

**ANÁLISIS DE ESTILOS ESTRUCTURALES A PARTIR DE MODELOS
ANÁLOGOS.
(Ambientes compresivos.)**

CAMILO ALBERTO ANAYA ARIAS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2016**

**ANÁLISIS DE ESTILOS ESTRUCTURALES A PARTIR DE MODELOS
ANÁLOGOS.
(Ambientes compresivos.)**

CAMILO ALBERTO ANAYA ARIAS

Trabajo de grado para optar al título de: Geólogo

**Director:
GIOVANNY JIMÉNEZ DÍAZ
Geólogo Phd.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2016**

DEDICATORIA

Éste trabajo va dedicado a todas aquellas personas que se piensan, y que reconocen en el conocimiento el único camino para la verdadera emancipación de las mentes, develando las imposturas propias de cada modelo y cada camino.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a todos y cada uno de los partícipes y colaboradores de esta investigación, a Juan Carlos Motta, Diego Armando Núñez, Diego Osorio, Yesid Paul Goyez, Hernando Alzate, Jorge Luis Santamaria, Leonardo Pinto, y de más.

Al Profesor Giovanny Jimenez por la confianza depositada en mí, que se materializo en esta investigación, por sus aportes a la formación profesional y personal de quien escribe.

Al Profesor Julián López, por su indirectamente directa participación, por la duda que siembra en todos sus pupilos.

Al Profesor Jairo Clavijo, por ser el gran maestro que es.

A la Universidad Industrial de Santander, y sus auxiliares por facilitar todos los espacios para el desarrollo de esta investigación.

A mi familia, a mis amigos, a los que están, estuvieron y estarán.

Y por último y no menos importante, a mi MADRE, por su paciencia, cariño y comprensión, sin ella nada de esto sería posible.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	17
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	17
1.2 OBJETIVOS.	18
1.2.1 Objetivos generales	18
1.2.2 Objetivos específicos.	19
1.3 JUSTIFICACIÓN.	19
1.4 APARTES Y APORTES DEL MODELAMIENTO ANÁLOGO EN LA GEOLOGÍA.	20
2. MARCO TEÓRICO.	22
2.1 MODELO DE CUÑA CRÍTICA DE FRICCIÓN (MOHR-COULOMB)	22
2.2 ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS ASOCIADAS A CC Y/O FPF.	26
2.3 TEORÍA DE ESCALADO DINÁMICO.	32
2.4 TEORÍA FRACTAL Y AUTO-SIMILITUD EN ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS.	33
2.5 ANGULO DE REPOSO Y COEFICIENTE DE FRICCIÓN INTERNA.	34
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.	36
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	36
3.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.	36
3.3 FASE DE LABORATORIO, ADQUISICIÓN DE DATOS.	37

4. RESULTADOS.	39
4.1 MONTAJE EXPERIMENTAL.	39
4.2 FASE DE LABORATORIO, PROCESAMIENTO DE DATOS.	55
5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.	66
6. DISCUSIÓN.	67
7. CONCLUSIONES.	77
BIBLIOGRAFÍA	78

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modelo mecánico de la cuña crítica. a) La cuña se encuentra en estado crítico, siendo su pendiente $\Phi_c = \alpha_1 + \beta$; b) La cuña presenta una pendiente superior a Φ_c , y el sistema tenderá a recuperar el equilibrio (ver explicación en el texto); c) Se restablece el ángulo crítico, por medio de propagación de corrimientos hacia el pie de la cuña; d) y e) Si el ángulo de la cuña desciende por debajo del valor crítico, la propagación hacia el antepaís se interrumpe y el sistema intenta recuperar su pendiente de equilibrio generando deformación fuera de secuencia. Modificado de Wilkerson y Marshak (1997).	18
Figura 2. Fotografía del modelo de caja de arena usado para el desarrollo de las investigaciones sobre fallas normales e inversas. Tomada de Hubbert, (1951)	21
Figura 3. Envolvente de Mohr-Coulomb en términos de los esfuerzos normal y de cizalla, para un estado de esfuerzo en compresión ($\sigma_1 > \sigma_3 > 0$). Tomado de Portillo (2008).	23
Figura 4. Modelo teórico de Cuña Crítica, relaciones dinámica y cinemática. Tomado de Portillo (2008).	24
Figura 5. Margen convergente tipo Andino, en él se aprecia la relación y clasificación existente entre la zona de subducción y la vergencia de las FPF. Tomado de Cristallini (1998).	27
Figura 6. Zonación de un FPF, se aprecia la relación espacial interna entre los planos de falla y cada sector de la CC. Tomado y modificado de Ghiglione et al., (2002).	29
Figura 7. Ejemplo de zona triangular (Pop-up); en él se observan los planos de cizalla y su respectiva vergencia. Tomado y modificado de Portillo (2008).	30

Figura 8: Esquema de una FPF, en la que se observan cabalgamientos en secuencia (1-4), un cabalgamientos fuera de secuencia (5), y un retrocabalgamiento (A). Tomado de Yagupsky (2009).	31
Figura 9. Esquema simplificado donde se muestran las relaciones de los planos de falla con la estratigrafía para sistemas imbricados frontal y dorsal. Tomado y modificado de Cristallini (1998).	32
Figura 10. Estructuras geológicas a diferente escala; a) En centímetros b) en metros. Tomado de Fossen (2010).	34
Figura 11. Método del embudo, en el que se aprecia también la expresión gráfica del ángulo de reposo. Tomado y modificado de Solaque y Lizcano (2008).	35
Figura 12. Esquema de la mesa de trabajo utilizada en esta investigación, observar la ubicación de la barrera cinética, y que el basamento no presenta inclinación.	40
Figura 13: Foto tomada a la arena tipo I, con 0.8X de aumento, en lupa Nikon NI-150 high intensity illuminator. En verde se delimitan granos y sus formas.	41
Figura 14. Foto tomada a la arena tipo II, con 0.8X de aumento, en lupa Nikon NI-150 high intensity illuminator. En verde se delimitan granos y sus formas.	42
Figura 15. Se observa montículo de arena tipo I, generado con el método del embudo para medir el ángulo de fricción interna.	44
Figura 16. Se observa montículo de arena tipo II, generado con el método del embudo para medir el ángulo de fricción interna.	44
Figura 17. Técnica empleada para depositar el material uniformemente.	45
Figura 18. Se observa la técnica empleada para nivelar a 1 cm (con ayuda de la llana) la primera capa de arena tipo I.	46
Figura 19. Condiciones iniciales para la serie experimental de control, con arena tipo I, se observan los 3 niveles de arena, perfectamente nivelados.	46
Figura 20. Tabla de condiciones iniciales (X_0) y finales (X), para el cálculo del porcentaje de elongación (%e).	47

Figura 21. Vista transversal del modelo análogo de un prisma acrecionado, en el que se observa el sentido de vergencia de los cabalgamientos y el sentido de avance tectónico.	48
Figura 22. Vista de planta modelo análogo FPC, se observa en ella la expresión geomorfológica de los cabalgamientos en planta, con clara concavidad en el sentido del transporte tectónico.	49
Figura 23. Vista transversal de un modelo análogo de CC, etapa final de deformación.	50
Figura 24. Vista de planta de un modelo análogo de CC, etapa final de deformación.	50
Figura 25. Condiciones iniciales del modelo, se observan en él, las circunferencias que sirven de guía sin deformar aún.	51
Figura 26. Corte transversal al interior de la FPF, en la figura se aprecia mejor los planos de falla, asociados a cada cabalgamiento.	51
Figura 27. Vista oblicua de un corte transversal al interior del modelo análogo de FPF.	52
Figura 28. Vista transversal del modelo análogo de una FPF, con arena tipo II.	53
Figura 29. Vista transversal al interior de un modelo análogo de una FPF, con arena tipo II. Donde se aprecia el filtro de granulometría diferente y la etapa final de la deformación.	54
Figura 30. Vista transversal a detalle de un modelo análogo de una FPF, se observa en verde cabalgamiento y en rojo un retrocabalgamiento.	54
Figura 31. Vista en planta modelo análogo de una FPF, en verde se aprecia circunferencias de control cinemático.	55
Figura 32. Cálculo del porcentaje de elongación (acortamiento) experimentado por el modelo análogo de una FPF con arena tipo II, con la ecuación de deformación longitudinal.	55
Figura 33. Interfaz gráfica de PIVlab. En este paso se carga la secuencia completa de imágenes.	57
Figura 34. Delimitando el área de análisis total en PIVlab.	58

Figura 35. Pre-procesamiento de imágenes en PIVlab, incorporando filtros y definiendo el tamaño de la ventana de evaluación.	59
Figura 36. Herramientas para el análisis. Determinando el algoritmo para evaluación de la imagen, como el número y el tamaño de las ventanas de evaluación.	60
Figura 37. Redefiniendo de manera gráfica los límites de velocidad asociados al campo vectorial del modelo.	61
Figura 38. Aplicando en todos los cuadros los valores de velocidad previamente validados.	62
Figura 39. Calibración del modelo, se introduce el valor de la longitud real de forma gráfica y numérica.	62
Figura 40. Se elige el parámetro a visualizar, aplicando un smooth data y un highpass vector field.	63
Figura 41. Streamline rake definido para el último cuadro de la secuencia.	63
Figura 42. Secuencia completa de la evolución de una CC bivergente asimétrica.	65
Figura 43. Método gráfico para el cálculo del ángulo crítico (δ y δ^*).	65
Figura 44. Esquema representativo de la mesa de trabajo (sandbox) con pared fija, utilizada por Davis et al. (1983). Tomado de Davis et al. (1983).	67
Figura 45. Mesa de trabajo (sandbox) con pared móvil utilizada por Yagupsky, 2009. Tomado de Yagupsky, 2009.	68
Figura 46. Modelo de mesa de trabajo (sandbox) sin pared móvil propuesto por Van Der Pluijm & Marshak, 2004. Tomado de Van Der Pluijm & Marshak, 2004.	69
Figura 47. Corte a través de los Alpes, donde se observa la similitud con el modelo de cuña asimétrica bivergente propuesto por Van Der Pluijm & Marshak, (2004). Tomado de Fossen (2010).	70
Figura 48. Corte a través de los Pirineos. Tomado de Sarmiento (2001).	73
Figura 49. Corte esquemático del norte de los Andes. En la parte superior se observa el corte (a-a'), de hace 20 Ma, y en la parte inferior el corte (b-b') representa la actualidad. Tomado de Taboada et al., (2000).	73

Figura 50. mModelo hipotético de cuña asimétrica bivergente para la Cordillera Oriental propuesto por Colleta et al., (1990). Tomado de Colleta et al., (1990).	74
Figura 51. Sismicidad y ángulo de incidencia asociado a diferentes zonas de subducción (b-c), (a) sismicidad asociada al nido sísmico de Bucaramanga. Tomado de Sarmiento (2001).	74
Figura 52. Modelos propuestos para la evolución de la CO, sin tener en cuenta la inversión tectónica como proceso generador. Tomado de Teson et al., (2013).	75
Figura 53. Modelo hipotético de un corte a través de la CO, se aprecia la sismicidad asociada al nido sísmico de Bucaramanga. Tomado de Sarmiento (2001).	75
Figura 54. Estructuras obtenidas al final de la deformación en laboratorio, planos de falla numerados con base a su ocurrencia.	76

RESUMEN.

TITULO: ANÁLISIS DE ESTILOS ESTRUCTURALES A PARTIR DE MODELOS ANÁLOGOS. (Ambientes compresivos.)^{*}

AUTOR: CAMILO ALBERTO ANAYA ARIAS^{**}

PALABRAS CLAVES. Cuña, critica, compresivo, ángulo de reposo, estilo estructural

La Cuña Crítica (CC) es una estructura geológica asociada a ambientes compresivos. La dinámica interna está controlada por el esfuerzo aplicado, generando mayor intensidad en la deformación a medida que se aumenta el acortamiento horizontal, la pendiente topográfica que exhiben estas estructuras en forma de cuña está controlada por el ángulo crítico (ϕ_c), siendo un criterio de estabilidad, Wilkerson y Marshak, (1997). Los sistemas de fajas plegadas y falladas (FPF) son estructuras asociadas a un ambiente compresivo (márgenes activos) Cristallini, (1998). Estos dos conceptos se encuentran estrechamente relacionados siendo el estudio de la CC un importante factor para comprender la evolución de un sistema de FPF, Davis et al. (1983). Los modelos análogos son una herramienta para comprender la evolución de estructuras geológicas en los diferentes ambientes tectónicos, ya que en la naturaleza solo es posible apreciar la deformación como un estado finito, Davis et al. (1983). El modelamiento análogo permite analizar en escalas temporales y espaciales diferentes la evolución de prototipos naturales, facilitando su estudio. El problema planteado en esta tesis consiste en identificar el material idóneo para el modelamiento análogo a escala de laboratorio, e ilustrar algunos factores que influyen en la evolución de un sistema de FPF y CC, asociado a un ambiente compresivo, que condicionan los estilos estructurales presentes. Construyendo para este proceso, una mesa de trabajo (sandbox) que permita reproducir de forma análoga estructuras geológicas, replicando a grandes rasgos, los mecanismos generadores de FPF en escalas temporales y espaciales muy distintas.

^{*} Proyecto de grado

^{**} Facultad de ingenierías físicoquímicas. Escuela de Geología. Director. Giovany Jimenez Díaz

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF STRUCTURAL STYLES FROM analog models. (Compressional environments.)*

AUTHOR: CAMILO ALBERTO ANAYA ARIAS**

KEYWORDS. Wedge, critical, compression, angle of repose, structural style

The Critical Wedge (CW) is a geological structure associated to collisional environments. The internal dynamic is controlled by applied stress, generating greater intensity in the strain while the horizontal shortening, the dip surface that these wedge-shaped structures exhibits is controlled by the critical taper theory (ϕ_c), being a stability criterion, Wilkerson y Marshak, (1997). The fold-belt faults (FBF) systems are structures associated to a collisional environment (active margins) Cristallini, (1998). These two concepts are closely related, the CW's study being a determining factor to comprehend the evolution of FBF systems, Davis et al. (1983). Analog models are a tool to understand the evolution of geological structures in different tectonic environments, since in nature it is only possible to appreciate deformation as a finite state, Davis et al. (1983). Analog modelling allows to analyze in different temporal and spatial scales the evolution of natural prototypes, facilitating their study. The problem considered in this thesis consists in identifying the appropriate material for lab-scale analog modelling, and illustrating some factors that influence the evolution of an FBF and GW system, associated to a collisional environment, that conditions the structural styles present. For this process, a sandbox will be constituted in order to reproduce geological structures analogically, replicating grosso modo, the FBF-generating mechanisms in very distinct temporal and spatial scales.

* Project of grade

** Faculty of Physical and chemical engineering. School of Geology. Director. Giovany Jimenez Díaz

INTRODUCCIÓN

La Cuña Crítica es una estructura geológica asociada a ambientes compresivos en los cuales la naturaleza exhibe un acortamiento horizontal. Los elementos asociados a esta estructura controlan la evolución de la misma, la dinámica interna está controlada por el esfuerzo aplicado, generando mayor intensidad en la deformación a medida que se aumenta el acortamiento horizontal, la pendiente topográfica que exhiben estas estructuras en forma de cuña está controlada por el ángulo crítico (ϕ_c), el cual controla la propagación de la cuña, siendo a la vez, un criterio de estabilidad, Wilkerson y Marshak, (1997). Los sistemas de fajas plegadas y falladas (FPF) son elementos asociados a un ambiente compresivo (márgenes activos) generalmente y muy rara vez a un ambiente extensivo (márgenes pasivos) Cristallini, (1998). Estos dos conceptos se encuentran estrechamente relacionados siendo el estudio de la CC un importante factor para comprender la evolución de un sistema de FPF, Davis et al. (1983).

Los modelos análogos son una herramienta para comprender la evolución de estructuras geológicas en los diferentes ambientes tectónicos, ya que en la naturaleza solo es posible apreciar la deformación como un estado finito, derivando múltiples problemas al tratar observar la deformación en la naturaleza como un estado progresivo, puesto que cada estado se sobrepone al anterior, Davis et al. (1983). Según lo anterior, el modelamiento análogo permite analizar en escalas temporales y espaciales diferentes la evolución de prototipos naturales, facilitando su estudio.

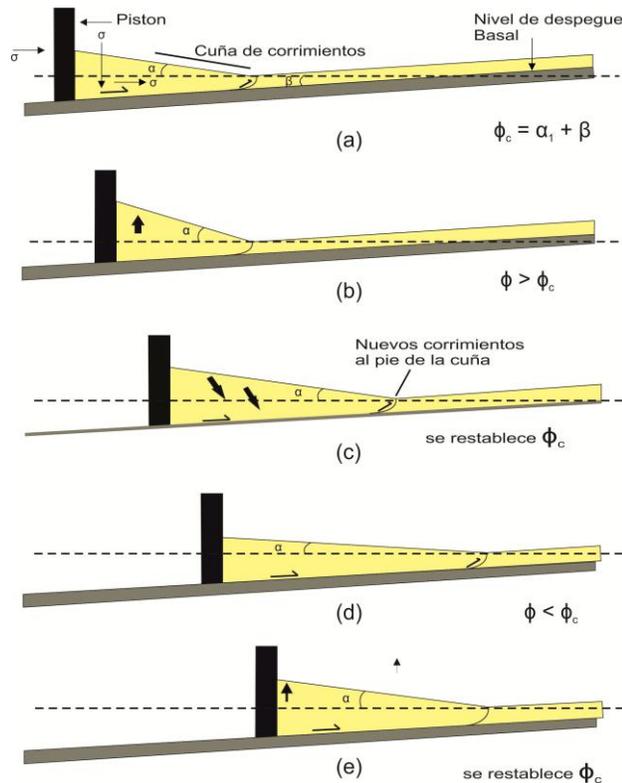
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El problema planteado en esta tesis consiste en identificar el material idóneo para el modelamiento análogo a escala de laboratorio, e ilustrar, algunos factores que influyen en la evolución de un sistema de FPF y CC, asociado a un ambiente compresivo, que condicionan los estilos estructurales presentes. Construyendo para ello, una mesa de trabajo (sandbox) que permita reproducir de forma análoga estructuras geológicas, replicando a grandes rasgos, los mecanismos generadores de FPF en escalas temporales y espaciales muy distintas.

La primera hipótesis que se plantea en esta investigación, es el hecho de que un modelo de CC se pueda simplificar y reproducir a escala de laboratorio con cualquier material granular (Arena), sobre un plano horizontal. En la figura 1 se aprecia el modelo clásico donde el desplazamiento del pistón hacia la cuenca foreland genera una componente de esfuerzo horizontal (σ_h). La energía potencial gravitatoria que es generada se encuentra ligada a la pendiente topográfica que presenta la cuña, como a la pendiente del basamento. De ésta se desprenden dos componentes de esfuerzos, una vertical (σ_v) y una horizontal (σ_h) (Ver figura 1 a). Las deformaciones internas en la cuña ocurren a medida que el pistón avanza hacia la cuenca foreland, evidencia de ello son fallas, pliegues, material compactado y un marcado incremento de pendiente en la cuña. El incremento en la pendiente genera en un intervalo de tiempo fijo un ángulo crítico (ϕ_c), el cual consiste en la sumatoria de la pendiente topográfica (α_1) y el ángulo que se genera entre la inclinación propia del basamento y el nivel de despegue basal (β). Wilkerson y Marshak, (1997).

Figura 1. Modelo mecánico de la cuña crítica. a) La cuña se encuentra en estado crítico, siendo su pendiente $\Phi_c = \alpha_1 + \beta$; b) La cuña presenta una pendiente superior a Φ_c , y el sistema tenderá a recuperar el equilibrio (ver explicación en el texto); c) Se restablece el ángulo crítico, por medio de propagación de corrimientos hacia el pie de la cuña; d) y e) Si el ángulo de la cuña desciende por debajo del valor crítico, la propagación hacia el antepaís se interrumpe y el sistema intenta recuperar su pendiente de equilibrio generando deformación fuera de secuencia. Modificado de Wilkerson y Marshak (1997).



1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 Objetivos generales. Desarrollar una metodología de trabajo experimental aplicable a la geología estructural que ilustre los procesos para diferentes estilos estructurales.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Construir un montaje experimental que permita realizar una correcta analogía de los prototipos naturales de interés.
- Analizar los factores que influyen en el desarrollo y evolución de una cuña crítica.
- Identificar estilos estructurales asociados a estadios compresivos a partir de un análisis detallado, tanto en los sectores de la cuña crítica como en sus áreas circundantes.
- Determinar la influencia del ángulo de fricción interna (Φ) en la geometría de los sistemas de fajas plegadas y corridas.
- Analizar la evolución cinemática de los diferentes estilos estructurales asociados.

1.3 JUSTIFICACIÓN.

Esta investigación genera una herramienta didáctica y metodológica para el análisis de estilos estructurales, ilustrando la evolución de estructuras geológicas asociadas a márgenes activos (ambiente compresivo), aunque su alcance no estará limitado a un solo ambiente tectónico. Se toma entonces como base fundamental los modelos análogos a escala, los cuales sirven de referencia en el análisis de prototipos naturales y los procesos involucrados en la deformación de los mismos. Permitiendo relacionar el análisis cualitativo con las mediciones cuantitativas, generadas a partir de un seguimiento fotográfico secuencial de la deformación.

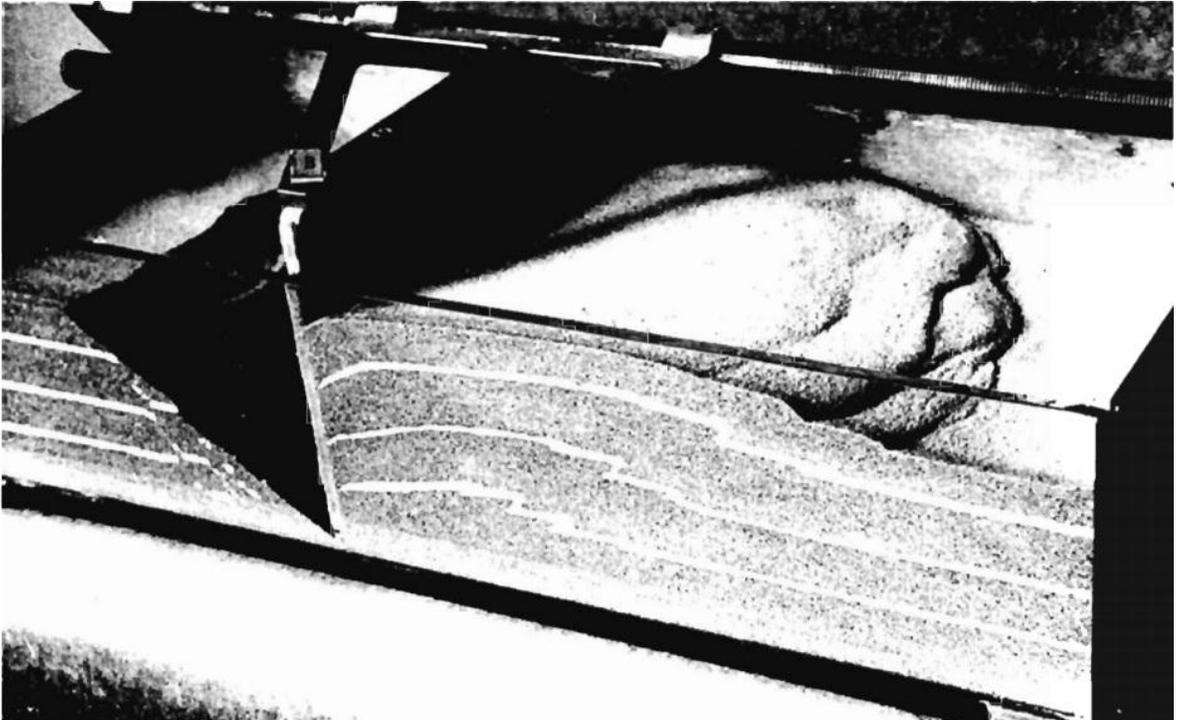
1.4 APARTES Y APORTES DEL MODELAMIENTO ANÁLOGO EN LA GEOLOGÍA.

Fue a principios del siglo XIX en el año de 1815 cuando Sir James Hall documentó sus resultados ante la Transactions of the Royal Society of Edinburgh; sobre las primeras simulaciones de procesos tectónicos a escala, dando inicio al historia del modelado análogo de estructuras geológicas. Hall (1815), realizó don series experimentales con las cuales pudo concluir que la existencia en la naturaleza de estructuras plegadas, se debe en principio a un proceso asociado a esfuerzos laterales compresivos, siendo esto concordante con lo planteado por Saussure (1766), hablando del acortamiento y plegamiento de rocas presentes en los Alpes.

Durante todo el siglo XIX varios investigadores le dieron relevancia al modelamiento análogo, estudiando principalmente estructuras asociadas a pliegues y cabalgamientos. Un gran aporte a esta herramienta, en pleno siglo XX, proviene de Hubbert (1937), y su teoría de escalado de procesos geológicos, innovando en gran parte, por su aporte cuantitativo, como por permitir el estudio de procesos geológicos a varias escalas de observación. Ya para finales de siglo XX diferentes autores (Faugere y Brun, 1984; Davy y Cobbold, 1988), amplían el frente de investigación del modelamiento análogo, involucrando analogías de procesos tectónicos a una escala mayor, utilizando diferentes materiales con comportamientos reológicos distintos (Frágil –Dúctil). Simulando en un mismo modelo el comportamiento de la corteza y el manto. Sin embargo estos experimentos no fueron suficientes para explicar las variaciones termodinámicas propias de zonas de subducción o de rifting. Desde entonces, números han sido los intentos por encontrar materiales con características analógicamente correctas, que reproduzcan el comportamiento reológico de cuñas orogénicas, entre otros prototipos naturales.

A finales de siglo XX y principios del siglo XXI, se vive un auge en la incorporación de nuevas técnicas, sirviendo éstas para sistematizar y optimizar el análisis de los modelos de laboratorio. Sveen (2004), generó un código informático (MatPIV), el cual sirve como una aplicación que se basa en el principio de coincidencia de patrones. Dicho principio es fundamental para generar un análisis secuencial de la deformación.

Figura 2. Fotografía del modelo de caja de arena usado para el desarrollo de las investigaciones sobre fallas normales e inversas. Tomada de Hubbert, (1951)



2. MARCO TEÓRICO.

A continuación se esbozan los conceptos teóricos a tener en cuenta en ésta investigación, tratando de llevar una secuencia lógica que proporcione al lector un mayor entendimiento de los fenómenos estudiados en éste documento.

2.1 MODELO DE CUÑA CRÍTICA DE FRICCIÓN (MOHR-COULOMB)

A finales del siglo XIX inicia el desarrollo de la teoría de Mohr-Coulomb, la cual surge como un modelo matemático que describe; el comportamiento interno de las partículas que componen un material, sometido a esfuerzo, y el criterio de ruptura para dicho material. Relacionado el esfuerzo normal y de cizalla para expresar la dinámica existente entre esfuerzo y resistencia al corte. Casi un siglo después, Byerlee (1978); Davis et al., (1983) y otros autores, postulan que la deformación en las rocas, describe un comportamiento del tipo Mohr-Coulomb, sirviendo de límite para esta conducta, la frontera quebradizo-dúctil de la litosfera. Según Portillo (2008), éste criterio describe un sistema quebradizo/granular, el cual no va a depender del tiempo, ni de la velocidad de la deformación.

$$\tau = \sigma\mu(1 - \lambda) + c$$

De la anterior ecuación decimos que; τ y σ se traducen como los esfuerzo de cizalla y normal en un plano de falla, μ como el coeficiente de rozamiento estático, el cual se determina a partir del ángulo de reposo, ϕ , λ es considerada como la presión de poro y C es la cohesión. La ecuación permite analizar el comportamiento de las rocas, siendo su expresión gráfica, la línea de fractura o envolvente de Mohr-Coulomb, la cual se representa como la recta tangente a los

diferentes círculos de Mohr. (Figura 3). Davis et al., (1983), realizó pruebas experimentales en rocas sedimentarias, concluyendo que según el criterio de Mohr-Coulomb la cohesión es un factor despreciable en el estudio de la mecánica de CC y FPF, en las que predominen sedimentos de silicato.

En cuanto al comportamiento mecánico descrito por la CC, podemos hacer la analogía con la cuña que se genera en el frente de un bulldozer (quita-nieve), la cual sufre deformación interna a medida que el bulldozer avanza (figura 4), hasta alcanzar un estado de criticidad en donde presenta un comportamiento estable, generando un ángulo con respecto al nivel de despegue, llamado ángulo crítico (Critical taper) Davis et al., (1983).

Figura 3. Envolvente de Mohr-Coulomb en términos de los esfuerzos normal y de cizalla, para un estado de esfuerzo en compresión ($\sigma_1 > \sigma_3 > 0$). Tomado de Portillo (2008).

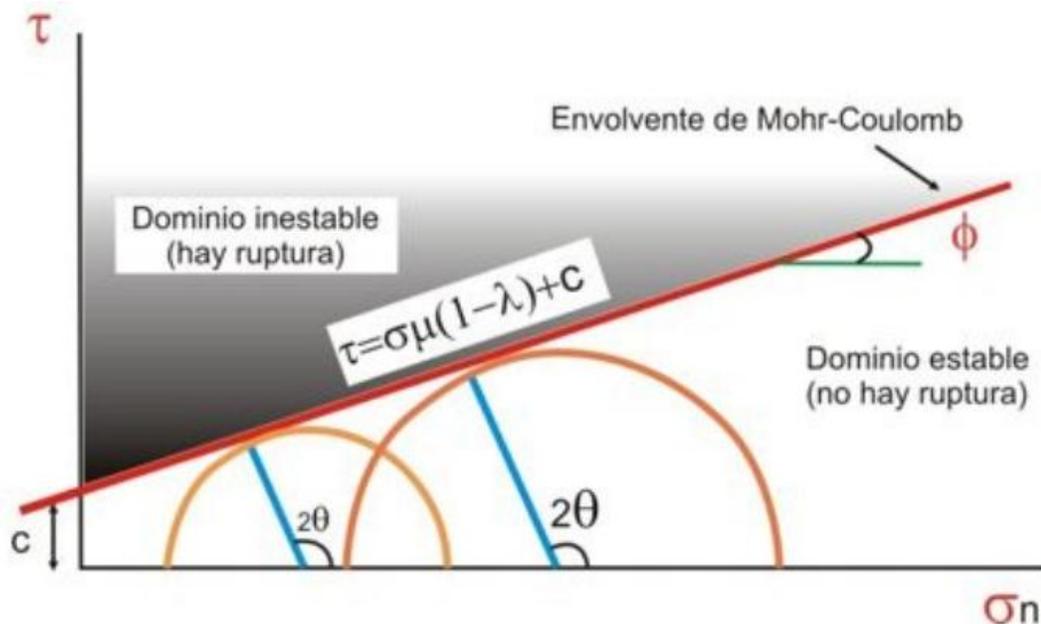
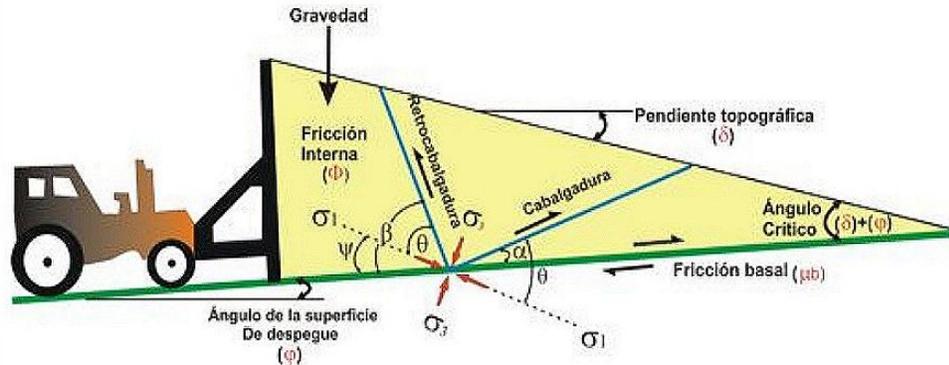


Figura 4. Modelo teórico de Cuña Crítica, relaciones dinámica y cinemática. Tomado de Portillo (2008).



Dicho estado de criticidad u equilibrio, se mantiene, mientras no existan nuevos aportes de material, en el frente de deformación de la cuña generada por el bulldozer. De tal modo, que si esto ocurriese, la cuña presentaría un crecimiento y deformación interna, acomodando los nuevos aportes, de manera que se mantenga constante el ángulo crítico. Davis et al., (1983).

En la figura 4, se observa las relaciones angulares y geométricas físicamente posibles para el desarrollo de estructuras en el sector de la CC, manteniendo la relaciones entre esfuerzo normal (σ) y de cizalla (τ), según la teoría de Mohr-Coulomb, Davis et al., (1983), donde (σ_1) representa el esfuerzo principal máximo, (σ_3) el esfuerzo principal mínimo, (α) ángulo de ocurrencia de una cabalgadura con respecto a la superficie de despegue, en dirección del frente de deformación, (β) ángulo de ocurrencia de la retrocabalgadura con respecto a la superficie de despegue, (θ) ángulo de ocurrencia de la cizalla con respecto al esfuerzo principal máximo y (ψ) ángulo entre el esfuerzo principal máximo y la superficie de despegue. La relación existente entre los diferentes factores involucrados, puede expresarse de la siguiente manera, Davis et al., (1983).

$$\delta + \varphi = \frac{(1 - \lambda)\mu_b + \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho}\right)\varphi}{\left(1 - \frac{\rho_w}{\rho}\right) + (1 - \lambda)k}$$

Donde, δ , representa el ángulo de la cuña generada por el bulldozer, con la pendiente topográfica, φ es el ángulo generado por la superficie de despegue (decollement) con la horizontal, λ daría la relación existente entre la presión de poro y la presión litosférica, μ_b simboliza el coeficiente de fricción basal, ρ_w es la densidad del agua, ρ la densidad promedio de los materiales involucrados en la cuña y finalmente k sería un valor adimensional definido por:

$$k \cong \frac{\text{sen}\Phi}{1 - \text{sen}\Phi} + \frac{\text{sen}^2\Phi_b + \text{cos}\Phi_b(\text{sen}^2\Phi - \text{sen}^2\Phi_b)^{\frac{1}{2}}}{\text{cos}^2\Phi_b - \text{cos}\Phi_b(\text{sen}^2\Phi - \text{sen}^2\Phi_b)^{\frac{1}{2}}}$$

De la anterior ecuación decimos que; Φ representa el ángulo de reposo de los materiales involucrados en la cuña y Φ_b el ángulo de fricción basal. El análisis de las ecuaciones anteriormente nombradas, muestra una relación directa entre Φ , Φ_b y $(\delta + \varphi)$, siendo los dos primeros términos condicionantes del tercero, como más adelante se explicara.

La importancia de los estudios teóricos del ángulo crítico se devela como una descripción simple de la cinemática de las CC, que permite relacionar geométrica y físicamente los diferentes factores involucrados para el cálculo del ángulo crítico. Cuando dicho ángulo no alcanza un estado de criticidad, al interior de la cuña (Hinterland) se generará un engrosamiento con el fin de alcanzar el estado de criticidad necesario para que la propagación de la cuña sea hacia la cuenca antepaís (Foreland) o frente de deformación. Las posibles causas del engrosamiento han sido descritas por diferentes autores. (Davis et al., 1983; Faugere y Brun, 1984; Cristallini, 1998; Yagupsky, 2009.). A modo de dar mayor claridad con este fenómeno, se enuncian a continuación las posibles causas:

- Inversión por contracción al formarse cuencas.
- Cabalgamientos fuera de secuencia (Out of sequence thrusts).
- Retrocabalgaduras (Backthrusts).
- Dúplex a lo largo del despegue.

2.2 ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS ASOCIADAS A CC Y/O FPF.

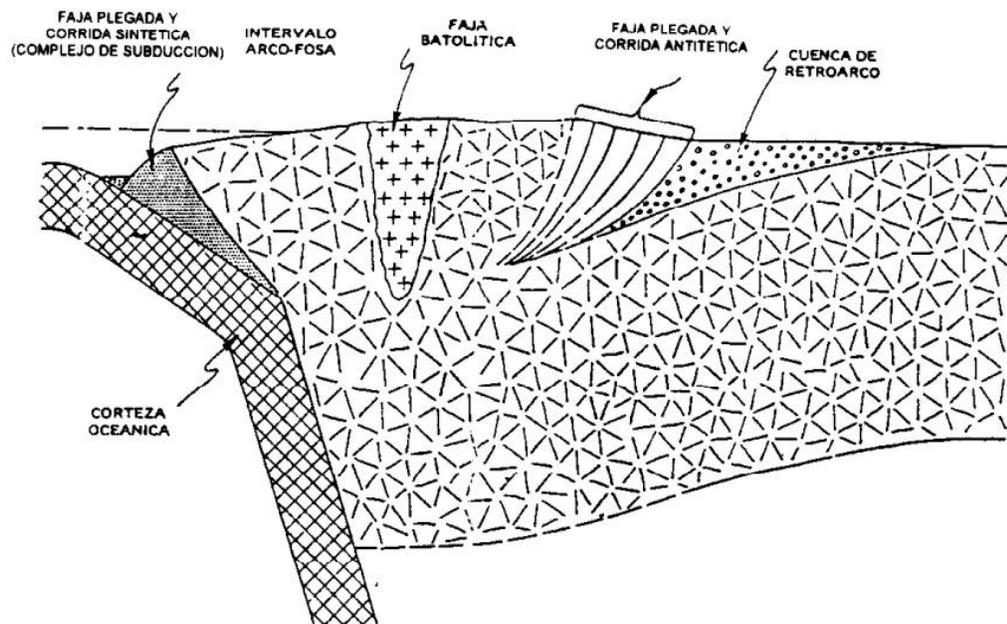
La descripción de las estructuras geológicas asociadas a ambientes tectónicos compresivos, específicamente aquellas que están íntimamente relacionadas con las FPF y por ende a la CC, son objeto de estudio en éste documento. Según Cristallini (1998), las estructuras que caracterizan a estos dos elementos, son los pliegues, fallas inversas y corrimientos.

Existen algunas clasificaciones para las FPF, que permiten tener mayor comprensión sobre la cinemática de las mismas. De acuerdo a la vergencia que exhiba la mayoría de las estructuras presentes en una FPF, Cristallini (1998), las clasifica en sintéticas y antitéticas, dependiendo esto, de la relación que exista entre los planos axiales y la inclinación de la zona de subducción asociada a la FPF. La relevancia de esta clasificación está dada, al indicar el sentido de transporte tectónico, que por lo general, es opuesto a la vergencia de la mayoría de los ejes axiales y planos de falla, en el caso de las FPF sintéticas. Cuando la inclinación de la zona de subducción, relacionada con la formación de la FPF es opuesta el sentido de los principales ejes axiales y planos de falla, se clasifica como antitética, y cuando el sentido de los principales ejes axiales y planos de falla coinciden con la inclinación de la zona de subducción relacionada, es clasificada como sintética, Cristallini (1998).

En la figura 5, se observa un margen convergente tipo andino, donde se aprecian ejemplos de FPF sintéticas y antitéticas, como a su vez, la relación y posición de dicha clasificación, con la zona de subducción.

Se usa también una clasificación para FPF, dependiendo ésta, de los niveles estructurales involucrados, enunciada por Rodgers (1971), en sus estudios sobre la orogenia Tacónica. Según Cristallini (1998), las FPF de piel fina o epidérmicas, son las que involucran una delgada capa de sedimentos en la deformación, sin tener en ella niveles del basamento comprometidos. Caracterizadas por presentar estructuras con continuidad en su rumbo y generar pliegues con una longitud de onda pequeña, que se traduce en un mayor acortamiento. Existen también FPF en las que se ve comprometido el basamento, llamadas de piel gruesa o de basamento, se caracteriza por presentar una mayor elevación, menor acortamiento y estructuras discontinuas en su rumbo.

Figura 5. Margen convergente tipo Andino, en él se aprecia la relación y clasificación existente entre la zona de subducción y la vergencia de las FPF. Tomado de Cristallini (1998).



Los mecanismos que comúnmente se usan para explicar la formación de FPF de piel gruesa, son la inversión tectónica y la reactivación de antiguas fallas o estructuras; aunque muy rara vez se hable del aumento de flujo térmico regional como posible causa, éste aumenta las posibilidades de transiciones frágil-dúctil en niveles someros (10-15 km de profundidad), incrementando la probabilidad de niveles de despegue óptimos para crecimiento de FPF de piel gruesa, Cristallini (1998).

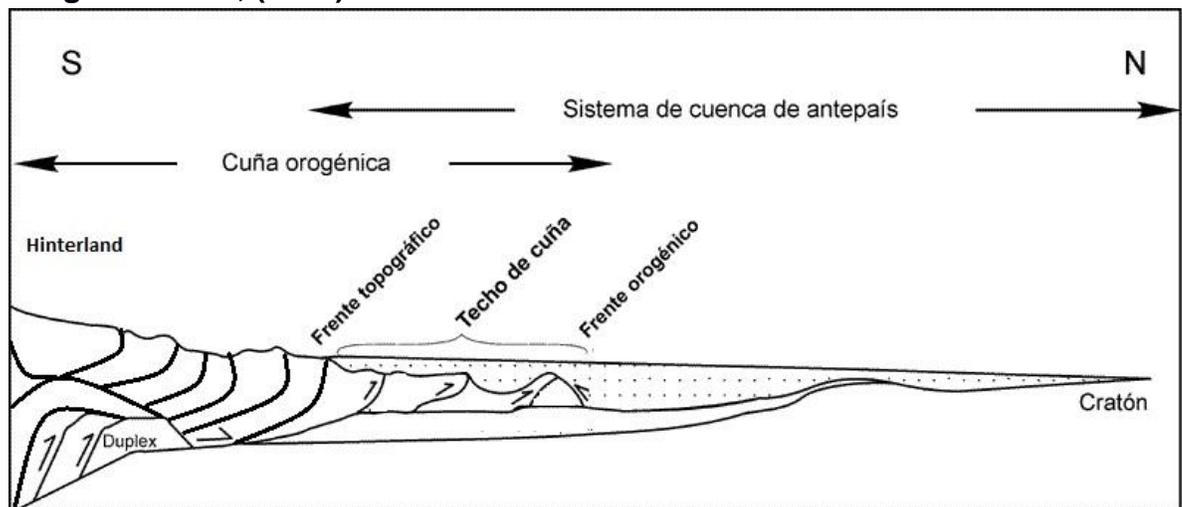
Para evitar confusiones con el concepto de basamento, cabe acuñar el concepto de estratigrafía mecánica, Latta y Anastasio (2007). El cual hace referencia a los cambios en el estilo de deformación presentado por una secuencia de rocas, facilitando el análisis de la deformación de un modo cuantificable. Según Portillo (2008), el cambio en el comportamiento mecánico de las rocas, no necesariamente implica una relación directa con las capas estratigráficas, el comportamiento mecánico de las capas geológicas estará supeditado a los contrastes reológicos generados durante importantes cambios en la historia geológica de la región (Por ejemplo cambios en el ambiente de depósito), quedando definido el basamento por dichos cambios.

Para facilitar el análisis de las FPF, se sectoriza la misma, dependiendo está clasificación, del nivel de deformación que presente cada sector, Cristallini (1998). El sector que presenta mayor deformación se ubica en la parte trasera de la FPF (Hinterland), llamado **zona de transporte**, presenta estructuras fosilizadas, y, a su vez, mayor elevación, lo cual implica un mayor peso en ese sector de la FPF, que generará un hundimiento en la superficie basal, explicando así, la inclinación regional del basamento hacia el hinterland, Cristallini (1998). El sector que se encuentra más cercano a la cuenca Foreland, es conocido como, frente orogénico, de deformación o corrimientos (thrust front), aunque algunos autores lo llamen **zona frontal**, en ella encontramos una deformación activa, en la que se desarrollan pliegues y corrimientos. Morley, (1986) sub-clasifica al frente

orogénico, en emergente o no emergente, y esto dependerá, en gran medida, si el tipo de la falla aflora en superficie o no.

Daremos inicio a la descripción detallada de los principales tipos de pliegues presentes en las FPF, siguiendo los lineamientos y limitantes de nuestro modelo, para no extendernos en explicaciones innecesarias, que no van al caso. Ya que los diferentes modelos de pliegues existentes, detallados por numerosos autores, varían, según la complejidad del contexto tectónico en el que se desarrollaron.

Figura 6. Zonación de un FPF, se aprecia la relación espacial interna entre los planos de falla y cada sector de la CC. Tomado y modificado de Ghiglione et al., (2002).



Zonas triangulares (pop-up).

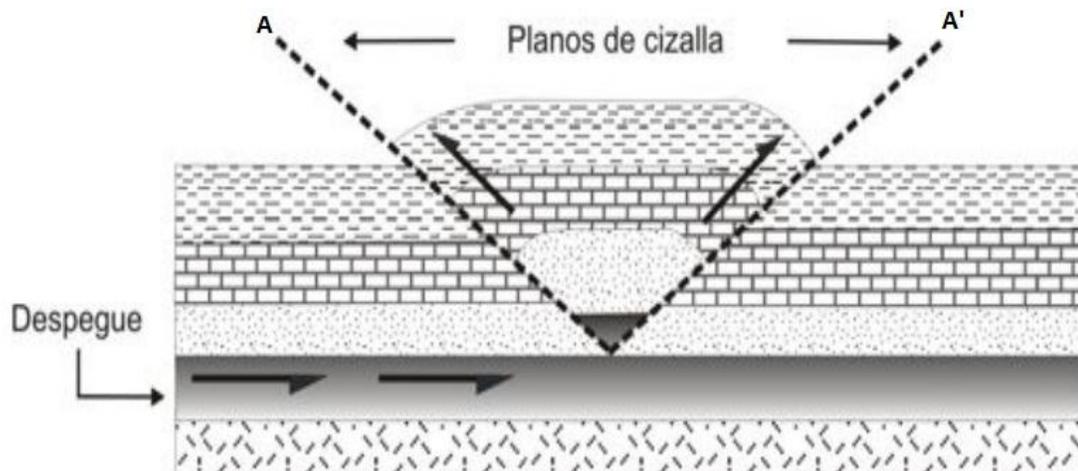
En este tipo de estructura en particular, existen dos planos de cizalla A-A', las cuales presentan una vergencia totalmente opuesta, exhibiendo el plano de cizalla A, una vergencia hacia el sector conocido como retropaís y en contra parte el plano de cizalla A', presenta una vergencia hacia el sector del antepaís, Portillo (2008). En la figura 7, se observa un modelo simplificado de zonas triangulares. Este tipo de estructura puede llegar a generar pliegues por despegue en forma de

caja u ocurrir un rompimiento en sus planos de cizalla, derivando ello en cabalgaduras o retrocabalgaduras, Portillo (2008).

Abanicos o sistemas imbricados (imbricate fans).

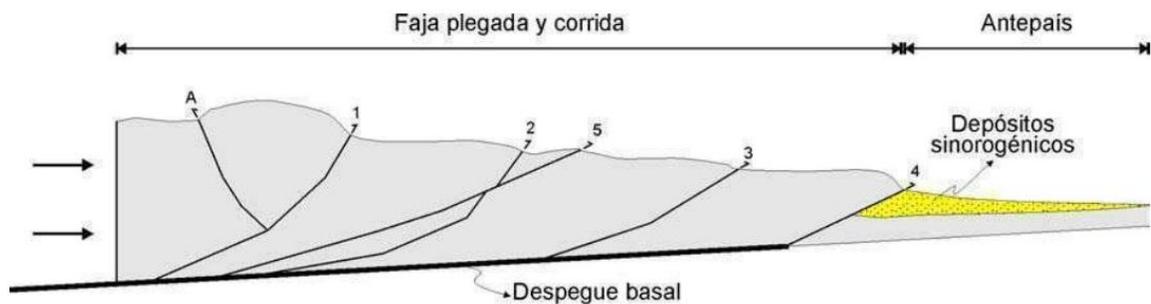
Los abanicos imbricados, son estructuras asociadas a FPF, y ocurren cuando un grupo de cabalgamientos se encuentran conectados entre sí, generando múltiples fallas con buzamiento opuesto a la dirección de transporte tectónico, Cristallini (1998). Hacen parte estas estructuras, de lo que comúnmente es conocido como sistema de cabalgamientos (thrust system) y en ella encontraremos; cabalgamientos en secuencia, los cuales buzando en dirección opuesta al sentido del transporte tectónico, siendo a su vez, la inclinación preferente por la mayoría de los planos de falla en un FPF, y existen cabalgamientos fuera de secuencia, los cuales se caracterizan por cortar estructuras más antiguas o generarse a partir de la reactivación de estructuras previas, con ocurrencia principalmente en el zona de transporte de una FPC, Yagupsky (2009).

Figura 7. Ejemplo de zona triangular (Pop-up); en él se observan los planos de cizalla y su respectiva vergencia. Tomado y modificado de Portillo (2008).



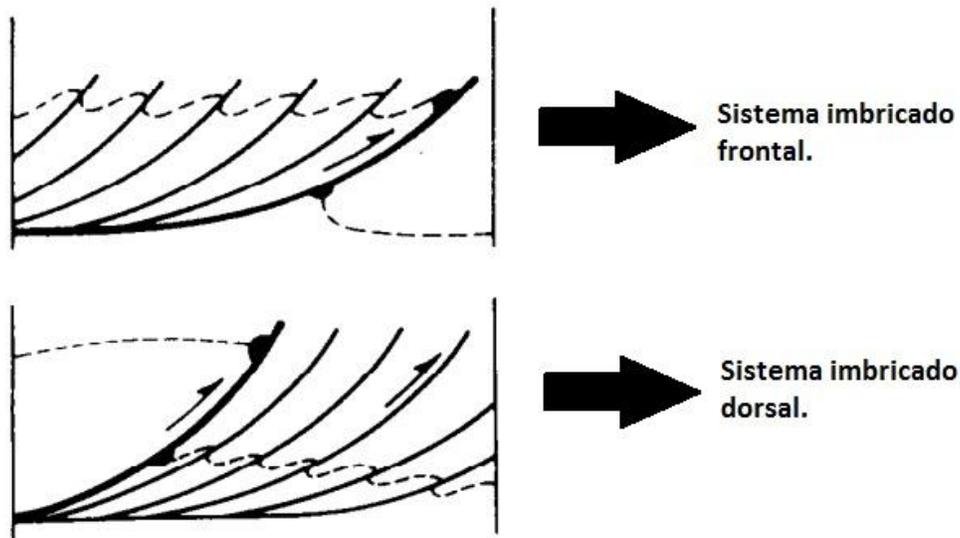
En la figura 8, se observa un esquema simplificado, del cual inferimos algunas observaciones; los cabalgamientos del 1 al 4, serán clasificados como cabalgamientos en secuencia, ya que describen las características anteriormente nombradas, el cabalgamiento 5, se encuentra en una relación de corte con el cabalgamiento 2, describiendo características de un cabalgamiento fuera de secuencia, como han de notar, el retrocabalgamiento A, se genera a partir del primer cabalgamiento.

Figura 8: Esquema de una FPF, en la que se observan cabalgamientos en secuencia (1-4), un cabalgamientos fuera de secuencia (5), y un retrocabalgamiento (A). Tomado de Yagupsky (2009).



Un sistema imbricado se subcalsifica en; sistema imbricado frontal y sistema imbricado dorsal, siendo el primero caracterizado por que sus fallas principales son aquellas que se encuentran en mayor cercanía a la cuenca antepaís, y los segundos, por presentar una situación completamente opuesta, en la que las fallas principales se encuentran hacia el retropaís, Cristallini (1998).

Figura 9. Esquema simplificado donde se muestran las relaciones de los planos de falla con la estratigrafía para sistemas imbricados frontal y dorsal. Tomado y modificado de Cristallini (1998).



2.3 TEORÍA DE ESCALADO DINÁMICO.

Propuesta por Hubbert (1937), evidencia la relación entre dos cuerpos con igual forma y densidad, pero con dimensiones diferentes. Con la ayuda de una constante de proporcionalidad (λ), es posible vincular directamente, ambos cuerpos, y sirve de referencia (escala), para el análisis de las propiedades físicas en laboratorio. Hubbert (1937) observó que algunas propiedades físicas de los cuerpos con igual densidad y forma, pero diferente tamaño, se reproducen proporcionalmente al tamaño de los cuerpos. Es así como un piñón con diámetro igual a 10 cm, necesitará menos frecuencia al girar para generar igual potencia, que un piñón con un diámetro de 3 cm. Quedando la constante de proporcionalidad (λ) quedará definida por;

$$\frac{l_2}{l_1} = \lambda, Ol_2 = \lambda l_1$$

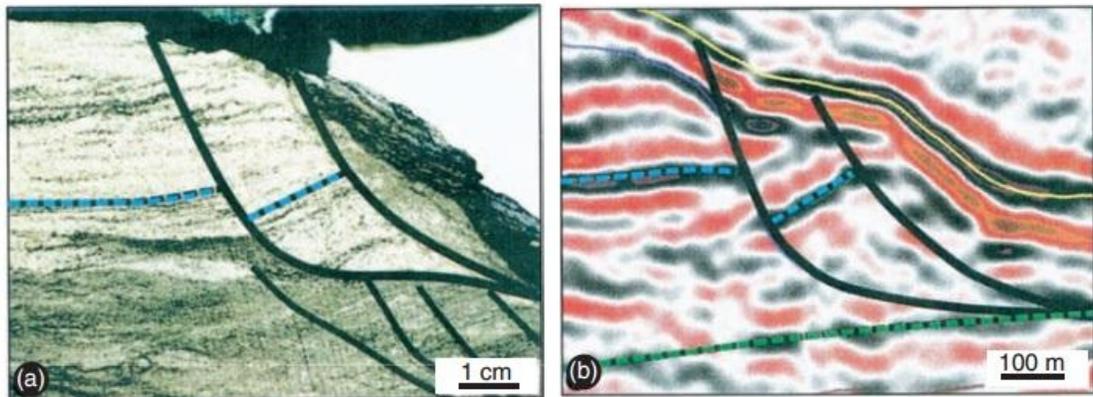
Donde l_1 representa la longitud original o del prototipo natural, y l_2 simboliza la longitud del modelo análogo. Según Hubbert (1937), el escalado dinámico de materiales granulares solo dependerá del factor longitud para su uso correcto, siendo despreciable las variables físicas gravedad y densidad, las cuales serían iguales en ambos cuerpos.

2.4 TEORÍA FRACTAL Y AUTO-SIMILITUD EN ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS.

Un fractal es una forma geométrica, la cual puede ser dividida en pequeñas partes, donde cada una de ellas, representa una forma correspondiente al uno más grande, significando que sus propiedades se repiten a diferentes escalas, Fossen (2010). No se exigen de este comportamiento a los pliegues y fallas, estructuras geológicas que presentan auto-similitud a diferentes escalas, ocasionando múltiples formas similares, en cuanto a sus relaciones geométricas, pero diferentes en tamaño, que compensan la estructura generada al azar, por ejemplo, para una falla que presente un desplazamiento de 100 m, existirán 100 fallas de 10 m cada una, Fossen (2010).

En la figura 20, se observan estructuras a dos escalas de observación diferente, perteneciendo ambas al mismo sector, Campo Statfjord, Mar del Norte, ilustrando el concepto de auto-similitud.

Figura 10. Estructuras geológicas a diferente escala; a) En centímetros b) en metros. Tomado de Fossen (2010).



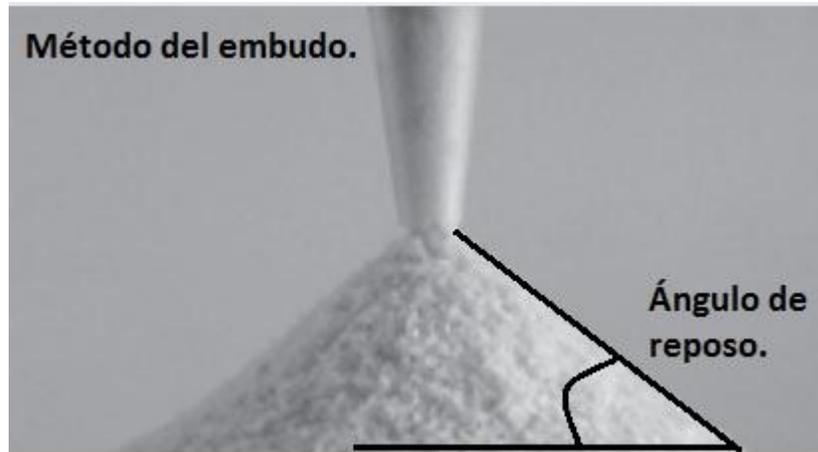
2.5 ANGULO DE REPOSO Y COEFICIENTE DE FRICCIÓN INTERNA.

El ángulo de fricción interna, o ángulo de reposo ϕ_{rep} , como es conocido, es un parámetro de los materiales que una vez es obtenido, se mantiene constante durante los procesos deformativos o de carga, Solaque y Lizcano (2008). La relevancia de este parámetro está dada en la manera en que condiciona el comportamiento mecánico de las rocas, su respuesta a los esfuerzos, Portillo (2008). Definiéndose entonces como el máximo ángulo alcanzado por un montículo de material granular, cuando éste se mantiene estable sin que se produzcan fallas por desplazamiento, y se define gráficamente como la inclinación expuesta por dicho montículo, quedando condicionado a factores tales como; forma y cohesión de las partículas, Rodas y Rousé (2010).

Existen varios métodos para el cálculo experimental del ángulo de reposo ϕ_{rep} , siendo el método del embudo el más fácil y práctico. El método consiste en un embudo que se apoya sobre una superficie horizontal, al cual se le vierte el material granular (arena) completamente seco, para después ir levantando el

embudo paulatinamente y generar un montículo de material por pluviación, Solaque y Lizcano (2008).

Figura 11. Método del embudo, en el que se aprecia también la expresión gráfica del ángulo de reposo. Tomado y modificado de Solaque y Lizcano (2008).



El coeficiente de fricción interna μ , o coeficiente de rozamiento como también es conocido, representa la capacidad que ejerce la superficie de dos materiales en contacto al deslizamiento. La expresión matemática utilizada para su cálculo estará dada por la siguiente ecuación, Portillo (2008):

$$\mu = \tan(\phi_{rep})$$

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.

En este capítulo, se dará a conocer la secuencia metodológica, utilizada en esta investigación.

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

En esta etapa preliminar a toda investigación, se busca generar las bases conceptuales para abordar un problema de carácter científico, brindando claridad sobre las posibles hipótesis de trabajo. Inicialmente se buscó información en la base de datos de la Universidad Industrial de Santander (UIS), posteriormente se amplió la búsqueda a diferentes sitios web. La relevancia de esta etapa, surge en la medida que un buen estado del arte, deriva en una hipótesis de trabajo.

El finalizar esta etapa se concluye la necesidad de implementar nuevas y viejas técnicas asociadas al análisis cuantitativo de los fenómenos naturales, técnicas que han sido instauradas a nivel mundial desde hace ya varias décadas, y que en el caso colombiano, no han sido implementadas, generando así modelos teóricos de prototipos naturales a partir de estudios realizados en otras partes del mundo.

3.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.

Superada la etapa de recopilación bibliográfica, procedemos a plantear el problema a solucionar con la investigación, que en nuestro caso, al conocer de antemano los vacíos en cuanto a antecedentes de trabajo con modelamiento análogo de estructuras geológicas a escala de laboratorio en el país, sería generar

una correcta metodología de trabajo, que permita analizar la cinemática de estilos estructurales asociados a un ambiente compresivo, subyaciendo a éste, la necesidad de identificar el idóneo material de trabajo para generar una correcta analogía, en la cual, sea posible apreciar las diferentes estructuras ligadas a dicho estado de esfuerzo.

3.3 FASE DE LABORATORIO, ADQUISICIÓN DE DATOS.

El presente numeral explica la forma en que se desarrolló el trabajo de laboratorio asociado a ésta investigación, con él, se ilustra al lector sobre los numerosos pasos a seguir en la realización de investigaciones en las que el modelamiento análogo a escala de laboratorio sea una herramienta de trabajo.

Parámetros y materiales.

Para el desarrollo del montaje experimental se tuvo en cuenta los siguientes parámetros; en el caso del modelamiento análogo, se hace necesaria una mesa de trabajo o una caja de arena (sandbox) para representar estructuras geológicas que estén ligadas a ambientes compresivos, los materiales seleccionados describen un comportamiento granular, libre de humedad, se utilizó 2 tipos diferentes de arena seca (material granular), la arena tipo I es producto de la carga sedimentaria del río de oro, es una arena comercial de fácil adquisición en las diferentes ferreterías de la ciudad, la arena tipo II fue colectada de la formación Los Santos en inmediaciones de la vereda Mesitas de San Javier, municipio de Los Santos, Departamento de Santander. La constante de proporcionalidad longitudinal 10^{-5} Dooley y Schreurs, (2012) se utiliza para el desarrollo de las diferentes series experimentales, y representa físicamente 1 cm en el modelo y 1 Km en el terreno. En cuanto al seguimiento fotográfico secuencial de la deformación, se utilizaron dos puntos focales, los cuales involucraron una vista de

planta y una vista transversal del modelo. Por último, el análisis cinemático de la deformación se lleva a cabo con el código abierto PIVLab.

4. RESULTADOS.

La propuesta metodológica planteada en esta investigación hace parte de los resultados obtenidos, con ella se sugiere una secuencia de pasos, mas no una regla general, puesto que cada modelo tiene sus propios requerimientos.

4.1 MONTAJE EXPERIMENTAL.

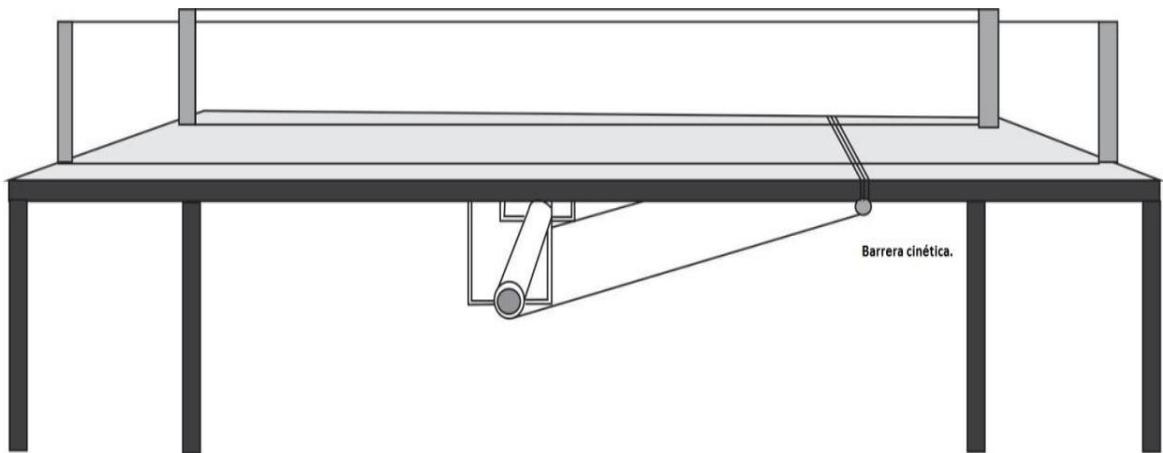
En el caso del modelamiento análogo de estructuras geológicas, se hace necesaria una mesa de trabajo que cuente con características específicas, que permita la correcta manipulación de los materiales involucrados. También se tendrá en cuenta en este numeral, las especificaciones necesarias, y las expuestas, por cada material que se utilizara durante la investigación.

- **Mesa de trabajo.**

La mesa de trabajo cuenta con unas especificaciones simples, gracias a ellas, es posible realizar el modelado análogo a esa escala. Se tiene entonces una mesa de madera con una superficie horizontal, con las siguientes dimensiones; 150 cm x 70 cm, la cual presenta un margen lateral de 10 cm y 15 cm, quedando en su interior una franja de 45 cm, la cual se revistió con una lámina de formica para reducir la fricción existente entre la superficie de la mesa y el papel mylar, el cual sirve de banda transportadora del material granular que se deposita sobre él, éste papel describe un coeficiente de fricción bajo ($\mu_b \approx 0.30$), Davis et al., (1983). La mesa cuenta también con un juego de rodillos que sirven para transportar el material hacia la barrera cinética ubicada en un extremo de ella, y en la cual, encontramos un rodillo de 45 cm de longitud, que ayuda a reducir la fricción (borde de mesa-

pape mylar) en la zona de acumulación del material, además de ese rodillo, la mesa cuenta otro rodillo de igual longitud, que ha de servir para enrollar el papel una vez empiece la deformación, simulando el movimiento del basamento en un ambiente compresivo. Se cuenta también con dos paredes de vidrio que pueden ser retiradas a voluntad.

Figura 12. Esquema de la mesa de trabajo utilizada en esta investigación, observar la ubicación de la barrera cinética, y que el basamento no presenta inclinación.



- **Material granular (arena).**

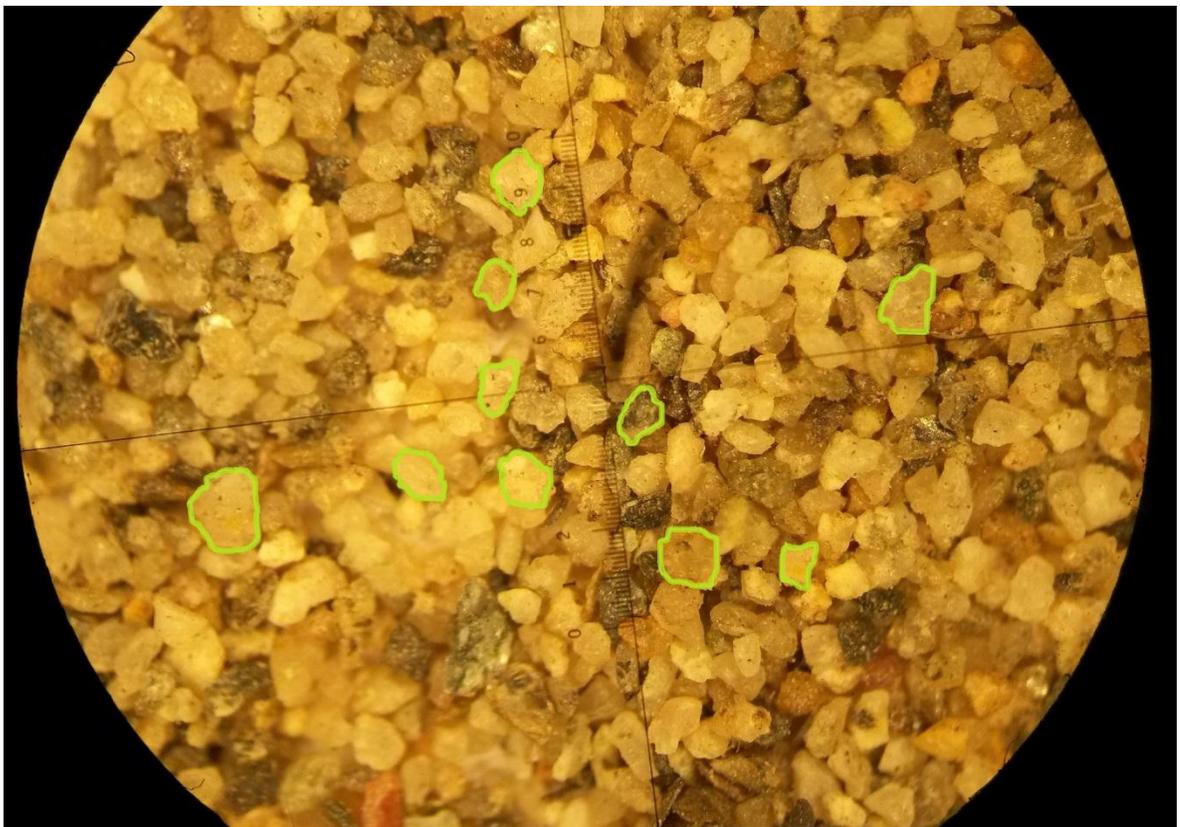
El material granular utilizado en esta investigación fue arena, y se utilizaron dos tipos de arena diferentes, ambas recolectadas en las canteras cercanas a la ciudad de Bucaramanga.

Arena tipo I.

Para la arena tipo I fue necesario un previo tamizaje que permitiera hallar el tamaño de grano adecuado a nuestros intereses, es así, que con ayuda de varios tipos de tamices (No 4, 8, 20, 30, 40, 50, 100), se extrajo y trabajó con el material retenido en el tamiz No 40 U.S. estándar, con apertura de malla de 0.42 mm, quedando clasificada según su tamaño de partícula como arena media, Folk

(1974). En cuanto a la esfericidad y redondez presentada por las partículas, se ajustan en su gran mayoría a formas esféricas angulares, con una ligera variación a no esférica angular, Powers (1953). Para la clasificación de las partículas de acuerdo al calibrado que éstas presenten, se tuvo en cuenta las imágenes de calibrado, propuestas por Pettijhon, en Boggs Jr. (1987), quedando clasificado como bien calibrado a moderadamente calibrado, el material definido como arena tipo I.

Figura 13: Foto tomada a la arena tipo I, con 0.8X de aumento, en lupa Nikon NI-150 high intensity illuminator. En verde se delimitan granos y sus formas.

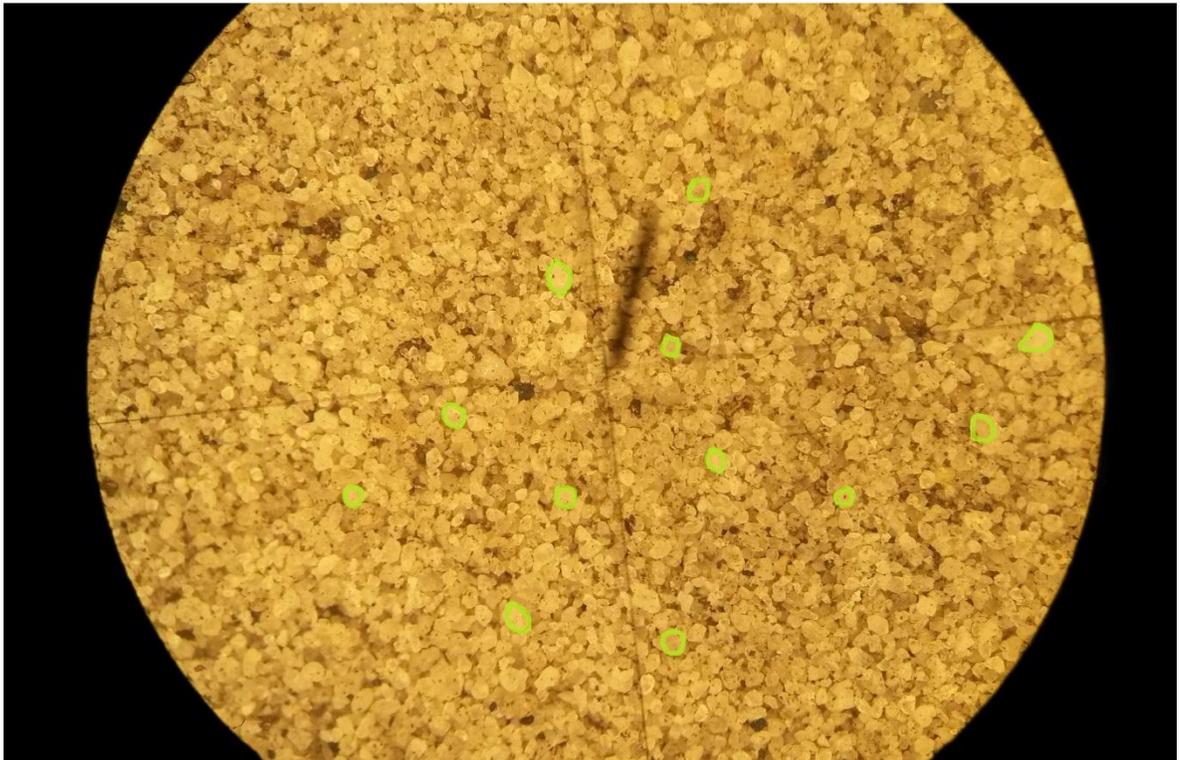


Arena tipo II.

La arena tipo II, fue seleccionada con un proceso de tamizaje más simple, ya que la misma, no presentaba tantas heterogeneidades en sus constituyentes, siendo

en gran parte arena silíceo. Es así que se utilizó un tamiz No 80 U.S. estándar, con apertura de malla 0.177 mm, quedando clasificada según su tamaño de partícula como arena fina, Folk (1974). El material denominado arena tipo II, presentó características especiales, entre ellas, la redondez y esfericidad se resaltan, por su influencia en el ángulo de reposo, siendo entonces clasificada como esférica sub-redondeadas, con variaciones ligeras a esférica redondeadas, Powers (1953). También es propio de él, exhibir un muy bien calibrado, según imágenes de Pettijhon, en Boggs, Jr. (1987).

Figura 14. Foto tomada a la arena tipo II, con 0.8X de aumento, en lupa Nikon NI-150 high intensity illuminator. En verde se delimitan granos y sus formas.



- **Cálculo del ángulo de reposo y el coeficiente de fricción interna.**

Se calculó el ángulo de reposo, utilizando el método del embudo anteriormente expuesto, se realizó para cada tipo de arena 10 pruebas, con el mismo método y

con la misma cantidad de material (500 g). Se realizaron varias pruebas, con el fin de reducir la incertidumbre asociada a cada una de ellas, generando así, representatividad estadística que valide los datos.

En cuanto a la captura de imágenes fotográficas, se recomienda tener la cámara al mismo nivel de la superficie en la que se generó el montículo de arena, a una distancia no mayor a un metro.

Para el cálculo del coeficiente de fricción interna se utilizó la ecuación ya nombrada en capítulos anteriores.

Arena tipo I.

En la figura 15, se aprecia una de las 10 pruebas realizada, para ésta granulometría en especial, donde de manera gráfica se halla el ángulo de reposo, $\phi_{rep} = 34,20^\circ$. Este valor corresponde al promedio aritmético de todos los ángulos obtenidos. Quedaría entonces el coeficiente de fricción interna μ , definido para este tipo de granulometría.

$$\mu = \tan(\phi_{rep}) = \tan(34,20^\circ) = 0,67$$

Arena tipo II.

En la figura 16, se observa un montículo de arena, correspondiente a una de las 10 pruebas realizadas para determinar el ángulo de reposo, $\phi_{rep} = 35,40^\circ$. Al igual que el caso anterior, este valor representa el promedio aritmético de todas las pruebas. En cuanto al coeficiente de fricción interna μ , queda definido:

$$\mu = \tan(\phi_{rep}) = \tan(35,40^\circ) = 0,71$$

Figura 15. Se observa montículo de arena tipo I, generado con el método del embudo para medir el ángulo de fricción interna.

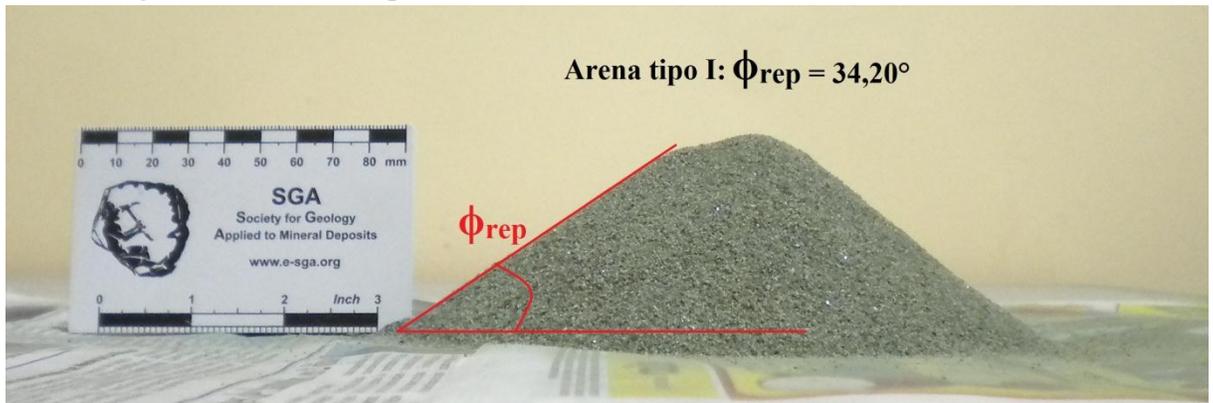
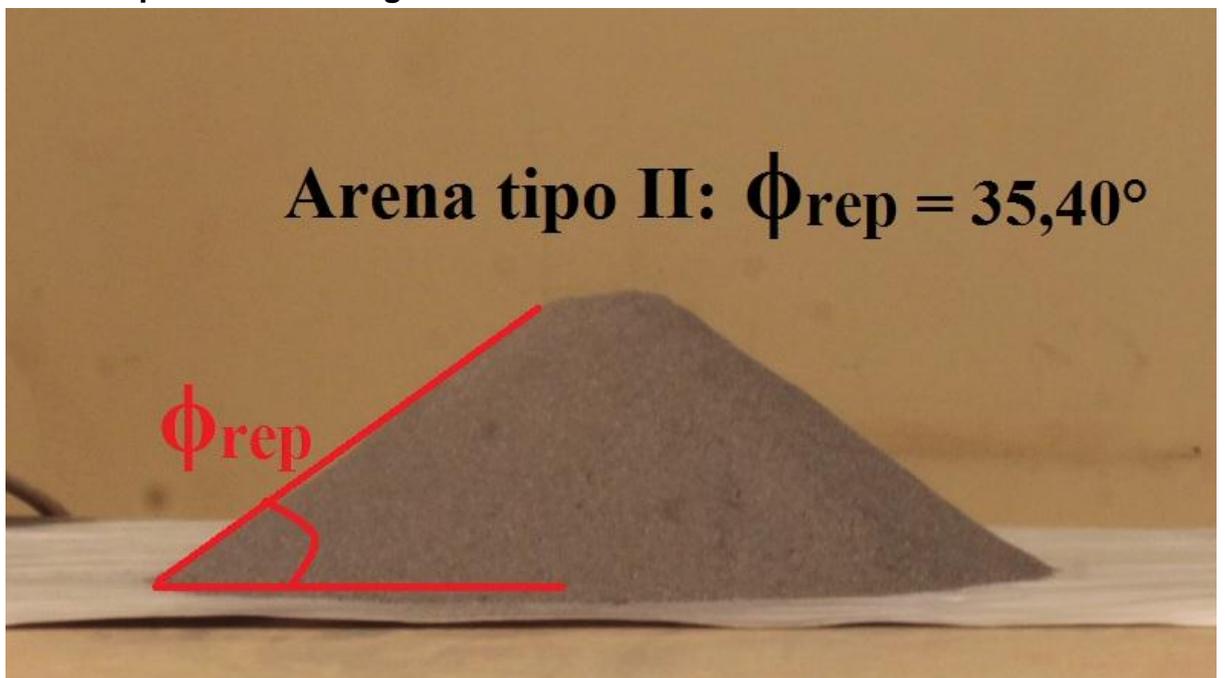


Figura 16. Se observa montículo de arena tipo II, generado con el método del embudo para medir el ángulo de fricción interna.



Series experimentales.

A continuación se procede a describir, los pasos seguidos durante el desarrollo de las series experimentales que conciernen a esta investigación. Es de agregar, el hecho de que solo se tuvo en cuenta 2 tipos diferentes de granulometría (arena

tipo I y arena tipo II), dando como consecuencia lógica, 2 tipos de series experimentales, en las cuales solo se varia el tipo de material granular utilizado y por consiguiente el ángulo de reposo ϕ_{rep} .

- **Serie experimental I o de control.**

Esta serie, llamada de control, se realizó con el tipo I de arena, y se denomina de control, ya que con ella se hicieron diferentes pruebas previas y repetitivas a modo de validar estadísticamente la tendencia observada, como también, para generar familiaridad con la mesa de trabajo y reducir la incertidumbre asociada al laboratorista, siendo así, que se corrió el modelo en más de 50 oportunidades, documentando las últimas 15 veces, con registro fotográfico incluido.

El modelo consistía en; una capa de arena de 3 cm de espesor en total, la cual se dividió en 3 niveles de 1 cm cada uno, delimitados por subniveles de arena del mismo tipo, aunque diferente color, como se muestra en la figura 19. El material se depositó con ayuda de un tamiz con apertura de malla ligeramente mayor al tamaño de la arena tipo I, tratando de dar uniformidad en toda la superficie, para posteriormente nivelar con ayuda de una llana, como se aprecia en la figura 17 y 18.

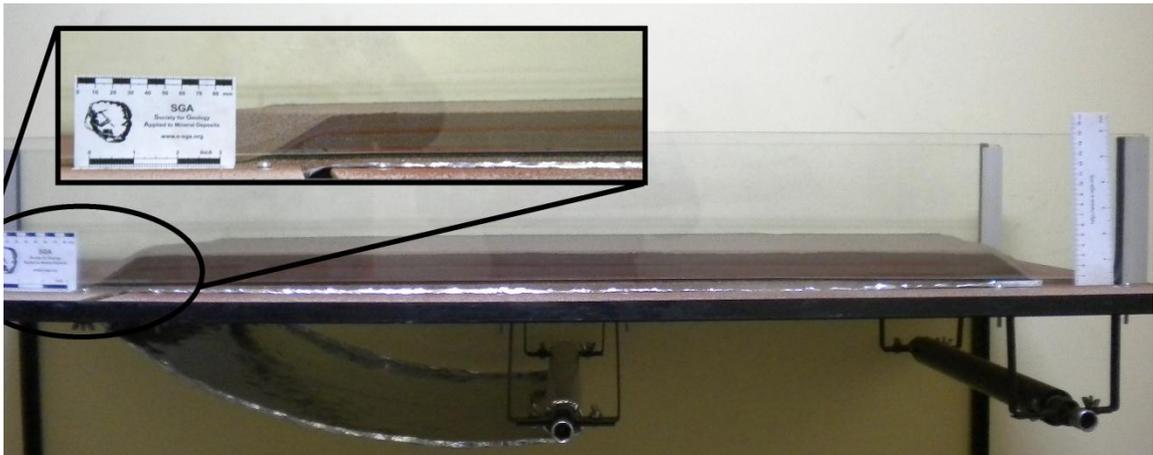
Figura 17. Técnica empleada para depositar el material uniformemente.



Figura 18. Se observa la técnica empleada para nivelar a 1 cm (con ayuda de la llana) la primera capa de arena tipo I.



Figura 19. Condiciones iniciales para la serie experimental de control, con arena tipo I, se observan los 3 niveles de arena, perfectamente nivelados.



En el análisis de evolución del modelo, se tuvo en cuenta datos de longitud (x_0) y altura (y_0), en condiciones iniciales, y finales cuando se daba por terminada la deformación (x , y). Esto, permitió calcular el porcentaje de acortamiento asociado a la deformación, que estaría dado por la ecuación encargada de medir la deformación longitudinal, la cual originalmente mide el porcentaje de elongación (e), quedando restringido los valores positivos, para todos los casos en que el

cuerpo experimente elongación y los valores negativos para aquellos en el que el material se contrae, Martínez (2002).

$$e = \frac{(x - x_0)}{x_0} * 100 = e$$

En la figura 20 se observa la tabla de datos para el cálculo del porcentaje de elongación (e), todos los valores hallados presentan signo negativo, lo cual, como anteriormente se dijo, describe un fenómeno de acortamiento o contracción. Los experimentos 10* y 15**, se diferencian de los demás, en el primer caso, hubo un pequeño altercado con el papel mylar, que derivó en una finalización prematura del experimento, y en el segundo caso, solo se busca diferenciar el grado de importancia, ya que, fue en esa oportunidad que se realizó el seguimiento fotográfico secuencial en planta y transversal.

Figura 20. Tabla de condiciones iniciales (Xo) y finales (X), para el cálculo del porcentaje de elongación (%e).

No	Xo (cm)	X (cm)	ΔX	%e
1	80	57	-23	-28,8
2	88	59	-29	-33,0
3	80	59	-21	-26,3
4	80	57	-23	-28,8
5	80	59	-21	-26,3
6	85	60	-25	-29,4
7	85	61	-24	-28,2
8	83	60	-23	-27,7
9	85	65	-20	-23,5
10*	85	78	-7	-8,2
11	90	70	-20	-22,2
12	85	57	-28	-32,9
13	88	64	-24	-27,3
14	92	65	-27	-29,3
15**	80	57	-23	-28,8

Una vez iniciada la deformación, ésta solo se detendrá cuando el aporte de material a la cuña se haya detenido, imposibilitando el avance del primas acrecionado hacia la zona opuesta al sentido de transporte tectónico. En la figura 21, se observa el estado final de la deformación, en donde se aprecia el sentido de la vergencia de los cabalgamientos, la cual, como en líneas anteriores se dijo, representara el sentido contrario al a la dirección de avance tectónico.

Figura 21. Vista transversal del modelo análogo de un prisma acrecionado, en el que se observa el sentido de vergencia de los cabalgamientos y el sentido de avance tectónico.

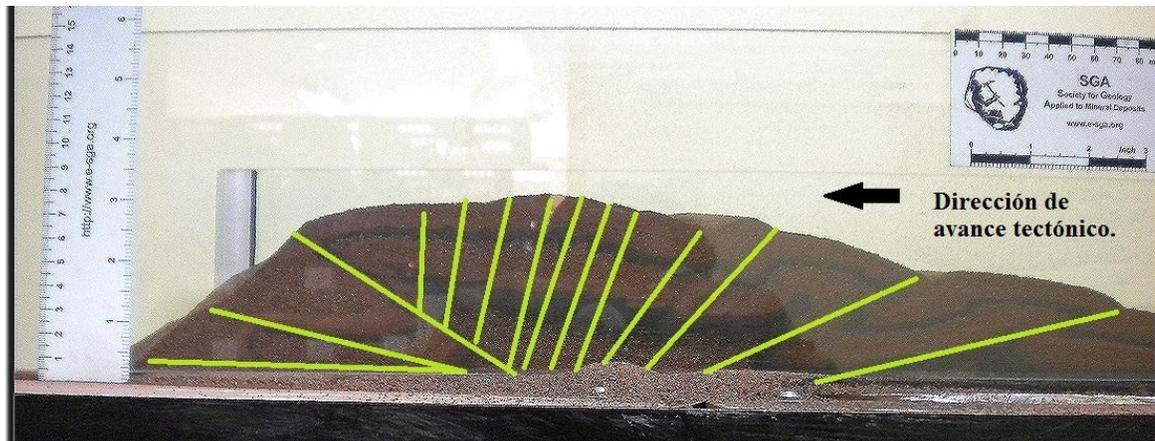


Figura 22. Vista de planta modelo análogo FPC, se observa en ella la expresión geomorfológica de los cabalgamientos en planta, con clara concavidad en el sentido del transporte tectónico.



Para la última adquisición de datos con arena tipo I, se adicionó a la etapa final, una granulometría de menor tamaño sobre la superficie de la FPF, la cual servirá a modo de filtro para adicionar de manera cuidadosa agua con ayuda de un atomizador, permitiendo la compactación del material (arena tipo I), para posteriormente realizar cortes transversales a la FPF con ayuda de un cuchillo de 12", a modo de conocer y comparar el comportamiento que describe en los sectores internos la FPF, con lo observado en los laterales de dicha estructura.

A continuación se procede a ilustrar diferentes vistas del experimento final, con el que se hizo la adquisición de imágenes secuenciales para la arena tipo I. la adquisición se realizó con dos cámaras, una para un seguimiento transversal y oblicuo, la otra, para la vista de planta. Para el seguimiento transversal y oblicuo se utilizó una cámara tipo Canon EOS T3i, y en planta se tuvo una Go-pro Silver.

Figura 23. Vista transversal de un modelo análogo de CC, etapa final de deformación.

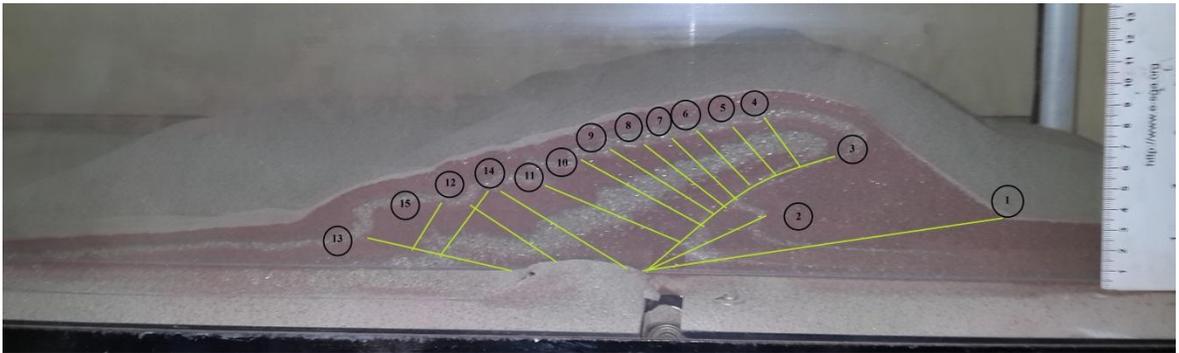


Figura 24. Vista de planta de un modelo análogo de CC, etapa final de deformación.



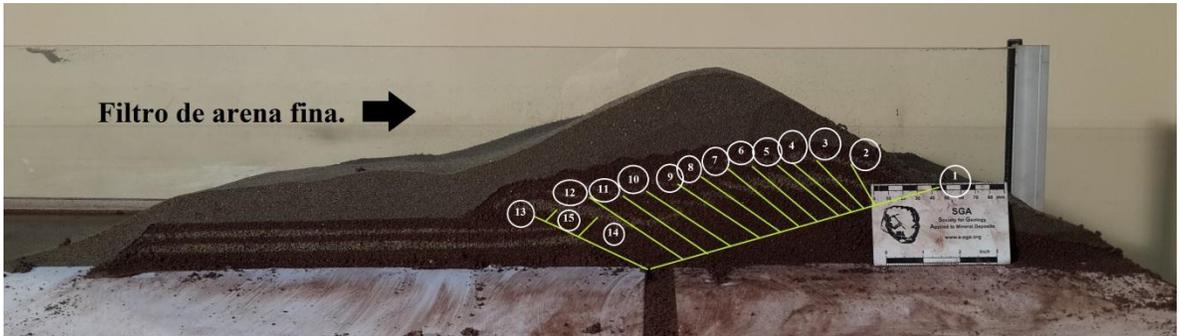
Para la vista de planta se tomó la precaución de generar indicadores para el análisis de la deformación, es así que se agregaron circunferencias en la superficie del modelo sin deformar, dichas circunferencias describen un diámetro de 6 cm c/u, y se distribuyeron de manera que cubran toda la superficie del modelo, como se observa en la figura 25. En promedio, todos los experimentos realizados con la arena tipo I presentaron 15 cabalgamientos, 12 de ellos, en sentido opuesto a la dirección de avance tectónico, y los 3 restantes con sentido a favor del transporte tectónico, resaltando la presencia de 2 retrocabalgamientos en el frente orogénico.

Figura 25. Condiciones iniciales del modelo, se observan en él, las circunferencias que sirven de guía sin deformar aún.



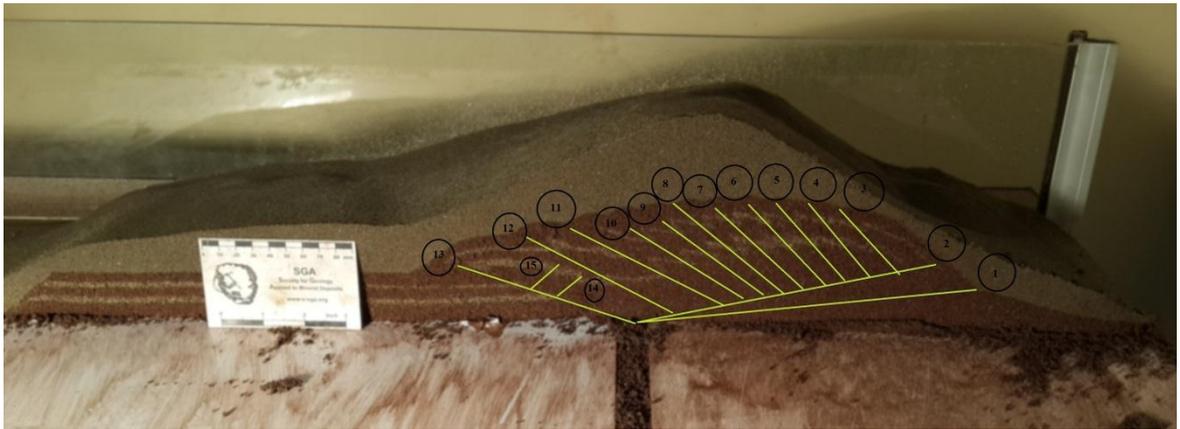
En la figura 26 se observa un corte transversal del modelo, solo que éste, es tomado del interior de la FPF, una vez finalizada la etapa anteriormente descrita en la que se agrega agua al modelo, en la figura se observa con mayor claridad el comportamiento que asumen los cantos y su relación con la fallas existentes.

Figura 26. Corte transversal al interior de la FPF, en la figura se aprecia mejor los planos de falla, asociados a cada cabalgamiento.



En la figura 27 se observa en vista oblicua un corte transversal al modelo análogo de una FPF o CC, es posible apreciar en los cabalgamientos más cercanos al frente de avance orogénico o de deformación, la ocurrencia de retrocabalgamientos (back thrust) en su flanco trasero.

Figura 27. Vista oblicua de un corte transversal al interior del modelo análogo de FPF.



La constante de proporcionalidad (λ) para la serie experimental I, queda definida por la relación existente entre la longitud natural y del modelo.

$$\frac{0.8(m)}{80.000(m)} = 0.00001$$

Quedando representada de forma numérica la escala como;

$$1:100.000$$

- **Serie experimental II.**

Esta serie se realizó con el tipo II de arena, teniendo en principio, la misma secuencia de eventos. Inicialmente se depositó granos de arena tipo II sobre la superficie cubierta por papel mylar, el cual es móvil y sirve como banda transportadora. El modelo consiste en 3 niveles de 1 cm cada uno, subdivididos por niveles del mismo tipo de arena pero diferente color. Se inicia la deformación dando movimiento a la biela que se encuentra ubicada en un extremo de la mesa, adherida al rodillo en el que el papel se enrolla, la deformación como en casos anteriores, se detendrá cuando el aporte de material a la CC se termine,

imposibilitando la propagación de las cabalgaduras en sentido opuesto a la dirección de avance tectónico. Posteriormente se procede a depositar otra granulometría en la parte superior de la FPF, a modo de generar el previo filtro para humedecer el modelo, generando así una mayor cohesión en el material involucrado en la deformación.

En la figura 28 se observa una vista transversal del modelo de CC, en el que se ve la ocurrencia de los planos de falla, cabe agregar, que al momento de realizar esta serie, se tuvo un pequeño inconveniente asociado espacialmente, a los extremos laterales de la barrera cinética, el cual consistía, en pérdida de material, impidiendo la acumulación del mismo en ese sector, imposibilitando por momentos el normal crecimiento de la FPF en esos sectores, dicho comportamiento no se propagó al interior de la CC, y se controló rápidamente con pequeñas cuñas de cartón, las cuales bloquearon en los extremos cualquier pérdida. La adquisición se realizó con las mismas cámaras fotográficas de la anterior serie.

Figura 28. Vista transversal del modelo análogo de una FPF, con arena tipo II.

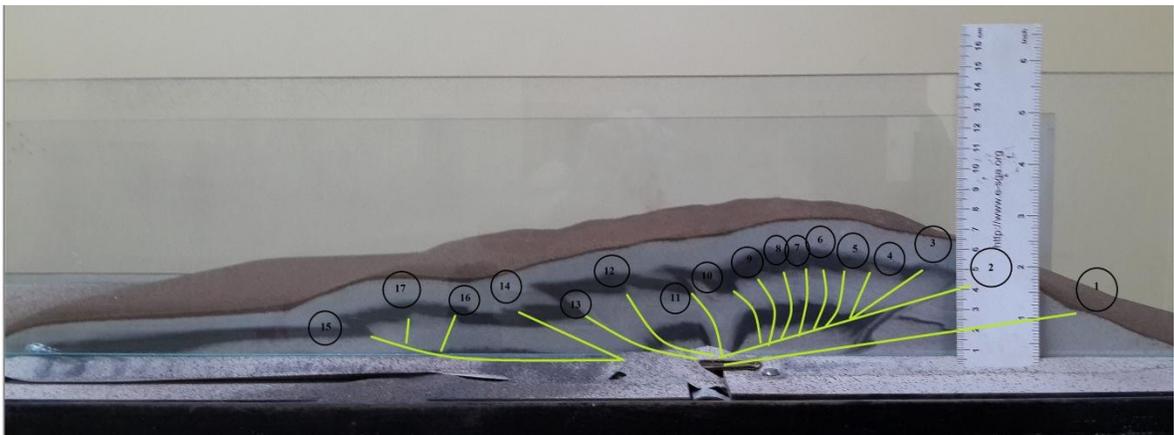


Figura 29. Vista transversal al interior de un modelo análogo de una FPF, con arena tipo II. Donde se aprecia el filtro de granulometría diferente y la etapa final de la deformación.

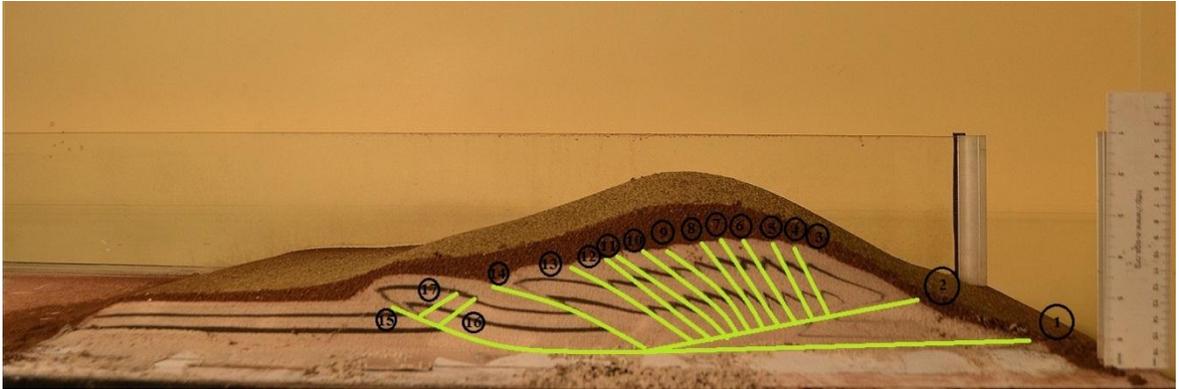


Figura 30. Vista transversal a detalle de un modelo análogo de una FPF, se observa en verde cabalgamiento y en rojo un retrocabalgamiento.



Al igual que con la serie experimental anterior, se tuvo en ésta, el cuidado de generar indicadores cinemáticos para la vista de planta, consistiendo en círculos de 6 cm de diámetro cada uno, estratégicamente espaciados y distribuidos a modo de cubrir el área de interés. Como también se tuvo en cuenta las dimensiones iniciales (X_0 , Y_0) y finales (X , Y) del modelo, sirviendo esto para el cálculo del porcentaje de elongación, previamente explicado.

Figura 31. Vista en planta modelo análogo de una FPF, en verde se aprecia circunferencias de control cinemático.

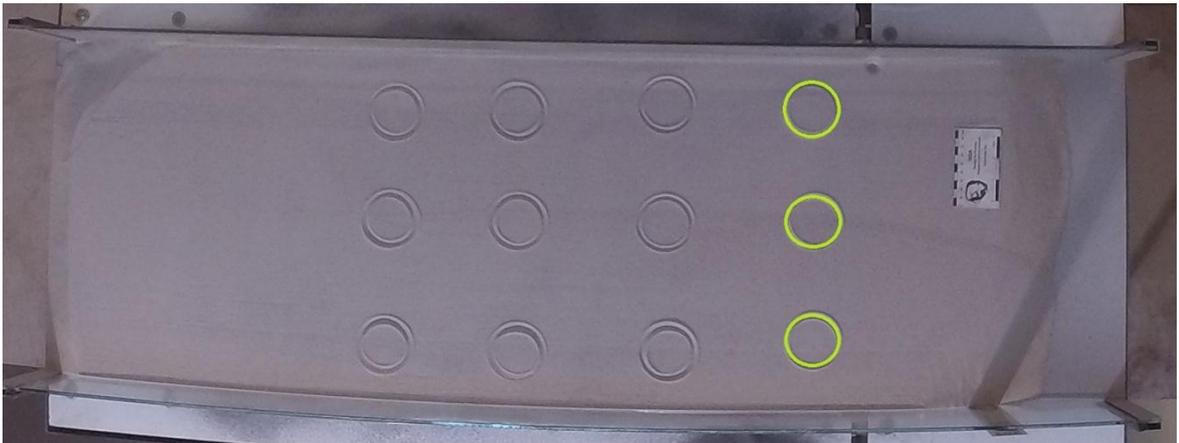


Figura 32. Cálculo del porcentaje de elongación (acortamiento) experimentado por el modelo análogo de una FPF con arena tipo II, con la ecuación de deformación longitudinal.

No	Xo(cm)	X(cm)	ΔX	%e
1	78	66	-12	-15,38

Para la serie experimental II, se obtuvo el siguiente valor para la constante de proporcionalidad; quedando su escala numérica definida por:

$$\frac{0.78(m)}{78.000(m)} = 0.00001$$

$$1:100.000$$

4.2 FASE DE LABORATORIO, PROCESAMIENTO DE DATOS.

En esta etapa se genera el procesamiento de los datos (imágenes), para el análisis secuencial de la deformación. Utilizando un velocímetro de partículas digital (DPIV) con código abierto (PIVlab) para MATLAB, el cual, permite el análisis del campo vectorial asociado al flujo del material involucrado en el modelo,

Thielicke y Stamhuis (2014). La interfaz gráfica que presenta PIVlab, resulta amigable y de fácil manejo, por lo demás, los filtros y pasos subsiguientes a la carga de imágenes, están determinados por los resultados obtenidos, a partir del ensamble de nuevos filtros o la ausencia de ellos en el análisis, es así que se obtienen diferentes resultados, quedando supeditado el ideal a las necesidades de la investigación. Es así, que en el subsiguiente paso a la carga de imágenes, llamado pre-procesamiento de imagen (image pre-processing), se utilizan todos los filtros que en la ventana se encuentran (Enable CLAHE, Enable highpass, Enable intensity capping, Wiener2 denoise filter) cada uno de ellos ayudará a mejorar la resolución de las imágenes obtenida a partir del uso de ventanas de análisis que permiten un mejor contraste entre las capas del modelo, el tamaño de píxeles en cada ventana de evaluación utilizada por los diferentes filtros es; 32px Enable CLAHE, 32px Enable highpass y 16px Wiener2 denoise filter. Para mayor información sobre cada filtro ver; Thielicke y Stamhuis (2014). El siguiente paso, define parámetros de suma importancia, como lo son; el algoritmo utilizado para la evaluación de imagen (FFT), el cual utiliza la transformada de Fourier para una correlación directa con múltiples pasadas y ventanas de deformación, y a su vez, permite elegir el tamaño en píxeles de las ventanas de evaluación (64, 32, 16, 8), el número de ventanas de evaluación (Pass 1, 2, 3, 4), y el método de interpolación dentro de cada ventana de evaluación de imagen (spline), éste último me genera una mayor precisión aunque el procesamiento de las imágenes sea más lento, en la figura 36 se observa todos los pasos mencionados anteriormente.

En la figura 33, se observa la interfaz gráfica del código abierto PIVlab, para el software MatLab. En ella es posible apreciar el paso inicial, en el cual, se carga la secuencia completa de imágenes, y es posible elegir el estilo de análisis para los pares secuenciales de las mismas (1-2,2-3,3-4... o 1-2,3-4,5-6...), para efectos de esta investigación se utilizó el primer estilo secuencial, como lo muestra la imagen.

Una vez se complete la carga de imágenes correctamente, se procede a delimitar el área total para el análisis vectorial del flujo. En línea punteada aparece el marcador asignado por el programa para especificar el área, que para el caso de esta investigación irá hasta los marcadores en rojo ubicados en los extremos de la imagen, como lo muestra la figura 34.

Figura 33. Interfaz gráfica de PIVlab. En este paso se carga la secuencia completa de imágenes.

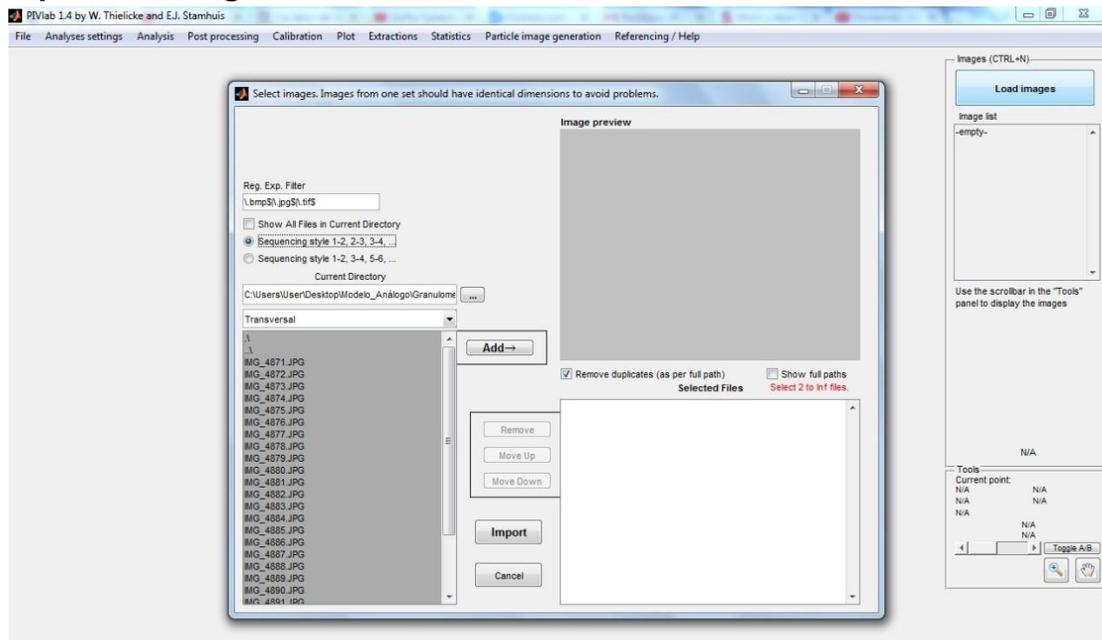


Figura 34. Delimitando el área de análisis total en PIVlab.



Paso seguido se incorporan los filtros (Enable CLAHE, Enable highpass, Enable intensity capping, Wiener2 denoise filter) que ayudan a mejorar la resolución y el contraste de la imagen en pro de un mejor análisis, esto, se generó a partir de un aumento en el tamaño de la ventana de cada filtro, como se muestra en la figura 35.

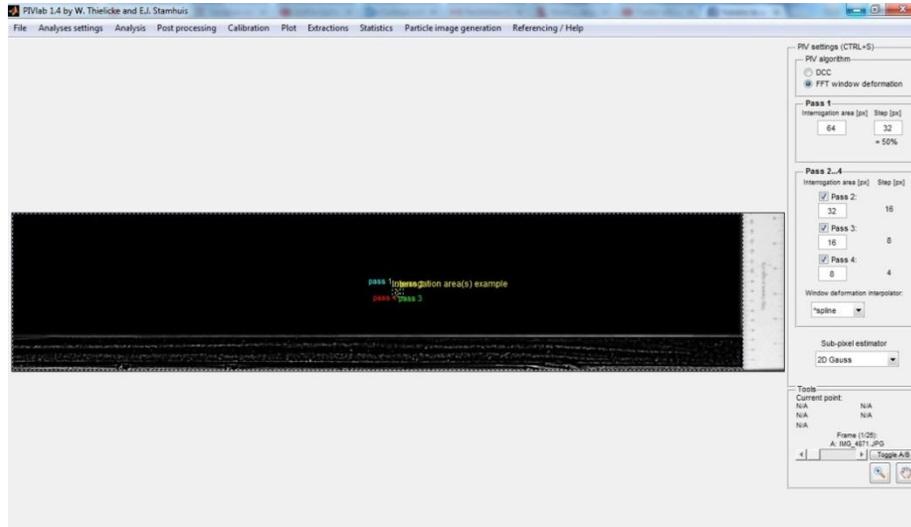
Terminado todos los pasos previos al procesamiento de imágenes, se procede a dar inicio al análisis de la secuencia completa. Al finalizar el análisis, se procede a validar el campo vectorial en la fase denominada de post procesamiento. En ésta, se redefinen de manera gráfica los límites de velocidad, como se muestra en la figura 37, donde es posible apreciar la densidad y distribución de puntos asociados a los diferentes valores de velocidad, validando todos aquellos puntos que presenten una relación de cercanía entre sí. Posteriormente se selecciona la opción de interpolar datos, para así aplicar a toda la secuencia de imágenes los valores de velocidad previamente validados, como se observa en la figura 38.

Figura 35. Pre-procesamiento de imágenes en PIVlab, incorporando filtros y definiendo el tamaño de la ventana de evaluación.



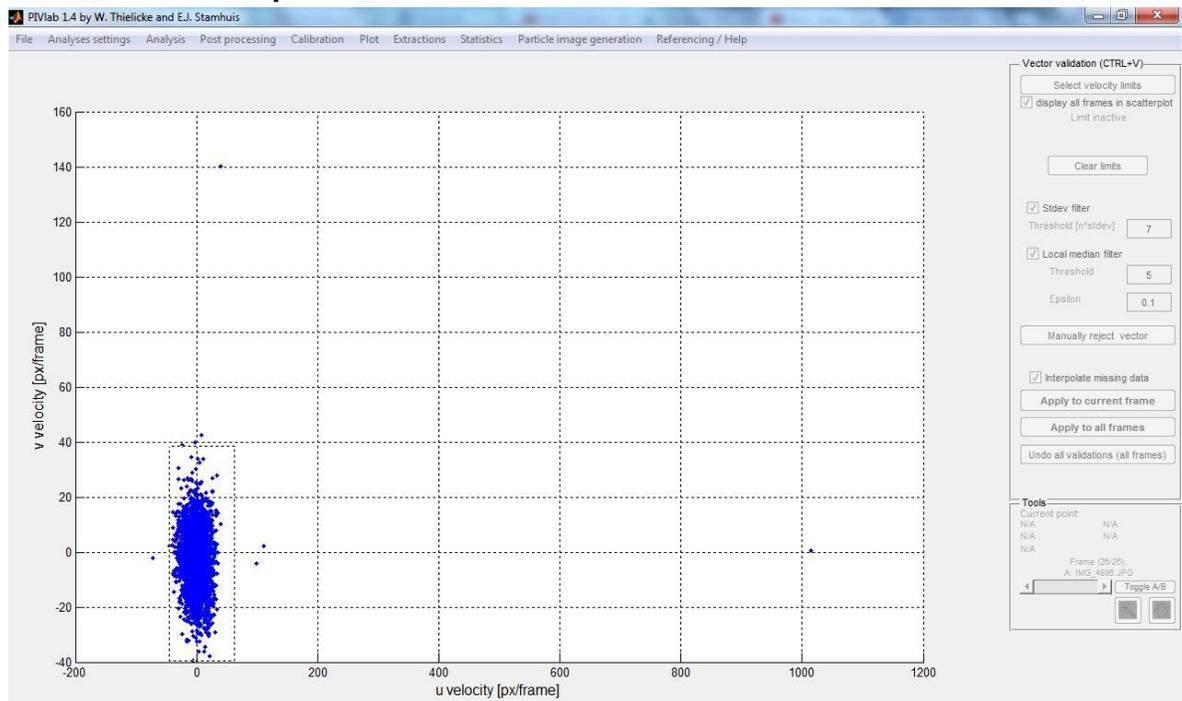
El siguiente paso se denomina de calibración, y en él se define la longitud real (mm) del modelo en la imagen. En la figura 39, se observa a detalle este paso, en línea roja se marca la longitud conocida en la imagen, para posteriormente introducir el valor real en milímetros (mm) en el recuadro superior derecho. En el paso siguiente, se procede a elegir el parámetro a visualizar, como también se le aplica al modelo un filtro de paso alto y un suavizado de datos (smooth data), que permiten una mejor visualización del campo vectorial, como se muestra en la figura 40.

Figura 36. Herramientas para el análisis. Determinando el algoritmo para evaluación de la imagen, como el número y el tamaño de las ventanas de evaluación.



Ya para finalizar, se definen los diferentes puntos y el número de líneas que limitan y constituyen el streamline rake, como se aprecia en la figura 41, el cual genera líneas guía que se modifican a medida que el modelo evoluciona, y en respuesta a los cambios que presenta en morfología, como en su estructura interna, facilitando el análisis cinemático de la deformación en forma particular, secuencial y holística. Una vez se ubican de manera transversal los puntos de referencia para el streamline rake, se exportan los resultados, en diferentes formatos.

Figura 37. Redefiniendo de manera gráfica los límites de velocidad asociados al campo vectorial del modelo.



Cabe mencionar que esta serie de pasos, descrita en líneas anteriores se aplicó para todos los casos estudiados en esta investigación, incluyendo la vista de planta.

Figura 38. Aplicando en todos los cuadros los valores de velocidad previamente validados.

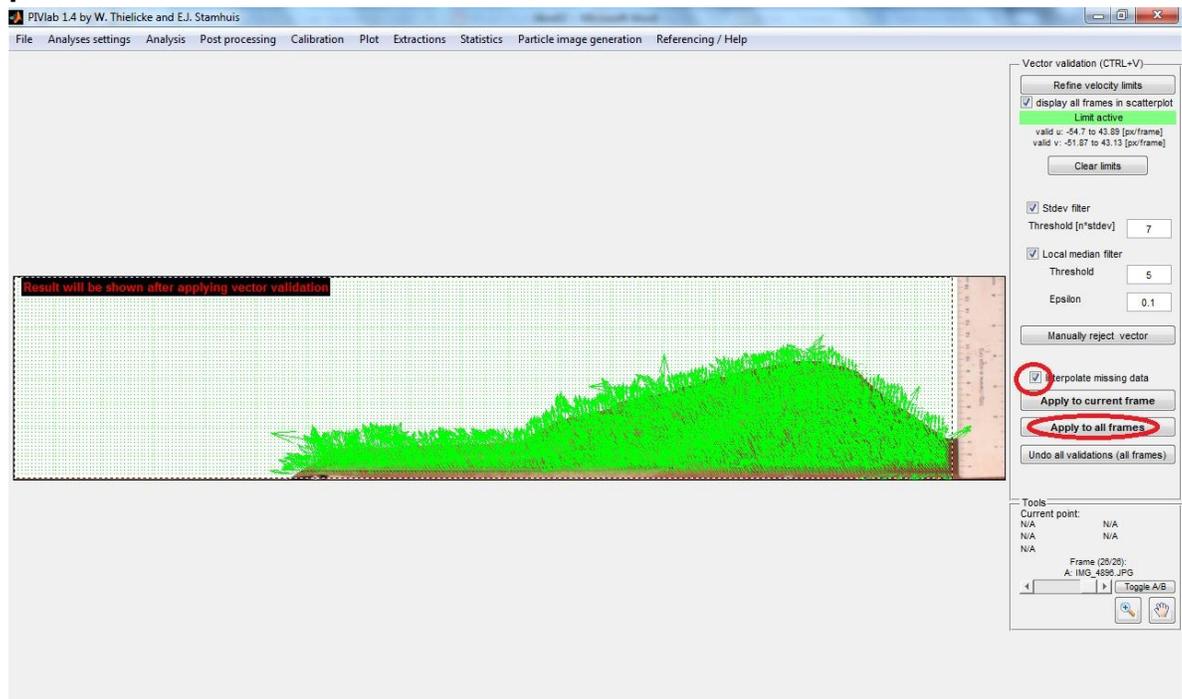


Figura 39. Calibración del modelo, se introduce el valor de la longitud real de forma gráfica y numérica.

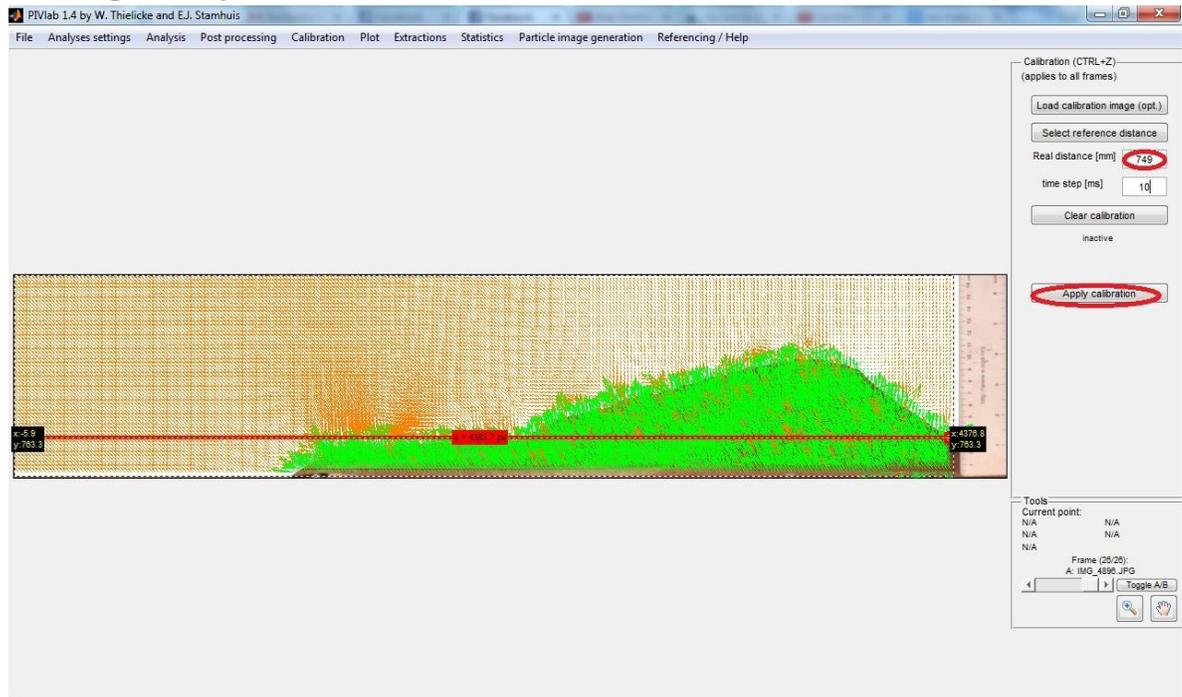


Figura 40. Se elige el parámetro a visualizar, aplicando un smooth data y un highpass vector field.

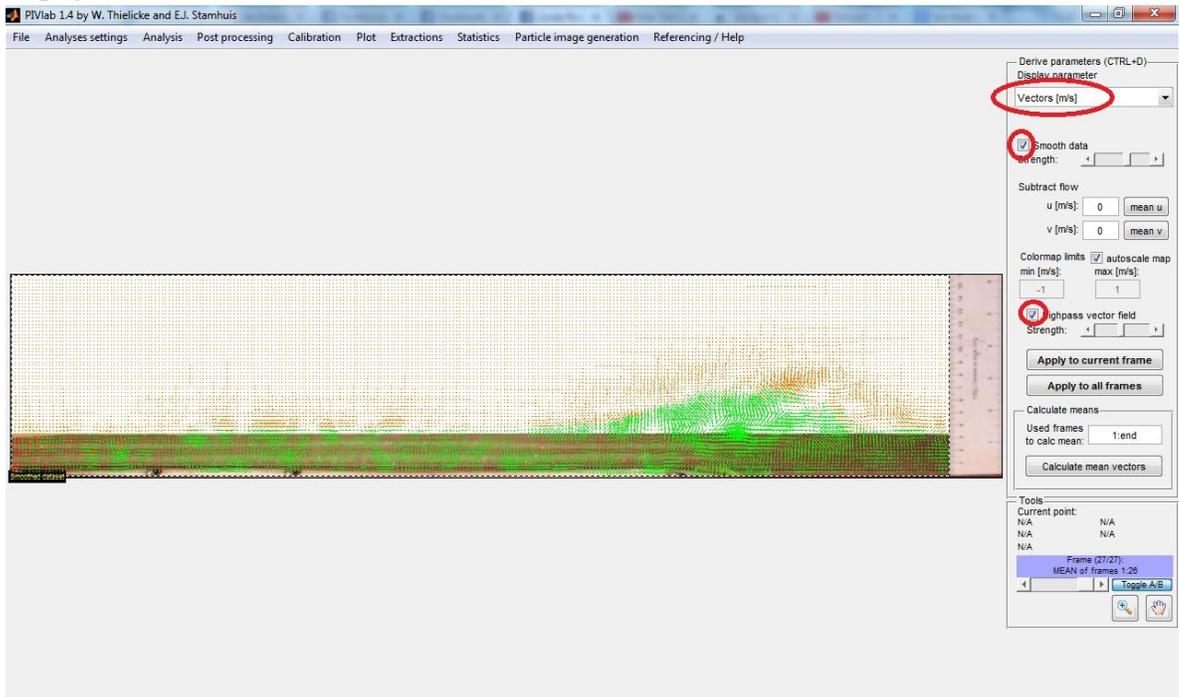
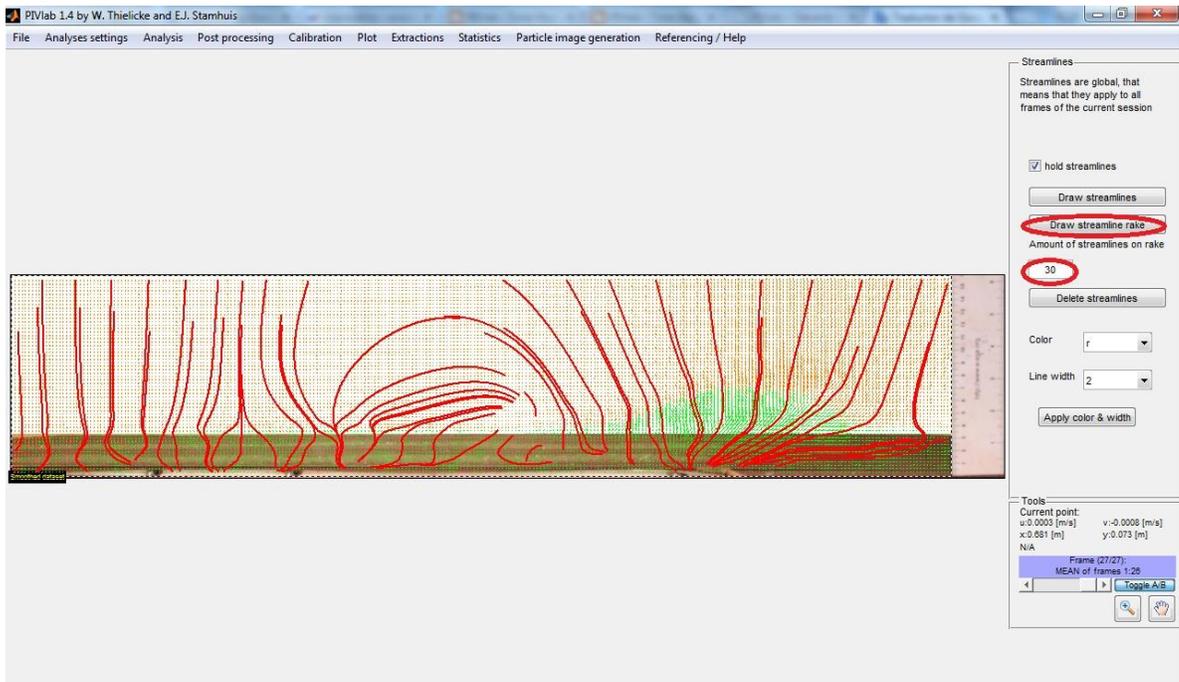


Figura 41. Streamline rake definido para el último cuadro de la secuencia.

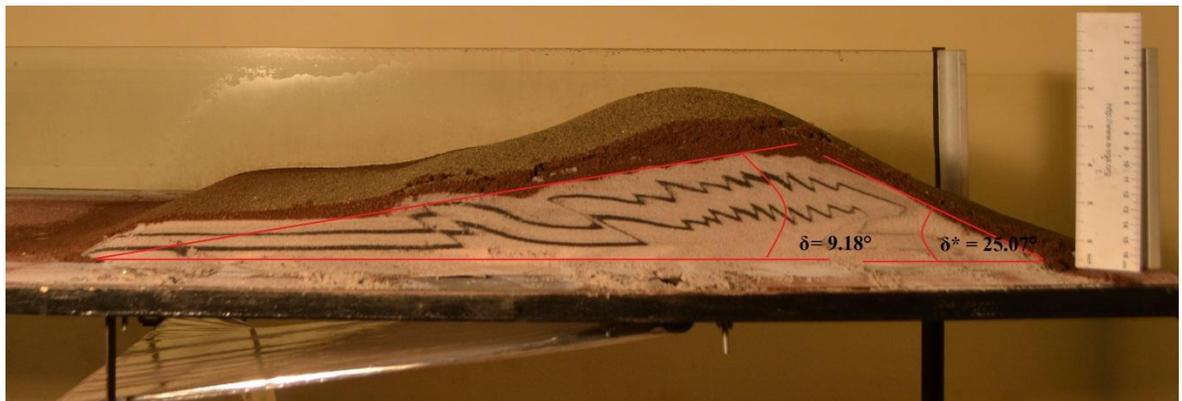


El análisis de la secuencia completa permite observar la evolución de una CC bivergente asimétrica y como se generan sus respectivos planos de fallas, en la figura 42 se aprecia las diferentes etapas registradas fotográficamente durante la deformación, como también se numera la ocurrencia de los 16 planos de falla, facilitando el estudio del modelo. La medición del ángulo crítico (δ) se realizó de forma gráfica a partir del despegue horizontal, y se toma como referencia la pendiente topográfica de la CC, quedando definido para la arena tipo I $\delta = 11.73^\circ$ en el caso del frente orogénico occidental y $\delta^* = 38,70^\circ$ el oriental, la arena tipo II presento valores de $\delta = 9.18^\circ$ (occidental) y $\delta^* = 25,07^\circ$ (oriental). En la figura 43 se observa la forma gráfica utilizada para el cálculo de δ , en este caso la línea horizontal imaginaria coincide con la inclinación del nivel de despegue.

Figura 42. Secuencia completa de la evolución de una CC bivergente asimétrica.



Figura 43. Método gráfico para el cálculo del ángulo crítico (δ y δ^*).



5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

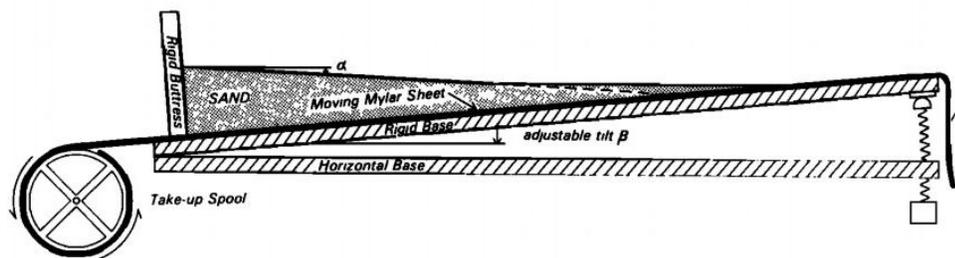
En este numeral, se tendrán en cuenta todos los resultados obtenidos durante las diferentes etapas incluidas en esta investigación, con el fin de facilitar su entendimiento.

- Se generó una mesa de trabajo (sandbox), que permite representar, analizar y reproducir la evolución física de estructuras geológicas de ambiente compresivo a escala de laboratorio, basados en los modelos de mesa realizados previamente por numerosos autores.
- Mediante diferentes criterios, se determina el material (arena tipo II) idóneo para reproducir y representar la evolución física de estructuras geológicas de ambiente compresivo a una escala de laboratorio.
- La estructura geológica mayor que describe el modelo una vez se detiene la deformación en la mesa de trabajo es característica de ambientes colisionales de límite de placa y es denominada por otros autores en estudios anteriores como cuña bivergente asimétrica.
- Se identificaron en el modelo diferentes estructuras típicas de ambientes compresivos, tales como; fallas inversas, retrocabalgamientos, y pop-up. Como también se analizó las relaciones espaciales y temporales existentes entre ellas.
- A partir del cálculo del porcentaje de acortamiento en los modelos análogos, se observa que en el caso de la arena con menor ángulo de reposo (ϕ), presenta un mayor acortamiento.

6. DISCUSIÓN.

El estudio de la evolución cinemática de cuñas críticas ha llevado a números autores a implementar el uso de mesas de trabajo (sandbox) que reproduzcan diferentes estados de esfuerzo para llevar a cabo el modelamiento análogo de estructuras geológicas, dichas mesas varían según las necesidades propias de cada investigación. Es así como Davis et al. (1983) en sus estudios sobre FPF y CC, utiliza una mesa de trabajo con ligera inclinación en su basamento hacia el hinterland y con una pared fija en un extremo, la cual reproduce a grandes rasgos sistemas montañosos compresivos tales como los encontrados en el sur de los Appalachians u el oeste de Taiwan.

Figura 44. Esquema representativo de la mesa de trabajo (sandbox) con pared fija, utilizada por Davis et al. (1983). Tomado de Davis et al. (1983).



Yagupsky, (2009) en sus estudios sobre la Faja plegada del Agrio, Cuenca Neuquina, construye con ayuda del Laboratorio de Modelado Geológico de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires una mesa de trabajo (sandbox) más elaborada para el análisis de sistemas compresivos, que adiciona una pared móvil y una componente transcurrente en sus estudios.

Figura 45. Mesa de trabajo (sandbox) con pared móvil utilizada por Yagupsky, 2009. Tomado de Yagupsky, 2009.

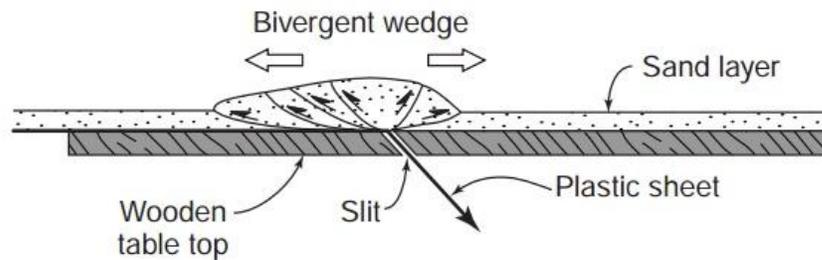


Un modelo de mesa de trabajo que generara analogías más realista fue propuesto por Van Der Pluijm y Marshak, (2004). Este modelo reproduce la evolución de una cuña critica bivergente que se desarrolla sobre una superficie de despegue horizontal, recubierta con una hoja de papel mylar sobre la que se depositan las capas de arena. Dicho modelo suprime la pared móvil que se había utilizado por diversos autores en estudios anteriores, lo cual reproduce un ambiente similar a límites de placas convergentes y/o colisionales; ambiente característico de los Andes. Para efectos de esta investigación se adopta el modelo propuesto por Van Der Pluijm & Marshak, (2004) ya que el mismo nos permite trabajar bajo la hipótesis de una zona de subducción asociada a la evolución de las FPF y CC, generando modelos más realistas.

El ángulo de reposo de los materiales granulares supedita el comportamiento mecánico de los mismos, Portillo (2008). Según Byerlee (1978), el comportamiento

mecánico quebradizo que se ajusta a la deformación de la parte superior de la corteza terrestre está controlado por el valor constante del coeficiente de fricción interna del material, el cual fue definido por Byerlee (1978), como ($\mu=0,85$) para profundidades menores a 8 km (0-200MPa).

Figura 46. Modelo de mesa de trabajo (sandbox) sin pared móvil propuesto por Van Der Pluijm & Marshak, 2004. Tomado de Van Der Pluijm & Marshak, 2004.

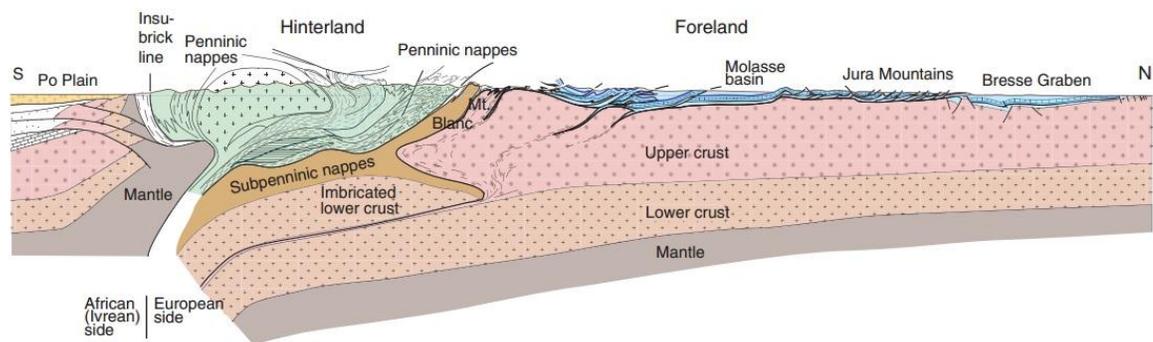


Para efectos de esta investigación se calculó el ángulo de reposo para ambos materiales con el método del embudo, dando como resultado para la arena seca tipo I ($\phi_{rep} = 34,20$), y para la arena seca tipo II ($\phi_{rep} = 35,40$), a partir de éstos resultados y con ayuda de la ecuación ($\mu = \tan(\phi_{rep})$), se obtuvo el coeficiente de fricción interna de cada material, quedando definido para la arena tipo I ($\mu = 0,67$) y para la arena tipo II ($\mu = 0,71$). Numerosos autores (Davis et al., 1983; Davy and Cobbold, 1988; Schellart, 2000) asumen el valor del coeficiente de fricción interna de la arena seca como ($\mu = 0,58$). Quedando el valor obtenido para la arena seca tipo II como aquel que se aproxima más a la constante propuesta por Byerlee (1978), para el comportamiento de la corteza superior de la tierra. La arena tipo II, presenta características loables que la convierten en el material idóneo, tales como; no presentar tantas heterogeneidades en sus constituyentes, es en gran parte arena silíceas, se clasifica según su tamaño de partícula como arena fina Folk (1974), la redondez y esfericidad se resaltan por su influencia en el ángulo de reposo, siendo entonces clasificada como esférica sub-redondeada, con variaciones ligeras a esférica redondeada, Powers (1953), con un muy bien

calibrado, según imágenes de Pettijhon, en Boggs, Jr. (1987). Además dicha arena presentó facilidad para generar contraste entre las capas, debido a su color blancuzco, sirviendo este criterio para el análisis de los planos de falla ocurrientes durante la deformación.

La estructura de mayor rango observada al final de la deformación se clasifica como cuña asimétrica bivergente, y se caracteriza por presentar dos fajas plegadas con vergencia opuesta, en la que se aprecian dos cinemáticas diferentes, en una se aprecian grandes desplazamientos asociados a los planos de falla, en la otra, se observa menores desplazamientos, es también propio del modelo una barrera cinética asociada a la zona de subducción, Van Der Pluijm & Marshak, 2004. Éste tipo de estructura es característica de ambientes colisionales de límites de placa, y se puede asociar con diferentes prototipos naturales de orogenias, los Alpes son una de ellas, en la figura 47 se observa un corte a través de los Alpes, donde se aprecia una bivergencia asimétrica en los planos de falla, con mayor intensidad en la deformación en los sectores del hinterland y es apreciable la barrera cinética asociada a la zona de subducción.

Figura 47. Corte a través de los Alpes, donde se observa la similitud con el modelo de cuña asimétrica bivergente propuesto por Van Der Pluijm & Marshak, (2004). Tomado de Fossen (2010).



Entre el límite norte de España y el sur de Francia, encontramos la orogenia de Los Pirineos, la cual presenta similitudes notorias con el modelo de cuña

asimétrica bivergente. Al igual que con los Alpes, los Pirineos son una estructura típica de ambientes colisionales de límite de placa, que como en el prototipo anterior y en nuestro modelo de laboratorio, el overriding (placa sin movimiento aparente) presenta los planos de falla con mayor desplazamiento.

En los Andes Colombianos, encontramos un prototipo natural, según Colleta et al., (1990) la Cordillera Oriental (CO) constituye la evolución de un orógeno de inversión, que tiene una etapa inicial de rift extensional en el Triásico-Jurásico, seguido de una etapa de convergencia de placas a finales del Cretácico. Al comparar con el modelo de laboratorio generado en esta investigación se observan claras similitudes, puesto que en la Cordillera Oriental se encuentran dos cinturones plegados con vergencia opuesta, el primero correspondería al Valle Medio del Magdalena (VMM), ubicado hacia el occidente de la CO, con menores desplazamientos asociados a los planos de falla. Caballero et al., (2010) clasifica el VMM como una Cuenca Intermontana, en ella se observan planos de falla con vergencia hacia el occidente, el otro cinturón involucrado, correspondería a lo que hoy es conocido como el Piedemonte Llanero (Cuenca Foreland), donde encontramos planos de falla con vergencia hacia el oriente, con grandes desplazamientos asociados, Julivert (1970). Sarmiento, (2001); Colleta et al., (1990); y Taboada et al., (2000) proponen la existencia de una zona de subducción asociada a la placa Paleocaribe ubicada a 20 km de profundidad bajo el anticlinal de Vélez, Colleta et al., (1990). La cual ejemplifica la barrera cinética o discontinuidad de velocidad, que es relacionada a la evolución del modelo de laboratorio, la evidencia geológica de la placa Paleocaribe está dada por lineamientos de sismos asociados al nido sísmico de Bucaramanga y por el vulcanismo del Mioceno reportado para Paipa e Iza en la CO, Taboada et al., (2000). Por otra parte Dengo y Covey (1993), y Roeder y Chamberlain (1995), proponen un modelo en el cual la inversión tectónica no es el proceso generador del levantamiento de la CO, ellos proponen la existencia de estructuras post-rift que descabezan estructuras previas, dichas estructuras se generan a partir de

despegues basales producto de una transferencia de esfuerzos de la zona de subducción ubicada al occidente del territorio Colombiano, aunque no es posible apreciar en los cortes propuestos por estos autores la existencia de una barrera cinética o discontinuidad de velocidad.

El acortamiento horizontal registrado para la CO varía según el autor, es así que según Cortés et al., (2006) el acortamiento registrado para la CO es de 170 Km; para Dengo y Cobey, (1993) de 150 Km (40%); para Roeder y Chamberlain, (1995) de 50%; para Cooper y Williams, (1989) varía entre 20-25%, al igual que para Teson et al., (2013); y para Colleta et al., (1990) es de 30%. Siendo los modelos de inversión tectónica los que presentan valores cercanos a los registrados en laboratorio (Arena tipo I 28%; Arena tipo II 15%).

Si bien, la Cordillera Oriental se clasifica como un orógeno de inversión, dadas las claras semejanzas con el modelo realizado en laboratorio es posible relacionar la evolución de los planos de falla observados en laboratorio con los modelos planteados por los diferentes autores anteriormente nombrados.

En el modelo de laboratorio generado en esta investigación se aprecian estructuras propias de ambientes compresivos, en la figura 54 se observa un abanico imbricado frontal y un abanico imbricado dorsal con fallas inversas (cabalgamientos) y los retrocabalgamientos asociados a las mismas, la falla No. 1, representa una falla inversa con vergencia hacia el oriente, y de ella se generan la mayoría de los retrocabalgamientos (No. 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, y 14) con vergencia opuesta, los planos de falla No. 15 y 16, se clasifican como retrocabalgamientos asociados a la evolución del plano No. 14, estos retrocabalgamientos delimitan la evolución de un Pop-up, espacialmente asociado al frente orogénico con vergencia hacia el occidente, en la etapas iniciales es posible apreciar otro Pop-up asociado a los planos de falla No. 1 y 2.

Figura 48. Corte a través de los Pirineos. Tomado de Sarmiento (2001).

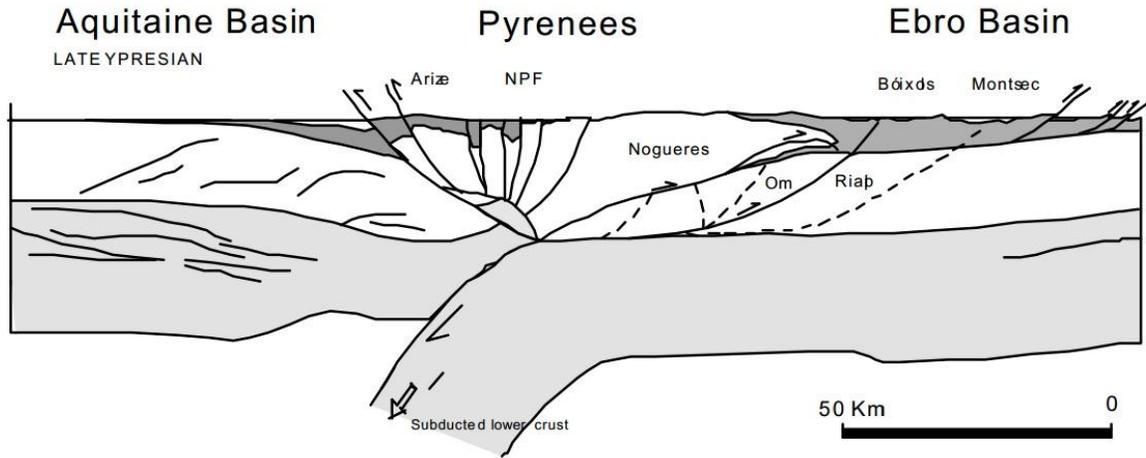


Figura 49. Corte esquemático del norte de los Andes. En la parte superior se observa el corte (a-a'), de hace 20 Ma, y en la parte inferior el corte (b-b') representa la actualidad. Tomado de Taboada et al., (2000).

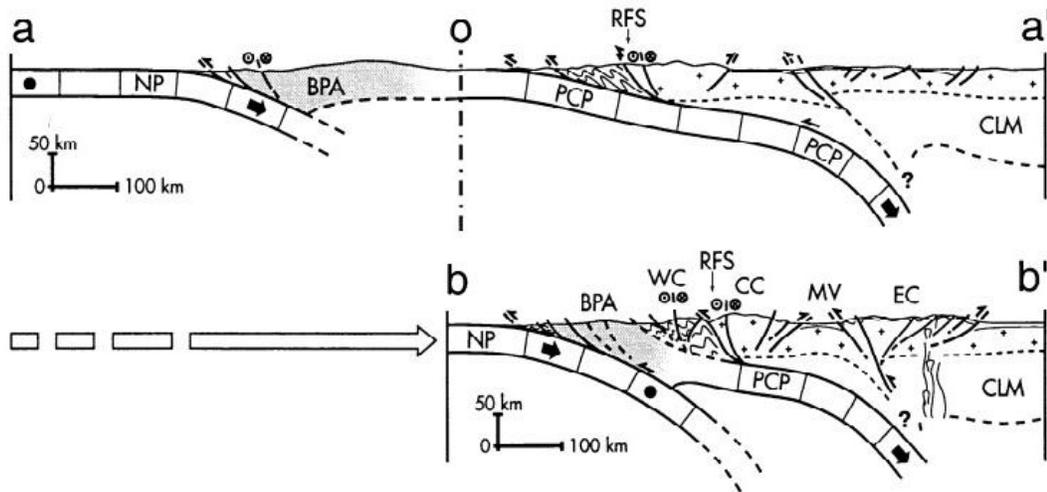


Figura 50. mModelo hipotético de cuña asimétrica bivergente para la Cordillera Oriental propuesto por Colleta et al., (1990). Tomado de Colleta et al., (1990).

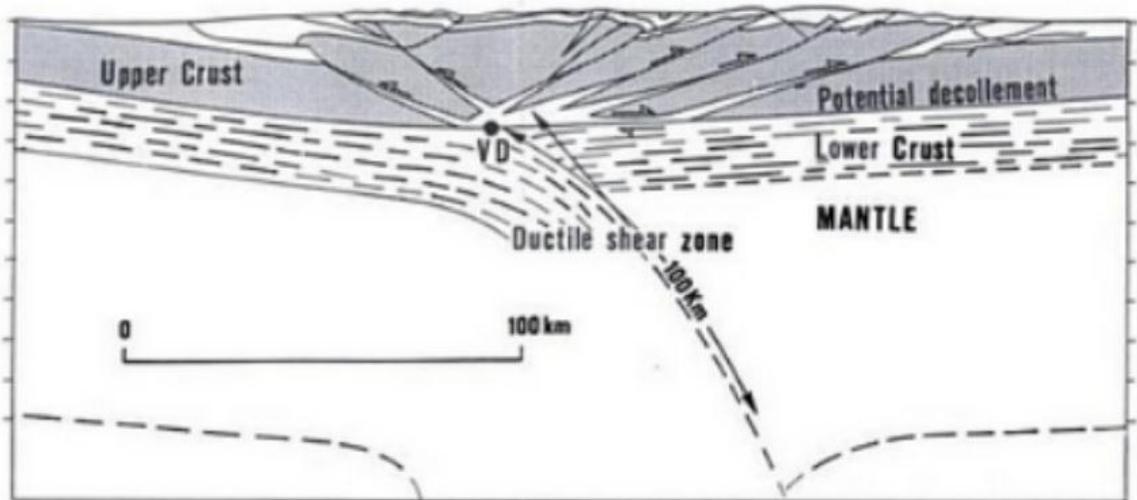


Figura 51. Sismicidad y ángulo de incidencia asociado a diferentes zonas de subducción (b-c), (a) sismicidad asociada al nido sísmico de Bucaramanga. Tomado de Sarmiento (2001).

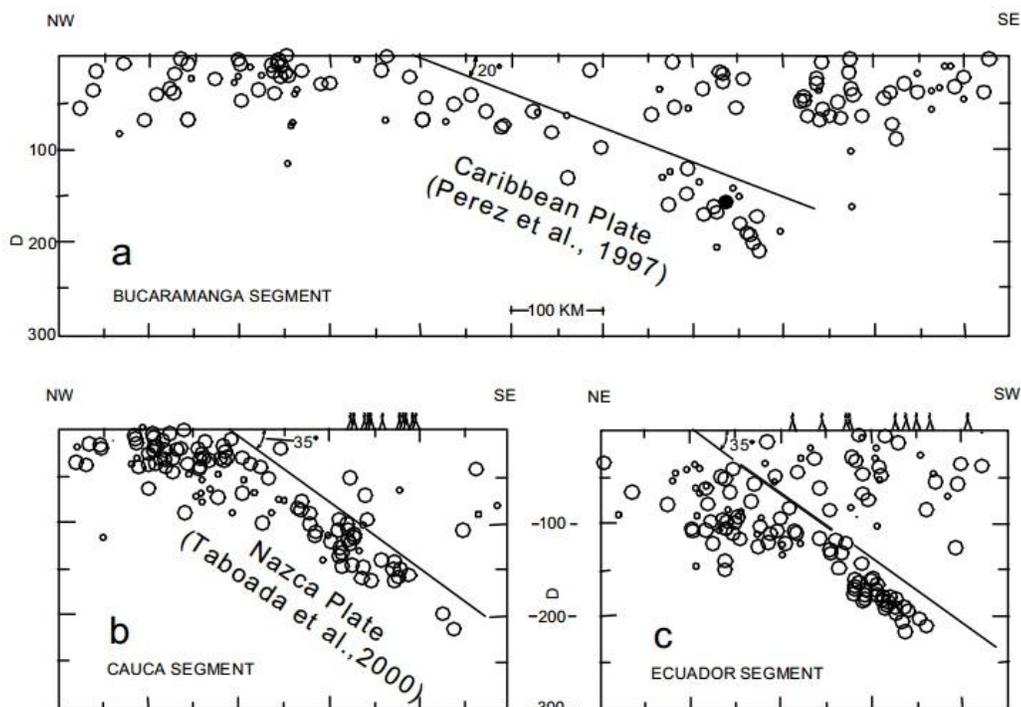


Figura 52. Modelos propuestos para la evolución de la CO, sin tener en cuenta la inversión tectónica como proceso generador. Tomado de Teson et al., (2013).

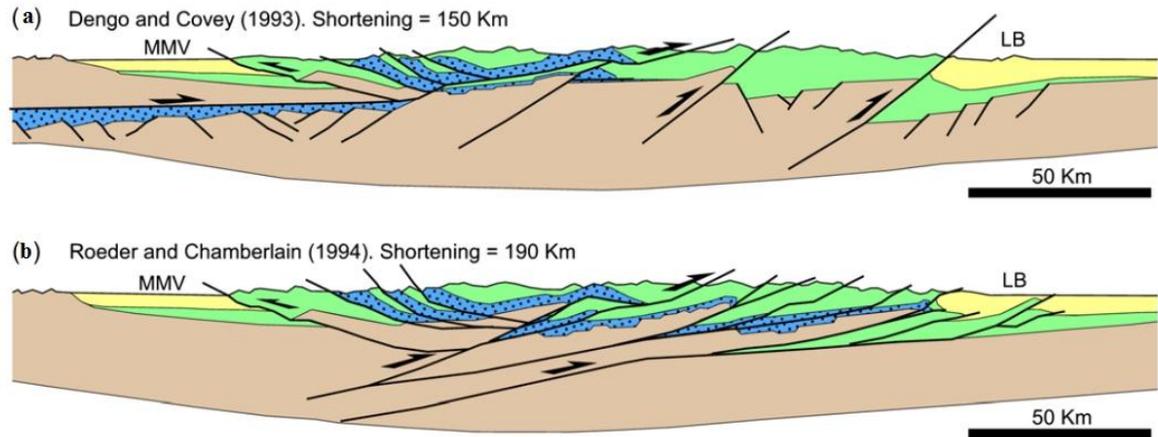


Figura 53. Modelo hipotético de un corte a través de la CO, se aprecia la sismicidad asociada al nido sísmico de Bucaramanga. Tomado de Sarmiento (2001).

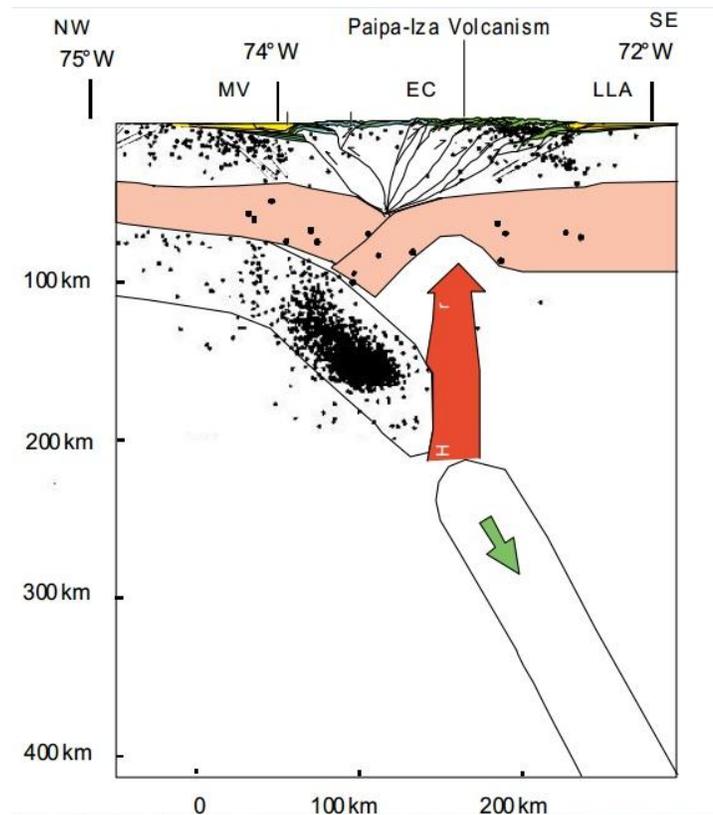
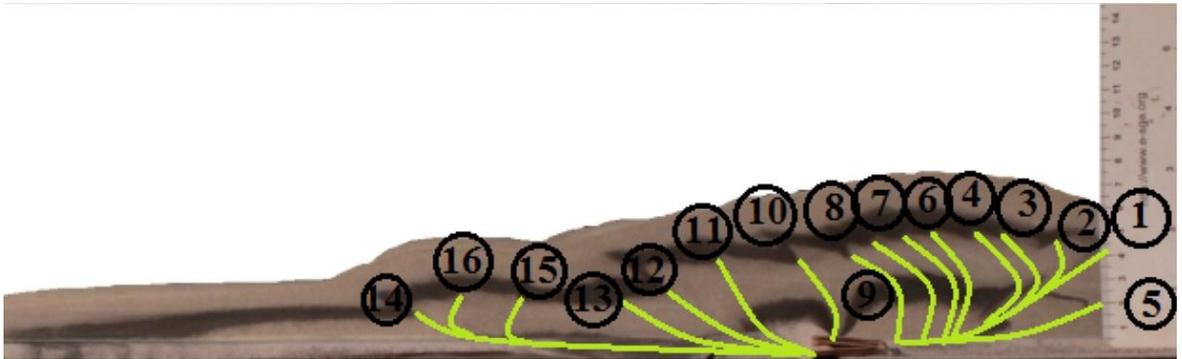


Figura 54. Estructuras obtenidas al final de la deformación en laboratorio, planos de falla numerados con base a su ocurrencia.



7. CONCLUSIONES.

- El modelo metodológico planteado en esta investigación facilita el análisis de la evolución estilos estructurales asociados a un ambiente compresivo, no obstante, se acopla para cualquier caso en el que el modelamiento análogo sea la herramienta utilizada para el estudio de prototipos naturales.
- La estructura geológica de mayor relevancia encontrada en el modelo análogo de laboratorio, es conocida como cuña asimétrica bivergente, en la cual se aprecian dos FPC con vergencia opuesta, las cuales reproducen sistemas de abanicos imbricados de escamación delgada, siendo éste, el estilo estructural predominante.
- El modelo de cuña asimétrica bivergente reproducido en esta investigación se acopla para el análisis de varios prototipos naturales asociados a límites de placas convergentes.
- El cálculo del acortamiento longitudinal sugiere que en el caso de materiales granulares con mayor ángulo de fricción interna se genera un menor acortamiento.
- Mediante diferentes criterios, se determinó el material (arena tipo II) idóneo para reproducir y representar la evolución física de estructuras geológicas de ambiente compresivo a una escala de laboratorio.
- A partir del cálculo del porcentaje de acortamiento en los modelos análogos, se observa que en el caso de la arena con menor ángulo de reposo (ϕ), presenta un mayor acortamiento.

BIBLIOGRAFÍA

BYERLEE, J. Friction of Rocks. 1978

CABALLERO, V., PARRA, M., MORA BOHORQUEZ A. R. Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno Tardío-Oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el sinclinal de nuevo mundo, cuenca valle Medio del Magdalena. Boletín de Geología, 32(1), 45-77. 2010

COOPER, M. A., y WILLIAMS, G. D. Inversion Tectonics. 1989

CORTES et al. Structure and tectonics of central segment of the Eastern Cordillera of Colombia. Journal of South American Earth Sciences. 2006

CRISTALLINI, E. Introducción a las fajas plegadas y corridas. 1998

DAVIS, D., SUPPE, J., DAHLEN, F. A. Mechanics of fold and thrust belts and accretionary wedges. Journal of Geophysical Research 88, 1153–1172. 1983

DAVY, P. R., y COBBOLD, P. H. Indentation tectonics in nature and experiment. 2. Central Asia, Bull. Geol. Inst. Univ. Uppsala, 14, 143-162. 1988

DENGO, C. A., y COVEY, M. C. Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: implications for trap styles and regional tectonics. AAPG Bulletin, 77 (8), 1315-1337. 1993

DOOLEY, T. P., y SCHREURS, G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics*, 574, 1-71. 2012

FAUGÈRE, E., y BRUN, J. P. Modelisation experimentale de la distention continentale. *C. R. Acad. Sci. Series 11* 299, 365-370. 1984

FOSSÉN, H. *Structural geology*. Cambridge University Press. 2010

GHIGLIONE M. C., RAMOS, V. A., Y CRISTALLINI, E. O. Estructura y estratos de crecimiento en la faja plegada y corrida de los Andes fueguinos. *Revista geológica de Chile*, 29(1), 17-41. 2002

HALL, J. *Revolutions of the Earth's surface*: Royal Society of Edinburgh Transactions, v. 7, p. 139-212. 1815

HUBBERT M. K. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Geological Society of America Bulletin*, 48(10), 1459-1520. 1937

HUBBERT M. K. Mechanical basis for certain familiar geologic structures. *Geological Society of America Bulletin*, 62(4), 355-372. 1951

JULIVERT M. Cover and basement tectonics in the Cordillera Oriental of Colombia, South America, and a comparison with some other folded chains. *Geological Society of America Bulletin*, 81(12), 3623-3646. 1970

LATTA D. K., y ANASTASIO, D. J. Multiple scales of mechanical stratification and décollement fold kinematics, Sierra Madre Oriental foreland, northeast Mexico. *Journal of Structural Geology*, 29(7), 1241-1255. 2007

MARTINEZ-CATALÁN, J. R. Geología estructural y dinámica global. Curso de Geol. Estructural (adaptado de apuntes de G. Gutiérrez Alonso). Univ. Salamanca 2002

MORLEY C. K. The Caledonian thrust front and palinspastic restorations in the southern Norwegian Caledonides. *Journal of Structural Geology*, 8(7), 753-765. 1986

PETTIJHON EN BOGGS S., Jr. Principles of sedimentology and stratigraphy. Columbus, Ohio: Merrill, pp. 105-34. 1987

PORTILLO, R. Influencia de la heterogeneidad mecánica de medios estratificados en el estilo y evolución estructural durante acortamiento: Experimentos físicos. 2008

POWERS M. C. A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 23(2). 1953

RODAS, R, y ROUSÉ, P. Análisis comparativo para la medición del ángulo de reposo de suelos granulares. *Revista de la Construcción*, Volumen 9, N° 1. 2010

ROEDER, D., & CHAMBERLAIN, R. L. Structural geology of sub-Andean fold and thrust belt in northwestern Bolivia. 1995

RODGERS, J. The taconic orogeny. *Geological Society of America Bulletin*, 82(5), 1141-1178. 1971

SARMIENTO, L. F. Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. Inferences from tectonic models. Faculty of Earth and Life Sciences, Vrije Universiteit Amsterdam 2001

SAUSSURE H. B. Saussure, "Voyages dans les Aples," Natural History nearby geneva , 1976, 4, pp.4-8

SCHELLART, W. P. Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modelling. *Tectonophysics*, 324(1), 1-16. 2000

SOLAQUE, D. P., y LIZCANO, A. Ángulo de fricción y ángulo de reposo de la arena del Guamo. *Revista Épsilon* N° 11: 7-20. 2008

SVEEN, K. An introduction to MatPIV v. 1.6.1. User reference manual: 27 pp. 2004

TABOADA, A., RIVERA, L. A., FUENZALIDA, A., CISTERNAS, A., PHILIP, H., BIJWAARD, H., OLAYA, J., RIVERA, C. Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, Vol. 19, N° 5, Pag 787-813. 2000

TESÓN, E., MORA, A., SILVA, A., NAMSON, J., TEIXELL, A., CASTELLANOS, J., CASALLAS, W., JULIVERT, M., TAYLOR, M., IBÁÑEZ-MEJÍA, M Y V. A. VALENCIA. Relationship of Mesozoic graben development, stress, shortening magnitude, and structural style in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes 2013

THIELICKE, W. Y STAMHUIS, E.J. PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software* 2(1):e30. 2014

VAN DER PLUIJM, B. A., MARSHAK, S., Y ALLMENDINGER, R. W. Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics (p. 672). 2004

WILKERSON, M. S., y MARSHAK, S. Fold-thrust belts—an essay. En B.A. van der Pluijm y S. Marshak (Eds.): Earth structure. US Division, WCB/McGraw-Hill, 485 pp. 1997

YAGUPSKY, D. L. Metodología para el estudio de sistemas compresivos y de sus controles estructurales. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. 2009