerardo, S. (2006). Seismicity and State of Stress in the La Paz-Los Cabos Region, Baja California Sur, Mexico. *Bulletin Of The Seismological Society Of America*, 96(2), 624-636.
- Nava-Sánchez, E., Gorsline, D., y Molina-Cruz, A. (2001). The Baja California peninsula borderland: structural and sedimentological characteristics. *Sedimentary Geology*, 144(1-2), 63-82.
- Oskin, M., Stock, J., y Martín-Barajas, A. (2001). Rapid localization of Pacific-North America plate motion in the Gulf of California. *Geology*, 29(5), 459.
- Oskin, M., y Stock, J. (2003). Pacific-North America plate motion and opening of the Upper Delfin basin, northern Gulf of California, Mexico. *Geological Society Of America Bulletin*, 115(10), 1173 -1190.
- Páramo, P., Holbrook, W., Brown, H., Lizarralde, D., Fletcher, J., y Umhoefer, P. et al. (2008). Seismic structure of the southern Gulf of California from Los Cabos block to the East Pacific Rise. *Journal Of Geophysical Research*, 113(B3), 1-19.
- Persaud, P., Stock, J., Steckler, M., Martín-Barajas, A., Diebold, J., González-Fernández, A. and Mountain, G. (2003). Active deformation and shallow structure of the Wagner, Consag, and Delfin Basins, northern Gulf of California, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B7).
- Persaud, P., Tan, E., Contreras, J. and Lavier, L. (2016). A bottom-driven mechanism for distributed faulting in the Gulf of California rift. *Tectonophysics*. Disponible solo en línea: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004019511630542X>.
- Petrunin, A., y Sobolev, S. (2006). What controls thickness of sediments and lithospheric deformation at a pull-apart basin? *Geology*, 34(5), 389-392.

Piñero-Lajas, D. (2008). *Sísmica de reflexión y fechamiento $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ del basamento continental en el margen oeste de la Cuenca Farallón (sur del Golfo de California, México)*. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 155pp.

Piñero-Lajas, D., Gonzalez-Fernandez, A., y López-Martínez, M. (2007). Download citationShare Request full-text Seismic Structural Setting of Western Farallon Basin, Southern Gulf of California, Mexico. *American Geophysical Union, Spring Meeting Abstracts*.

Plattner, C., Malservisi, R., Dixon, T., LaFemina, P., Sella, G., Fletcher, J., y Suarez-Vidal, F. (2007). New constraints on relative motion between the Pacific Plate and Baja California microplate (Mexico) from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, 170(3), 1373-1380.

Pompa-Mera, V., Schaaf, P., Hernández-Treviño, T., Weber, B., Solís-Pichardo, G., Villanueva-Lascurain, D., y Layer, P. (2017). Geology, geochronology, and geochemistry of Isla María Madre, Nayarit, Mexico. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 30(1), 1-23.

Quennell, A. M. (1956). Tectonics of the Dead Sea rift. In *Proceedings, Congreso Geológico Internacional, 20th*, Asociación de Servicios Geológicos Africanos, Mexico City, pp. 385-405.

Quennell, A. M. (1958). The Structural And Geomorphic Evolution Of The Dead Sea Rift. *Quarterly Journal Of The Geological Society*, 114, 1-24.

Ranalli, G. (1995). *Rheology of the earth* (2nd ed., p. 413). London: Chapman y Hall.

Seiler, C., Fletcher, J., Quigley, M., Gleadow, A., y Kohn, B. (2010). Neogene structural evolution of the Sierra San Felipe, Baja California: Evidence for proto-gulf transtension in the Gulf Extensional Province? *Tectonophysics*, 488(1-4), 87-109.

Sims, D., Ferrill, D., y Stamatakos, J. (1999). Role of a ductile décollement in the development of pull-apart basins: Experimental results and natural examples. *Journal Of Structural Geology*, 21(5), 533-554.

Smit, J. H.W. (2005). *Brittle-Ductile Coupling in thrust wedges and Continental transforms*. Tesis Doctoral. VU Amsterdam and Université de Rennes 115pp.

Spencer, J. E., and W. Normark (1989), Neogene plate-tectonic evolution of the Baja California Sur continental margin and the southern Gulf of California, Mexico, In E. Winterer, M. Hussong y R. Decker, *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii* (v. N, pp. 489-497). Geological Society of America, BoulderCo. The Geology of North America.

Spencer, J., y Normark, W. (1979). Tosco-Abreojos fault zone: A Neogene transform plate boundary within the Pacific margin of southern Baja California, Mexico. *Geology*, 7(11), 554.

Stock, J., y Hodges, K. (1989). Pre-Pliocene Extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific Plate. *Tectonics*, 8(1), 99-115.

- Sugan, W., Wu, J., y McClay, K. (2014). 3D analogue modelling of transtensional pull-apart basins: comparison with the Cinarcik basin, Sea of Marmara, Turkey. *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, 55(4), 699-716.
- Sutherland, F., Kent, G., Harding, A., Umhoefer, P., Driscoll, N., y Lizarralde, D., Fletcher, J.M., Axen, G.J., Holbrook, W.S., González-Fernández, A., y Lonsdale, P. (2012). Middle Miocene to early Pliocene oblique extension in the southern Gulf of California. *Geosphere*, 8(4), 752-770.
- Umhoefer, P., Mayer, L., y Dorsey, R. (2002). Evolution of the margin of the Gulf of California near Loreto, Baja California Peninsula, Mexico. *Geological Society Of America Bulletin*, 114(7), 849-868.
- Umhoefer, P. (2011). Why did the Southern Gulf of California rupture so rapidly?—Oblique divergence across hot, weak lithosphere along a tectonically active margin. *GSA Today*, 21(11), 4-10.
- Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Barton, M., Patchett, P., Zürcher, L., Hodkinson, D., & Roldán-Quintana, J. (2001). A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico: Identification of the southern edge of the North American Precambrian basement. *Geological Society Of America Bulletin*, 113(11), 1409-1422.
- Wong, M., Gans, P., y Scheier, J. (2010). The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of core complexes and other basement rocks in Sonora, Mexico: Implications for Cenozoic tectonic evolution of northwestern Mexico. *Journal Of Geophysical Research*, 115(B7).
- Wu, J., McClay, K., Whitehouse, P., y Dooley, T. (2009). 4D analogue modelling of transtensional pull-apart basins. *Marine And Petroleum Geology*, 26(8), 1608-1623.

9.- Anexos

9.1.- Perfiles de las cuencas

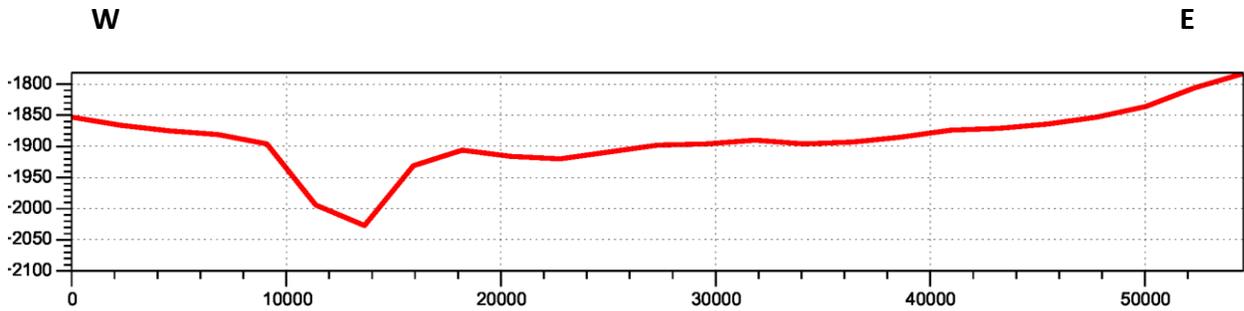


Figura 61. Perfil transversal W-E de la cuenca "Guaymas" donde se muestra la profundidad máxima y sus variaciones (en m).

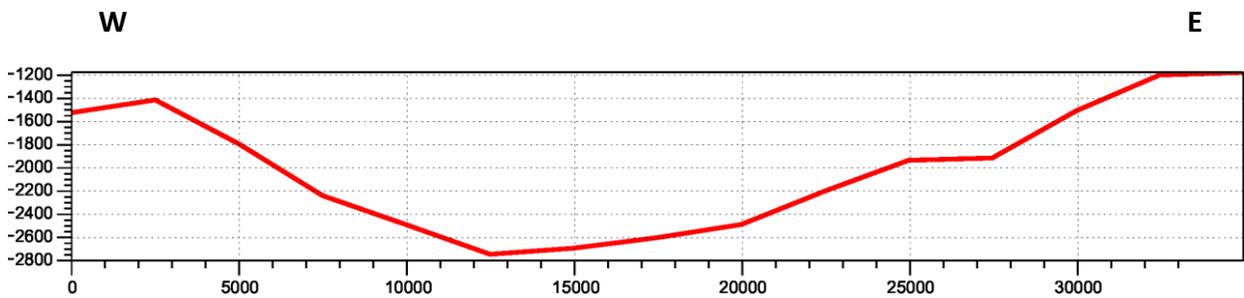


Figura 62. Perfil transversal W-E de la cuenca "Carmen" donde se muestra la profundidad máxima y sus variaciones (en m).

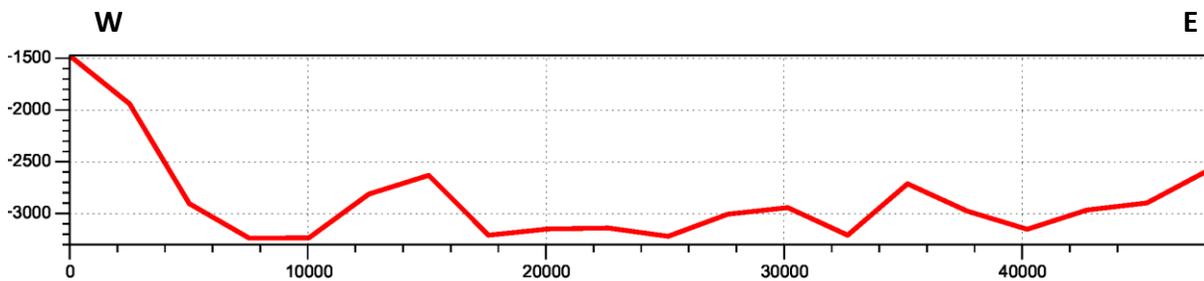


Figura 63. Perfil transversal W-E de la cuenca "Farallón" donde se muestra la profundidad máxima y sus variaciones (en m).

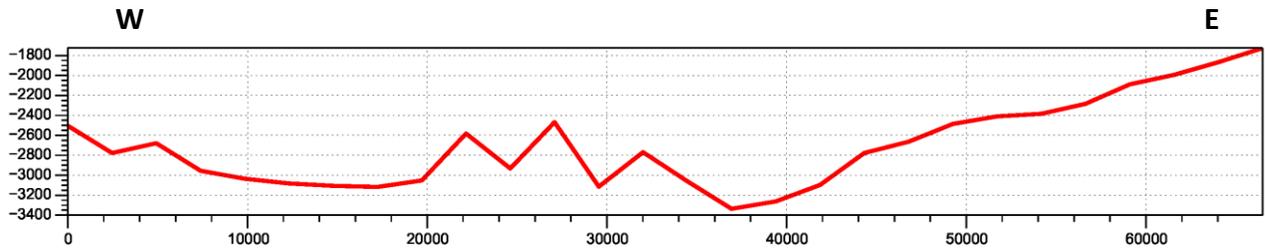


Figura 64. Perfil transversal W-E de la cuenca “Pescadero” donde se muestra la profundidad máxima y sus variaciones (en m).

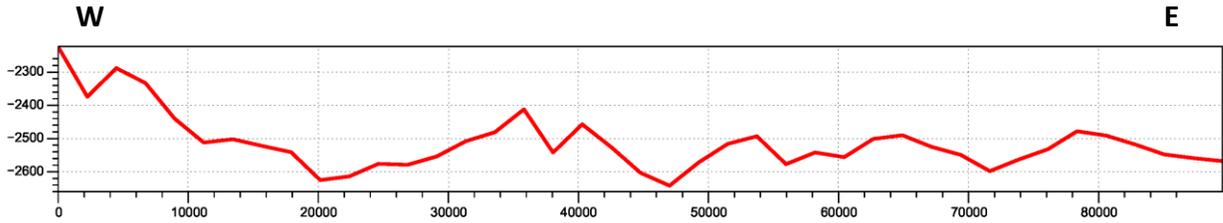


Figura 65. Perfil transversal W-E de la cuenca “Alarcón” donde se muestra la profundidad máxima y sus variaciones (en m).

9.2.- Montajes serie experimental "I"

9.2.1.- Montajes ángulo $\alpha 25^\circ$

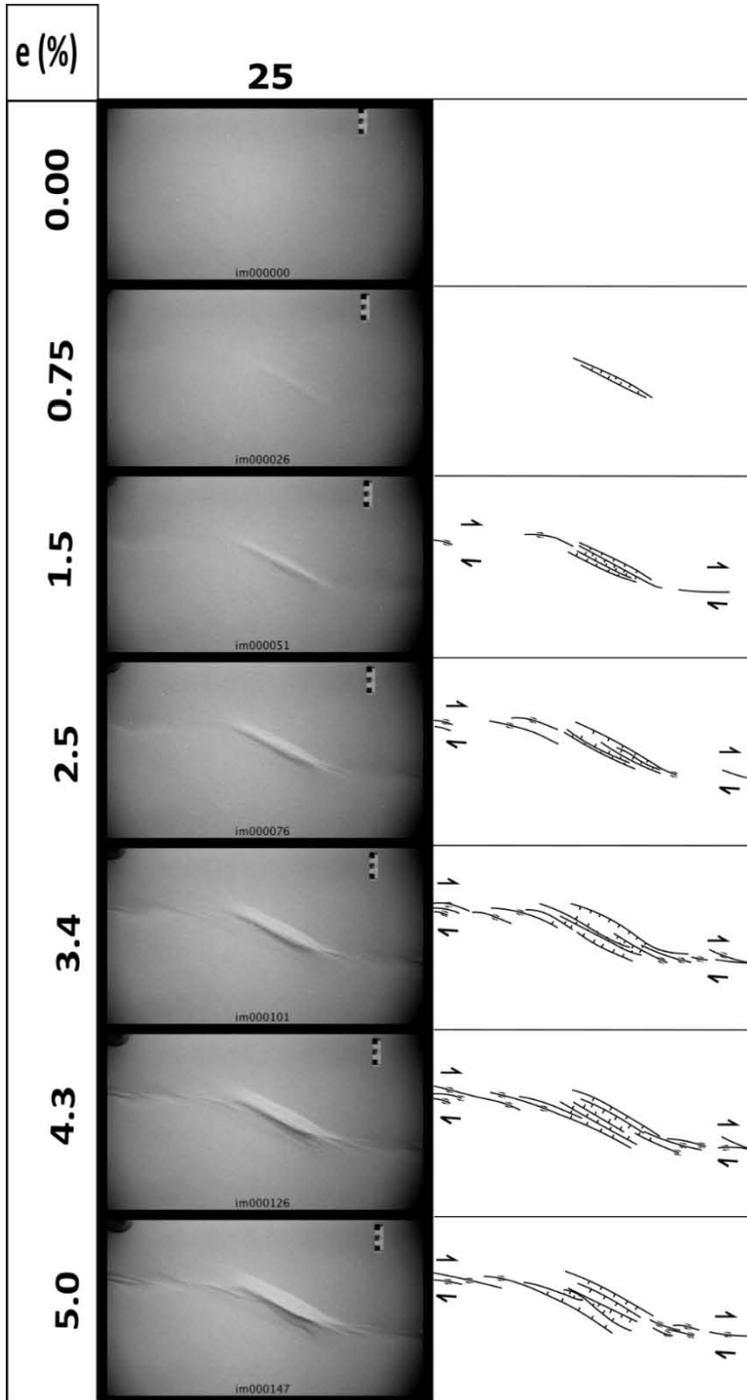


Figura 66. La imagen muestra el montaje "25" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

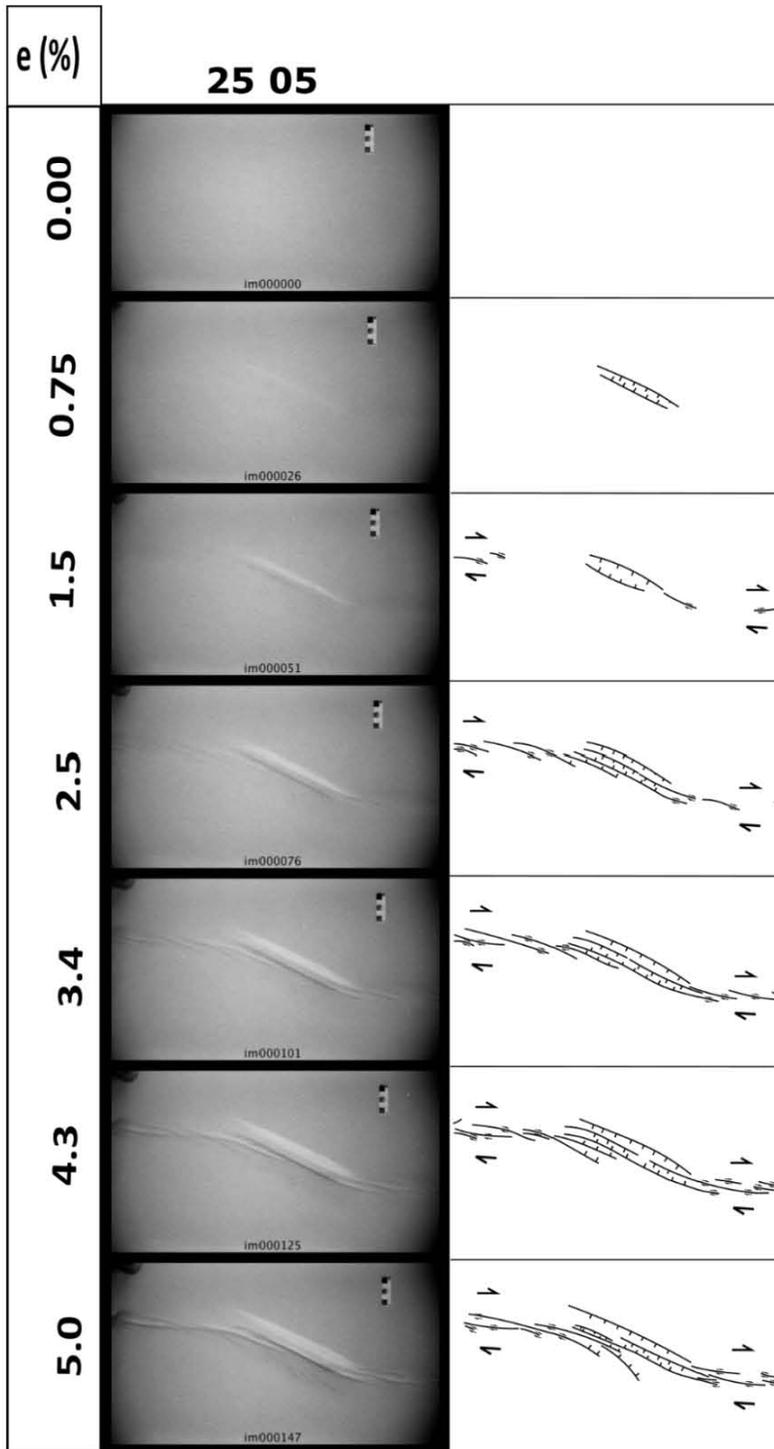


Figura 67. La imagen muestra el montaje “25 05” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

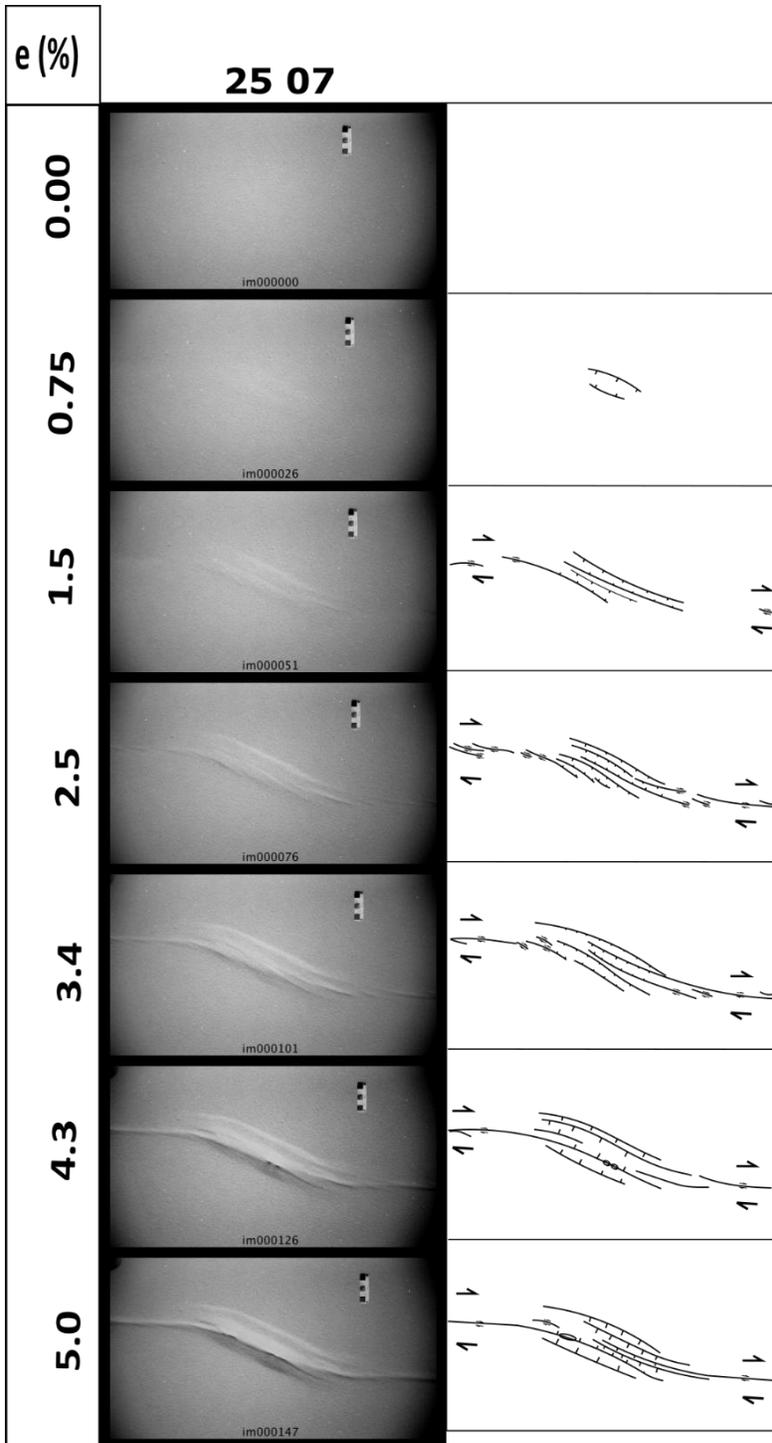


Figura 68. La imagen muestra el montaje "25 07" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

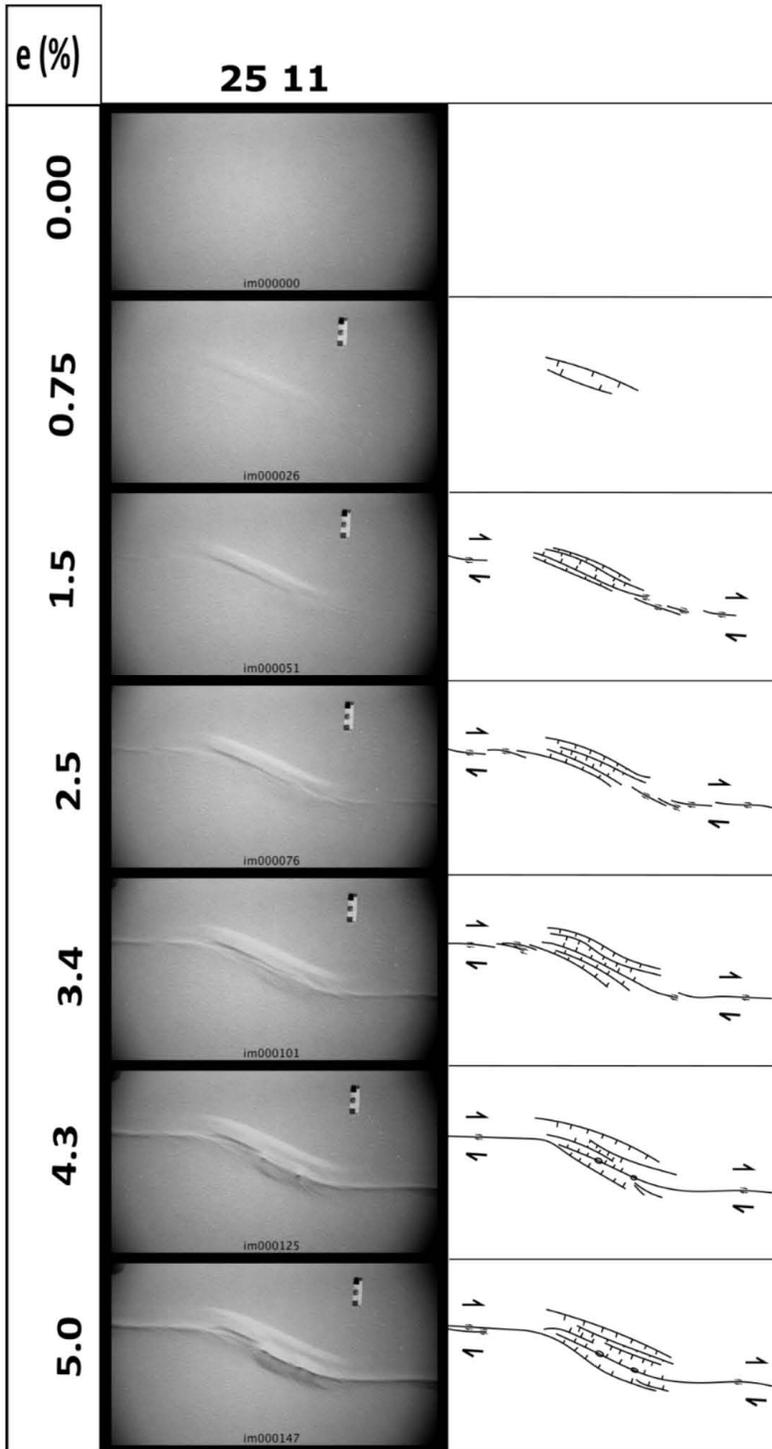


Figura 69. La imagen muestra el montaje “25 11” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

9.2.2.- Montajes ángulo $\alpha 30^\circ$

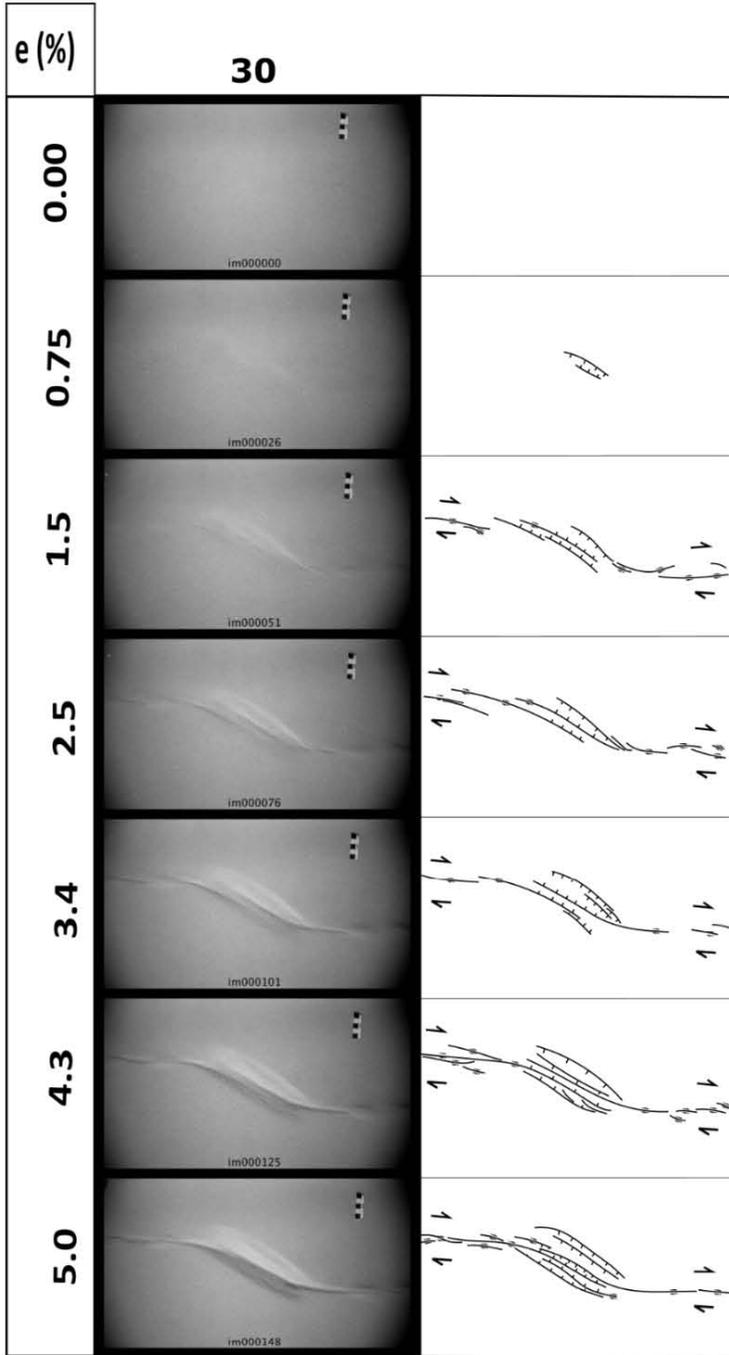


Figura 70. La imagen muestra el montaje "30" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

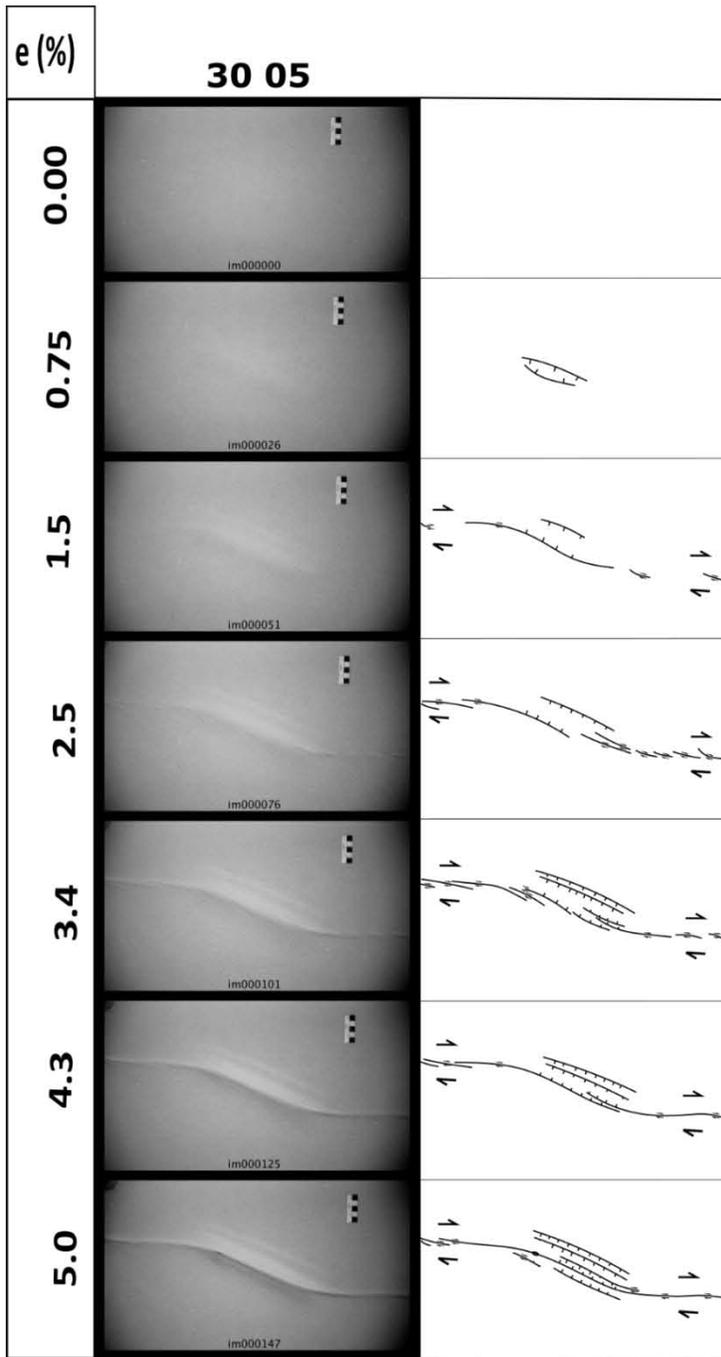


Figura 71. La imagen muestra el montaje “30 05” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

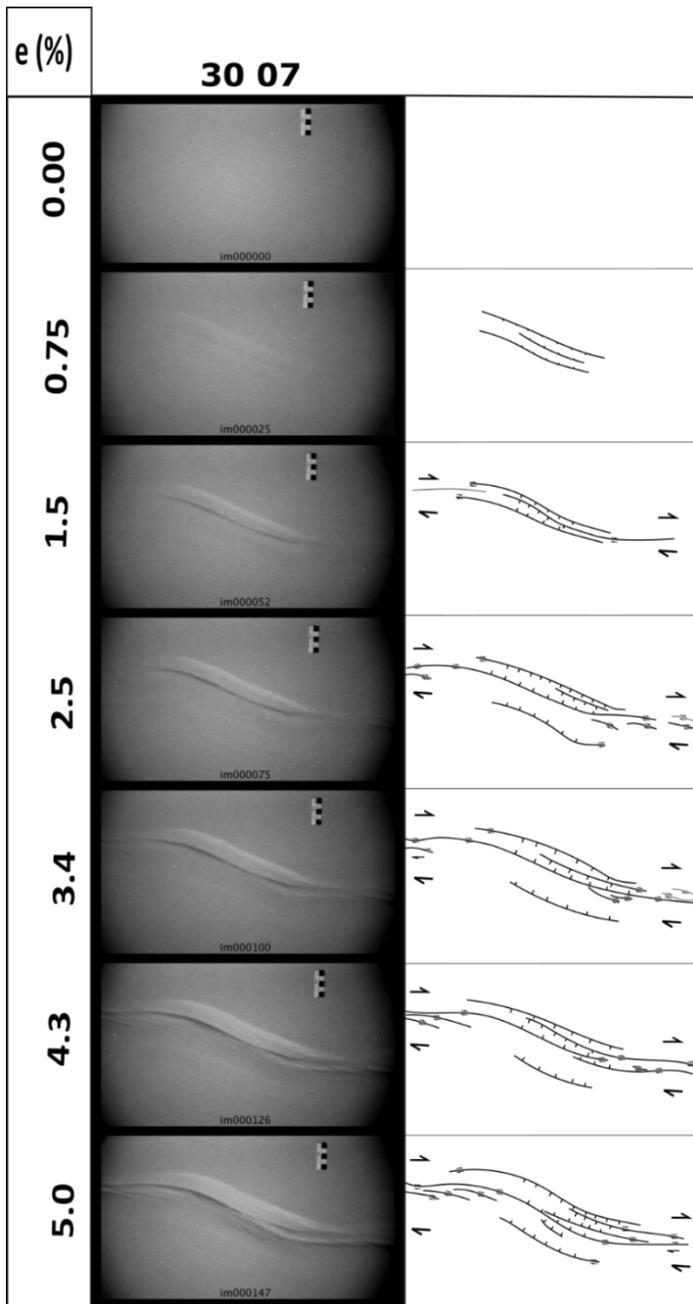


Figura 72. La imagen muestra el montaje "30 07" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

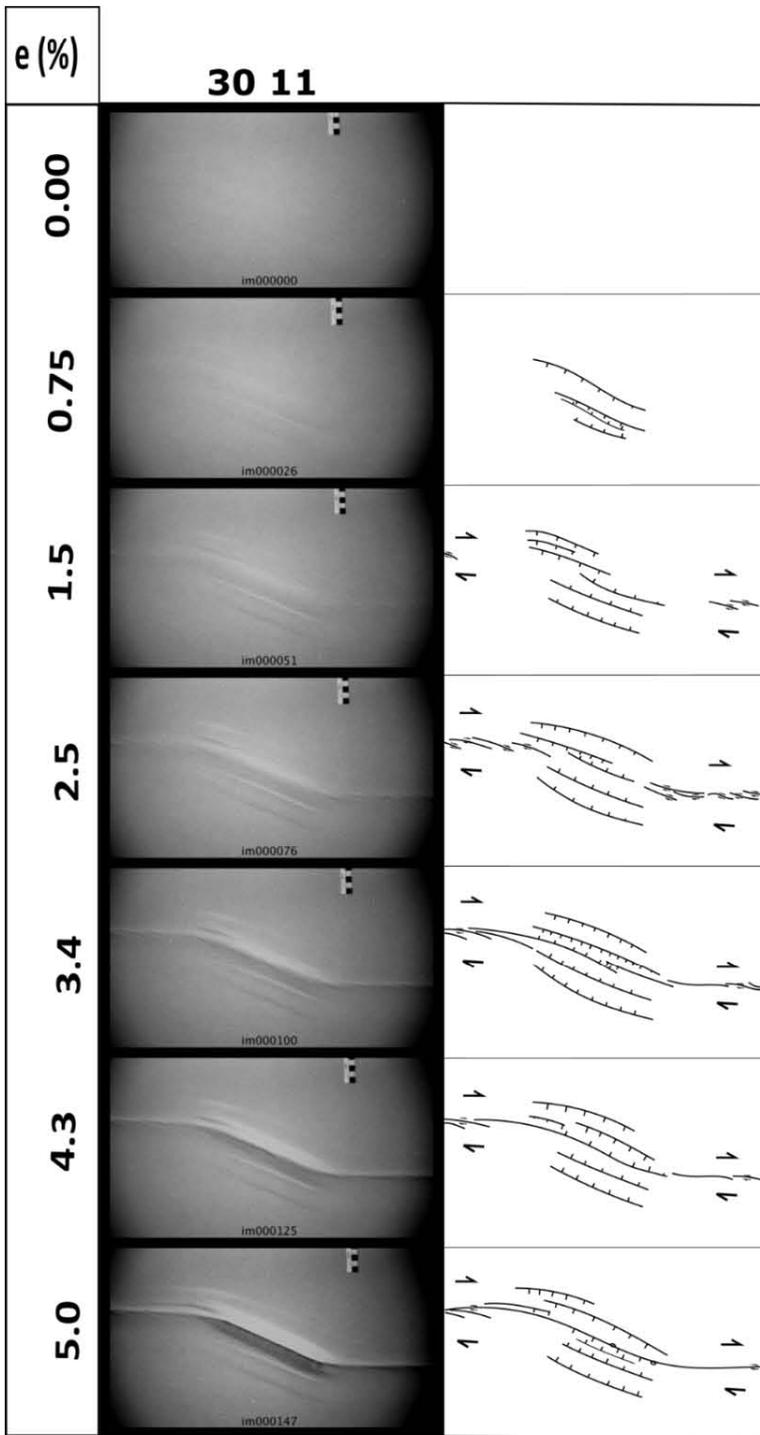


Figura 73. La imagen muestra el montaje "30 11" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

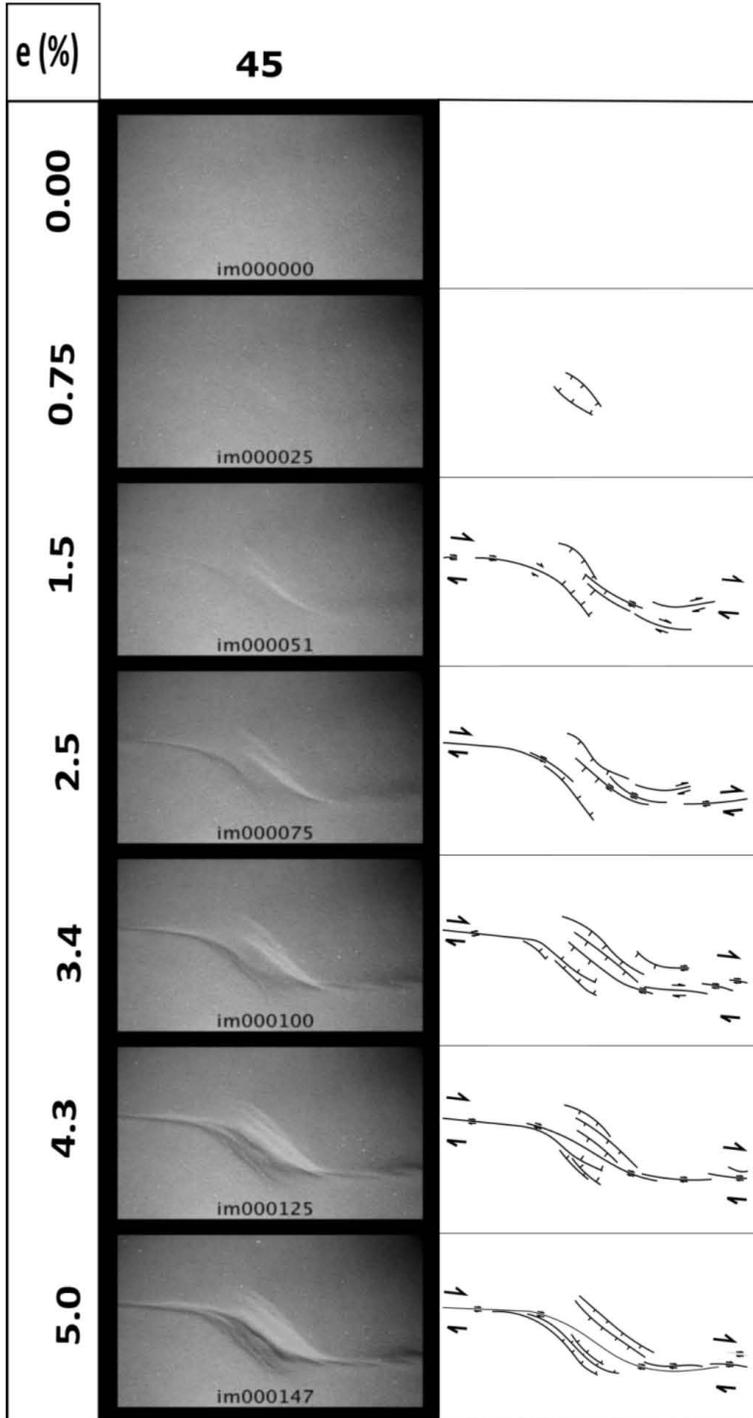
9.2.3.- Montajes ángulo $\alpha 45^\circ$ 

Figura 74. La imagen muestra el montaje "45" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

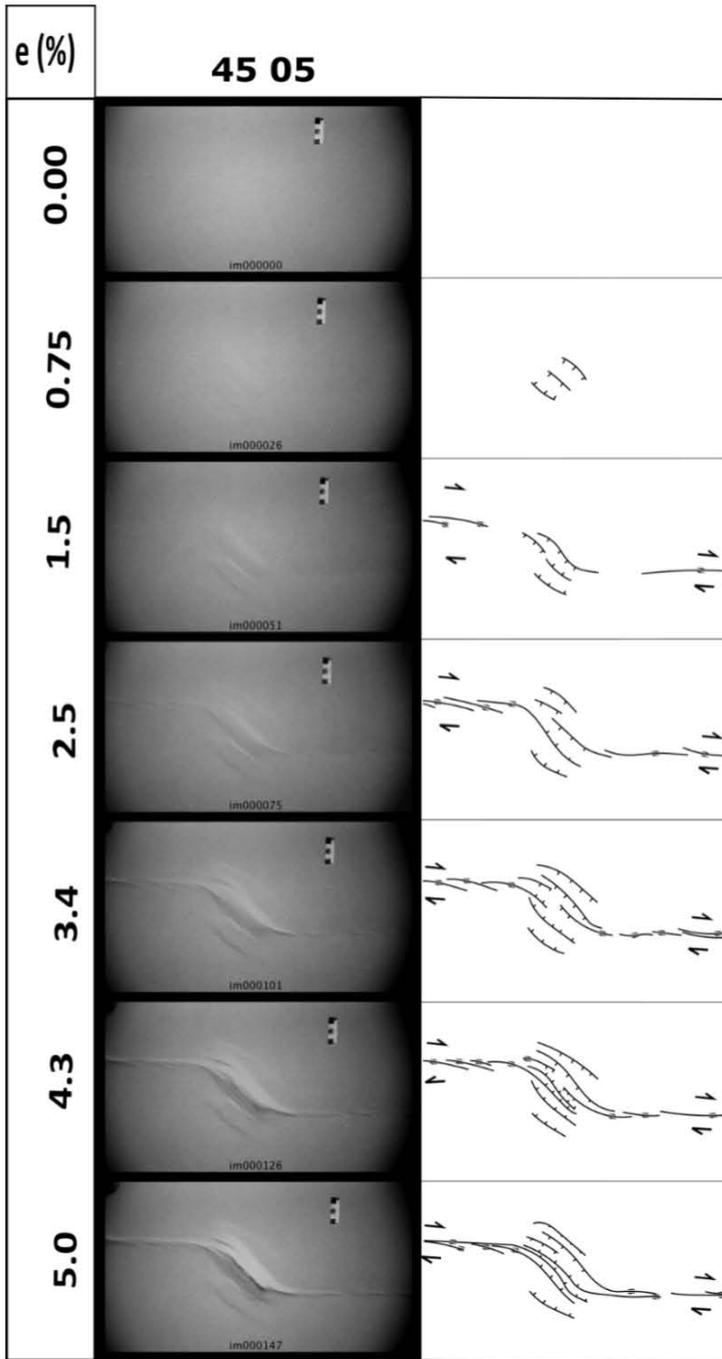


Figura 75. La imagen muestra el montaje "45 05" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

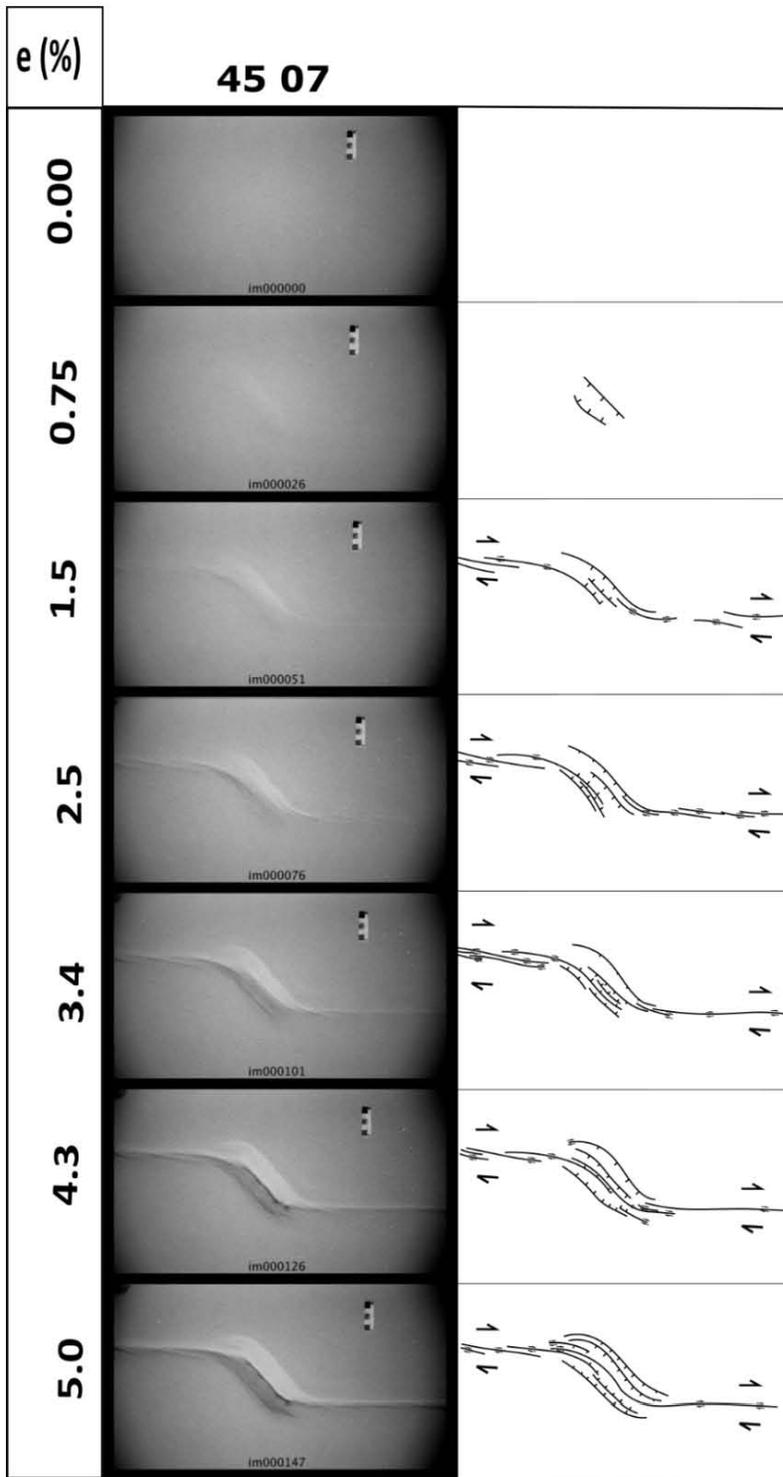


Figura 76. La imagen muestra el montaje “45 07” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

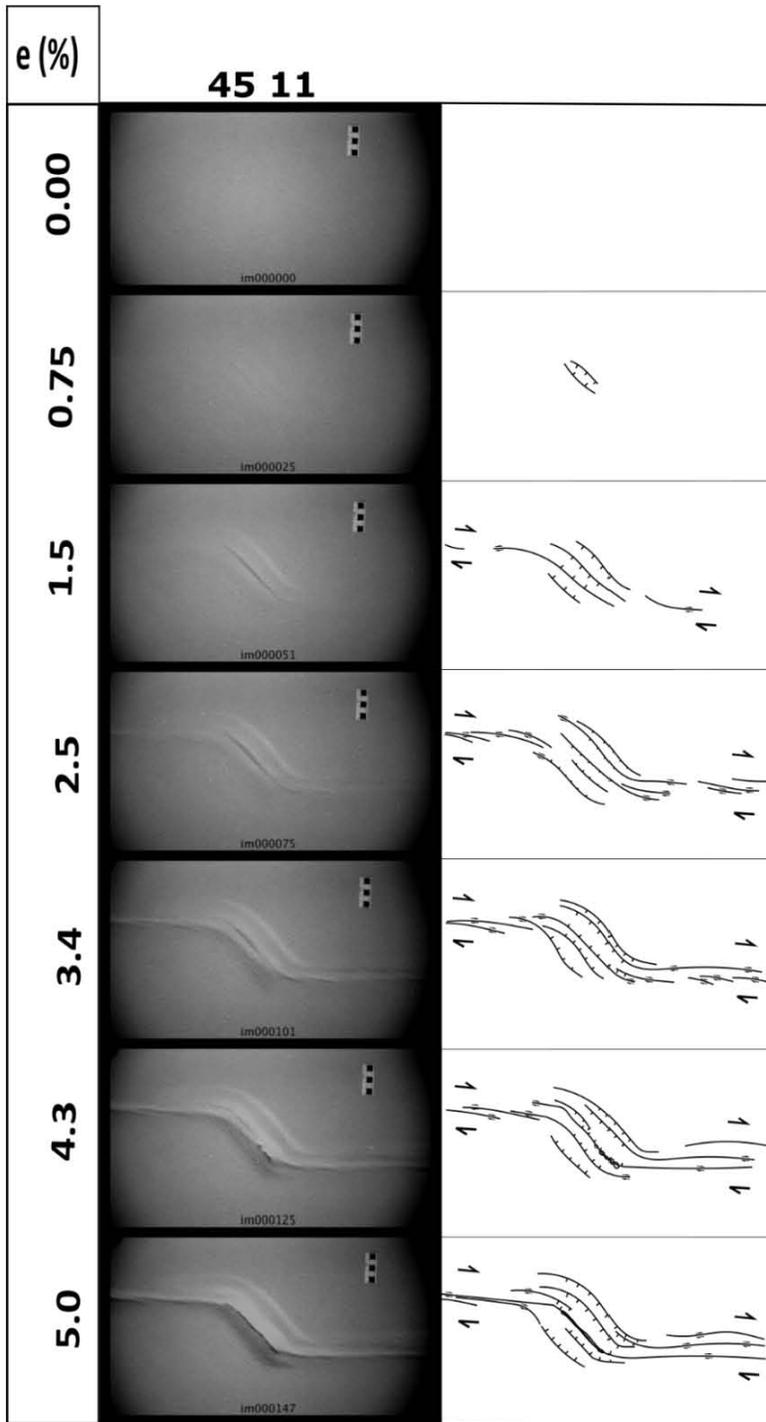


Figura 77. La imagen muestra el montaje “45 11” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

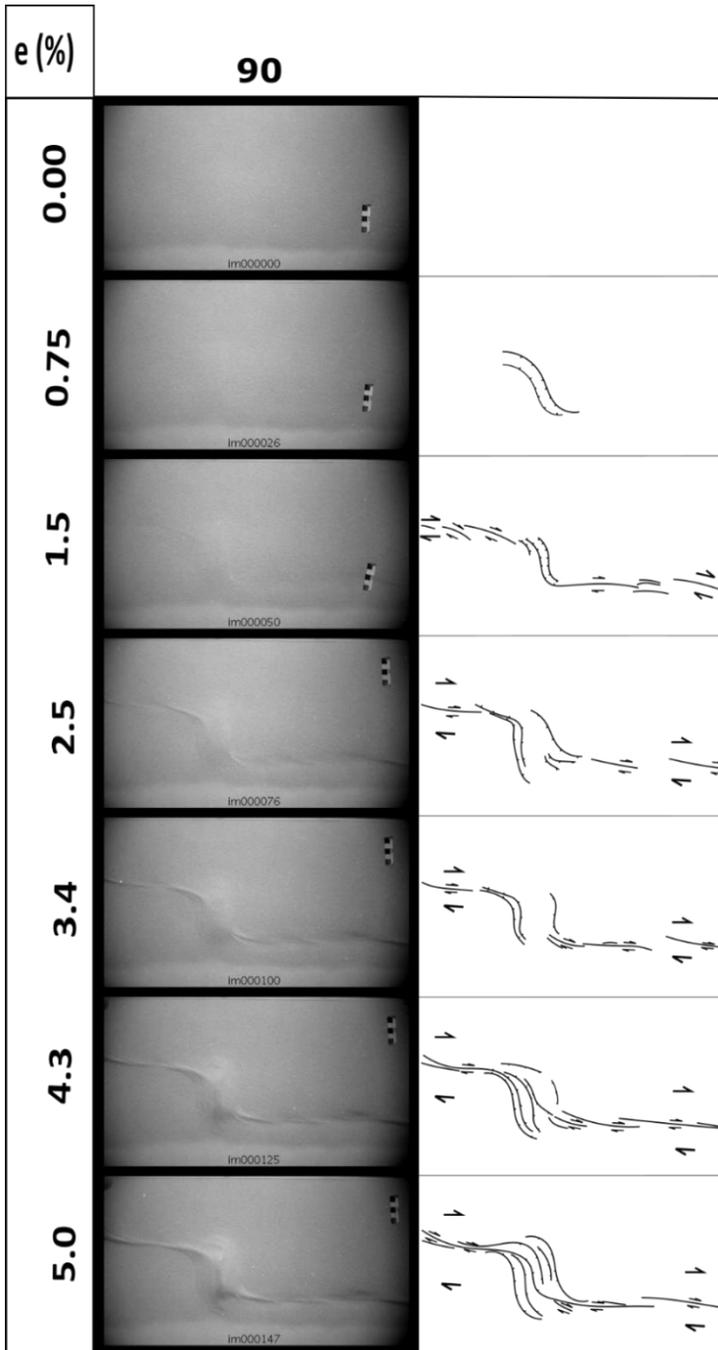
9.2.4.- Montajes ángulo $\alpha 90^\circ$ 

Figura 78. La imagen muestra el montaje "90" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

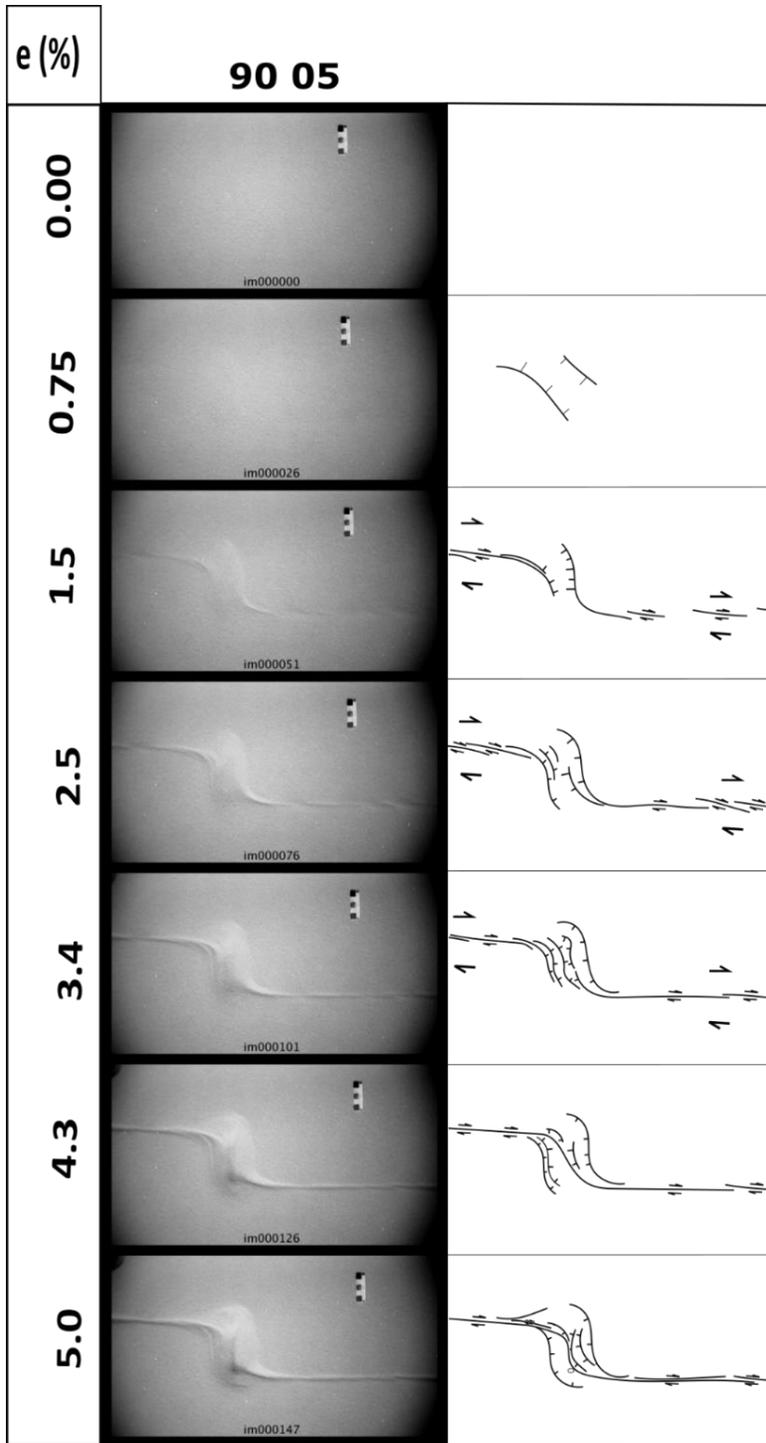


Figura 79. La imagen muestra el montaje “90 05” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

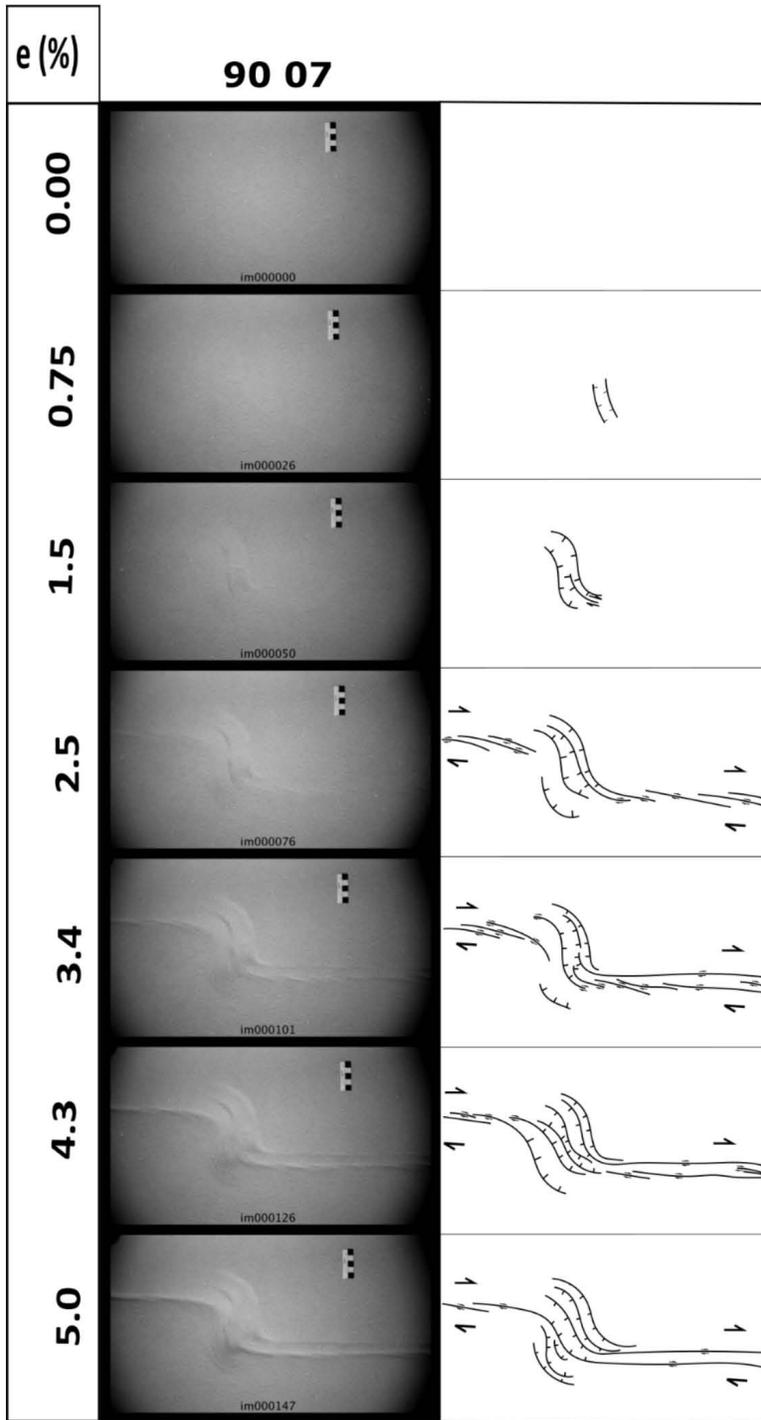


Figura 80. La imagen muestra el montaje "90 07" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

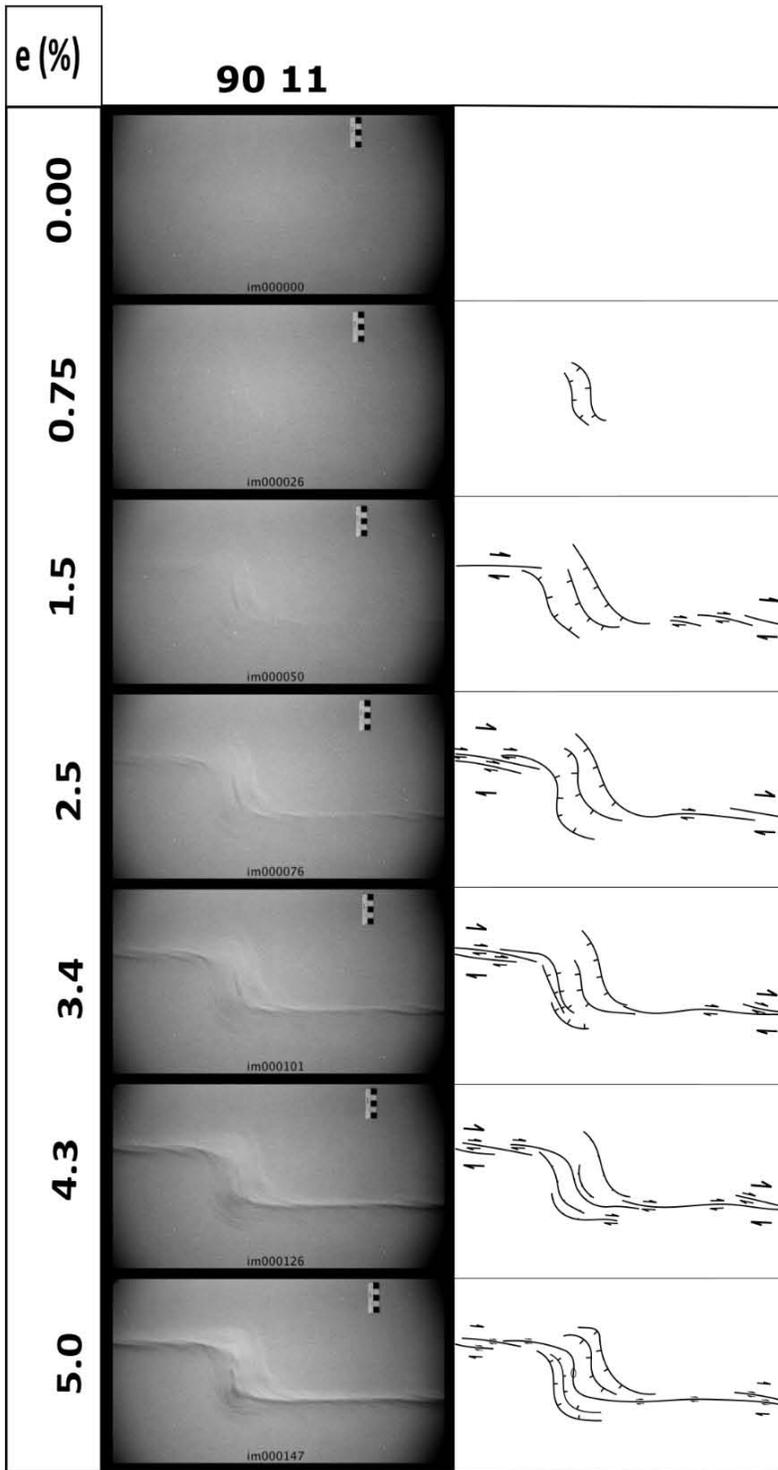


Figura 81. La imagen muestra el montaje “90 11” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

9.3.- Montajes serie experimental "II"

9.3.1.- Montajes ángulo $\alpha 25^\circ$

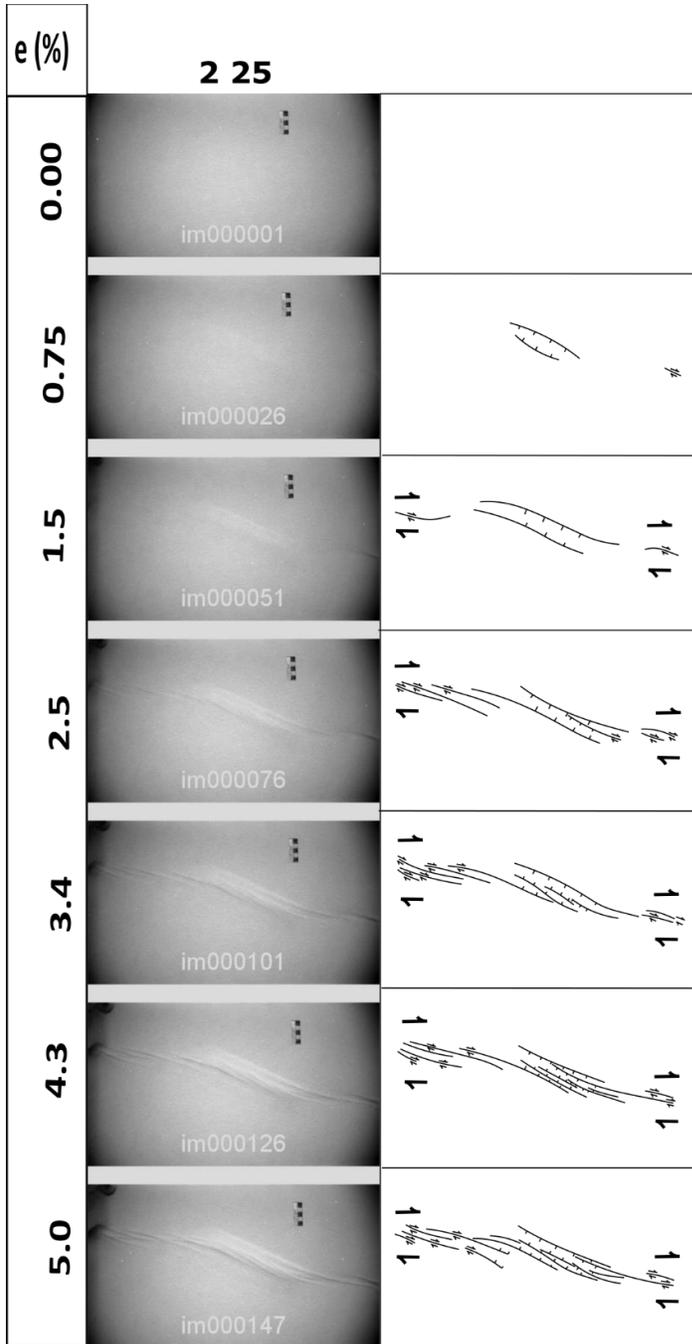


Figura 82. La imagen muestra el montaje "2 25" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

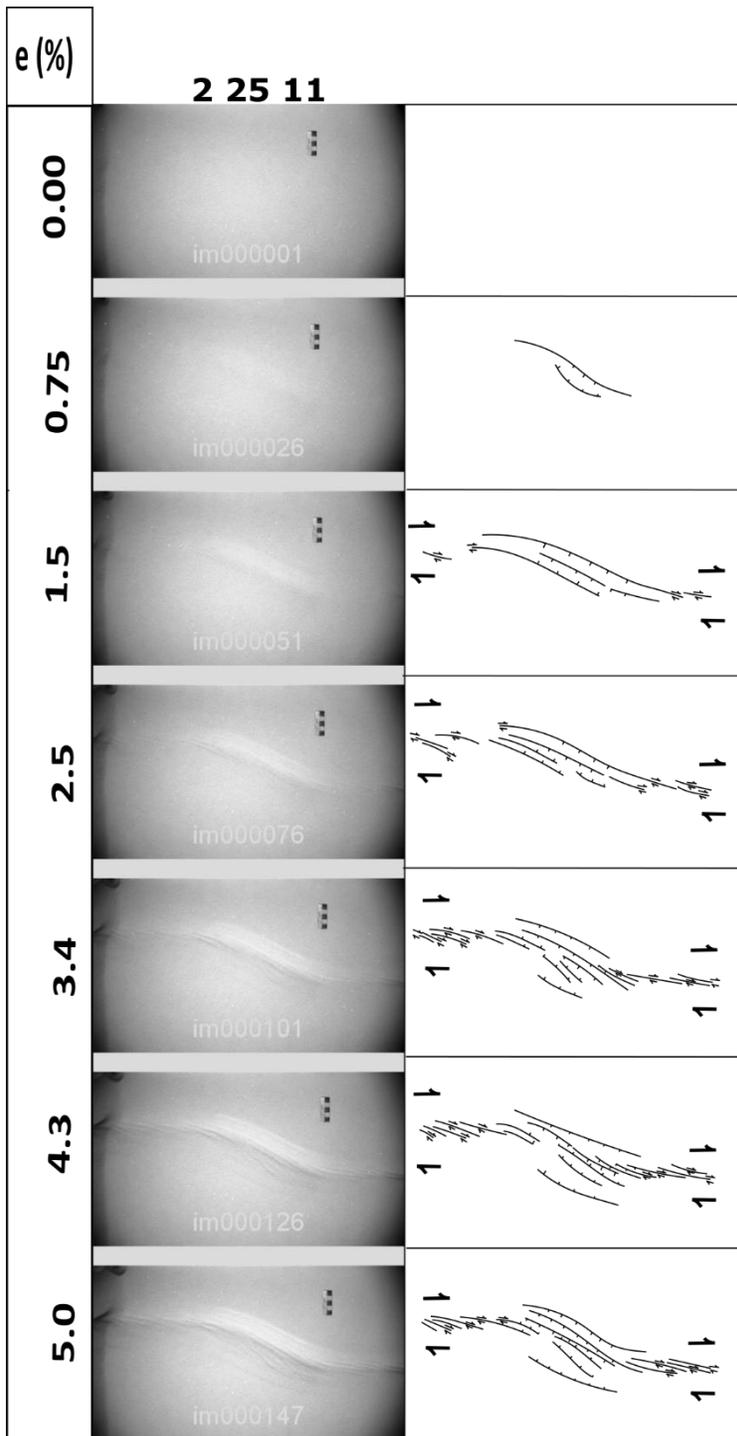


Figura 83La imagen muestra el montaje “2 25 11” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

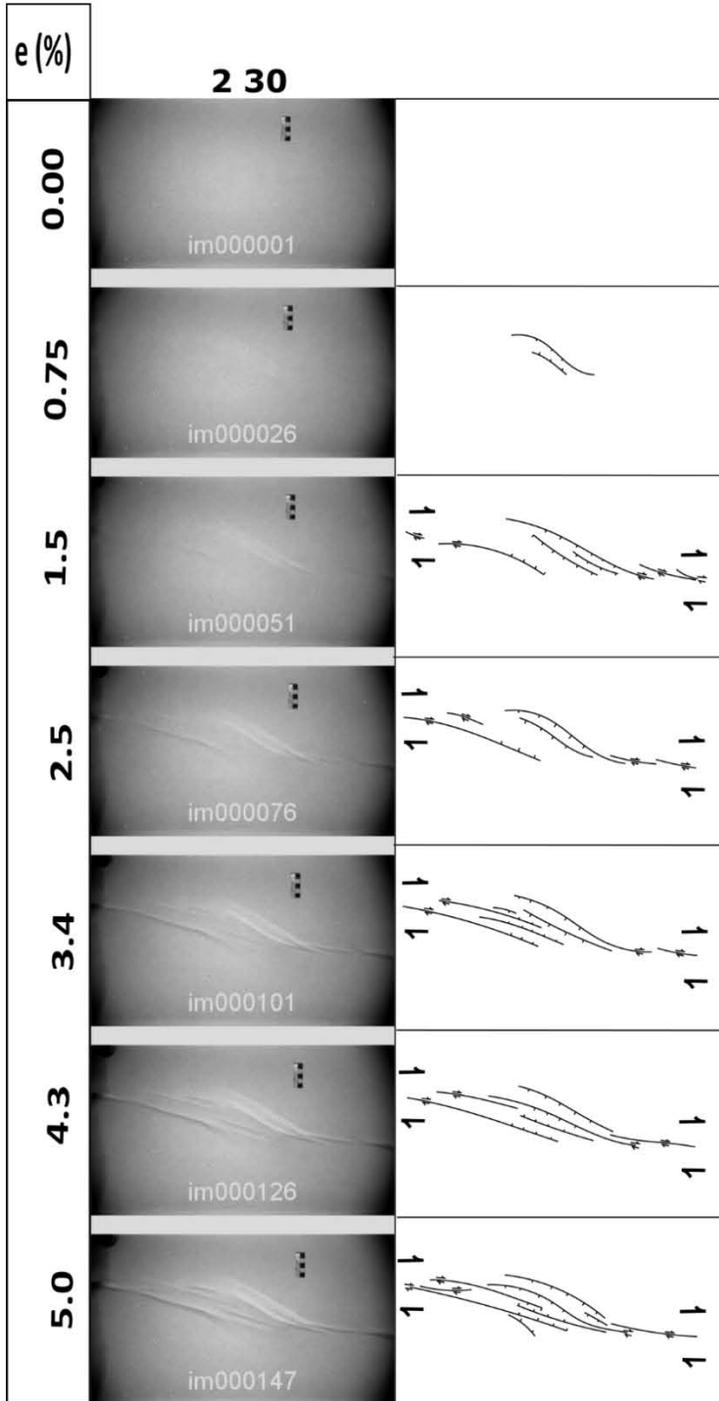
9.1.3.- Montajes ángulo $\alpha 30^\circ$ 

Figura 84. La imagen muestra el montaje "2 30" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

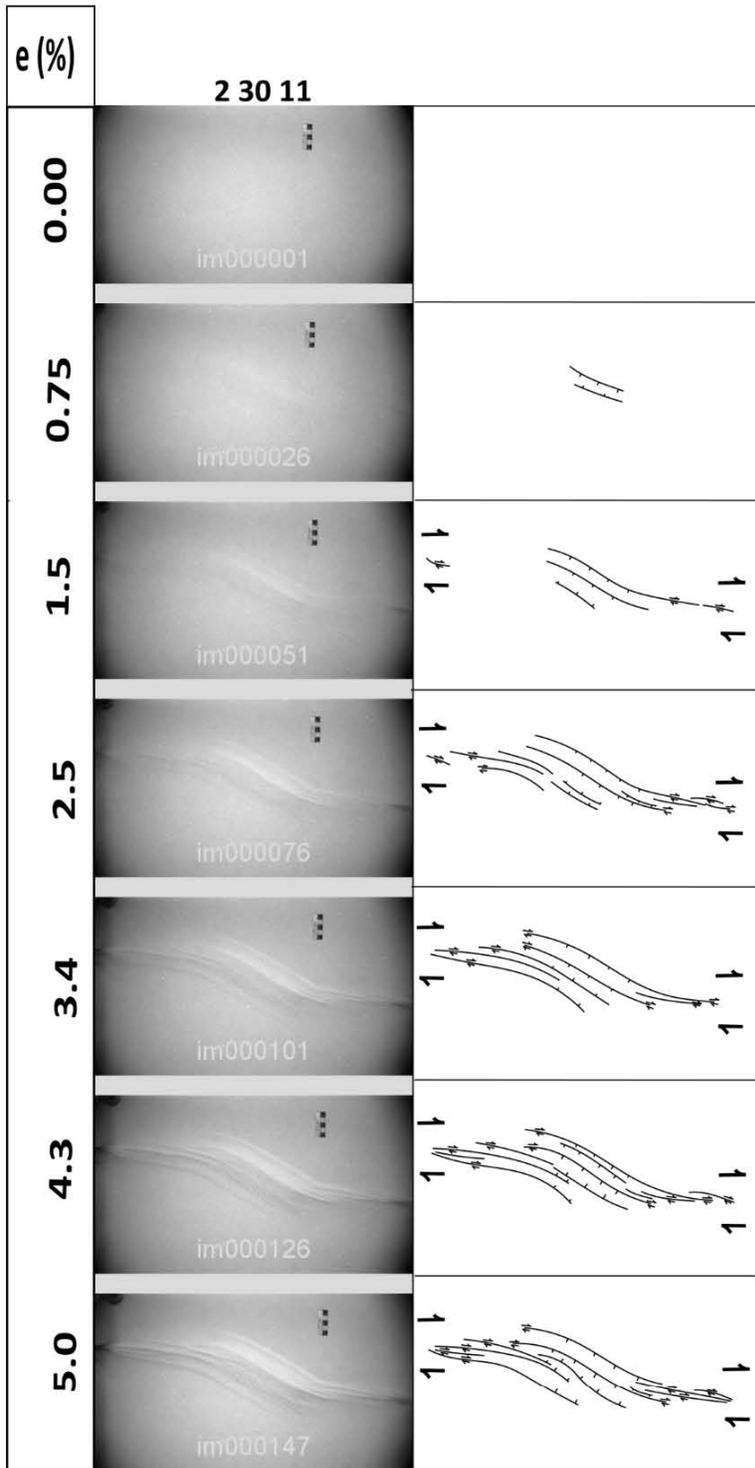


Figura 85. La imagen muestra el montaje "2 30 11" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

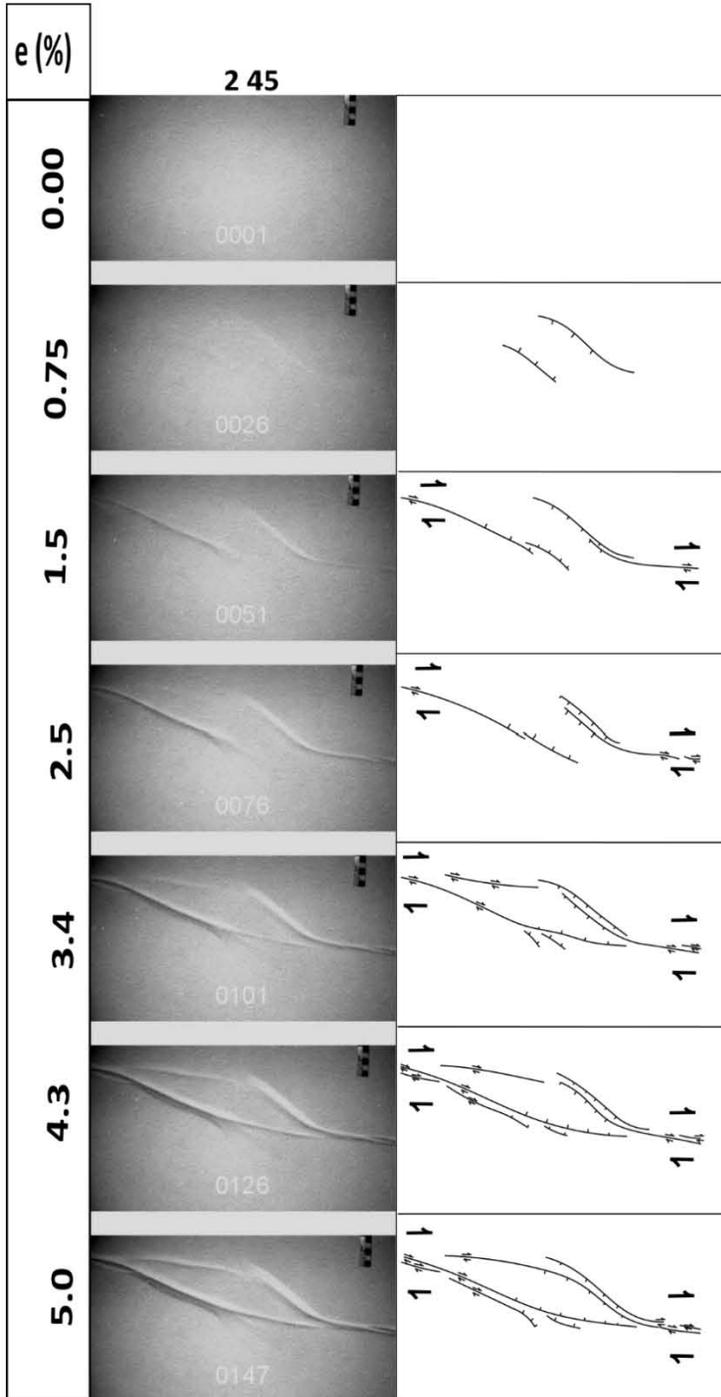
9.3.2.- Montajes ángulo $\alpha 45^\circ$ 

Figura 86. La imagen muestra el montaje "2 45" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

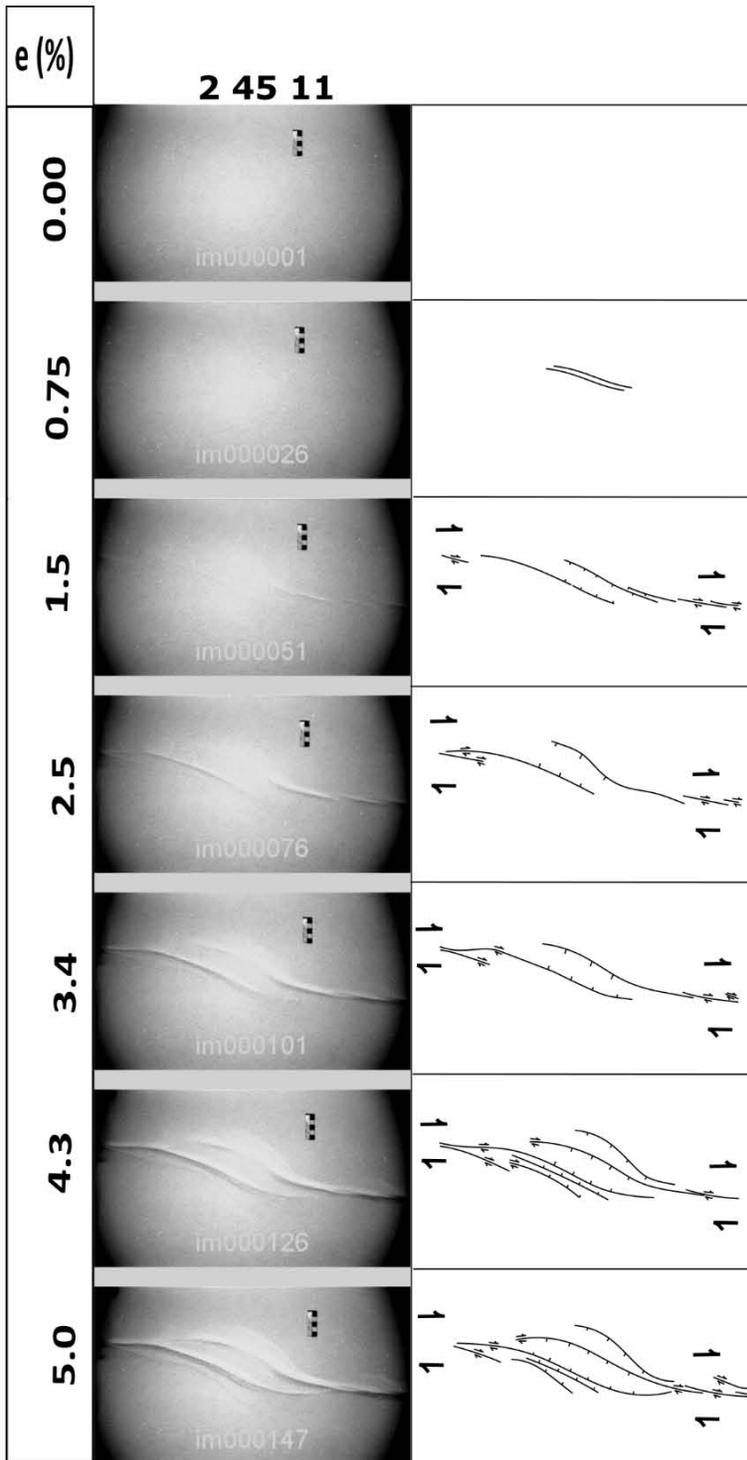


Figura 87. La imagen muestra el montaje "2 45 11" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

9.3.4.- Montajes ángulo $\alpha 90^\circ$

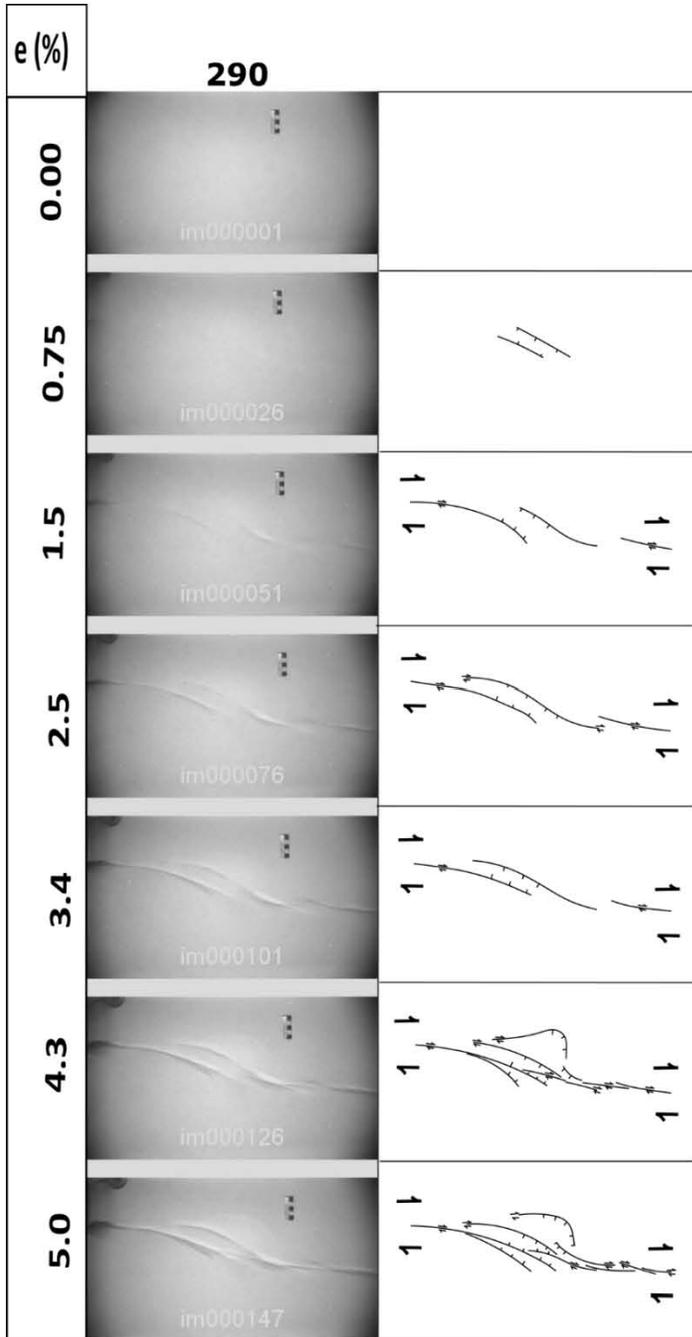


Figura 88. La imagen muestra el montaje "2 90" (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

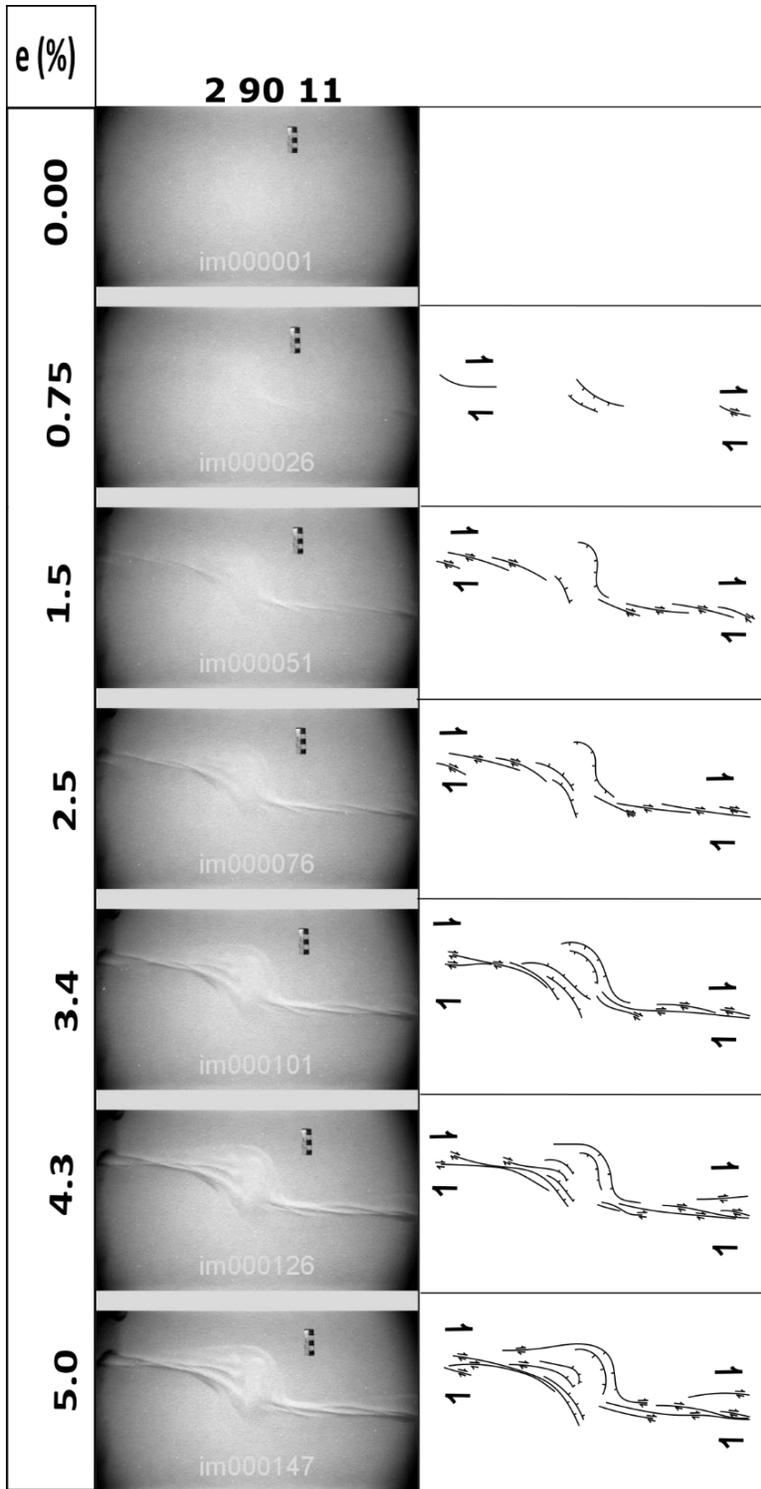


Figura 89. La imagen muestra el montaje “2 90” (izquierda) con sus distintos y progresivos estados de deformación (e %) y la interpretación (derecha) de sus estructuras.

9.4.- Modelos de elevación, serie experimental "I"

9.4.1 Modelos de elevación ángulo $\alpha 25^\circ$

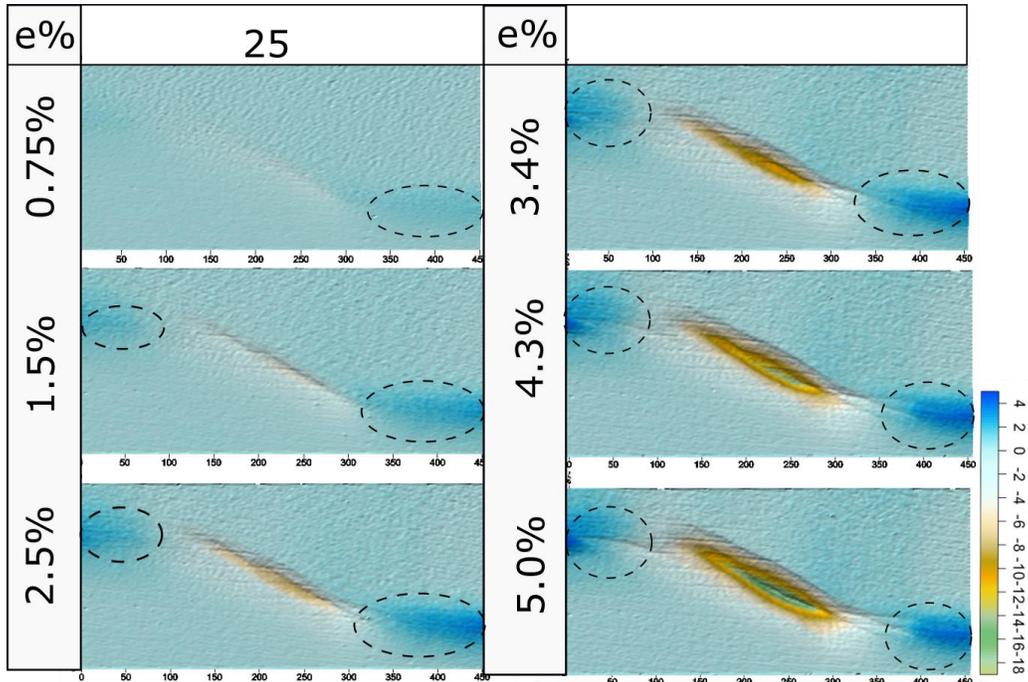


Figura 90. Muestra los modelos de elevación del experimento "25". Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

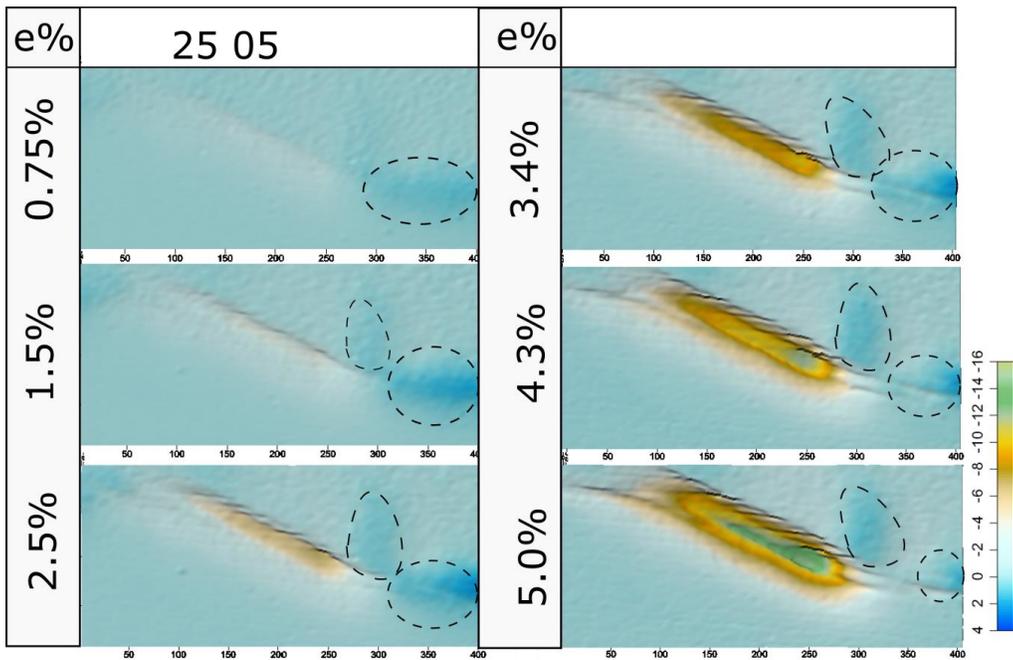


Figura 91. Muestra los modelos de elevación del experimento "25 05". Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

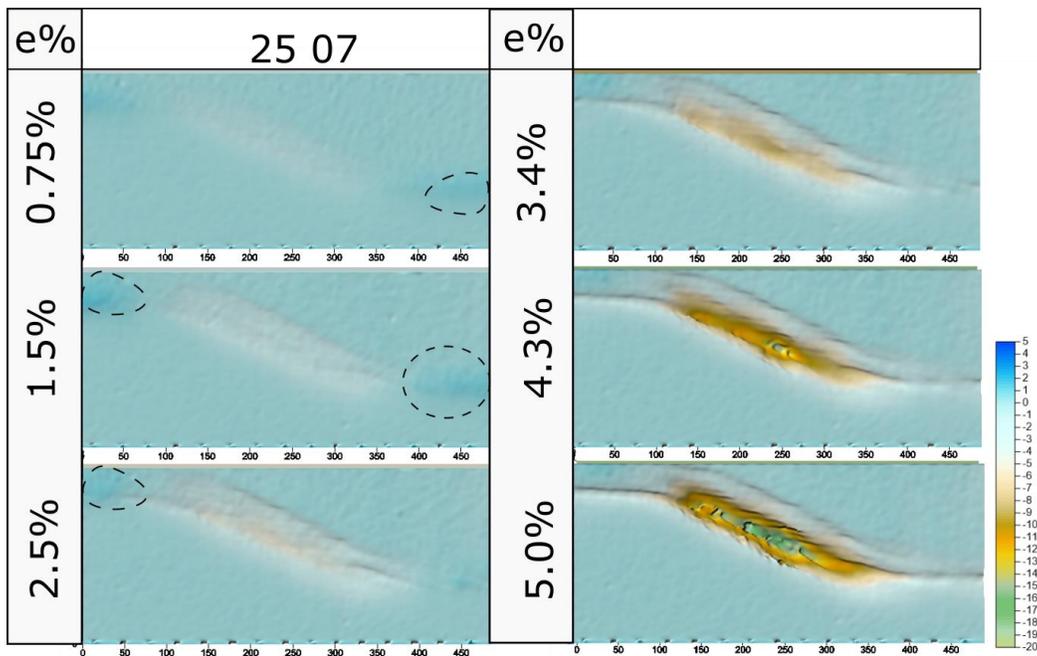


Figura 92. Muestra los modelos de elevación del experimento "25 07". Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

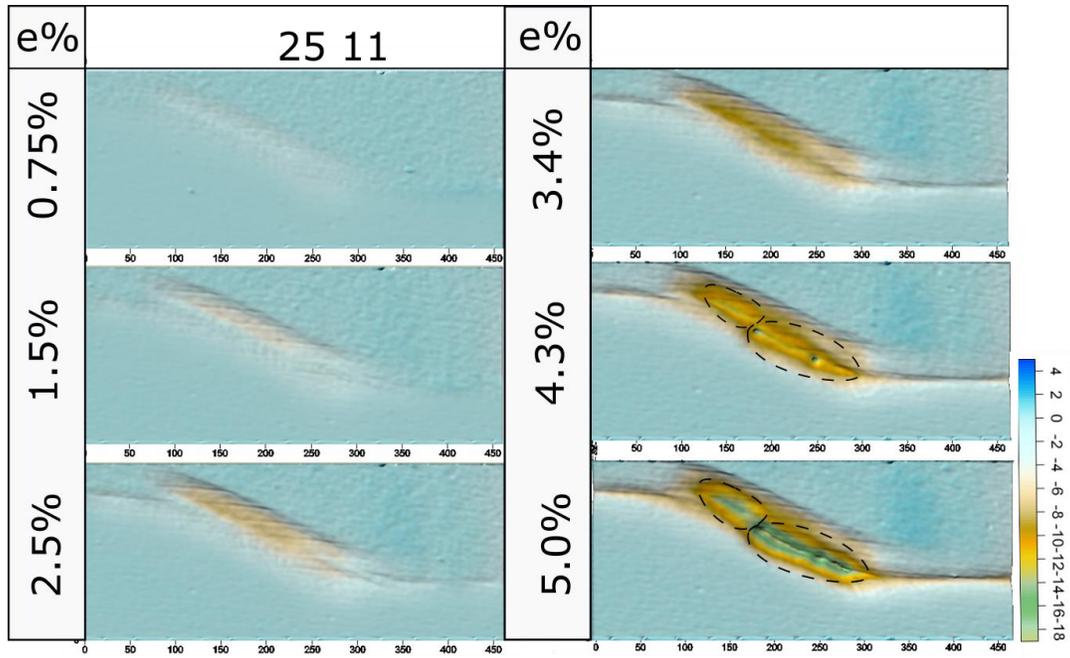


Figura 93. Muestra los modelos de elevación del experimento "25 11". Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

9.4.2.- Modelos de elevación ángulo α 30°

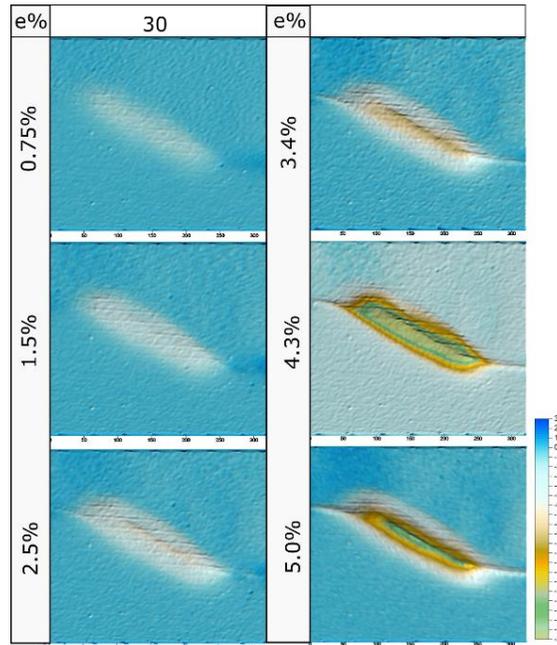


Figura 94. Muestra los modelos de elevación del experimento "30". Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

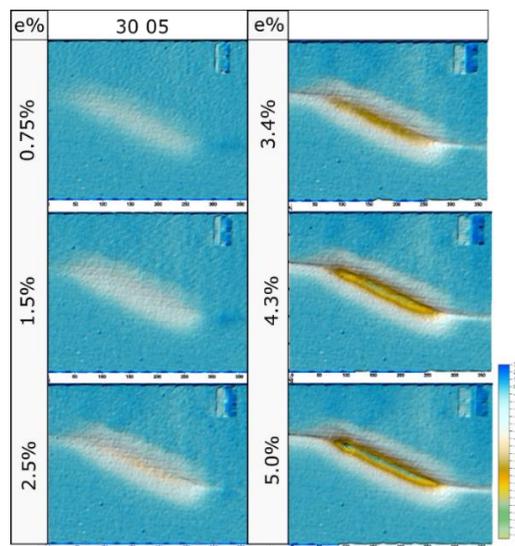


Figura 95. Muestra los modelos de elevación del experimento "30 05". Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

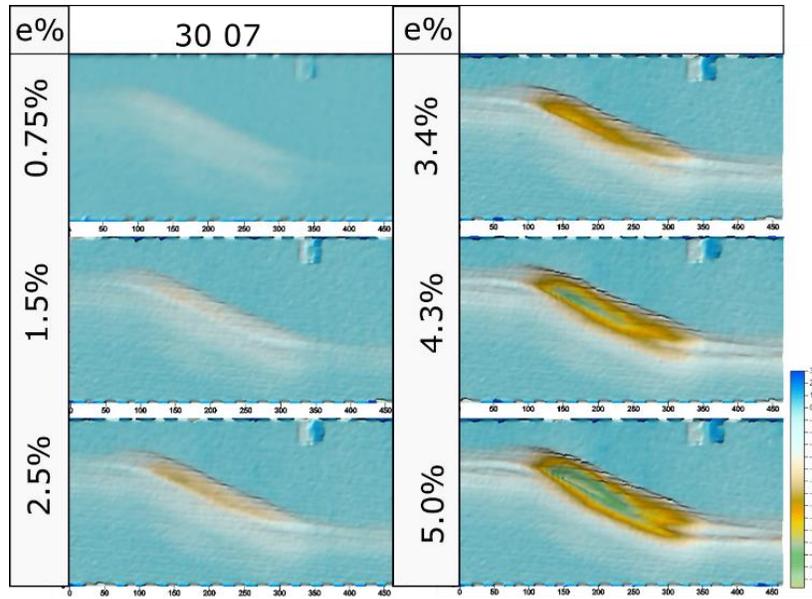


Figura 96. Muestra los modelos de elevación del experimento "30 07". Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

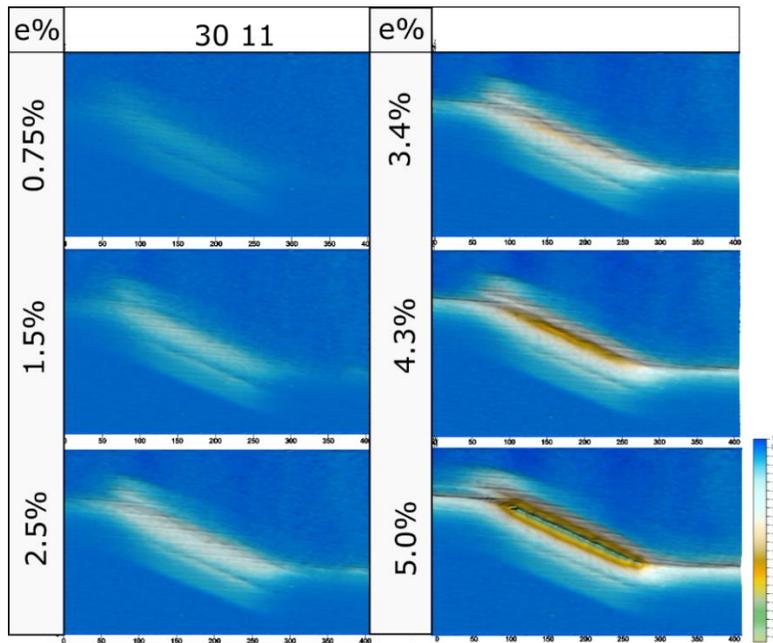


Figura 97. Muestra los modelos de elevación del experimento "30 11". Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

9.4.3.- Modelos de elevación ángulo $\alpha 45^\circ$

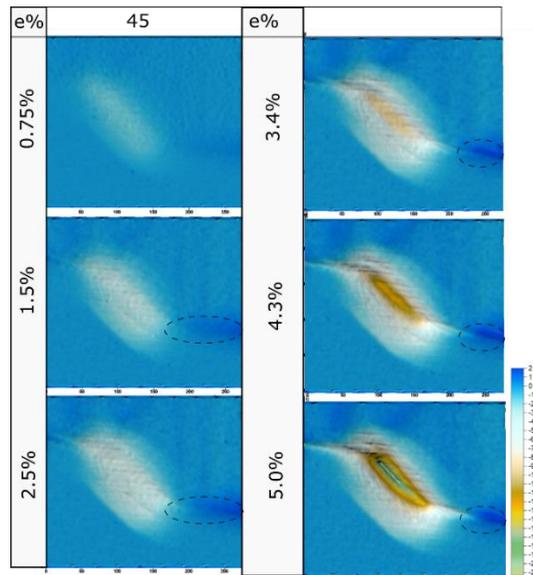


Figura 98. Muestra los modelos de elevación del experimento “45”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

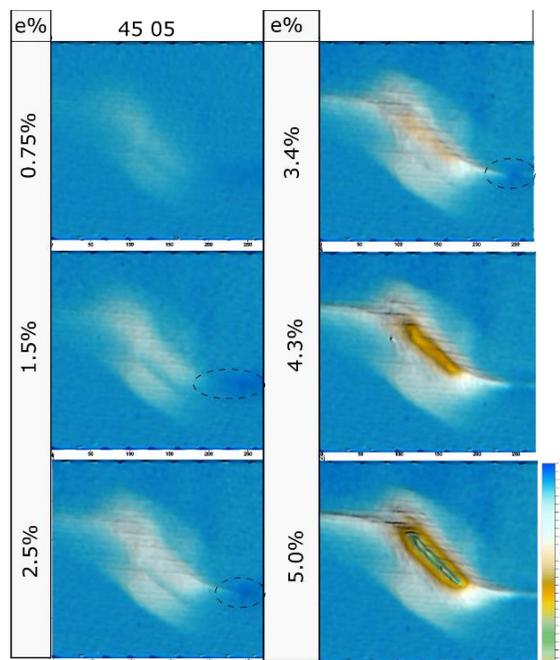


Figura 99. Muestra los modelos de elevación del experimento “45 05”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

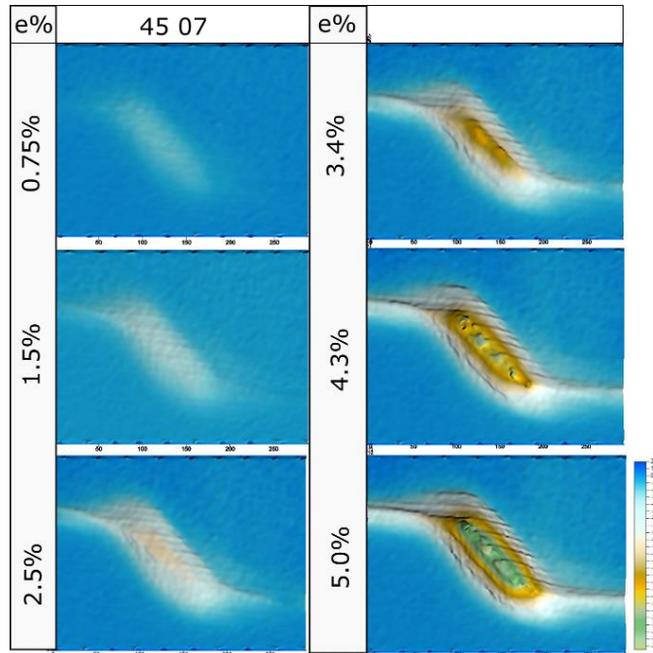


Figura 100. Muestra los modelos de elevación del experimento “45 07”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

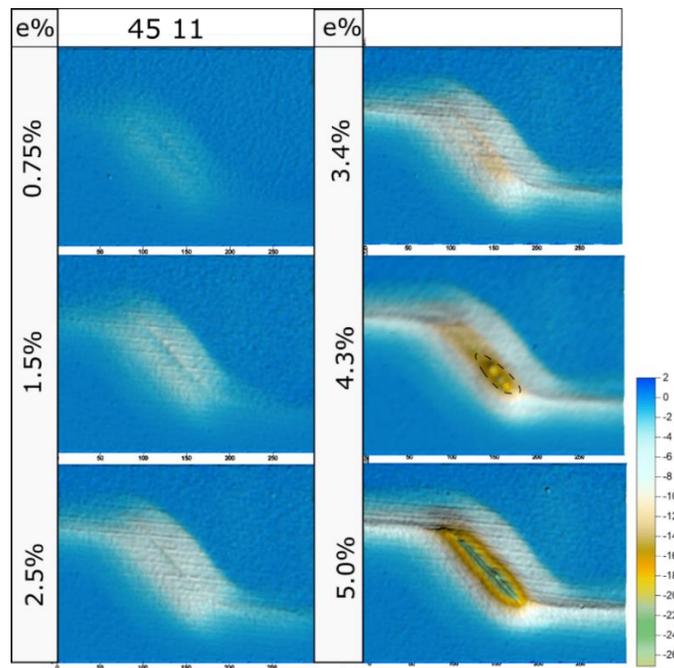


Figura 101. Muestra los modelos de elevación del experimento “45 11”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

9.4.4.- Modelos de elevación ángulo $\alpha 90^\circ$

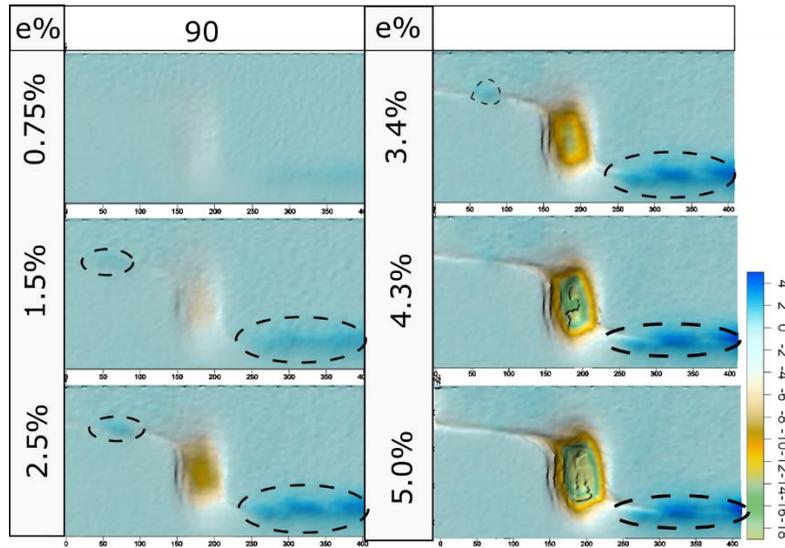


Figura 102. Muestra los modelos de elevación del experimento “90”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

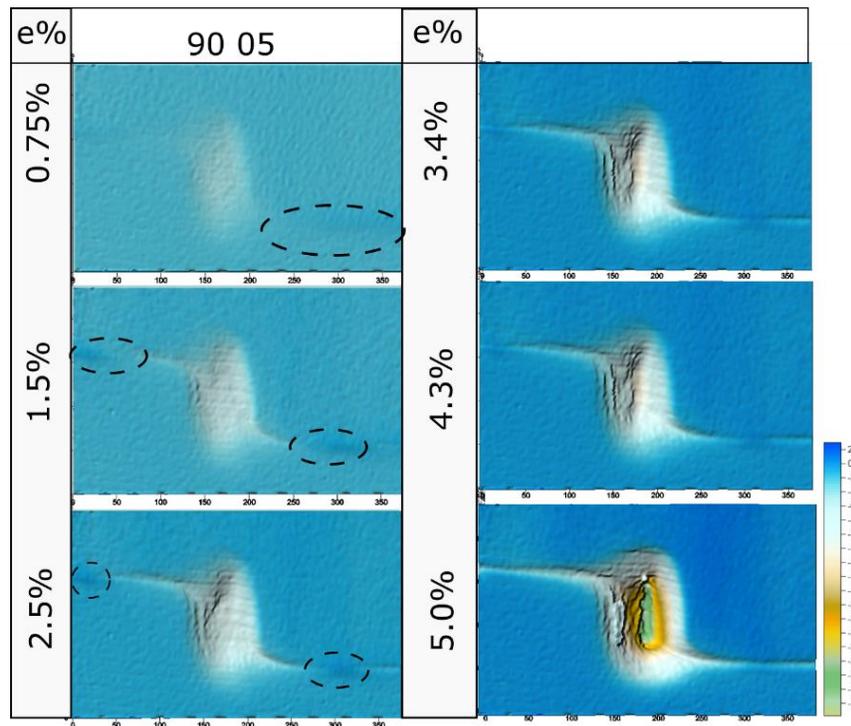


Figura 103. Muestra los modelos de elevación del experimento “90 05”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

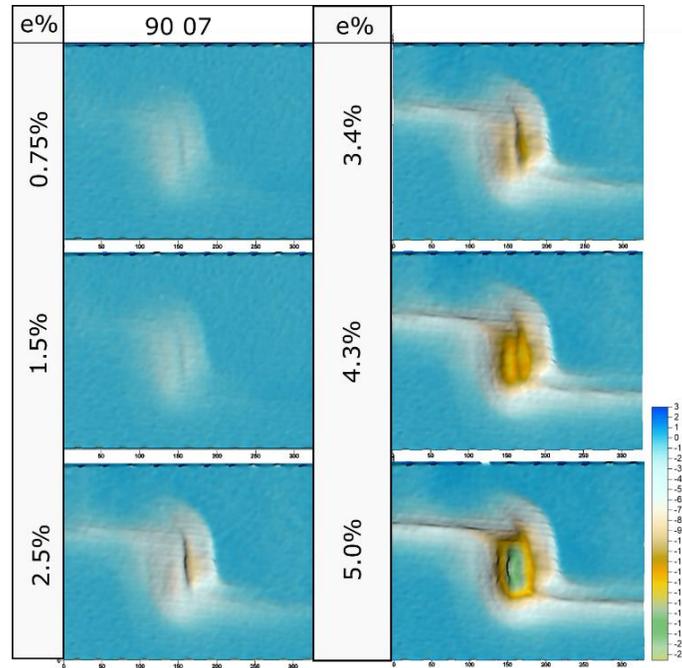


Figura 104. Muestra los modelos de elevación del experimento “90 07”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

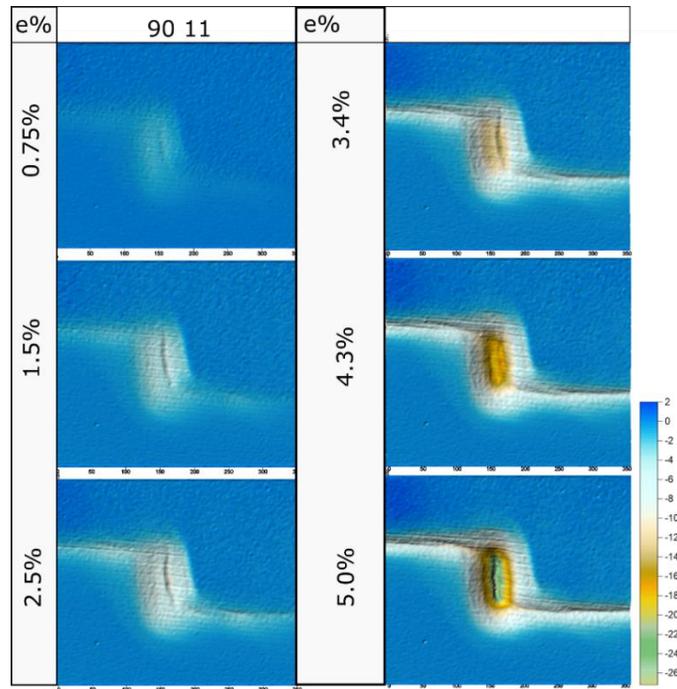


Figura 105. Muestra los modelos de elevación del experimento “90 11”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

9.5.- Modelos de elevación, serie experimental "II"

9.5.1 Modelos de elevación ángulo $\alpha 25^\circ$

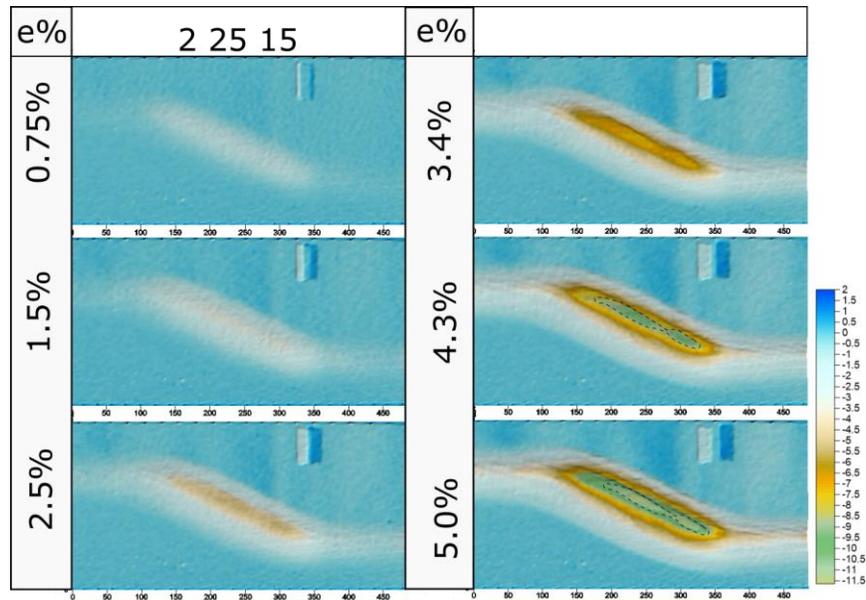


Figura 106. Muestra los modelos de elevación del experimento "2 25". Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

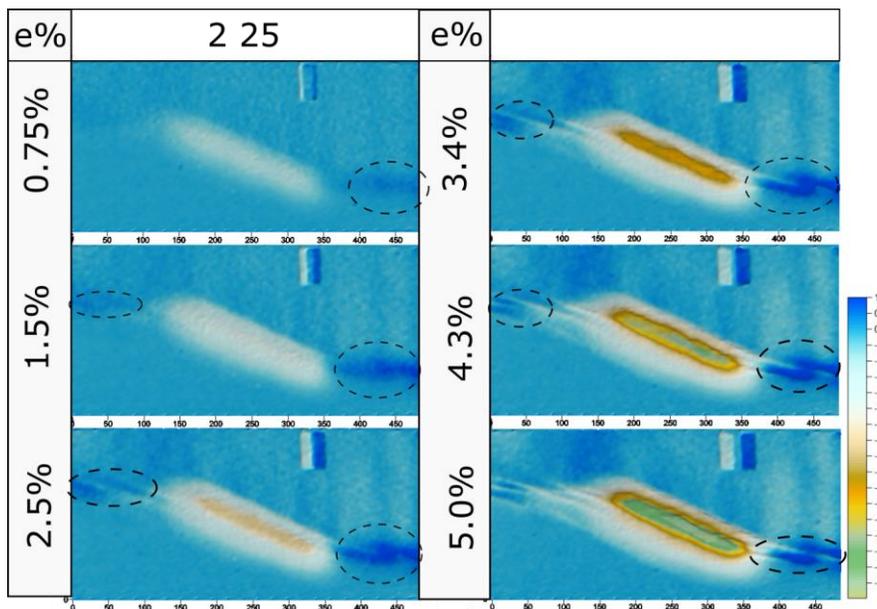


Figura 107. Muestra los modelos de elevación del experimento "2 25 11". Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

9.5.2.- Modelos de elevación ángulo $\alpha 30^\circ$

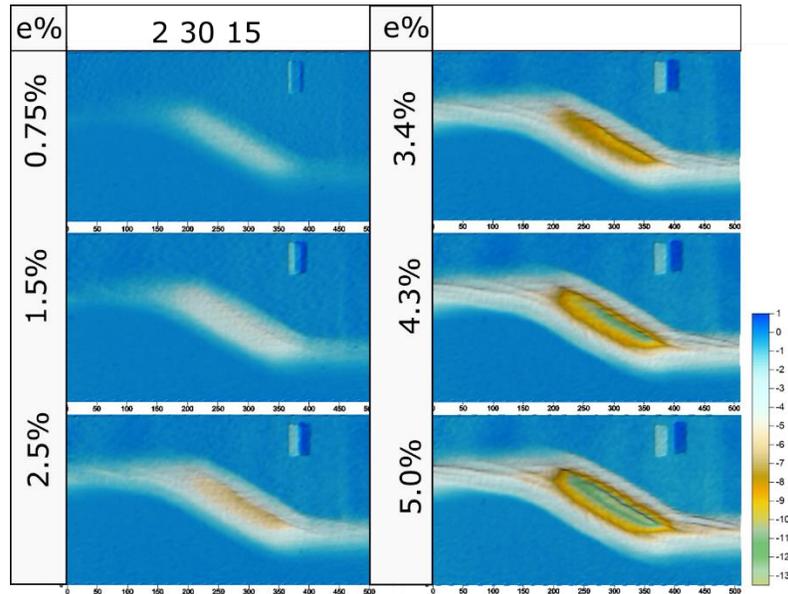


Figura 108. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 30”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

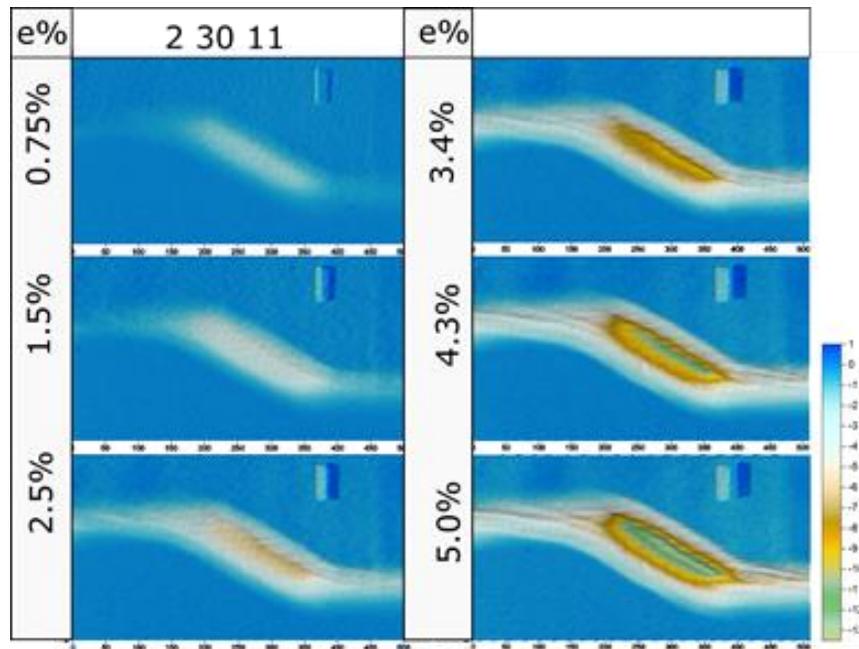


Figura 109. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 30 11”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

9.5.3.- Modelos de elevación ángulo $\alpha 45^\circ$

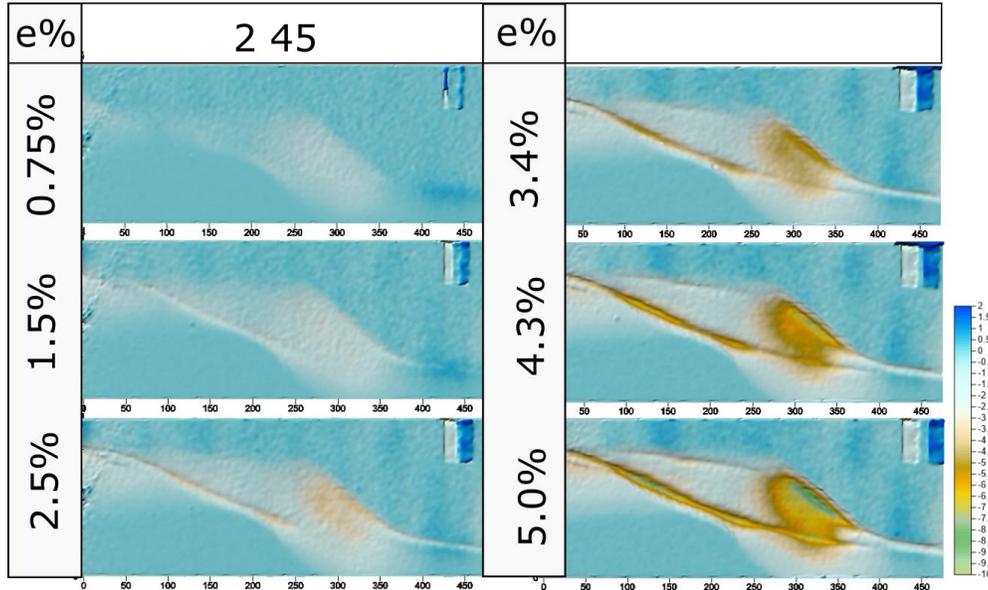


Figura 110. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 45”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

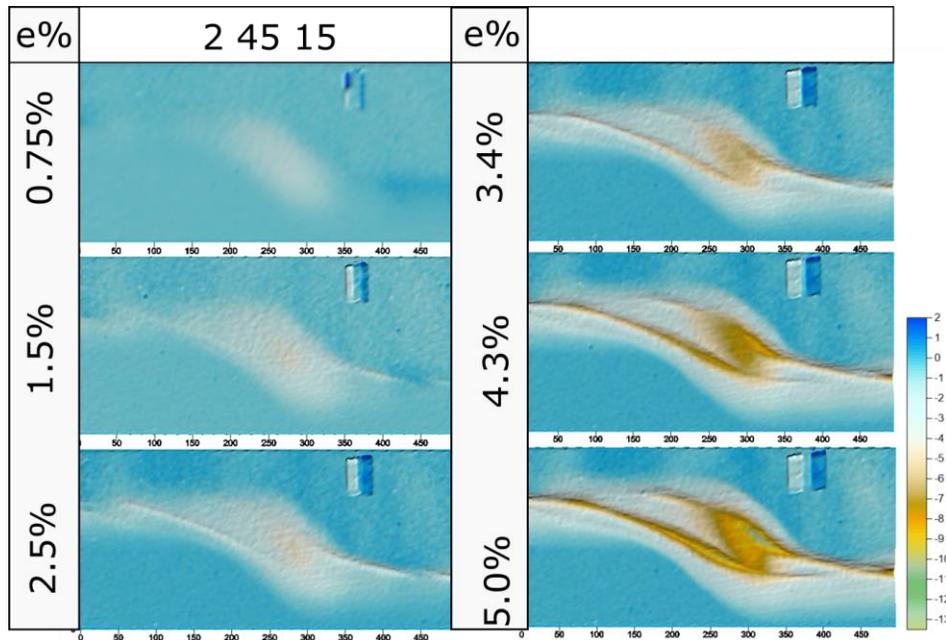


Figura 111. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 45 11”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

9.5.4.- Modelos de elevación ángulo $\alpha 90^\circ$

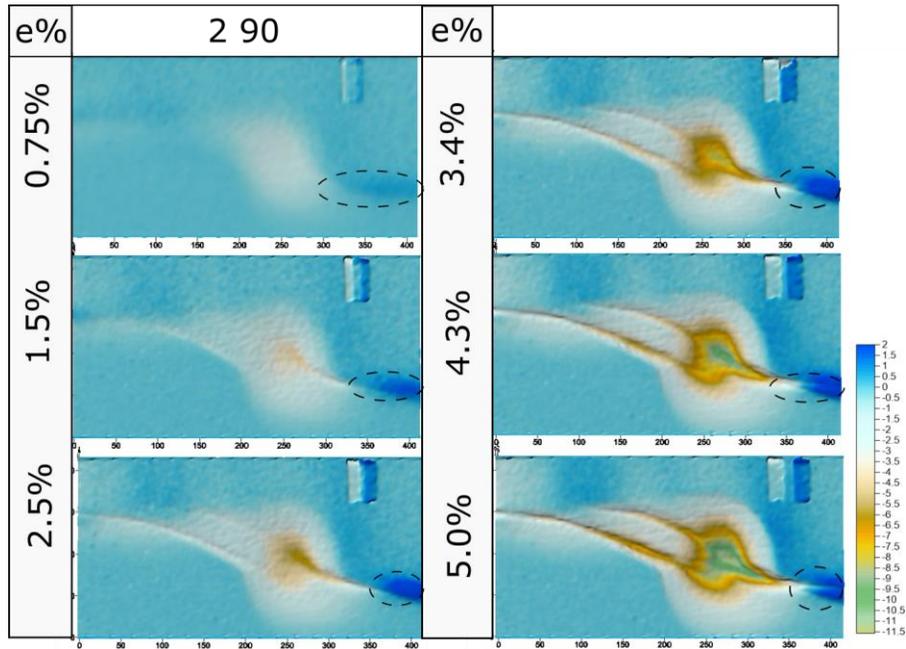


Figura 112. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 90”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.

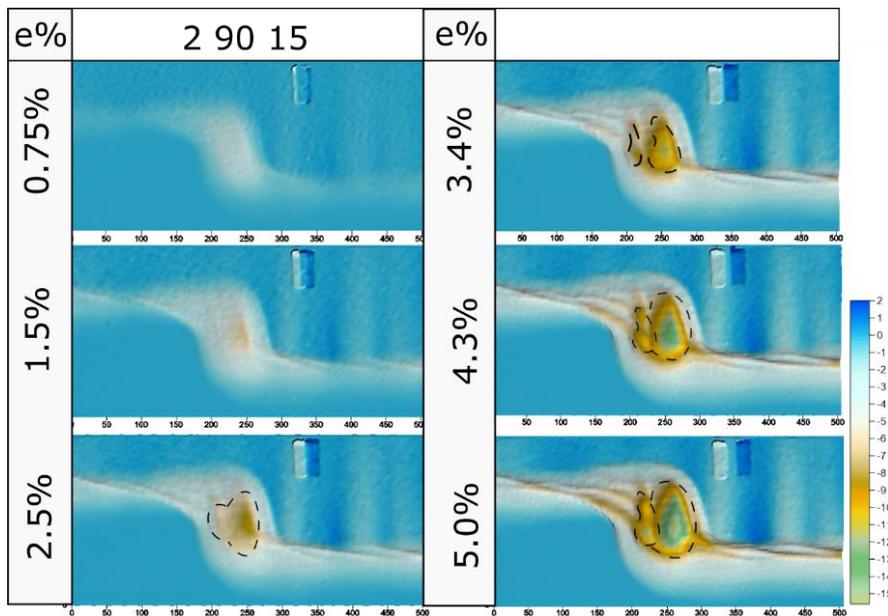


Figura 113. Muestra los modelos de elevación del experimento “2 90 11”. Se observa; estado de deformación (%), vista en planta que muestra los distintos rasgos de las cuencas pull-apart y su escala de colores que indican alturas, en círculos punteados zonas con elevación positiva.