



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis de un pliegue monoclinal al SW de la Sabana de Bogotá y su modelamiento análogo a escala en arcilla y cinemático por trishear.

Freddy Alexander Ladino Torres.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias
Departamento Geociencias
Bogotá, Colombia

Análisis de un pliegue monoclinal al SW de la Sabana de Bogotá y su modelamiento análogo a escala en arcilla y cinemático por trishear.

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias-Geología

Director:
Ph.D., Andreas Kammer

Línea de Investigación:
Geología Estructural

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias
Departamento Geociencias
Bogotá, Colombia
2018

A Carolina, padres y hermanos

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento a:

Profesor Andreas Kammer director de la tesis.

La geóloga Carolina Pérez y al geólogo Fabio Hernández por su acompañamiento, comentarios y colaboración en las labores de campo y ejecución del trabajo de grado.

Ingeniero Hoover Estupiñan, ingeniero y auxiliares del departamento de seguridad industrial y a la empresa Rex Ingeniería S.A por el apoyo en las labores y permisos.

Fredy Quiroz quien colaboro en el diseño y elaboración de las máquinas de deformación.

Resumen

Modelamiento experimental con mezclas de arcilla y cinemático con Trishear junto con datos estructurales de campo fueron utilizados para estudiar la geometría, evolución y posible origen del pliegue monoclinal de la cantera Loma Pelada, expuesto en las rocas cretácicas del Grupo Guadalupe (Mosquera - Cundinamarca). Dentro de las rocas del Grupo Guadalupe, la Formación Arenisca Dura es la unidad que tiene mayor presencia en el pliegue, esta unidad presenta un fuerte plegamiento que contrasta con las deformaciones observadas en los alrededores y para el cual se plantea un origen por la propagación de una falla ciega. Para establecer el posible ángulo de falla que actúa en el pliegue natural se realizaron ensayos análogos con ángulos de rampa de 30°, 60° y 90°, los cuales cubren un amplio rango en los posibles ángulos en que se pueden generar pliegues relacionados a fallas. Además, se probaron diferentes densidades en las mezclas para obtener diferentes patrones de deformación y fracturamiento. Las máximas deformaciones y fracturamiento en el monoclinal de Loma Pelada, están concentradas en una zona triangular (en perfil), donde para su modelación y análisis se empleó el modelo cinemático Trishear propuesto por Erslev (1991); este modelo se aplica en la modelación cinemática y en el análisis de los resultados de la modelación análoga. Al comparar los perfiles generados en la modelación análoga y cinemática con ángulos de rampa cercanos a 60° con la geometría de la capa guía del pliegue natural se encontró un alto grado de similitud, condición que permitió concluir que los parámetros encontrados en la modelación cinemática aplican como posibles parámetros en la generación del pliegue natural. Con la aplicación de esta metodología se pretende generar nuevos conceptos y formas de investigar los pliegues relacionados a fallas y las implicaciones de estos resultados en la estimación de riesgos sísmicos.

Palabras Clave: Pliegues por propagación de falla, monoclinal, Trishear, modelamiento análogo y cinemático.

Abstract

Experimental modeling with clay mixtures and kinematic modeling with Trishear, along with structural field data was used to study the geometry, evolution and possible origin of the monoclinical fold of the Loma Pelada Mine, exposed in the Cretaceous rocks of the Guadalupe Group (Mosquera - Cundinamarca). Within the rocks of the Guadalupe Group, the Arenisca Dura Formation is the unit that has a greater presence in the fold, this unit presents a strong folding, which contrasts with the deformations observed in the surroundings and for which is proposed an origin by the propagation of a blind fault. To establish the possible angle of the fault that develops the natural fold, analogous assays were made with the ramp angles of 30 °, 60° and 90°, these cover a wide range in the possible angles in which it can be generate fault-related folding. In addition several densities were tested with mixtures for producing differents deformation and fracturing patterns. The highest deformations and fracturing in the Loma Pelada monoclinical are concentrated in a triangular zone (in profile), where the modeling and analysis was done using the Trishear kinematic model the proposed by Erslev (1991), the Trishear is applied in the kinematics modeling and the results analysis of the analogous modeling. To compare the profiles generated in the analog and kinematic modeling with ramp angles of 60° and the geometry of the guide layer natural fold, it was found a high degree of similarity, that condition allowed to conclude that the parameters found in the kinematic modeling apply as possible parameters in the generation of the natural fold. With the application of this methodology, it is posible to generate new concepts and ways to investigate the risks fault-related folding and the implications of these results in the estimation of seismic risks.

Keywords: Fault propagation folds; trishear, analogous and kinematic modeling, trishear modeling.

Contenido

	Pág.
<u>Resumen</u>	I
<u>Lista de figuras</u>	VI
<u>Lista de tablas</u>	XI
<u>Lista de símbolos y abreviaturas</u>	XII
<u>Capítulo 1. Introducción</u>	1
1.1 <u>Planteamiento del problema y objetivos</u>	1
1.2 <u>Contenido de la tesis</u>	6
<u>Capítulo 2. Modelamiento experimental a escala</u>	6
2.1 <u>Introducción</u>	6
2.2 <u>Teoría del modelamiento tectónico a escala</u>	7
2.2.1 <u>Grados de similitud</u>	7
2.3 <u>Experimentos tectónicos análogos</u>	8
2.4 <u>Propiedades de la cobertura sedimentaria</u>	9
2.5 <u>Características y comportamiento del material de modelamiento</u>	11
2.5.1 <u>Arcilla como material de modelamiento</u>	11
2.5.2 <u>Propiedades mecánicas de la arcilla húmeda</u>	12
2.5.3 <u>Condiciones físicas en un modelamiento análogo</u>	14
2.5.4 <u>Límites de Atterberg y grado de saturación</u>	14
2.5.5 <u>Condiciones de drenaje</u>	15
2.5.6 <u>Resultados de laboratorio de la arcilla RN</u>	15
2.5.6.1 <u>Corte directo</u>	15
2.5.6.2 <u>Limites</u>	16
2.5.6.3 <u>Resistencia al corte (prueba de penetración con cono)</u>	16
2.5.6.4 <u>Análisis de difracción de rayos X</u>	19
<u>Capítulo 3. Modelo cinemático Trishear</u>	20
3.1 <u>Introducción</u>	20
3.2 <u>Cinemática del modelo</u>	20
3.3 <u>Parámetros del modelo trishear</u>	22
3.4 <u>Evolución del modelamiento trishear</u>	23
<u>Capítulo 4. Montaje del experimento análogo</u>	26
4.1 <u>Máquinas de deformación</u>	26

4.2	<u>Capa de arcilla</u>	27
4.3	<u>Método de registro</u>	28
Capítulo 5. Modelamiento análogo		29
5.1	<u>Ensayos</u>	29
5.2	<u>Análisis de los ensayos</u>	30
5.2.1	<u>Fallas verticales</u>	30
5.2.2	<u>Ensayos con ángulo de rampa a 60°</u>	34
5.2.2.1	<u>Fallamiento inverso</u>	34
5.2.2.2	<u>Fallamiento normal</u>	36
5.2.3	<u>Ensayos con ángulo de rampa a 30°</u>	37
5.2.3.1	<u>Fallamiento inverso</u>	37
5.2.3.2	<u>Fallamiento normal</u>	40
Capítulo 6. Estructura Natural		41
6.1	<u>Geología del área de estudio</u>	41
6.1.1	<u>Grupo Villeta</u>	41
6.1.1.1	<u>Formación Simijaca</u>	41
6.1.1.2	<u>Formación La Frontera</u>	42
6.1.1.3	<u>Formación Conejo</u>	42
6.1.2	<u>Grupo Guadalupe</u>	42
6.1.2.1	<u>Formación Arenisca Dura</u>	43
6.1.2.2	<u>Formación Plaeners</u>	44
6.1.2.3	<u>Formación Arenisca Labor – Tierna</u>	44
6.1.3	<u>Formación Guaduas</u>	44
6.2	<u>Geología estructural</u>	46
6.3	<u>Pliegue Loma Pelada</u>	46
6.3.1	<u>Niveles</u>	47
6.3.1.1	Nivel Ar1.....	47
6.3.1.2	Capa Lod1.....	48
6.3.1.3	Nivel Ar2.....	49
6.3.1.4	Capa PI1.....	49
6.3.1.5	Nivel Ar3.....	49
6.3.1.6	Capa PI2.....	50
6.3.1.7	Nivel Ar4.....	50
6.3.1.8	Capa PI3.....	50

6.3.1.9 Nivel Ar5.....	50
6.3.1.10 Nivel Ar6.....	51
6.3.1.11 Capa Lod2.....	51
6.3.2 <u>Geometría del pliegue</u>	53
6.3.3 <u>Datos estructurales</u>	54
6.3.3.1 <u>Planos so</u>	55
6.3.3.2 <u>Diaclasas</u>	56
<u>Capítulo 7. Modelamiento cinemático trishear</u>	58
7.1 <u>Modelamiento cinemático vs modelamiento análogo</u>	58
7.1.1 <u>Fallamiento Inverso</u>	59
7.1.2 <u>Fallamiento normal</u>	62
7.2 <u>Modelamiento cinemático vs estructura natural</u>	63
7.3 <u>Modelamiento análogo vs estructura natural</u>	63
7.4 <u>Modelamiento cinemático vs modelamiento análogo</u>	65
<u>Capítulo 8. Análisis y discusión de resultados</u>	66
<u>Capítulo 9. Conclusiones</u>	69
<u>Bibliografía</u>	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Pliegues relacionados a fallas [1]. Esquemas del estado final de A) un pliegue por flexión del plano de falla (izq) y B) un pliegue por propagación de falla (der). Figuras tomadas de Davis et al. 2010, páginas 410 y 415.....	1
Figura 1.1 Perfil del pliegue Loma Pelada y unidades [2]. A = anticlinal y S = sinclinal...2	2
Figura 1.1 Mapa geológico y ubicación del perfil del pliegue y cantera Loma Pelada, (tomado Ingeominas 1998) [3].....	3
Figura 1.1 Principales rasgos estructurales al SW de la Sabana de Bogotá [4]. A) Mapa regional (tomado de la Rev C.I.A:F. Vol 8 N-1-2 pg 265, 1983) y B) Mapa local donde se encuentra el área de estudio (tomado de la Rev C.I.A:F. Vol 10 N-1 pg 48, 1985)	4
Figura 1.1 Principales estructuras en los alrededores de Facatativá, Soacha y Bojacá [5]. (Tomado de Camargo, 1995)	5
Figura 2.3 Figura 2.3: Esquema general del montaje de modelos análogos para ambientes distensivos (Withjack et al., 1990) [6]. A) Etapa inicial del ensayo y B) deformación de la capa de arcilla por el movimiento horizontal del bloque móvil.....	8
Figura 2.5.6.2. Condiciones de límite y parámetros de corte en modelos físicos anteriores [7].....	16
Figura 2.5.6.3. Prueba de penetración con cono [8]	17
Figura 2.5.6.3: Resistencia al corte no drenada de la arcilla RN vs contenido de agua % [9].....	18
Figura 2.5.6.3: Densidad de las mezclas de arcilla RN agua vs contenido de agua % [10].....	18
Figura 2.5.6.4. Difractograma de arcilla RN [11].....	19
Figura 3.2. Geometria basica del modelo trishear y modelo contornos de esfuerzos de una grieta tipo II [12]. A) Elementos basicos del modelo trishear y B) Grieta tipo II, notese la region simetrica triangular de maximos esfuerzos en color amarillo, naranja y rojo (punta de la grieta), modelo basado en el mecanismo de fractura de elasticidad linear descrito por Pollar and Segall (1987).....	21
Figura 3.2. Geometria basica del modelo trishear Erslev (1991) [13]. A) Geometria inicial. B) Deslizamiento de la falla donde los vectores de movimeinto se mueven paralelos a la	

falla generando un desbalance entre en area inicial en A con B. C) En el modelo trishear los vectores de movimiento se mueven en forma oblicua manteniendo el area inicial.....22

Figura 3.4. Diagrama esquemático usado por Hardy and Ford (1997) y esquemas de crecimiento de estratos a medida que se da la deformación [14]. A) Diagrama esquemático, donde v_1 y u_1 son las velocidades conocidas y v_2 y u_2 las desconocidas . B y C) Deformación, crecimiento de estratos y erosión. D y E) Deformación y crecimiento de estratos sin erosión.....23

Figura 3.4. Modelación inversa de un pliegue por propagación de falla (Hudson Valley, Allmendinger, (1998) y parámetros de grilla de búsqueda (FaultFoldForward) [15]. A) Digitalización de capas guía, B) restauración planar de capas, C) con los parámetros obtenidos en la grilla de búsqueda se corre un modelo forward y D) Ventana de grilla de parámetros de búsqueda.....24

Figura 3.4. Ilustración de la técnica del modelamiento con elementos discretos (Hardy and Finch, 2006) [16]. A) Simulación de la deformación de una capa poco competente. B) Simulación de una capa competente.....25

Figura 4.1. Fotografías de las máquinas de deformación [17]. A) máquina con ángulo de rampa 90° , B) máquina con ángulo de rampa 60° y C) máquina con ángulo de rampa 30°26

Figura 4.2. A) Fotografía de marco de madera y sujetadores de caucho (izq) y B) fotografía del llenado del molde (der) [18].....27

Figura 4.2. A) Fotografía de la colocación de marcadores (izq) y B) Fotografía montaje del método de registro (der) [19].....28

Figura 5.2.1. Fotografías de los ensayos que simulan fallas verticales (izq) y figuras de trayectoria de partículas (der) [20]. A) Ensayo # 1 con desplazamiento inverso, B) y C) ensayos (# 15 y # 3) con desplazamiento normal. En las figuras D-F los círculos de color naranja representan la posición inicial de las partículas, círculos azules la posición final.....32

Figura 5.2.1. Fotografías de la deformación de los marcadores circulares en la zona triangular del ensayo 15 [21]. A) Inicio de la rotación y elongación del eje horizontal (círculo de color azul estado inicial con ejes sin deformar), B) y C) continua la elongación y rotación del eje horizontal y D) estado final donde la elipse está fracturada y desplazada.....34

Figura 5.2.2.1. Fotografías de ensayos de fallamiento inverso con ángulo de rampa a 60° y figuras de las trayectorias de partículas y elipses de deformación [22]. A) Ensayo # 7 45% H ₂ O, B) ensayo # 9 46% H ₂ O, C) ensayo # 12 47% H ₂ O y figuras D-F donde se observan las trayectorias de las partículas de cada ensayo.....	35
Figura 5.2.2.2. Ensayo # 13 fallamiento normal a 60°. [23]. A) Fotografía estado final de deformación del ensayo y B) Trayectoria de partículas y elipses de deformación.....	37
Figura 5.2.3.1. Fotografías de estado final de la deformación en los ensayos 5 y 8 (45 % H ₂ O) A-B, D) ensayo 11 (47% H ₂ O) y figuras de trayectoria de partículas y elipses de deformación C y E. [24].....	38
Figura 5.2.3.2. Fotografía y figura del ensayo #14 [25]. A) Estado final de la deformación del ensayo, líneas rojas fallas principales y amarillas fallas secundarias. B) Figura de la trayectoria de partículas y deformación de marcadores circulares de deformación.....	40
Figura 6.1.2. Mapa geológico de campo a escala 1:15.000 [26].....	43
Figura 6.1.3. Mapa geológico a escala 1:75.000 y columna estratigráfica generalizada para la Sabana de Bogotá [27], geología tomada de la plancha 227 Ingeominas 1998.....	45
Figura 6.3.1 Corte pliegue monoclinal cantera de Loma Pelada [28]. Niveles (Ar1 - Ar6), capas de lodolitas y plaeners.....	48
Figura 6.3.1.2 Nivel Ar1 [29].....	48
Figura 6.3.1.3. Niveles Ar1 y Ar2, capa Lod1 y ángulos de inclinación de las capas [30]. En la parte superior derecha se observa una fractura continua de 10 a 12 metros de longitud.....	49
Figura 6.3.1.8. Flanco E del pliegue [31]. Capa PI3, Ar5, Ar6 y Lod2 con espesor aproximado.....	51
Figura 6.3.1.9. Nivel Ar5 y subniveles Ar5a y Ar5b [32]. Dentro de las líneas rojas capa de arenitas retro deformadas.....	52
Figura 6.3.1.11. Niveles Ar5, Ar6, Lod2 y subniveles Ar6a y Ar6b [33]. Capa retro deformada entre los subniveles 6a y 6b limitada por la línea roja y negra.....	52
Figura 6.3.2. Corte del pliegue LP [34]. Fotografía donde se observa la ubicación de los puntos de máxima curvatura de los niveles y capas (puntos rojos) y la línea recta en color azul que pasa a través de la mayoría de los puntos de máxima curvatura (trazo axial del pliegue).....	53

Figura 6.3.2. Posible superficie axial del pliegue (plano azul) [35]. Puntos de máxima curvatura (rojos) y superficies curvas adyacentes a los puntos de máxima curvatura (arcos de color negro).....	54
Figura 6.3.3. Ejes coordenados del pliegue [36]. Tomado de Hancock 1985, figura 17 pg 452.....	55
Figura 6.3.3.1. Diagrama π de polos (círculo rojo) de la estratificación del pliegue [37]. Trend y plunge del eje del pliegue ($344^\circ, 17.1^\circ$) y plano axial ($209.9^\circ, 23.2^\circ W$).....	55
Figura 6.3.3.2. A) Diagrama de polos de las diaclasas (izq), círculos de color rojo so, cuadros de color verde Dac, triángulos de color magenta Dab, círculos de color azul Eab y diamantes de color naranja Eac. B) Diagrama rosa de la distribución de datos de rumbos de estratificación y diaclasas (der) [38].....	57
Figura 6.3.3.2. Fotografías de pavimentos realizados en lodolitas techo del pliegue [39]. Líneas de color verde planos de diaclasas Dab, líneas de color negro diaclasas Dac, líneas de color naranja diaclasas Eac y líneas de color rojo diaclasas Eab.....	57
Figura 7.1.1. Perfiles de la modelación análoga y cinemática AR 30° [40]. Línea de color café representa el perfil de la capa guía de la modelación análoga y la línea de color negro el perfil de la modelación cinemática. La zona trishear está representada por las líneas de color rojo, y la punta de la falla con la línea corta de color negro en la parte inferior.....	59
Figura 7.1.1. Grafica resultado de la modelación en FaultFoldForward AR 60° [41]. Perfil del pliegue natural línea de color café, perfil de la modelación línea de color negro, zona trishear líneas de color rojo y falla línea corta de color negro inferior, los datos con *son del modelamiento análogo.....	61
Figura 7.1.1. Grafica resultado de la modelación en FaultFoldForward AR 90° [42].....	61
Figura 7.1.2. Grafica resultado de la modelación en FaultFoldForward AR 90° [43]. Perfil del pliegue natural línea de color café, perfil de la modelación línea de color negro, zona trishear líneas de color rojo y falla línea corta de color negro inferior, los datos con *son del modelamiento análogo.....	62
Figura 7.2. Graficas resultado de la modelación cinemática [44].A) Perfil del pliegue natural línea de color café, perfil de la modelación línea de color negro, zona trishear líneas de color rojo y falla línea corta de color negro inferior, B) Perfil resultado de la modelación cinemática y pliegue natural.....	64
Figura 7.3. Grafica comparativa del modelo análogo #12 y natural LP [45].....	65

Figura 8. Fotografía panorámica de la morfología en los alrededores de Loma Pelada A) Al SW de la cantera Loma Pelada, y B) panorámica de unidades al N de la cantera Loma Pelada [46].....67

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.4: Propiedades de los sedimentos y rocas sedimentarias [1]. Compilado por Attewell y Farmer (1976), Rumel (1982), Shopper (1982) y Carmichael (1990). Algunos de los datos pertenecen a núcleos de roca y macizos rocosos in situ (Instituto de Ciclo Nuclear de Japón, 2000). Los sedimentos pertenecen al Neógeno y son rocas blandas, compuestas por tamaño de grano arcilla y arena con intercalación de capas.....	6
Tabla 2.5.2. Condiciones de límite y parámetros de corte en modelos físicos anteriores [2]. (-): significa sin información. (*): Son referencias de geotecnia.....	9
Tabla 2.5.6.1: Resultados corte directo arcilla RN. [3].....	12
Tabla 2.5.6.3 Resultados de prueba de penetración con cono [4]. Los valores con * son tomados del trabajo de Atmaoui (2005) prueba con veleta.....	14
Tabla 5.1: Ensayos finales y algunas de sus características. [5].....	23
Tabla 5.1. Tasas de desplazamiento, densidad de las mezclas y año de presentación de algunos ensayos previos. [6].....	23
Tabla 6.3.3.2. Datos para la evaluación de las diaclasas [7].....	49

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

gr	Gramos
kg	Kilogramo
D	Distancia
cm	centímetro
cm ³	Centímetro cubico
m	Metro
E	Modulo de elasticidad de Young
Gs	Gravedad especifica
c	Cohesión
P	Presión
kPa	Kilo pascales
Mpa´	Mega pascales
Pa	Pascales
ϕ	Angulo de fricción interna
IP (o PI)	Índice de plasticidad
ne	Porosidad efectiva
σ	Resistencia a la Tensión
u	Presión de poro
λ	Parámetro de longitud de escala
n	Porosidad
Sr	Grado de saturación
Su	Resistencia al corte no drenada
OCR	Tasa de sobreconsolidación de arcillas

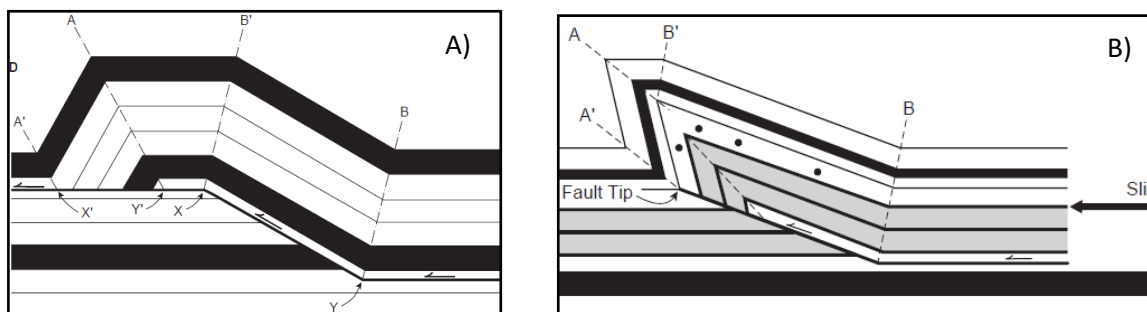
σ	Esfuerzo normal total
$\sigma'1$	Esfuerzo efectivo principal máximo
$\sigma'3$	Esfuerzo efectivo principal mínimo
σ' (or $\sigma'n$)	Esfuerzo normal efectivo
$\sigma'cs$	Esfuerzo normal efectivo en estado critico
σ_t	Resistencia de tensión
ν	Coeficiente de Poisson
v_{cs}	Volumen especifico en estado crítico
w	Contenido de agua
WL (or LL)	Limite liquido de Atterberg
WP (or PL)	Limite plástico de Atterberg
%	Porcentaje
\approx	Aproximado
ρ	Densidad
#	Numero
T	Temperatura
t	Tiempo
seg	segundo
v	Volumen especifico
V_{max}	Volumen máximo de desplazamiento vertical
z, Z	Profundidad de sedimentos; espesor de la capa

Capítulo 1: Introducción

1.1 Planteamiento del problema y objetivos

Los pliegues son estructuras que ocurren a diferentes escalas y en un amplio rango de ambientes. Estos desarrollan diferentes geometrías que revelan información acerca del tipo de deformación y evolución tectónica de un área de estudio. Muchos pliegues están relacionados a fallas, fallas que pueden tener un origen profundo, que en algunas ocasiones no tienen expresión en superficie y se expresan es mediante la deformación de las unidades litológicas superiores (fallas ciegas). Este tipo de fallas se pueden presentar en ambientes distensivos o compresivos. En la descripción del plegamiento relacionado a fallas se encuentran dos categorías principales: una es el plegamiento por flexión del plano de falla y la otra es el plegamiento por propagación de falla. Los pliegues por flexión del plano falla se forman cuando el bloque colgante cambia de forma a medida que se desplaza sobre el plano de falla, plano que presenta cambios en el ángulo de buzamiento (Figura 1.1, A [1]). Por otra parte, los pliegues por propagación de falla se forman cuando el bloque colgante particularmente en fallas de cabalgamiento (en su desplazamiento), en profundidad acomodan desplazamiento (deformación o pliegue de capas) principalmente en la punta de falla, se dice que la falla “muere” cerca o en el núcleo de un pliegue (Figura 1.1 B [1]).

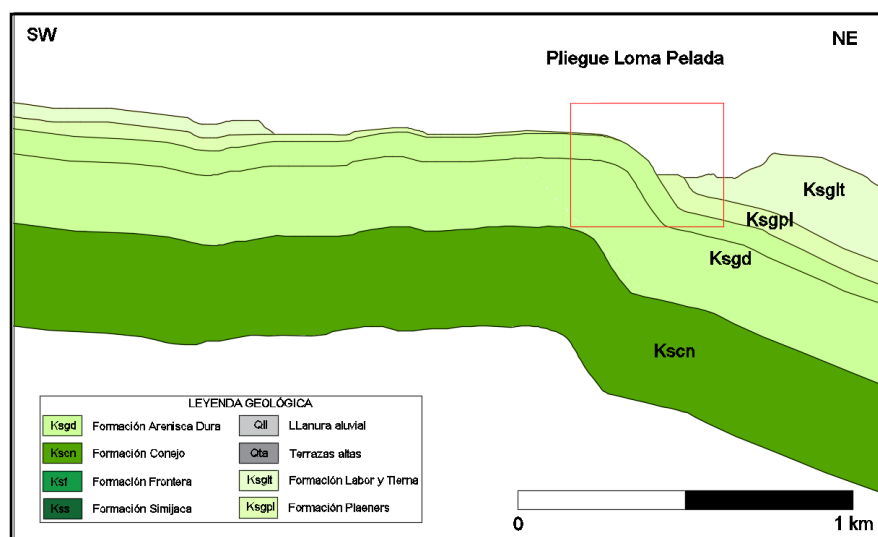
Figura 1.1 Pliegues relacionados a fallas [1]. Esquemas del estado final de A) un pliegue por flexión del plano de falla (izq) y B) un pliegue por propagación de falla (der). Figuras tomadas de Davis et al. 2010, páginas 410 y 415.



Los pliegues por propagación de falla en algunas ocasiones no son tan fáciles de identificar debido a la escasa información del subsuelo, la cobertura sedimentaria y a que las fallas

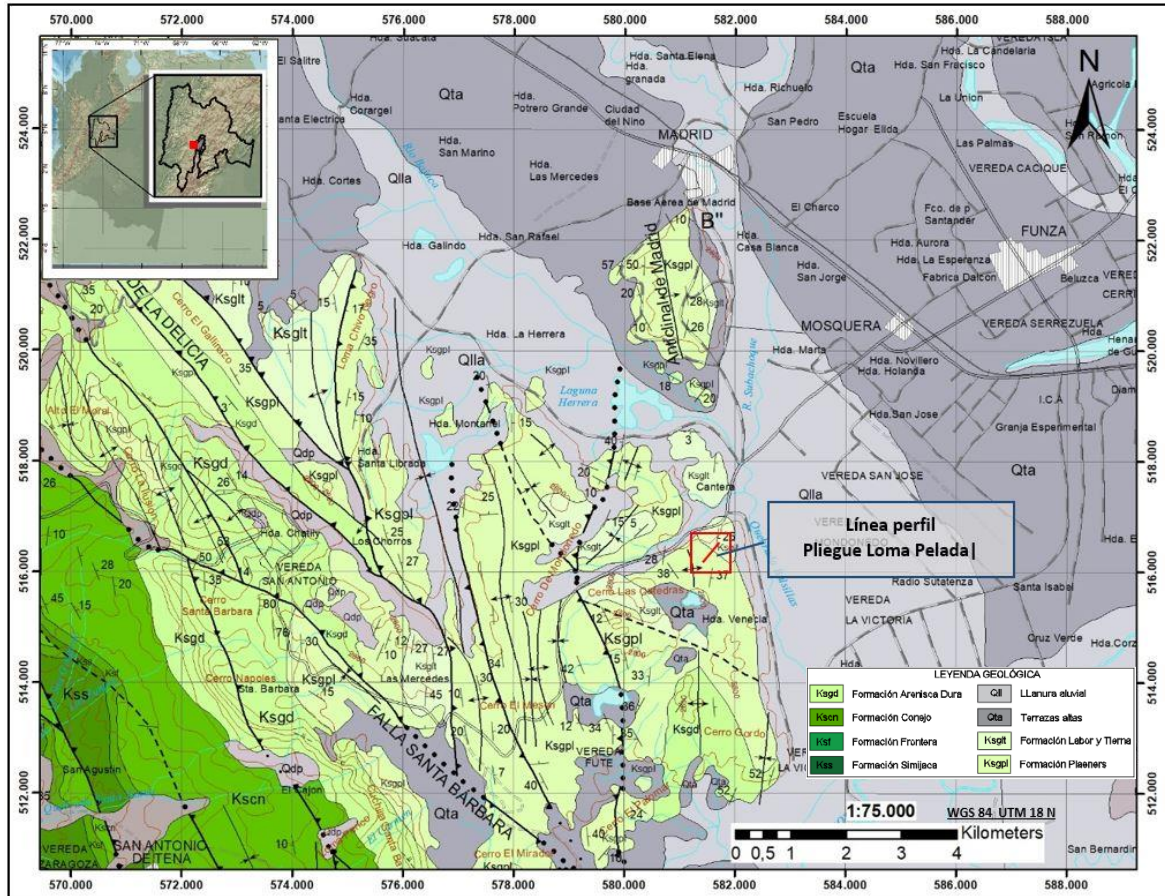
que los generan no afloran en superficie. En su proceso de búsqueda se tiene en cuenta la presencia de pliegues monoclinales con curvaturas suaves, charnelas redondeadas y zonas con intensa deformación (cambios bruscos en el buzamiento de las capas), los cuales se pueden encontrar en ambientes compresivos como distensivos. Teniendo esto en cuenta, la información de campo y bibliográfica, se propone como zona de estudio, la cantera Loma Pelada, donde por la explotación para materiales de construcción se expone en perfil un plegamiento fuerte de las capas que contrasta con los observados en los alrededores (Figura 1.1 [2]), para el cual se infiere un origen por la propagación de una falla. El pliegue de Loma Pelada se encuentra al SW de la Sabana de Bogotá donde afloran rocas cretácicas del grupo Guadalupe, principalmente areniscas competentes en capas muy gruesas a medias pertenecientes a las formaciones Arenisca Dura y Labor y Tierna, y en menor proporción capas medias y finas de lodolitas de la Formación Plaeners (Figura 1.1 [3]).

Figura 1.1 Perfil del pliegue Loma Pelada y unidades [2]. A = anticlinal y S = sinclinal.



En el corte de la cantera de Loma Pelada se identifica una estructura monoclinale, en la cual se observa un pliegue de las capas en superficie, que presenta una curvatura amplia (anticlinal) con buzamientos suaves que cambian a buzamientos fuertes al llegar a lo que sería el footwall en la estructura, donde por el buzamiento y continuidad de las capas hacia el relleno de la Sabana de Bogotá se infiere la presencia de un sinclinal en profundidad.

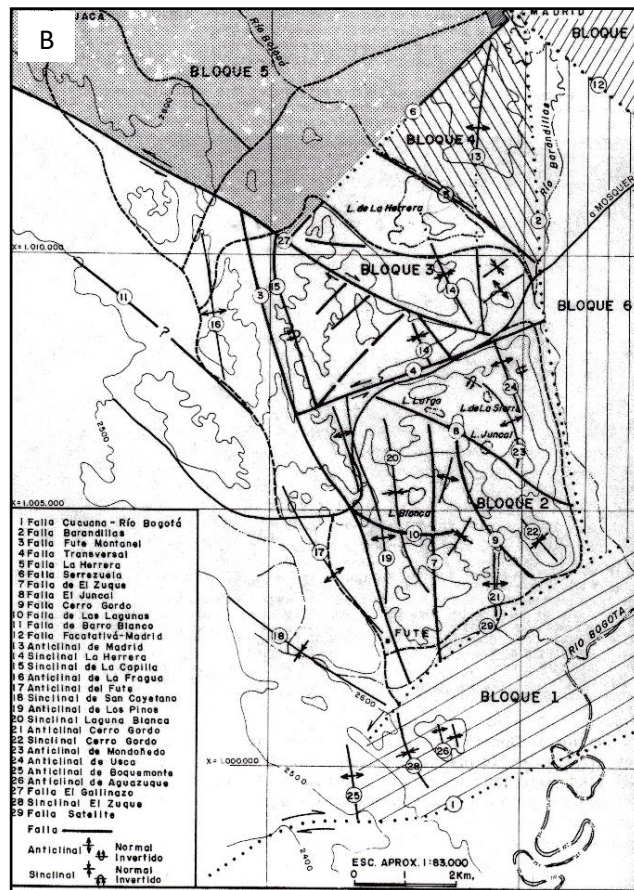
Figura 1.1 Mapa geológico y ubicación del perfil del pliegue y cantera Loma Pelada, (tomado Ingeominas 1998) [3].



Los espesores de las capas al parecer no presentan grandes cambios, predominan las capas de unidades de un solo tipo de roca (areniscas), no se observan estrías ni espejos de falla entre capas y en general se podría decir que el mecanismo de plegamiento sería de flujo flexural lo cual en términos prácticos simplifica la modelación.

Para el esquema estructural en el área de trabajo, se tienen en cuenta entre otras (Kammer, 1999 y Velandia et al., 2002), las ideas de Gómez (1985) y Camargo (1995), ya que como veremos dan una posible explicación de la orientación y origen de los pliegues y fallas observadas en el área de estudio. Para Gómez (1985) la Sabana de Bogotá se encuentra dividida en una serie de bloques, los cuales están limitados por fallas transversales y estos a su vez se encuentran afectados por fallas locales (Figura 1.1 A [4]), donde encontramos que para el área de estudio la falla de rumbo dextral de Cucuana-Río Bogotá empuja de SW a NE las rocas del Grupo Guadalupe originando parte de los diferentes tipos de pliegues y fallas en el denominado bloque 2 (Figura 1.1, B [4]).

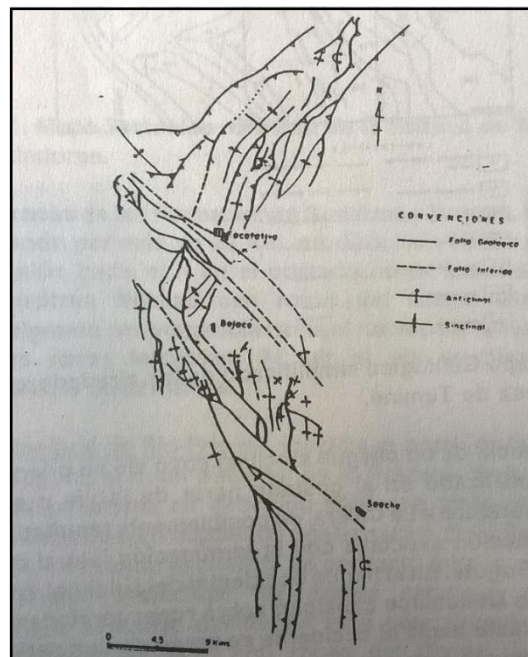
Figura 1.1 Principales rasgos estructurales al SW de la Sabana de Bogotá [4]. A) Mapa regional (tomado de la Rev C.I.A:F. Vol 8 N-1-2 pg 265, 1983) y B) Mapa local donde se encuentra el área de estudio (tomado de la Rev C.I.A:F. Vol 10 N-1 pg 48, 1985).



La otra propuesta es la desarrollada por Camargo (1995), en donde para el SW de la Sabana toma importancia el denominado sistema de fallas de Facatativá (Figura 1.1 [5]), sistema que presenta diferentes direcciones en las estructuras, al norte del trazo principal de la falla, las estructuras se orientan al NE y al sur cambian a NW y N-S, para lo cual este autor propone para este sistema de fallas una componente de movimiento en el rumbo de tipo sinistral con una compresión en sentido NW-SE (Figura 1.1 [5]), razón por la cual podemos tener pliegues como el de la Loma Pelada, anticlinales de Madrid y de Cerro Gordo orientados en la misma dirección del sistema de fallas principal (NNW y NW).

Por lo tanto, se propone una modelación análoga y cinemática para el estudio de este pliegue donde se pretende: 1) simular el proceso de formación y replicar la geometría actual de la estructura monoclinal, 2) simular los bloques colgante y yacente, 3) inferir las características de la falla (posible ubicación de la punta, ángulo de la rampa, deslizamiento y propagación) y 4) simular la cobertura sedimentaria y su deformación. En cuanto al modelo cinemático a seguir, se elige el denominado Trishear, propuesto por Erslev (1991), el cual a diferencia del modelo cinemático de Bandas Tipo Kink, presenta una alternativa para replicar las superficies curvas de las charnelas (anticlinal y sinclinal), los cambios de espesor de las capas, y los patrones de deformación observados en los ejemplos naturales y análogos de pliegues por propagación de falla.

Figura 1.1 Principales estructuras en los alrededores de Facatativá, Soacha y Bojacá [5]. (Tomado de Camargo, 1995).



1.2 Contenido de la tesis

La tesis se encuentra organizada de la siguiente manera: en el capítulo 2 se presenta un resumen de la teoría del modelamiento análogo a escala, las bases de los modelos tectónicos, características y propiedades mecánicas de las rocas y del material de modelamiento y por último los resultados de laboratorio de pruebas que se realizaron al material utilizado en este estudio. El capítulo 3 trata el modelo cinemático Trishear (teoría, aplicación y evolución). El capítulo 4 muestra el montaje para llevar a cabo los experimentos análogos y el método registro. En el capítulo 5 se realiza la descripción de los estados finales de los ensayos. En el capítulo 6 se habla del ejemplo natural, se describe la geología del área, además se realiza la descripción de las unidades del perfil del pliegue objeto de estudio. En el capítulo 7 se realiza la modelación cinemática por trishear por medio del programa FaultFoldForward (Allmendinger 2012). En el capítulo 8 se analizan y discuten los resultados y por último en el capítulo 9 se exponen las conclusiones. Después de la bibliografía se presenta un anexo con el procedimiento en el laboratorio para el desarrollo de la modelación análoga.

Capítulo 2: Modelamiento experimental a escala

2.1 Introducción

En la naturaleza muchos fenómenos físicos son lo suficientemente simples para ser entendidos y analizados mediante un razonamiento matemático sin la ayuda de la experimentación, y otros a pesar de estar compuestos por sistemas simples y bien entendidos, cuando interactúan con otros sistemas son difíciles de entender en conjunto como para hacer un análisis completo. En estos casos la experimentación directa ofrece la oportunidad de obtener información acerca de estos fenómenos que desean ser entendidos. En los diferentes ambientes tectónicos, fenómenos como la deformación del material rocoso es un ejemplo en donde la experimentación directa es casi imposible ya que por sus dimensiones y la cantidad de variables que intervienen hacen muy difícil la experimentación y el análisis de todo el sistema. En este caso, una alternativa del estudio del sistema o fenómeno se puede realizar por medio de modelos a escala adecuadamente contruidos. El modelamiento a escala presenta cierto grado de escepticismo en algunos

sectores de la comunidad geológica, principalmente por los materiales usados, la duración de los ensayos (tasa de deformación), efectos de borde de los modelos y la magnitud de esfuerzos aplicados.

En campos como la aeronáutica, hidráulica, ingeniería mecánica y eléctrica no son la excepción, pero más allá de las inquietudes y críticas, la modelación análoga a escala ha permitido desarrollar guías y lineamientos en el estudio, además ayuda en el entendimiento de fenómenos físicos complejos que, pese a sus diferencias con los ejemplos naturales, los modelos a escala pueden llegar a ser relevantes.

2.2 Teoría de modelos tectónicos a escala

Los modelos experimentales a escala han sido usados por alrededor de 100 años como una herramienta para simular, observar y analizar la evolución de estructuras geológicas. Los modelos iniciales utilizaron una gran variedad de materiales tratando de encontrar el material que más se acercara a la geometría final y comportamiento de algunas estructuras. Pero fue solo hasta 1937, que los materiales y procedimientos fueron más rigurosos cuando Hubbert introdujo “La teoría de los modelos a escala y su aplicación en el estudio de estructuras geológicas” donde se establece un análisis dimensional y se definen los requerimientos del material que va a ser utilizado en la modelación análoga de estructuras. La teoría presenta como eje central el término de similitud, que a su vez presenta grados de similitud. La similitud es definida como el estado de ser equivalente o parecido, y los grados de similitud de como las propiedades del modelo y los sistemas modelados están relacionados proporcionalmente.

2.2.1 Grados de similitud

Similitud geométrica: En términos generales, se dice que dos cuerpos son geoméricamente similares cuando todas las longitudes son proporcionales (constante de proporcionalidad) y los ángulos en los dos son iguales.

Similitud cinemática: Si dos cuerpos presentan similitud geométrica y sufren igual cambio geométrico (de forma) y posición, se dice que los dos cuerpos presentan similitud cinemática.

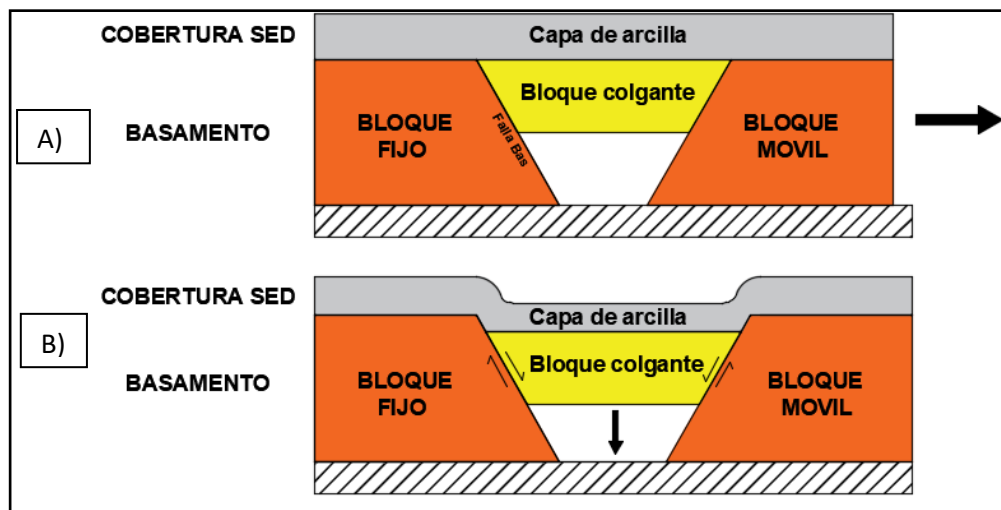
Similitud en velocidades y aceleraciones: Si dos cuerpos presentan similitud cinemática, las velocidades y aceleraciones de puntos correspondientes deben presentar una constante de proporcionalidad.

Similitud dinámica: Requiere que en cada elemento de masa que ocupa un volumen en el modelo, las fuerzas que actúan deben ser tal que el movimiento es geoméricamente y cinemáticamente similar al movimiento correspondiente a cada elemento de masa que ocupa un volumen en el original.

2.3 Experimentos tectónicos análogos

En la modelación análoga de ambientes tectónicos distensivos y compresivos, donde se generan pliegues relacionados a fallas de basamento en la cobertura sedimentaria, se trata de representar en términos generales: 1) el ambiente distensivo y/o compresivo, 2) la cobertura sedimentaria (una o varias capas) y su deformación, 3) los bloques que conforman el basamento y 4) la evolución de las fallas y estructuras, mediante algún mecanismo que genere un movimiento en dirección normal o inverso de uno de los bloques que representan el basamento y deforme la capa superior (de arcilla o arena) que simula la cobertura sedimentaria (Figura 2.3 [6]).

Figura 2.3: Esquema general del montaje de modelos análogos para ambientes distensivos (Withjack et al., 1990) [6]. A) Etapa inicial del ensayo y B) deformación de la capa de arcilla por el movimiento horizontal del bloque móvil.



Autores como Withjack et al., (1990) con la configuración anterior de modelos análogos, estudio el desarrollo de pliegues forzados bajo la influencia de una falla normal de basamento, donde en términos generales se estableció una similitud aceptable en la

geometría actual del pliegue natural, y los patrones de deformación del modelo análogo y las estructuras naturales analizadas (Golfo de Suez y offshore en Noruega), además se obtuvieron lineamientos generales en las interpretaciones de campo, pozos e información geofísica.

En cuanto al material utilizado autores como Eisenstadt y Sims (2005) presentan una serie de experimentos de extensión y compresión donde se establecen diferencias específicas en el estilo y la distribución de la deformación en materiales como arena y arcilla. Las diferencias se dan principalmente por el tamaño y cohesión de las partículas. En los ensayos con arenas las fallas presentan: 1) mayor tasa de propagación, mayor amplitud de la zona de falla y desplazamiento que en las arcillas, 2) diferencia en la proporción del plegamiento vs el fracturamiento, en las arenas es evidente ya que la baja cohesión de las partículas no permite desarrollar un plegamiento significativo, la mayor parte de la deformación es asimilada por el fracturamiento. Caso diferente con las arcillas las cuales se deforman casi uniformemente por fracturamiento y plegamiento sin ser dominante un proceso sobre el otro.

2.4 Propiedades de la cobertura sedimentaria

En la modelación análoga se pretende simular para este caso de estudio, sedimentos y coberturas sedimentarias, las cuales generalmente presentan niveles de saturación elevados o muy cercanos a los presentados en el nivel freático. Las propiedades físicas, mecánicas de los sedimentos comprenden un amplio rango de valores asociados al grado de litificación (consolidación y cementación) y edad (Tabla 2.4 [1]). De todas estas propiedades, la cohesión c necesita un tratamiento especial a la hora de usar los valores de esta en la modelación. Se deja a decisión del investigador el uso y valor de este parámetro en donde en algunos casos se prefiere ignorar la cohesión a tales escalas. En disciplinas como la geomecánica y la geotecnia se han usado métodos empíricos que estiman la cohesión de las rocas teniendo en cuenta los efectos de escalamiento. La caracterización del macizo rocoso se basa en grandes ensayos in-situ y los resultados revelan una notable presencia de cohesión en los sedimentos (sobre 5 MPa, Tabla 2.4 [1]) Los impactos de una cohesión no insignificante en el escalamiento y los resultados de modelos tectónicos aun necesitan mayor investigación y discusión.

Tabla 2.4: Propiedades de los sedimentos y rocas sedimentarias [1]. Compilado por Attewell y Farmer (1976), Rumel (1982), Shopper (1982) y Carmichael (1990), datos tomados de la tesis de Atmaoui (2005). Algunos de los datos pertenecen a núcleos de roca y macizos rocosos in situ (Instituto de Ciclo Nuclear de Japón, 2000). Los sedimentos pertenecen al Neógeno y son rocas blandas, compuestas por tamaño de grano arcilla y arena con intercalación de capas.

		Sedimentos	Rocas Sedimentarias
Propiedades Físicas	Densidad ρ (kg/m ³)	1.2 – 2.45	1.55 – 2.84
	Gravedad específica Gs (-)	2.70	
	Porosidad Efectiva n_e (%)	30	2
Propiedades Mecánicas	Resistencia a la compresión sin límites UCS (MPa)	5 - 25	22 – 175
	Módulo de Youngs E (MPa)	1500 – 5000	37000
	Coefficiente de Poisson ν (-)	0.30	0.25
	Cohesión c (MPa)	1 – 5	8 – 105
	Angulo de fricción interna ϕ (°)	25 – 30	28 – 45
	Resistencia a la Tensión σ_t (MPa)	2 – 20	15 – 25

El comportamiento dúctil y frágil en la cobertura sedimentaria es posible a profundidades menores de 6 km. La presencia de fluidos en los poros afecta fuertemente las propiedades físicas, hidráulicas, termales y mecánicas de las rocas. En profundidades de 2.5 a 4 km, las areniscas y shales son generalmente poco cementadas y dúctiles, mientras que a grandes profundidades calizas y shales carbonatados se vuelven frágiles y los fluidos corren por las fracturas. También, procesos diagenéticos como la disolución y precipitación generan arenitas bien cementadas y calizas dirigidas hacia una deformación dúctil, lo cual responde a un esfuerzo de un gran periodo de tiempo. Este comportamiento no se puede mostrar en ensayos de laboratorio de cortos periodos de tiempo. A mayor profundidad incrementa la cementación lo cual ocasiona que las rocas sedimentarias sean más frágiles, a pesar que el incremento de la presión de confinamiento y temperatura lo impidan y hagan que la roca sea más dúctil. En las partes profundas de la cuenca, rocas arcillosas se deshidratan, su permeabilidad se reduce y en áreas de sobrepresión el flujo es controlado por hidrofracturamiento. En resumen, las fuerzas tectónicas pueden generar un comportamiento dual en una cobertura sedimentaria (frágil y dúctil).

2.5 Características y comportamiento del material de modelamiento

Los materiales particulados de tamaño de grano fino como arena y arcilla son ampliamente usados en los modelamientos tectónicos ya que al igual que la mayoría de las rocas están constituidas principalmente partículas (granos y cristales principalmente) y se busca que el material de modelamiento sea lo más parecido al material natural. Para este estudio se escogió la arcilla por sus características y comportamiento que a continuación se describen.

2.5.1 Arcilla como material de modelamiento

Para el modelamiento físico de los materiales que componen la corteza superior (frágil) se busca que el material utilizado en el modelamiento, presente un comportamiento similar a un material de tipo Mohr-Coulomb (plástico friccional). Se debe tener en cuenta que la arcilla húmeda no es el material teóricamente perfecto para la modelación ya que su comportamiento no es perfectamente plástico friccional y en algunos casos se puede alejar del comportamiento ideal de una roca (heterogénea y sometida a diferentes esfuerzos), pero si es un material que ha reproducido los patrones de deformación observados en algunas estructuras naturales con un alto grado de aproximación (Eisenstadt y Sims, 2005).

La arcilla es un material ideal para realizar simulaciones de rocas sedimentarias, se caracteriza por su alta deformabilidad, comportamiento frágil y dúctil, características que están asociadas al contenido de agua. Con los cambios en el contenido de agua también se puede variar fácilmente la resistencia al corte, característica que se puede relacionar con los patrones de deformación observados en el modelamiento análogo. Cloos (1928) y Hubbert (1937) enfatizan que, para un adecuado escalamiento dinámico, las mezclas de arcilla deben tener una resistencia al corte muy baja, esto puede obtenerse con contenidos de agua más allá de su límite líquido.

Otras características que cumple la arcilla, es la posibilidad de escalar el tamaño de grano, el desarrollo de una presión de poros durante la deformación, y la anisotropía presente en la organización de los granos en rocas, que en la arcilla sería una anisotropía primaria que hace referencia a la forma de cómo están orientados los granos en las mezclas con agua. Por último, se puede decir que las arcillas utilizadas, son adecuadas para un modelamiento análogo, pues los parámetros de esfuerzos (cohesión y ángulo de fricción) son escalables. Pero hay que tener en cuenta que los sedimentos y rocas sedimentarias son

dinámicamente escalables en estos modelos de arcilla, si la cohesión usada es insignificante y si el ángulo de fricción interno corresponde al de las rocas sedimentarias (Weijermars et al., 1993).

2.5.2 Propiedades mecánicas de la arcilla húmeda

La consistencia de la mezcla de arcilla utilizada en el modelamiento análogo es un inconveniente para ensayos de mecánica de suelos y ensayos de laboratorio como el corte directo o la compresión triaxial. Pero no lejos de los métodos estándar es posible medir el esfuerzo y la tensión en las mezclas de arcillas con altos contenidos de agua, lo cual se hace ejerciendo un muy bajo esfuerzo efectivo. De todas maneras, la mecánica de suelos moderna provee la base para desarrollar una metodología funcional asociada al estado del material y las condiciones límite (Tabla 2.5.2 [2]).

Tabla 2.5.2. Condiciones de límite y parámetros de corte en modelos físicos anteriores [2]. (-): significa sin información. (*): Son referencias de geotecnia.

Arcilla	Tipo de ensayo	Rango de esfuerzos	Intercepción de Cohesión	Angulo de fricción	Referencia
Caolín	Corte directo	220-240 kPa	10 kPa	23°	Tchalenko 1970
Soft clay	Corte directo	1000 Pa	-	-	Withjack et al. 1990
Caolín	Corte directo	-	46 Pa	28°	Sims 1993
Caolinita (66%) Bentonita (33%)	Presión inconfiada	< 10 kPa	-	-	Lazarte y Bary 1996*
Caolinita Hidratada R	Corte directo	200 – 1600 Pa	140 Pa	28°	El-Gharbawy 1998*
Caolinita Hidratada R	Corte directo (muestra delgada)	1 – 2400 Pa	50 Pa	55° -9 log (σ'_n)	Pedersen et al. 2003*
Kaolin O	Corte directo	1.5 x 10 ³ Pa	-	32	Atmaoui, N. 2005
kaolin, nepheline-syenite, and flint	Corte directo	60 – 65 Pa	-	-	Eisenstadt y Sims. 2005.
Clay	Corte directo	1079 Pa	-	-	Miller and Mitra. 2011
Kaolin	Corte directo	85-100 Pa	-	-	Cooke et al. 2012.

Para los experimentos a escala se debe tener en cuenta dos condiciones de las mezclas de arcilla: 1) la resistencia al corte debe ser muy baja y 2) el ángulo de corte debe ser muy similar a las condiciones naturales. Adicionalmente se debe determinar la densidad de las mezclas de arcilla para especificar el contenido de agua.

Hubbert (1937) formuló que para obtener una similitud geométrica y cinemática con las rocas que componen la corteza, la resistencia del material a modelar y las dimensiones del modelo deberían ser escaladas en el mismo factor. Este requisito se cumple en los modelos ya que el promedio de densidad de las rocas sedimentarias ($\approx 1.6 \text{ gr/cm}^3$) se encuentra muy cercano en magnitud a la densidad de las mezclas de arcilla utilizadas en este estudio (1.47 gr/cm^3). La resistencia al corte de las rocas sedimentarias ($\approx 10 \text{ MPa}$) es cerca de 10^5 veces más grande que la de las mezclas de arcilla utilizadas ($9 \times 10^{-5} \text{ MPa}$, cono de penetración). Los espesores de la cobertura sedimentaria sobre los bloques de basamento fallados ($\approx 10^5 \text{ cm}$) es cerca de 10^5 veces más grande que los espesores de las capas de arcilla en la modelación (4 cm). Por lo tanto, el factor de escalamiento es igual y se cumpliría el criterio de similitud geométrica y cinemática.

En cuanto al efecto de la cohesión en las mezclas de arcilla-agua Eisentadt y Sims (2005) realizaron modelamientos con arcillas donde se concluyó que el esfuerzo de cohesión aumenta con el incremento de la densidad (menor contenido de agua). A mayor fuerza de cohesión mayor es la densidad. También se encontró que en este tipo de modelación la densidad es la variable que más influye en la deformación y no la tasa de deformación como se podría pensar.

Bain y Beebe (1954) demostraron que los efectos en la variación de la densidad resultan en diferentes patrones de deformación, entre más baja la densidad, se tiene menor desplazamiento y las inclinaciones son bajas.

Ortel (1965) demostró que los efectos del decrecimiento en la tasa de esfuerzo generan un patrón de deformación, donde los ángulos son agudos o menores entre los trazos de las fallas.

Otros investigadores han observado el efecto de la variación de la densidad de las mezclas en las fallas generadas. Mattman (1987) realizó ensayos donde el porcentaje de agua varía desde 15 % hasta 60% y pudo demostrar que la deformación ocurre a lo largo de distintas zonas de falla y presentando espesores de 20 a 100 μm de ancho. Incluso las densidades bajas pueden mostrar una deformación plástica, bajo el microscopio se pueden observar zonas de cizalla.

El estudio de Arch et al., (1988), demuestra que arcillas con poco contenido de agua genera una zona de cizalla discreta y casi plana, mientras que alto contenido de agua en las arcillas genera zonas de cizalla más complejas y numerosas.

2.5.3 Condiciones físicas en un modelamiento análogo

La mecánica de suelos clasifica las arcillas en dos categorías: arcillas con consolidación normal y arcillas sobreconsolidadas. El estado de consolidación hace referencia a la historia de esfuerzos de una arcilla natural desde su depositación, asociado a la reducción del volumen o porosidad durante y después de la carga. Los datos son presentados en términos de la razón de la sobreconsolidación. Un valor de sobreconsolidación cercano a 1 representa un estado de consolidación normal, donde el máximo esfuerzo experimentado por el material no es mayor que el que presenta actualmente. Un valor de sobreconsolidación mayor a 1 describe a un material que ha sufrido esfuerzos mayores al esfuerzo que presenta actualmente. Una mezcla de arcilla agua preparada en el laboratorio no está sujeta a un proceso típico de consolidación y se puede considerar como una arcilla normalmente consolidada.

Otro parámetro importante es la sensibilidad, donde la pérdida de resistencia debida al remoldeo se caracteriza con la sensibilidad de la arcilla, relaciona la resistencia en un estado inalterado con la resistencia de un estado alterado:
$$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{resis inalterada}}{\text{resis remoldeada}}$$

Las mezclas preparadas en laboratorio se consideran como arcillas sensitivas (Terzaghi and Peck, 1948) porque pierden su resistencia cuando son remoldeadas (proceso de preparación de las mezclas) pero la recuperan después de un tiempo de reposo (por su alto contenido de agua).

2.5.4 Límites de Atterberg y grado de saturación

En los modelos de arcilla a escala, la mezcla de agua – arcilla se prepara para obtener una resistencia al corte muy baja y una consistencia que permita una fácil manipulación y permita dar forma a las capas de arcilla. La magnitud de plasticidad de una arcilla depende de su composición mineralógica y el contenido de agua. Los límites de Atterberg se basan en el concepto de que un suelo fino solamente puede existir cuatro estados de consistencia variando los contenidos de agua (seco, semisólido, plástico y líquido), y los puntos de transición entre los estados como los límites. El rango del estado de plasticidad es dado por la diferencia entre el límite de líquido y el límite de plástico, el término asignado es índice de plasticidad. Estos límites de consistencia son determinados por ensayos estándares en laboratorio de mecánica de suelos. El índice de plasticidad refleja las características mineralógicas del tamaño de fracción de la arcilla, y está directamente relacionado a las propiedades mecánicas de las arcillas.

2.5.5 Condiciones de drenaje

Cuando el material arcilloso en condiciones húmedas es sometido a un esfuerzo cortante, un exceso de presión de poros es producido y la disipación depende de la permeabilidad y del tiempo. Si la presión de poros se disipa rápidamente, se dice que el ensayo es drenado, pero si la tasa de disipación es muy lenta el ensayo se considera no drenado, el material modelado no escurre y el incremento del esfuerzo total resulta en uno igual al incremento de la presión de poro. Arcillas y limos arcillosos tienen una baja permeabilidad, con estos materiales los experimentos análogos pueden durar desde algunos minutos hasta 4 horas, este lapso de tiempo es muy corto para que el agua pueda ser drenada durante el experimento, lo cual significa que prevalecen las condiciones no drenadas.

2.5.6 Resultados de laboratorio de la arcilla RN

En este estudio se utiliza una arcilla comercial en polvo seca que es empleada en la fabricación de cerámica y su referencia es Arcilla RN molida (empresa de refractarios colombianos s.a, erecos). Con el objetivo de determinar algunos parámetros mecánicos de las mezclas se realizaron las siguientes pruebas en laboratorio.

2.5.6.1 Corte directo

Se utilizó el equipo ELE maquina digital de corte directo del laboratorio de geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia. La muestra se falla en condiciones consolidada-drenada. Aunque las condiciones de drenaje de los ensayos son no consolidados no drenados, da una idea de los valores del ángulo de fricción y cohesión (Tabla 2.5.2 [2]). Se obtienen valores de ángulos de fricción de 23°, 28° y 32°, valores muy cercanos a los obtenidos para la arcilla RN (32° y 37°), Tabla 2.5.6.1 [3]. En cuanto a los valores de cohesión solo el de Tchalenko (1970) de 10 kPa es cercano a los obtenidos en este estudio (6.6 y 7.1 kPa).

Tabla 2.5.6.1: Resultados corte directo arcilla RN. [3]

Arcilla	Tipo de ensayo	Rango de esfuerzos		Intercepción de Cohesión	Angulo de fricción	Contenido de agua inicial
Arcilla RN	Corte directo	Corte 0-90.4 kPa	Normal 0-204.6 kPa	6.6 kPa	32°	45%
Arcilla RN	Corte directo	Corte 0-85.2 kPa	Normal 0-204.6 kPa	7.1 kPa	37°	47%

2.5.6.2 Límites

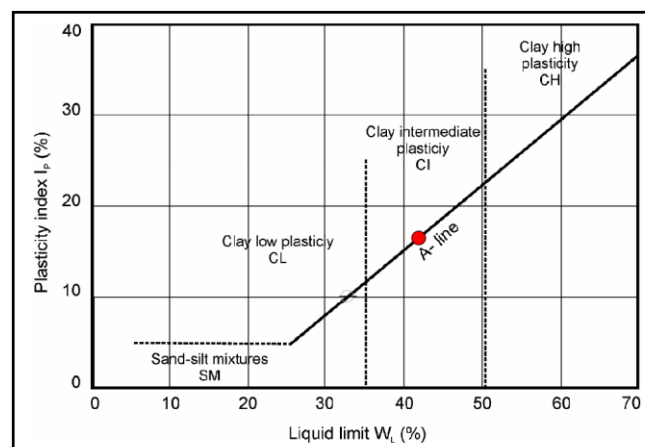
Se establecieron los límites líquido y plástico de la arcilla RN. El límite líquido (LL) se determinó mediante un procedimiento normalizado en el laboratorio de geotecnia (cuchara de Casagrande) y el límite plástico (LP) con la formación de cilindros de 3 mm de diámetro (arcilla seca en polvo con incrementos de agua hasta formar los cilindros a mano) en una superficie lisa hasta que los cilindros empiecen a fracturarse, luego se mide el contenido de agua de los cilindros. Con la diferencia entre los contenidos de agua encontrados en el LL y LP se halla el índice de plasticidad, punto que es ubicando en la Figura 2.5.6.2 [7], donde encontramos que la arcilla RN es una arcilla de intermedia plasticidad adecuada para este tipo de ensayos.

Límite Líquido = 42,5 % contenido de agua.

Límite Plástico = 25.9 % contenido de agua.

Índice de plasticidad = $LL - Lp = 42.5\% - 25.9\% = 16.6\%$

Figura 2.5.6.2. Condiciones de límite y parámetros de corte en modelos físicos anteriores [7].



2.5.6.3 Resistencia al corte (prueba de penetración con cono)

Uno de los métodos indirectos para obtener la resistencia al corte de un suelo en condiciones no drenada no consolidada es la prueba de penetración con cono, es una prueba simple en la cual un cono metálico penetra por su propio peso una muestra de suelo y la profundidad de penetración es medida (milímetros), Figura 2.5.6.3 [8]. Además de la resistencia al corte (corte directo) se realizaron pruebas de penetración con cono

(corte indirecto) con diferentes contenidos de agua (45%, 46%, 47% y 48). La resistencia al corte no drenada S_u se obtiene por la ecuación de cono:

$$S_u = k * \left(\frac{m * g}{d^2} \right)$$

Donde k es la constante del cono (0.29), m es la masa del cono de 60° (60 gr), g es la aceleración de la gravedad y d es la penetración del cono. Los resultados de la prueba se observan en la Tabla 2.5.6.3 [4] y se agregan los obtenidos por Atmaoui (2005) quien realizo la prueba con veleta. La penetración con cono es una prueba que no presenta gran aceptación en la comunidad científica, pero para este ensayo los valores son muy aproximados con obtenidos con la veleta en Atmaoui (2005).

Figura 2.5.6.3. Prueba de penetración con cono [8].



Tabla 2.5.6.3 Resultados de prueba de penetración con cono [4]. Los valores con * son tomados del trabajo de Atmaoui (2005) prueba con veleta.

% de agua	Densidad ρ (gr/cm ³)	S_u (KPa)
45	1.50	1.2
46	1.47	0.8
47	1.48	0.6
48	1.48	0.4
38*	1.79	2
42*	1.75	1.5
48*	1.70	0.5

Esta prueba a diferencia del corte de directo, permitió evaluar las condiciones del modelamiento análogo, y los resultados obtenidos comparados con veleta permiten dar mayor confianza, ya que son muy cercanos a los obtenidos con el cono.

Se presentan dos graficas donde se comparan el contenido de agua en las mezclas con la resistencia al corte (S_u) obtenida con el cono (Figura 2.5.6.3 [9]), y los contenidos de agua con la densidad (Figura 2.5.6.3 [10]). En S_u vs % agua se observa una correlación directa, a medida que aumenta el contenido de agua disminuye la resistencia al corte. La correlación no es tan directa como se esperaría en ρ vs % agua, ya que al aumentar el contenido de agua de 45% a 46% la densidad cae de 1.5 a 1.47 gr/cm^3 , y en 47% y 48% de contenido de agua la densidad no sigue bajando si no sube a 1.48 gr/cm^3 .

Figura 2.5.6.3: Resistencia al corte no drenada de la arcilla RN vs contenido de agua % [9].

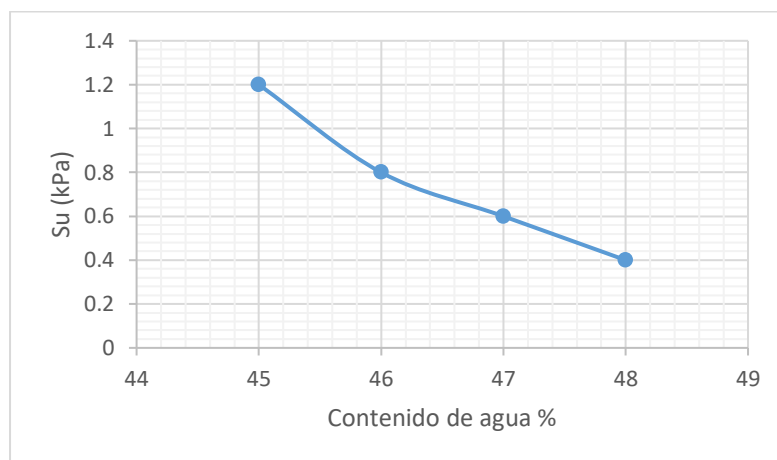
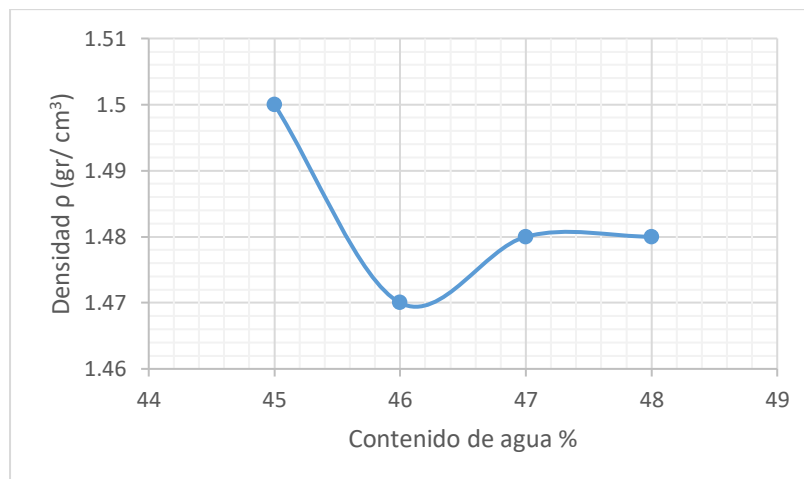


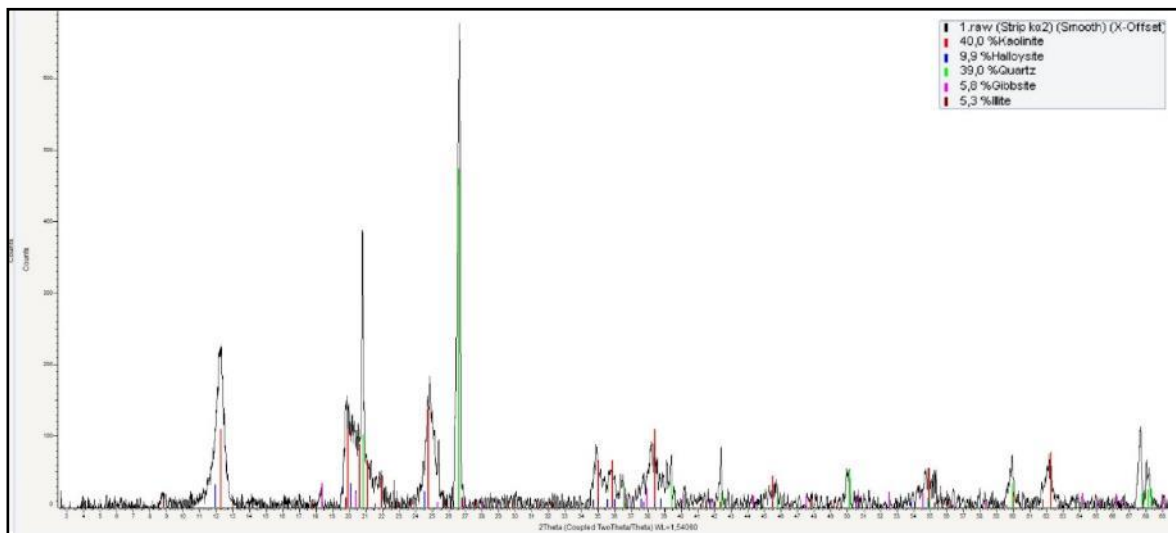
Figura 2.5.6.3: Densidad de las mezclas de arcilla RN agua vs contenido de agua % [10].



2.5.6.4 Análisis por difracción de rayos X

La arcilla RN después de ser analizada mediante difracción de rayos X muestra que los principales componentes de esta arcilla son caolinita (40 %), cuarzo (39%) y en menor proporción otras arcillas (21%), ver figura 2.5.6.4 [11]. Estos resultados son favorables para el modelamiento análogo ya que la intermedia plasticidad y el alto contenido de sílice en arcillas, como las que se utiliza en este estudio, tienen la capacidad de reproducir fallas localizadas con los contenidos de agua apropiados para el escalamiento de la resistencia de la corteza, caso contrario con arcillas de alta plasticidad donde se necesitan mayores contenidos de agua, que hacen que las mezclas fluyan ante la deformación, más que producir fallas localizadas (Cooke and Van der Elst, 2012).

Figura 2.5.6.4. Difractograma de arcilla RN [11].



Capítulo 3: Modelo cinemático Trishear

3.1 Introducción

Los pliegues por propagación de falla en provincias tectónicas de piel delgada han llamado la atención de geólogos estructurales en las últimas décadas. Varios modelos cinemáticos se han ideado y aplicado tratando de explicar las geometrías observadas, uno de ellos es el clásico tipo kink (Suppe, 1983; Suppe y Medwedeff, 1990), el cual no replica las superficies plegadas de los pliegues, cambio de espesores, ni tampoco explica los complejos patrones de deformación observados en ejemplos naturales ni en los generados por experimentos análogos. Otros intentos por modelar este tipo de pliegues fueron ejercicios puramente geométricos o cinemáticos con bastantes restricciones (Suppe et al., 1992; Suppe y Medwedeff, 1990). Eric Erslev (1991) desarrollo el modelo cinemático curviplanar denominado Trishear, el cual en términos generales explica la geometría de las estructuras involucradas, los cambios de espesores de los estratos y una aproximación al entendimiento de los complejos patrones de deformación observados en este tipo de pliegues.

En los modelos tipo trishear de pliegues relacionados a fallas, la relación de avance del fallamiento y plegamiento es evidente. Información sísmica y de pozo muestran que además del avance (deslizamiento) de la falla, cambios en el buzamiento de la falla intervienen en el desarrollo de pliegues. Los pliegues por propagación de falla son definidos “como los pliegues que representan la deformación que toma lugar justo en el frente de la superficie de propagación de la falla” (Suppe, 1984).

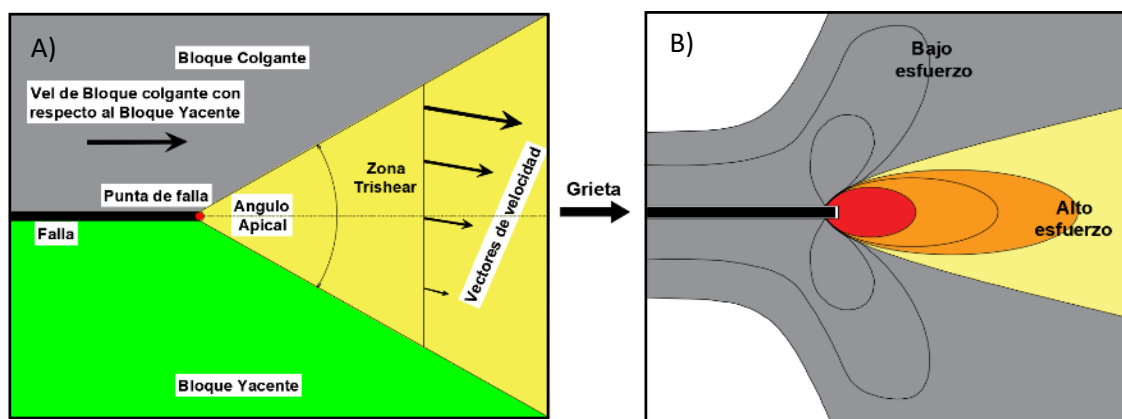
Para entender mejor el modelo Trishear se presenta a continuación la cinemática y los parámetros que intervienen en la modelación.

3.2 Cinemática del modelo

En el modelo trishear una falla con origen profundo avanza hacia la superficie, a medida que avanza el deslizamiento hacia estratos superiores, se observa en la punta de la falla un fenómeno de disipación del movimiento, generándose una zona de cizalla que presenta una forma triangular en perfil (Figura 3.2. A) [12]). La forma triangular es un aspecto que aún no es bien entendido, pero se plantea que la deformación en la punta de este tipo de fallas se asemeja a la geometría producida por las grietas tipo II (Allmendinger 1998),

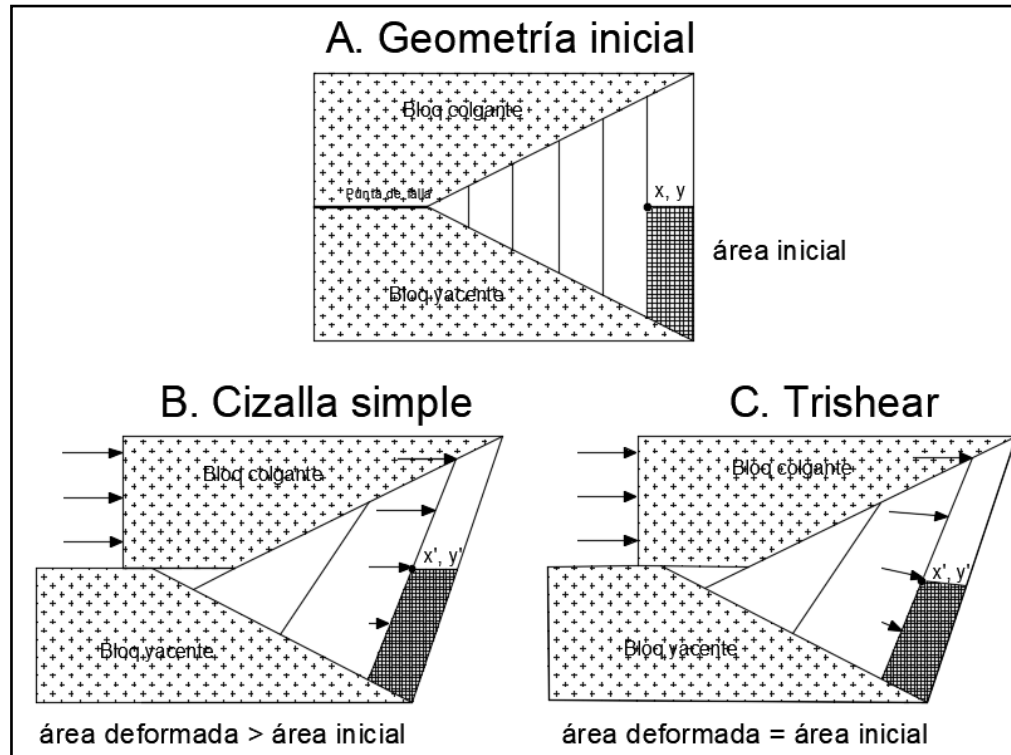
teóricamente este tipo grietas muestran una zona triangular (Figura 3.2. B [12]) de concentración de esfuerzos cortantes alrededor de la punta (Pollard and Segall, 1987).

Figura 3.2. Geometria basica del modelo trishear y modelo contornos de esfuerzos de una grieta tipo II [12]. A) Elementos basicos del modelo trishear y B) Grieta tipo II, notese la region simetrica triangular de maximos esfuerzos en color amarillo, naranja y rojo (punta de la grieta), modelo basado en el mecanismo de fractura de elasticidad lineal descrito por Pollard and Segall (1987).



Erslev (1991) y Erslev and Rogers (1993) muestran que para conservar el área en esta sección triangular esta debe ser simétrica con respecto a la falla. En la parte superior de la zona trishear, los vectores de deslizamiento son iguales a los ubicados en el bloque colgante: ellos deben ser paralelos y de igual magnitud a la falla maestra (Figura 3.2 [13]). En la base de la zona trishear el deslizamiento debe ser cero (bloque yacente). En la zona denominada trishear los vectores de velocidad varían linealmente en magnitud y orientación desde el tope hacia la base (Hardy and Ford, 1997), así la dirección de cizalla varía desde el buzamiento de la falla al buzamiento menos la mitad del ángulo apical de la zona trishear. En cuanto al campo de desplazamiento debe calcularse iterativamente, razón por la cual el método no se puede aplicar grafica ni analíticamente.

Figura 3.2. Geometria basica del modelo trishear Erslev (1991) [13]. A) Geometria inicial. B) Deslizamiento de la falla donde los vectores de movimiento se mueven paralelos a la falla generando un desbalance entre en area inicial en A con B. C) En el modelo trishear los vectores de movimiento se mueven en forma oblicua maneteneindo el area inicial.



3.3 Parámetros del modelo trishear

Ya se han mencionado algunos de los componentes del modelo, como el deslizamiento de la falla, ángulo apical y la punta de la falla. En el modelo trishear varios parámetros pueden ser modificados y obtener diferentes geometrías y patrones de deformación. Los parámetros más importantes y que se pueden modificar son los siguientes:

Localización inicial de la punta de la falla: Ubica la posición (X, Y) en perfil de la punta de la falla.

Buzamiento de la falla: Angulo de la rampa.

Deslizamiento total de la falla: Cuantifica el desplazamiento total de la falla.

Angulo trishear (ángulo apical): Angulo que determina que tan amplia es la zona de deformación observada en un ejemplo natural o simulado.

Relación P/S: Esta relación determina que tan rápido la punta de la falla se propaga a través de la sección con respecto a la tasa de deslizamiento de la falla. Un valor $P/S=0$ significa que se fija la zona triangular al bloque yacente y un $P/S=1$ significa que se fija la zona triangular en el bloque colgante. Altos valores de P con respecto a S llevan a la

formación de zonas estrechas de alta deformación y bajos valores de P/S conllevan a una deformación más dúctil con amplias zonas de deformación.

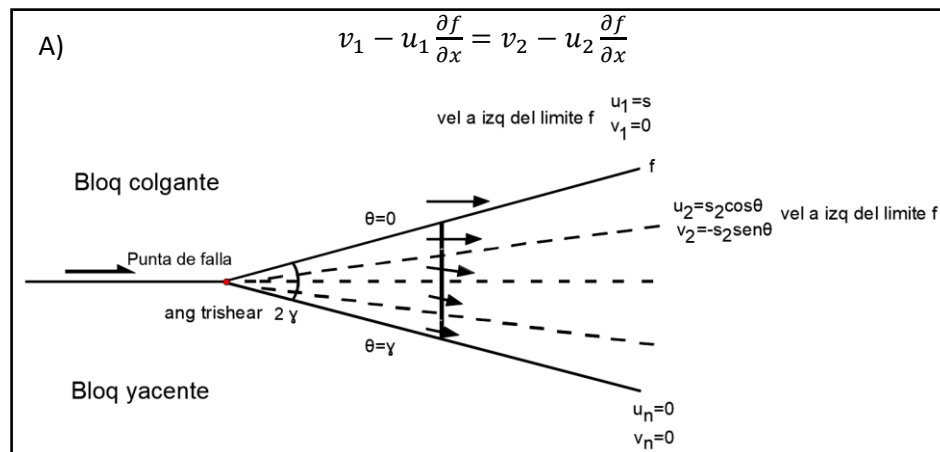
En Allmendinger (1998) se plantean varios casos donde los parámetros como ángulo de rampa, deslizamiento de la falla, ángulo trishear y P/S pueden variar durante la deformación y generar muchas más geometrías, que dejando fijos estos valores durante toda la deformación.

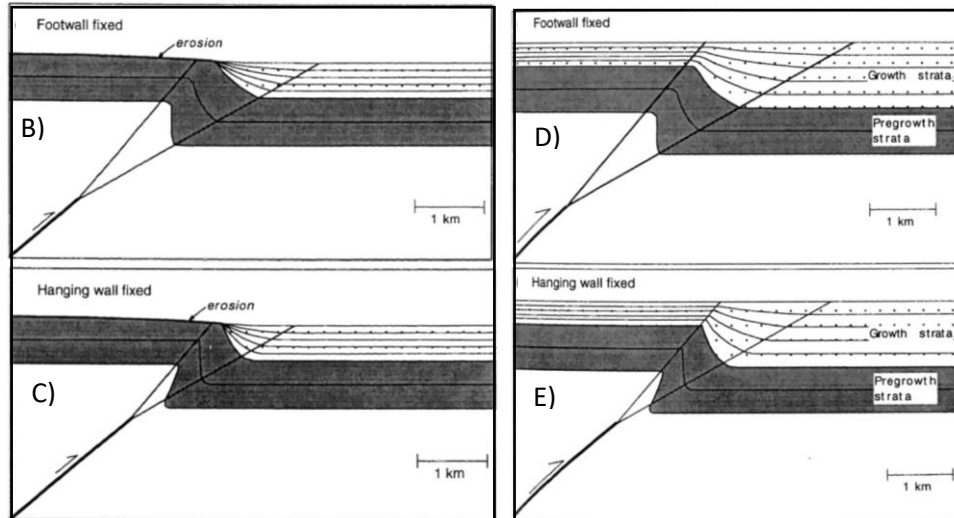
3.4 Evolución del modelamiento trishear

Desde que Erslev (1991) formulo el modelo cinemático trishear (Figura 3.2 [13]), este ha tenido avances y contribuciones que le han permitido ampliar su campo de acción. A continuación, se presentan algunos de ellos.

Hardy and Ford (1997) presentaron una formulación matemática del problema y amplían los alcances del modelo inicial propuesto por Erslev (1991). Analizaron el efecto de la propagación variable con respecto a las tasas de deslizamiento en la falla y han ilustrado la geometría de estratos de crecimiento asociados con los pliegues por propagación de falla trishear (Figura 3.4 [14]). Su programa representa el primer intento de un programa de modelación de trishear forward (deformación de un estado inicial de capas inalteradas a uno deformado “hacia adelante”).

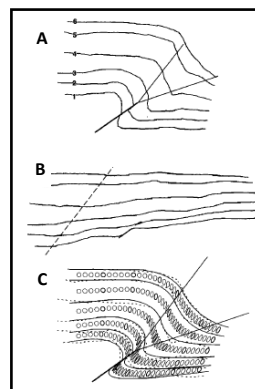
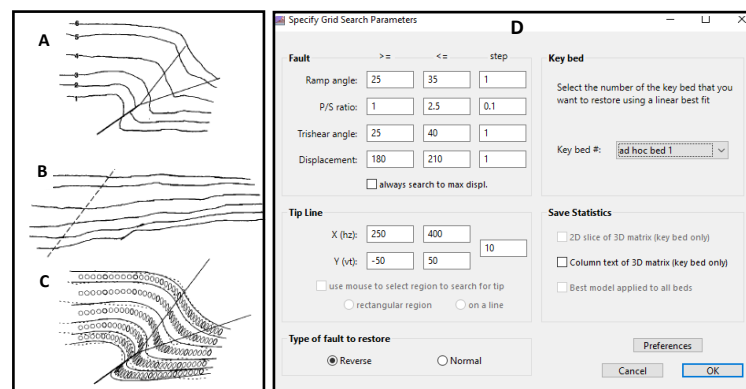
Figura 3.4. Diagrama esquemático usado por Hardy and Ford (1997) y esquemas de crecimiento de estratos a medida que se da la deformación [14]. A) Diagrama esquemático, donde v_1 y u_1 son las velocidades conocidas y v_2 y u_2 las desconocidas. B y C) Deformación, crecimiento de estratos y erosión. D y E) Deformación y crecimiento de estratos sin erosión.





Allmendinger (1998) aplicando el análisis matemático de Hardy and Ford (1997) presenta un programa que desarrolla un algoritmo que utiliza una grilla de búsqueda, grilla que encuentra la combinación de los paramentos trishear que mejor restauran un pliegue en perfil 2D, en una serie de líneas rectas. El programa presenta gran flexibilidad en los parámetros de entrada, variaciones de los parámetros durante el análisis, cambios en el espesor y buzamiento de los estratos y generación de estratos de crecimiento. Además provee una manera cuantitativa, científicamente objetiva de aplicar la modelación trishear a estructuras reales (Figura 3.4 [15]).

Figura 3.4. Modelación inversa de un pliegue por propagación de falla (Hudson Valley, Allmendinger, (1998) y parámetros de grilla de búsqueda (FaultFoldForward) [15]. A) Digitalización de capas guía, B) restauración planar de capas, C) con los parámetros obtenidos en la grilla de búsqueda se corre un modelo forward y D) Ventana de grilla de parámetros de búsqueda.



Specify Grid Search Parameters

Fault

Ramp angle:

P/S ratio:

Trishear angle:

Displacement:

always search to max displ.

Tip Line

X (hz):

Y (vt):

use mouse to select region to search for tip

rectangular region on a line

Type of fault to restore

Reverse Normal

Key bed

Select the number of the key bed that you want to restore using a linear best fit

Key bed #:

Save Statistics

2D slice of 3D matrix (key bed only)

Column text of 3D matrix (key bed only)

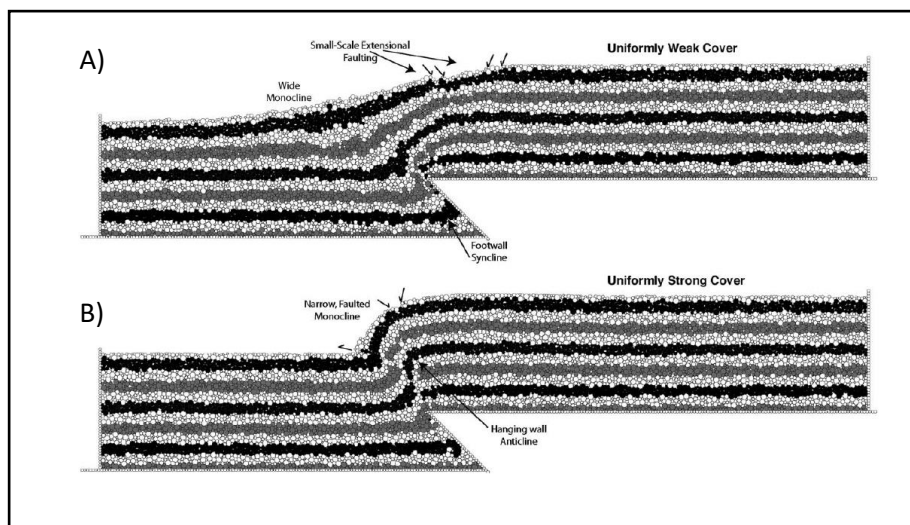
Best model applied to all beds

Preferences

Zehnder and Allmendinger (2000) presentan un método preciso, simple y generalizable para obtener el campo de velocidades en el modelo trishear. Donde los campos se pueden escribir como funciones explícitas de posición dentro de una zona de deformación. Además, se demuestra que la zona trishear no necesita ser simétrica como se establece en el modelo inicial.

Hardy and Finch (2006) aplican el método de elementos discretos para investigar la influencia del efecto de la resistencia (dureza) de la cobertura sedimentaria en la generación de pliegues por propagación de falla. Se analizan las respuestas a la deformación de coberturas sedimentarias homogéneas (suaves de poca resistencia) las cuales presentan deformación tipo trishear. Por otro lado, coberturas sedimentarias resistentes presentan pliegues más redondeados y un avance significativo de la propagación de la falla en la cobertura sedimentaria (Figura 3.4 [16]). También se analiza el efecto en coberturas sedimentarias heterogéneas en las cuales las capas presentan diferente grado de dureza, el resultado es el desarrollo de pliegues complejos que difieren de las predicciones de modelos cinemáticos simples.

Figura 3.4. Ilustración de la técnica del modelamiento con elementos discretos (Hardy and Finch, 2006) [16]. A) Simulación de la deformación de una capa poco competente. B) Simulación de una capa competente.



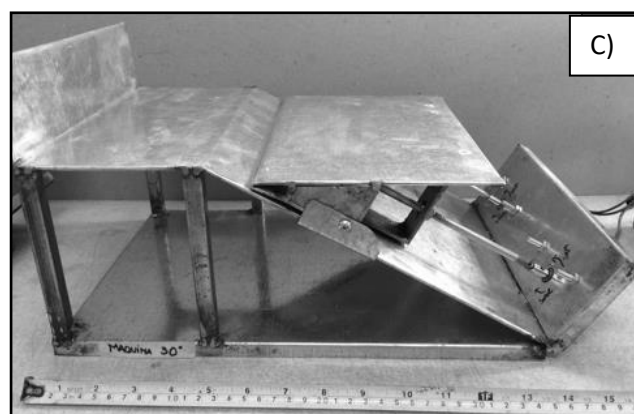
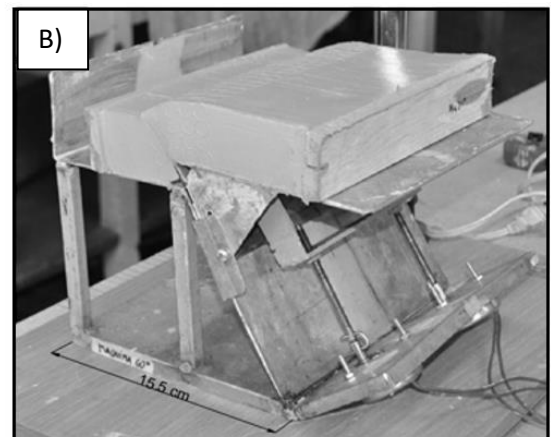
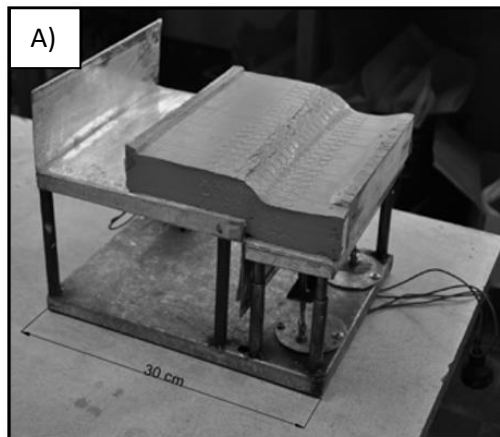
Cardozo and Aanonsen (2009) describen la aplicación de la optimización en 2D y 3D del modelamiento inverso (Allmendinger, 1998). Este método de optimización es significativamente más rápido que el método estándar de grilla de búsqueda. Los algoritmos de optimización atraviesan el espacio del parámetro en una dirección ideal hacia un mínimo, así se reduce el tiempo de estimación de los parámetros que mejor se acomodan.

Capítulo 4 Montaje del experimento análogo

4.1 Máquinas de deformación

El diseño de las máquinas de deformación para este estudio se realizó teniendo en cuenta las características geométricas y mecánicas de otras máquinas elaboradas por otros autores (Withjack and Olson, 1990 y Miller and Mitra 2011). El mecanismo consta de un bloque fijo y otro móvil que se desplaza por la acción de dos motores y un sistema tipo husillo. Los motores hacen que el bloque colgante suba o baje a una tasa de desplazamiento que varía entre 1.8×10^{-3} y 2.6×10^{-3} cm/seg, con ángulos de rampa de 30° , 60° y 90° (Figura 4.1 [17]).

Figura 4.1. Fotografías de las máquinas de deformación [17]. A) máquina con ángulo de rampa 90° , B) máquina con ángulo de rampa 60° y C) máquina con ángulo de rampa 30° .



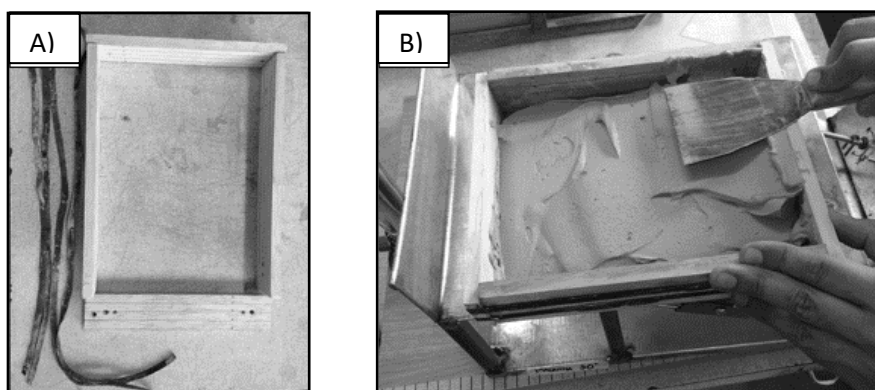
Este tipo de máquinas tratan de simular la evolución de un pliegue por propagación de falla, y los componentes de la máquina representan: 1) el basamento, 2) fallas de

basamento, 3) los bloques yacente y colgante, 4) cinemática de fallas normales e inversas y 5) la cobertura sedimentaria (capa de arcilla) y su deformación por la propagación de una falla.

4.2 Capa de arcilla-agua

Se emplea un marco de madera de 4 cm de alto y de las dimensiones de la parte superior de las máquinas para sostener, dar forma y perfilar la capa de arcilla-agua que simulara la cobertura sedimentaria (Figura 4.2 [18]). Se trata en lo posible en el momento del llenado del molde, extender las mezclas de manera uniforme sin dejar espacios vacíos, además se deja reposar la mezcla por unas horas (4 a 6) para tratar de garantizar al máximo la homogeneidad y un estado de consolidación normal de mezcla.

Figura 4.2. A) Fotografía de marco de madera y sujetadores de caucho (izq) y B) fotografía del llenado del molde (der) [18].



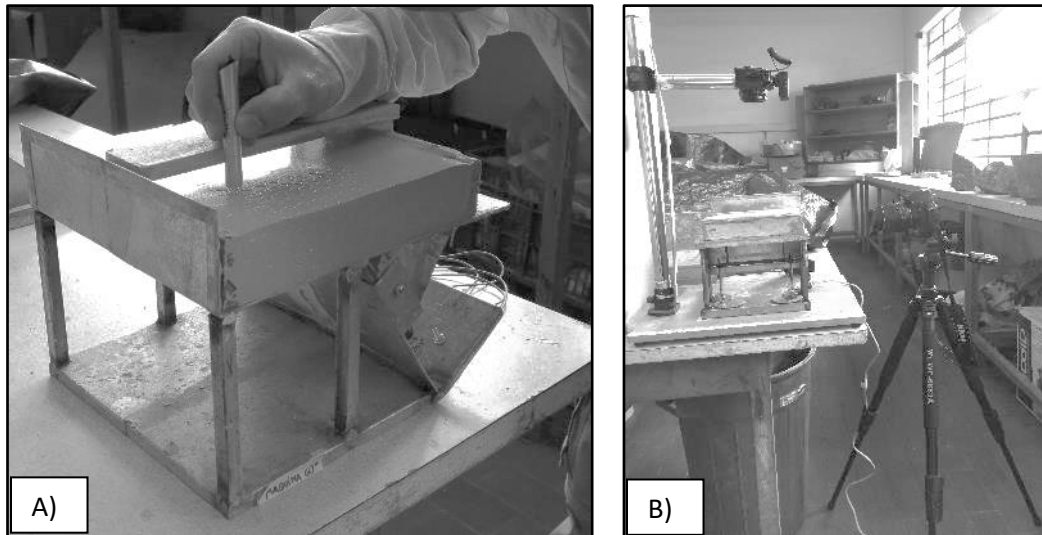
Antes de dar inicio a la deformación, se retiran las partes laterales del marco dejando libres estas dos caras de la capa de arcilla para realizar el registro fotográfico y evitar introducir deformaciones y esfuerzos cortantes en los bordes, producidos por el movimiento del bloque móvil, entre la parte de capa de arcilla que queda fija en cada ensayo y las partes laterales del marco de madera, hecho que se puede presentar en la naturaleza donde las partes laterales del marco pueden simular el limite o borde de un bloque de una unidad adyacente, pero esto escapa de los alcances de este estudio. Una vez retiradas las partes laterales del marco, se procede a perfilar las caras libres y colocar los marcadores de

deformación, los cuales permiten evidenciar el desplazamiento y deformación del material (se colocan marcadores circulares y líneas horizontales), ver Figura 4.2 A) [19].

4.3 Método de registro

Se tomaron fotografías a intervalos de 1 minuto en una de las caras de la capa de arcilla y también en vista de planta al mismo intervalo. Una cámara fue montada en un trípode (tomas de la cara lateral de la capa) y la otra en un brazo metálico horizontal emplazado en una base de madera (toma de vista de planta del ensayo), ver Figura 4.2 B (der) [19].

Figura 4.2. A) Fotografía de la colocación de marcadores (izq) y B) Fotografía montaje del método de registro (der) [19].



Capítulo 5 Modelamiento análogo

5.1 Ensayos

Antes de proceder a modelar con las mezclas de arcilla (RN)-agua, se realizaron 22 ensayos en total, 7 de prueba y 15 finales, en los ensayos de prueba se establecieron los porcentajes de contenido de agua del total del peso de la mezclas, donde se buscaba: i) determinar los rangos de densidad de las mezclas óptima para la fácil manipulación de las mismas y ii) que las paredes de las capas moldeadas fueran capaces de auto-sostenerse, una vez se quitaran las paredes laterales los moldes de madera. En la Tabla 5.1 [5] se relacionan los ensayos finales (15) y algunas de sus características. En total se realizaron once ensayos simulando la evolución de fallas inversas y cuatro para fallas normales, donde se prueban diferentes ángulos de inclinación del plano de la falla tratando de cubrir un amplio rango de posibilidades de la generación de diferentes geometrías de los pliegues relacionados a fallas, y con las geometrías generadas en cada ensayo establecer cual se parece más a la geometría actual del pliegue natural objeto de estudio. Las densidades de las mezclas están entre 1.47 y 1.50 gr/cm³. Las tasas de desplazamiento varían entre 1.8 x 10⁻³ y 2.6 x 10⁻³ cm/seg. Los porcentajes del contenido de agua en las mezclas se encuentran entre 45% a 48% del total de la masa de la mezcla.

Tabla 5.1. Ensayos finales y algunas de sus características. [5].

#	ángulo rampa	tipo mov	deslizamiento de la falla (cm)	Tasa de desplaz (cm/seg)	ρ mezclas (gr/cm ³)	% agua	% arcilla
1	vert	Inv	2.4	1 x 10 ⁻²	1.48	48	52
2	60	Inv	1.6	2.4 x 10 ⁻³	1.47-1.48	46 48	54 52
4	vert	Inv	2.7	2.4 x 10 ⁻³	1.48	48	52
5	30	Inv	2.5	1.8 x 10 ⁻³	1.50	45	55
6	60	Inv	2.7	2.6 x 10 ⁻³	1.50	45	55
7	60	Inv	2	2.6 x 10 ⁻³	1.50	45	55
8	30	Inv	2	1.8 x 10 ⁻³	1.50	45	55
9	60	Inv	2	2.2 x 10 ⁻³	1.47	46	54
10	30	Inv	2	1.8 x 10 ⁻³	1.47	46	54
11	30	Inv	2	1.8 x 10 ⁻³	1.48	47	53
12	60	Inv	2	2.2 x 10 ⁻³	1.48	47	53
3	vert	N	3	2.6 x 10 ⁻³	1.48	48	52
13	60	N	2	2.3 x 10 ⁻³	1.48	47	53
14	30	N	1.9	2.0 x 10 ⁻³	1.48	47	53
15	vert	N	1.8	2.4 x 10 ⁻³	1.48	47	53

Como referencia con ensayos previos realizados por otros autores se elabora la Tabla 5.1 [6], donde se muestran las tasas de desplazamiento, densidad de las mezclas y los porcentajes de agua

Tabla 5.1. Tasas de desplazamiento, densidad de las mezclas y año de presentación de algunos ensayos previos. [6].

Autor	Año	Tasa de desplaz (cm/seg)	ρ mezclas (gr/cm ³)	Tipo de fallas
Withjack & Olson	1990	5×10^{-3}	≈ 1.6	Normales
Eisenstadt & Withjack	1995	1.1×10^{-3}	50% H ₂ O	Normales e inversas
Schlische et al.	2002	1.1×10^{-3}	1.6	Normales oblicuas
Eisenstadt & Sims.	2005	1.1×10^{-3}	1.68	Extensión y acortamiento
Atmaoui	2005	7.3×10^{-4}	1.75	De rumbo
Miller & Mitra.	2011	$2.0-3.5 \times 10^{-3}$	1.4	Normales e inversas
Cooke & Van der Elst.	2012	8.3×10^{-4}	62%-66% H ₂ O	Resistencia al corte
Mitra & Miller	2012	3.5×10^{-3}	1.4	Normales e inversas

Al comparar las tasas de desplazamiento de los ensayos de la tabla 5.1 [5] con los de 5.1 [6], se encuentran que son similares a excepción de 2 que manejan tasas de desplazamiento diez veces menores (Atmaoui y Cooke & Van der Elst, 2012). En cuanto a la densidad de las mezclas hay similitud con los valores de dos trabajos (Miller & Mitra, 2011), y es muy aproximado con los demás estudios citados (las diferencias están entre 0.12 y 0.27 gr/cm³). Con los estudios que citan porcentajes de agua (2), hay parecido con el de Eisenstadt & Withjack (1995) y una diferencia del 17% mayor en Cooke & Van der Elst (2012). La discrepancia con los valores del estudio de Cooke & Van der Elst (2012) en las tasas de desplazamiento se puede explicar por la baja densidad de las mezclas utilizadas por estos autores, ya que el manejo de estas mezclas implica deformar a tasas muy bajas de desplazamiento, evitando que el material fluya muy rápido y no genere fallas localizadas.

5.2 Análisis de los ensayos

5.2.1 Fallas verticales

Dentro de las fallas relacionadas a pliegues encontramos que las fallas con altos ángulos de inclinación pueden generar estructuras monoclinales, razón por la cual se incluyen ensayos con este tipo de fallas. Se realizaron cuatro ensayos de los cuales se analizan

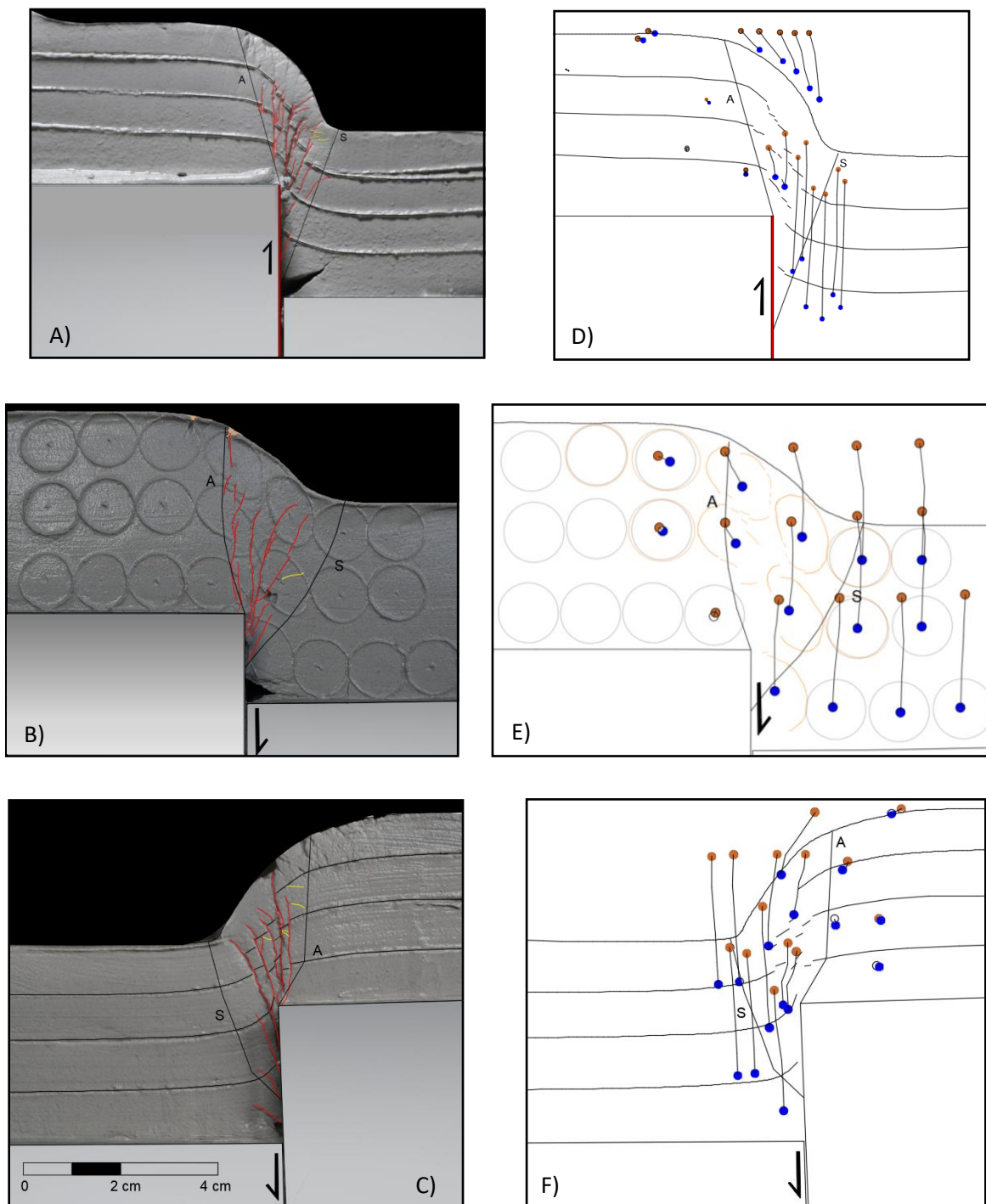
tres: # 1, # 3 y # 15 (el # 4 no se analiza ya que fue una prueba de falla normal reactivada a falla inversa y este tipo de ensayo no está dentro de los alcances de este estudio), donde se simula la evolución de fallas verticales, uno con desplazamiento inverso y dos con desplazamiento normal.

En la Figura 5.2.1 [20] se muestran las fotografías y figuras de las etapas finales de los ensayos. En A) se observa el resultado del desplazamiento inverso donde el bloque de la izquierda sube con respecto al de la derecha, los bloques se encuentran separados por una falla vertical. La estructura final del ensayo es un monoclinal (vista de perfil), el cual está compuesto por un anticlinal amplio (ubicado en el bloque que sube) y un sinclinal apretado (ubicado en el bloque fijo). Se trazan las superficies axiales vistas en perfil A (anticlinal) y S (sinclinal) que delimitan la zona de máxima deformación y fracturamiento en el monoclinal, esta zona presenta una forma triangular. En la zona triangular se desarrolla un sistema de fallas secundarias (líneas rojas) que sigue la dirección de la falla de principal, este sistema inicia en la punta de la falla maestra y se propaga hacia los estratos superiores a medida que avanza el ensayo. En los ensayos con desplazamiento normal 15 y 3, en la fotografía B (5.2.1 [20]) el bloque fijo es el izquierdo y el derecho es el que desciende, al igual que en la fotografía A se delimita la zona de máxima deformación por las superficies axiales A y S, que en este caso no son líneas rectas sino poli-líneas que siguen la distribución de la zona de máxima deformación. En C (5.2.1 [20]) el bloque izquierdo baja con respecto al bloque derecho, al igual que en las figuras A y B se delimita la zona de máxima deformación con las superficies axiales A y S.

La curvatura de la parte superior de la zona triangular de deformación en los ensayos 1 (A, D) y 3 (C, F) con un contenido de agua del 48% es similar, se observa como en la parte superior cerca al eje A la curva es bien definida y amplia, esta se va cerrando a medida que avanza hacia el eje S donde termina en el sinclinal apretado. En el ensayo 15 fotografía B y figura E (47% H₂O) la curvatura de la parte superior de la zona triangular es suave y amplia tanto en el anticlinal como en el sinclinal. En este ensayo se colocaron marcadores circulares que permiten ver la deformación de estos a medida que avanza el ensayo.

Para ayudar a visualizar la distribución de la deformación y el movimiento del material en la zona triangular y fuera de ella, se utiliza la trayectoria de partículas (Figura 5.2.1 D-F [20]) en la capa de arcilla. La trayectoria es marcada por partículas que están en la capa y a medida que el ensayo avanza estas se mueven en la dirección que se desplaza el material (del anticlinal hacia el sinclinal).

Figura 5.2.1. Fotografías de los ensayos que simulan fallas verticales (izq) y figuras de trayectoria de partículas (der) [20]. A) Ensayo # 1 con desplazamiento inverso, B) y C) ensayos (# 15 y # 3) con desplazamiento normal. En las figuras D-F los círculos de color naranja representan la posición inicial de las partículas, círculos azules la posición final.

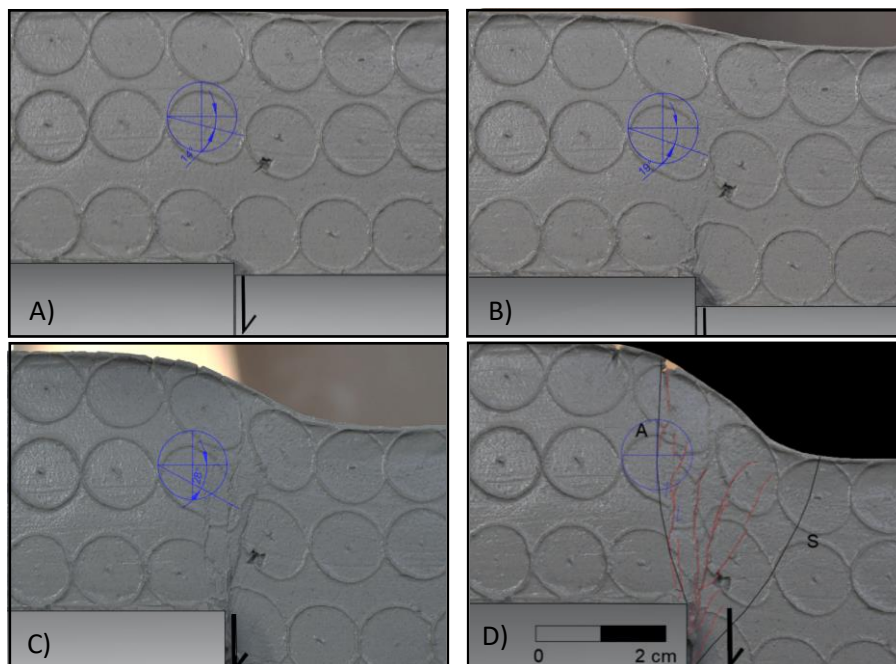


Por lo que se registra en las fotografías de los ensayos, a medida que avanza del ensayo, la zona triangular aumenta de amplitud y se propaga de los estratos inferiores a los superiores. En los estratos superiores de la capa en el ensayo # 1, las partículas se mueven diagonalmente no hay componente horizontal ni vertical que predomine (Figura 5.2.1 D [19]). En estratos medios e inferiores y por fuera de la zona triangular de los tres ensayos la componente de movimiento que predomina es la vertical. En el bloque fijo de cada ensayo el material no presenta movimiento significativo.

En cuanto al sistema de fallas generado en los ensayos, se observa como a medida que evoluciona el ensayo las fallas dentro de la zona triangular se distribuyen uniformemente desde la punta de la falla hasta la parte superior de la capa y del centro hacia los bordes. Las fallas delimitan y desplazan los marcadores horizontales y circulares como en bloques, bloques que se deslizan por planos casi paralelos a la falla principal, donde es evidente el movimiento de tipo normal. Las fallas secundarias son predominantemente rectas con algunas ramificaciones, la parte final de las fallas presentan cambios fuertes de buzamiento en sentido opuesto al de la falla principal. Son muy pocas las fallas que buzan en dirección opuesta a la falla principal (líneas amarillas Figura 5.2.1 A, D, C, F [20]).

La mayor deformación se observa en la zona central de la zona triangular donde los ejes axiales horizontales de las elipses se elongan, rotan en dirección del movimiento normal y por último se fracturan, desplazando parte de las elipses. Los ejes axiales verticales presentan elongación y rotación combinada, pero en menor proporción con respecto a los horizontales (Figuras 5.2.1 B y E [20] y [21]).

Figura 5.2.1. Fotografías de la deformación de los marcadores circulares en la zona triangular del ensayo 15 [21]. A) Inicio de la rotación y elongación del eje horizontal (circulo de color azul estado inicial con ejes sin deformar), B) y C) continua la elongación y rotación del eje horizontal y D) estado final donde la elipse esta fracturada y desplazada.



5.2.2 Ensayos con ángulo de rampa a 60°

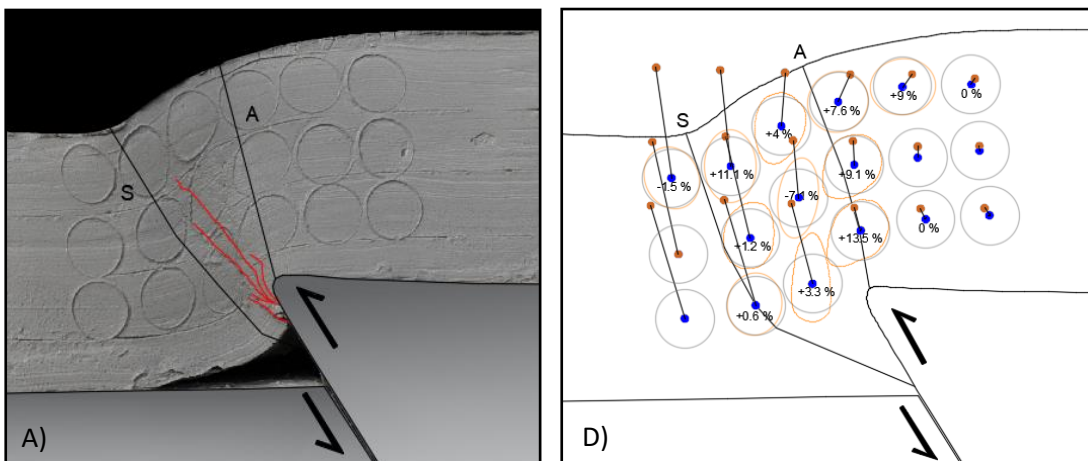
5.2.2.1 Fallamiento inverso

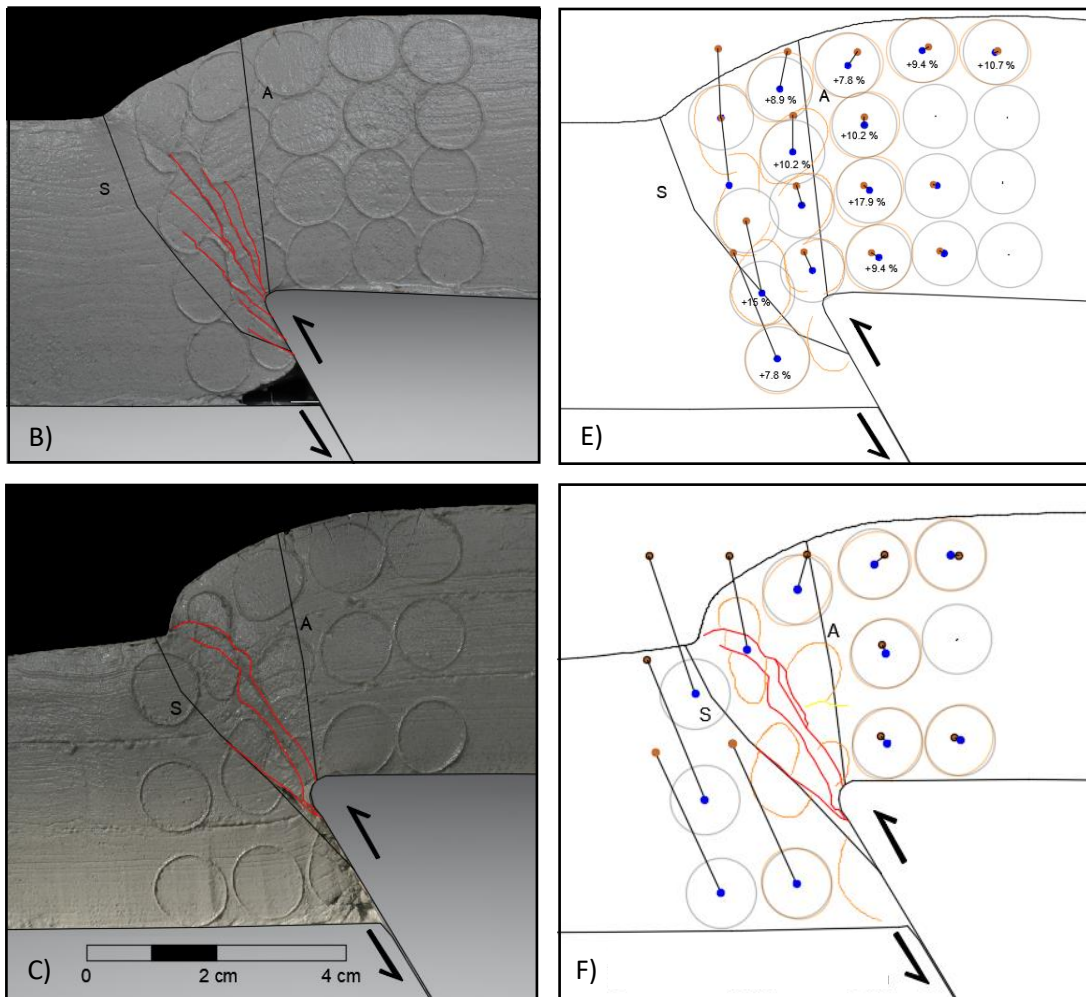
Se presenta el resultado final de tres ensayos (Figura 5.2.2.1 [22]) con ángulo de rampa a 60°, con diferentes densidades de las mezclas. En estos ensayos se tiene como resultado final de la deformación una estructura monoclinial.

En el sistema de fallas generado en el ensayo # 7 (Figura 5.2.2.1 A [22], $\rho = 1.50 \text{ gr/cm}^3$), se observan 2 fallas secundarias de mayor longitud y continuidad paralelas a la falla principal, las cuales no alcanzan a propagarse a estratos superiores en la capa. En el área de la punta de la falla es donde se presenta la mayor densidad de fallas, pero con poca penetración en la capa. La deformación de los círculos utilizados como marcadores de la deformación es mayor en la zona central de la zona triangular, en la parte media de la capa se configura una elipse bien definida y en los estratos superior e inferior de la capa se generan óvalos con solo un eje de simetría, donde se mantiene la forma circular en un extremo y ovalada hacia el centro de la capa (como en forma de huevo), Figura 5.2.2.1 A y D [22]. Las curvaturas del anticlinal y sinclinal son suaves y abiertas. La base de la capa ubicada en el del bloque fijo presenta un comportamiento principalmente dúctil ya que la capa se pliega en el sentido del movimiento. En el ensayo # 9 ($\rho = 1.47 \text{ gr/cm}^3$, fotografía B y fotografía E, Figura 5.2.2.1 [22]) la zona triangular presenta mayor amplitud que la del

ensayo # 7, el sistema de fallas presenta mayor densidad y propagación en la capa. Las elipses dentro de la zona triangular están más deformadas y fracturadas (partes de las elipses son desplazadas), Figura 5.2.2.1 B [22]. La base de la capa ubicada en el bloque fijo presenta un comportamiento menos dúctil que en # 7. En el ensayo # 12 ($\rho=1.48 \text{ gr/cm}^3$, fotografía C Figura 5.2.2.1 [22]) la amplitud de la zona triangular es similar a la del ensayo # 7, la densidad de las fallas disminuye con respecto al ensayo # 9 pero aumenta la penetración en la capa alcanzando la superficie. Las elipses presentan la mayor cantidad de desplazamiento a través de las fallas. La curvatura del anticlinal y sinclinal es más apretada (Figura 5.2.2.1, C y F [22]).

Figura 5.2.2.1. Fotografías de ensayos de fallamiento inverso con ángulo de rampa a 60° y figuras de las trayectorias de partículas y elipses de deformación [22]. A) Ensayo # 7 45% H_2O , B) ensayo # 9 46% H_2O , C) ensayo # 12 47% H_2O y figuras D-F donde se observan las trayectorias de las partículas de cada ensayo.





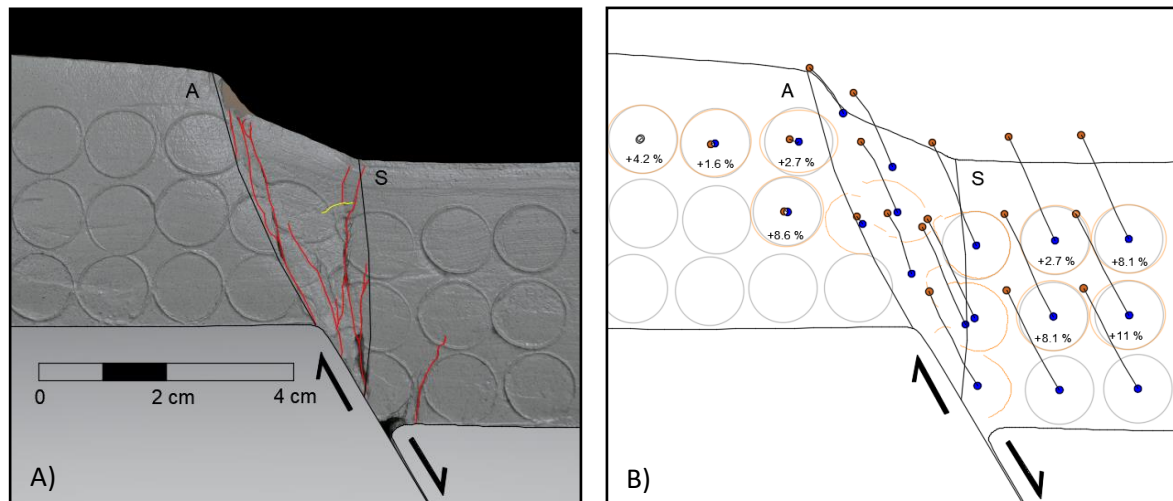
En los ensayos anteriores, se observa en diferente medida espacios abiertos en los bloques yacentes, en donde las condiciones de densidad de las mezclas permiten que a mayor densidad las mezclas presentan un comportamiento más plástico y a menor densidad (mayor % de agua) las mezclas presenten un comportamiento más líquido, rellenando de alguna manera los espacios vacíos generados por el arrastre en el movimiento del bloque móvil.

5.2.2.2 Fallamiento normal

Se lleva a cabo un ensayo en dirección normal con ángulo de rampa a 60° , (Figura 5.2.2.2 A y B [23]). Se delimita la zona triangular por las superficies axiales A y S, en este caso la mitad del anticlinal que está en la zona triangular termina fracturado y desplazado en dirección del movimiento. El sistema de fallas generado se propaga por toda la capa con fallas continuas y semi-paralelas a la falla principal (líneas rojas). Las fallas con mayor

continuidad se concentran cerca de las superficies axiales A y S. Las elipses de deformación no presentan formas regulares, están fracturadas y desplazadas en la zona triangular. La trayectoria de partículas muestra como el material se mueve casi paralelo a la dirección de la falla principal (Figura 5.2.2.2 B [23]).

Figura 5.2.2.2. Ensayo # 13 fallamiento normal a 60°. [23]. A) Fotografía estado final de deformación del ensayo y B) Trayectoria de partículas y elipses de deformación.



5.2.3 Ensayos con ángulo de rampa a 30°

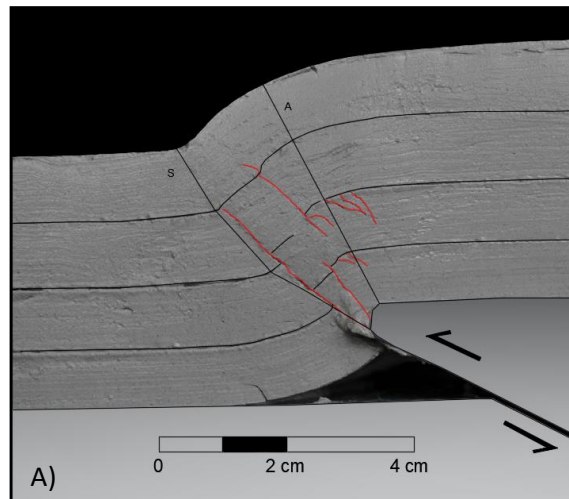
5.2.3.1 Fallamiento inverso

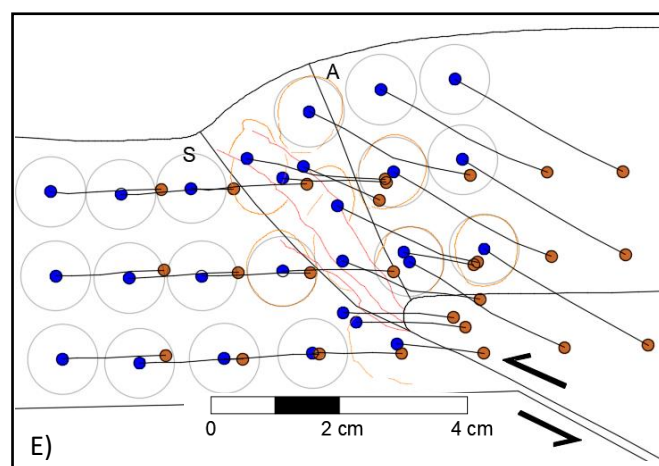
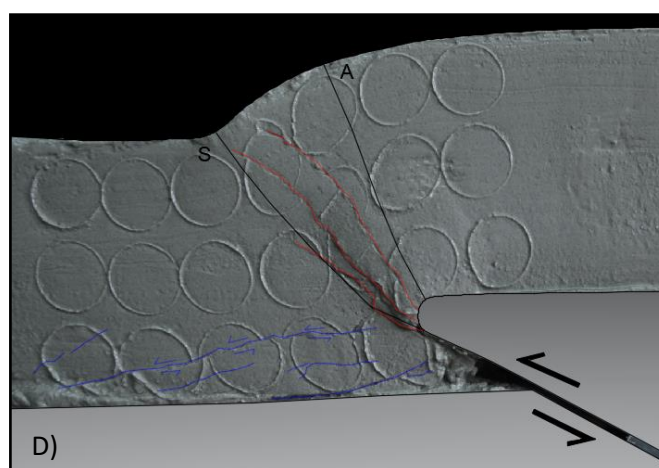
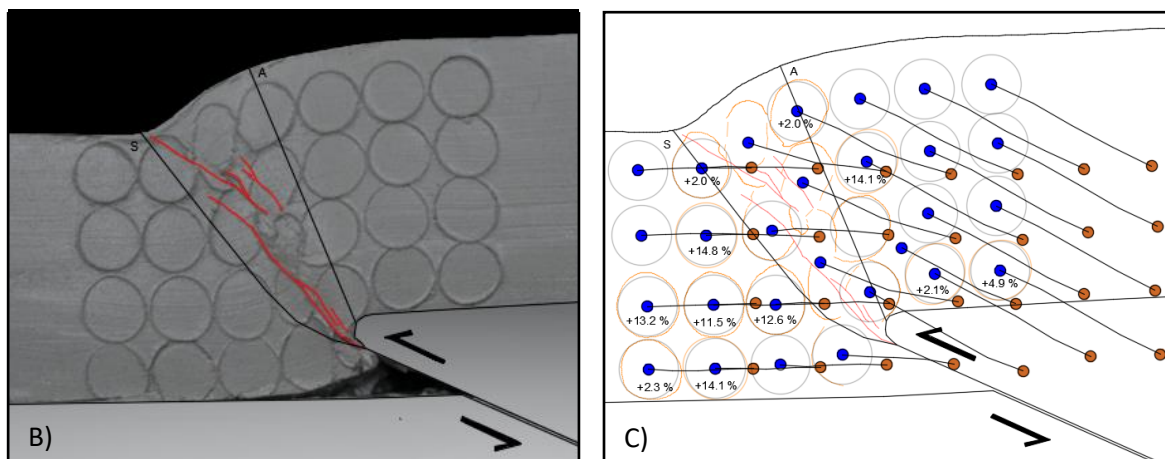
Se presentan tres ensayos (5,8 y 11) de fallamiento inverso con ángulo de rampa a 30° (Figura 5.2.3.1 [24]). Las mezclas de los ensayos 5 y 8 tienen una densidad de 1.50 gr/cm³, y de 1.48 gr/cm³ en el ensayo 11. La estructura final en los ensayos es una estructura monoclinical con anticlinales amplios y sinclinales de menor amplitud.

Se presentan dos ensayos con igual densidad para determinar la capacidad de este tipo de ensayos de ser reproducido, similitudes y diferencias en el estado final de la deformación. En el ensayo 5 se delimita la zona triangular de máxima deformación con las superficies axiales del anticlinal (A) y del sinclinal (S). La curvatura del anticlinal ubicado en el bloque colgante es suave y amplia, la del sinclinal presenta menor amplitud y es más apretada (Figura 5.2.3.1 A [24]). El sistema de fallas generado presenta dos fallas secundarias que se propagan hasta el último marcador horizontal superior. El espesor de los marcadores no presenta cambios significativos durante el ensayo. Al igual que en la

fotografía del ensayo # 7 (Figura 5.2.2.1 A [22]) este ensayo confirma que a la densidad de 1.50 gr/cm^3 de la mezcla, la capa presenta un comportamiento bastante dúctil ya que en la evolución del ensayo la base de la capa ubicada en el bloque yacente presenta más plegamiento que fracturamiento. En el ensayo # 8 la zona triangular presenta una amplitud similar a la del ensayo # 5. Las fallas se propagan hasta la superficie de la capa. La curvatura de las superficies del anticlinal y sinclinal son suaves, a diferencia del anterior ensayo, el sinclinal es un poco más abierto (Figura 5.2.3.1 B y C [24]). En la zona triangular las elipses son deformadas, fracturadas y desplazadas por las fallas presentes. La trayectoria de partículas en el bloque colgante sigue la dirección de la falla, en zona triangular predomina el movimiento con dirección de la falla, pero con alguna componente horizontal, ya en el bloque yacente la trayectoria de las partículas es horizontal de derecha a izquierda en el sentido de empuje del bloque colgante (Figura 5.2.3.1 C [24]).

Figura 5.2.3.1. Fotografías de estado final de la deformación en los ensayos 5 y 8 (45 % H_2O) A-B, D) ensayo 11 (47% H_2O) y figuras de trayectoria de partículas y elipses de deformación C y E. [24].



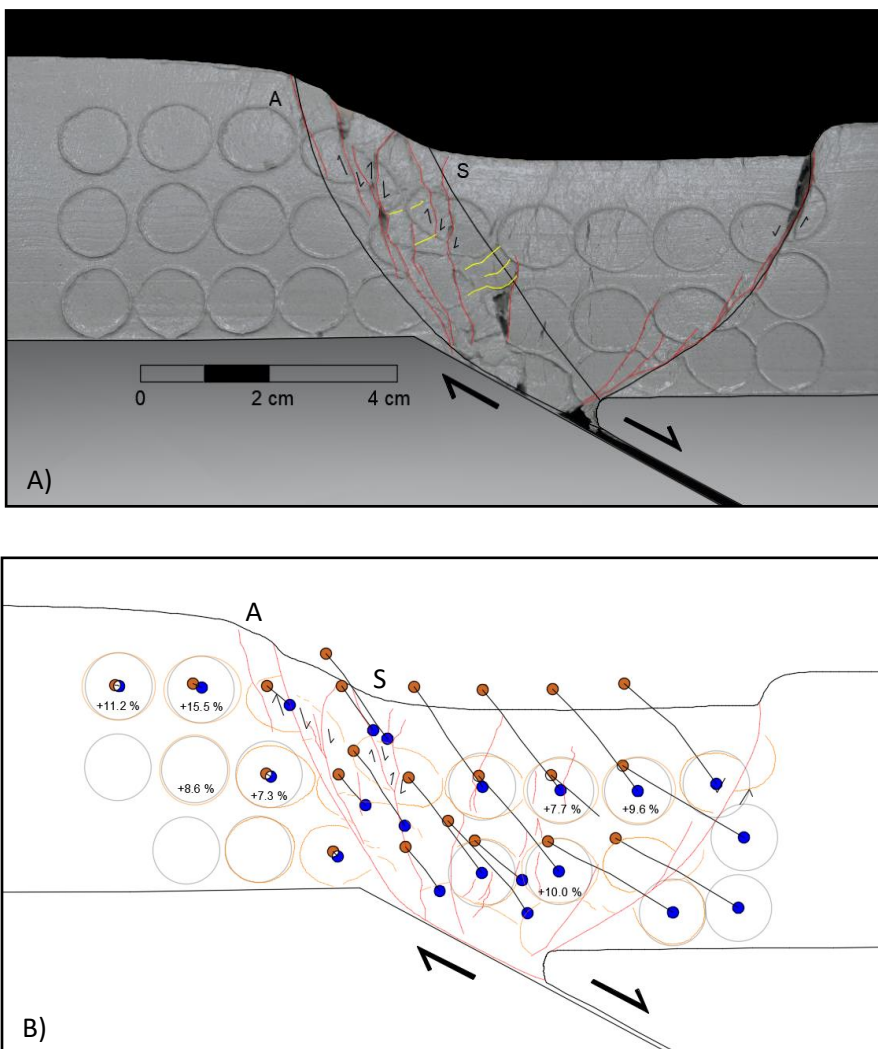


Al igual que en los ensayos inversos con ángulo de rampa a 60° se observan espacios vacíos en el bloque colgante, pero en este caso con ángulo de rampa a 30° el ensayo con la menor densidad además de rellenar el espacio generado, desarrolla tres familias de fallas casi horizontales donde es evidente la deformación por cizalla simple.

5.2.3.2 Fallamiento normal

Como se efectuó en los ensayos anteriores se termina con un ensayo de extensión. Este ensayo es el # 14, se llevó a cabo con el 47% de contenido de agua en la mezcla (Figura 5.2.3.2 [25]).

Figura 5.2.3.2. Fotografía y figura del ensayo #14 [25]. A) Estado final de la deformación del ensayo, líneas rojas fallas principales y amarillas fallas secundarias. B) Figura de la trayectoria de partículas y deformación de marcadores circulares de deformación.



La estructura final es un graben limitado por dos fallas que presentan medio a alto grado de curvatura. En el segmento izquierdo del graben se puede definir una estructura monoclinas no tan evidente y fracturada. En el cual se puede observar una curvatura muy suave y amplia en el anticlinal y el sinclinal que lo componen. Las superficies axiales

delimitan la zona triangular en la cual los marcadores circulares se deforman a elipses luego a formas irregulares y en este proceso se van fracturando, teniendo como resultado una zona muy fracturada y con los marcadores muy deformados y fragmentados (Figura 5.2.3.2 [25]).

En la trayectoria de partículas se observa como el material en el graben se mueve en la dirección del bloque colgante. Las elipses en el borde del graben se deforman y luego se fracturan, dentro del graben sufren elongación en el eje horizontal principalmente y aplastamiento en la vertical.

Capítulo 6 Estructura Natural

Esta sección describe el marco geológico de la estructura que se va a modelar. El pliegue se encuentra ubicado al SW de la Sabana de Bogotá en la vía que conduce del municipio de Mosquera al municipio de la Mesa (Cundinamarca - Colombia). Es un pliegue que presenta muy buena exposición y podría ser la expresión de una falla local (normal o inversa) que no aflora en superficie.

6.1 Geología del área de estudio

La Sabana de Bogotá se encuentra ubicada en la parte central de la Cordillera Oriental, su estratigrafía se compone por unidades del cretácico, terciario y cuaternario. Para este trabajo son relevantes las siguientes unidades: i) en el Grupo Villeta, las formaciones Simijaca, La Frontera, Chipaque y Conejo, ii) el Grupo Guadalupe, las formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Labor y Tierna, y por último se encuentra la Formación Guaduas que no aflora en el área de estudio (Figuras 6.1.3 [26] y 6.1.3 [27]).

6.1.1 Grupo Villeta

Se caracteriza por ser una espesa unidad de carácter lodoso con intercalaciones calcáreo-silíceas. Las unidades que la conforman de base a techo son: Formación Trincheras, Formación Socotá – El Peñón, Formación Capotes, Formación Hiló, Formación Pacho, Formación Simijaca, Formación Chipaque, Formación La Frontera y Formación Conejo (Acosta, J. & Ulloa, C, 2001). En el sector occidental de la Sabana de Bogotá su base es aproximadamente 40 m de calizas y limolitas silíceo – calcáreas. El resto de la unidad corresponde a lutitas negras finamente laminadas, con un espesor aproximado de 1300 m.

En el sector oriental, la secuencia se compone por arcillolitas en mayor proporción, areniscas, limonitas y calizas. La edad del grupo está entre Barremiano a Santoniano (Lobo-Guerrero, 1992).

6.1.1.1 Formación Simijaca (Kss)

La unidad contiene lodolitas y limolitas, con intercalaciones de areniscas cuarzosas. Se encuentran estructuras de laminación ondulosa, bioturbación y moldes de bivalvos (Ulloa & Acosta, 2001). La edad de la formación es Cenomaniano. Su espesor varía entre 600 a 800m (Simijaca). En la Plancha 208 se mide un espesor de 432m (Acosta & Ulloa, 2002), en la plancha 209 reportan un espesor de 107m, Vereda Carupa, vía Ubate – Carmen de Carupa (Montoya & Reyes, 2003). Se caracteriza por tener contactos netos en base y tope. Se le asigna una edad de Turoniano.

6.1.1.2 Formación La Frontera (Ksf)

La formación está constituida por limolitas silíceas con intercalaciones de calizas. Se le asigna una edad de Turoniano Temprano (Acosta & Ulloa, 2011). Presenta un contacto neto con la Formación Simijaca y transicional rápido con la Formación Conejo. En la Plancha 208, Villeta, presenta un espesor de 80m, en la Plancha 246 de Fusagasugá, espesor de 80m y en la Plancha 227 de la Mesa, 63m.

6.1.1.3 Formación Conejo (Kscn)

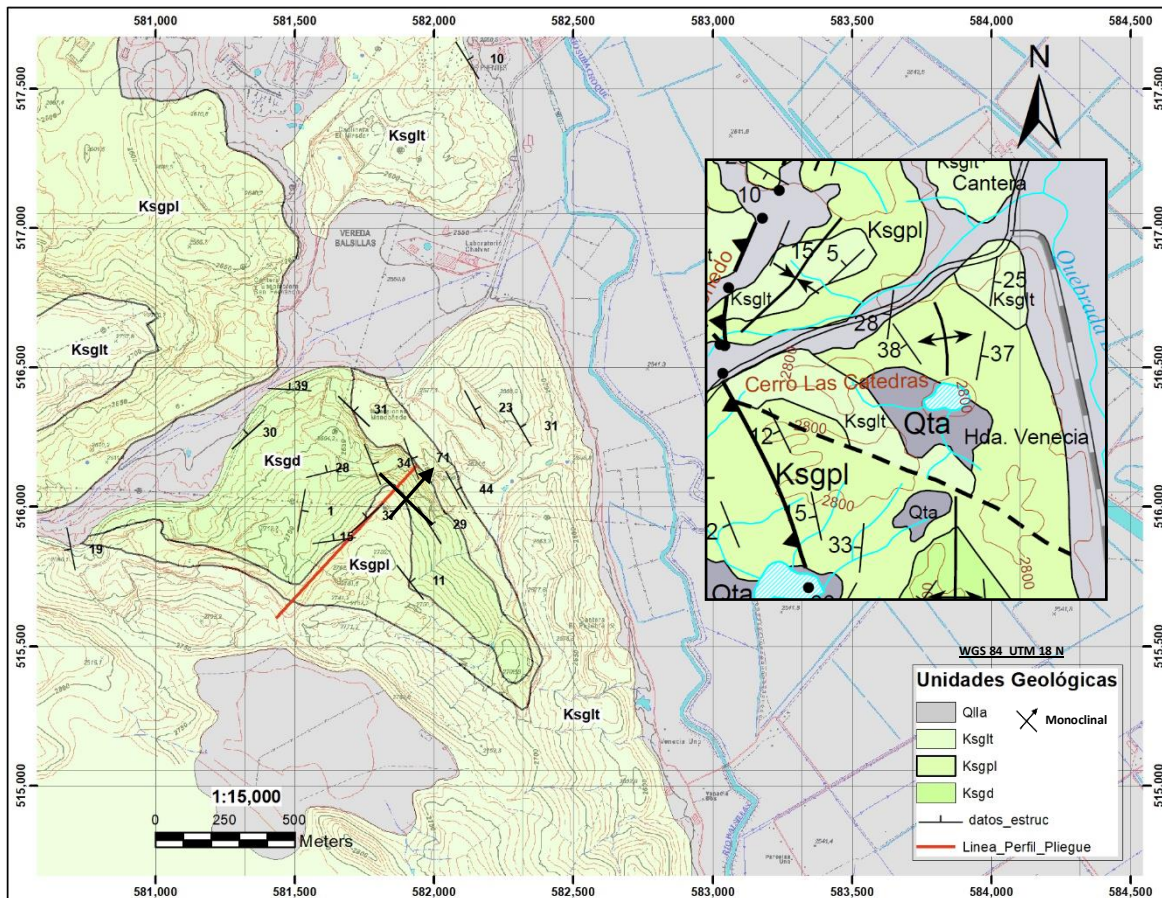
Esta unidad está compuesta por lutitas con intercalaciones de areniscas, liditas y calizas. Su contacto en base y techo es transicional. Espesor reportado es de 400 m, columna levantada en la plancha 227 La Mesa (Acosta & Ulloa, 2002). Se observa una laminación ondulosa y bioperturbación media. Se le asigna una edad de Coniaciano temprano (Acosta y Ulloa, 2001).

6.1.2 Grupo Guadalupe

De base a tope el Grupo Guadalupe está conformado por las formaciones: Arenisca Dura, Plaeners y Arenisca de Labor y Tierna. En el desarrollo de la etapa de campo se dio relevancia a las unidades de este grupo en especial a la Formación Arenisca Dura donde se encontró que esta presenta mayor extensión en el área de estudio, por lo tanto se

presenta una cartografía (Figura 6.1.2 [26]) un poco diferente a la observada en la plancha 1:100.000 (227 La Mesa, Ingeominas 1998).

Figura 6.1.2. Mapa geológico de campo a escala 1:15.000 [26].



6.1.2.1 Formación Arenisca Dura (Ksgd)

Se conforma por areniscas cuarzosas duras de grano muy fino, capas potentes, intercaladas por lutitas y niveles silíceos. Se destaca por formar escarpes donde existen registros de espesores de 300 m. En su base se encuentran intercalaciones de lutitas negras, las cuales son muy parecidas a las de la Formación Villeta, este límite puede definirse casi morfológicamente, pues la Formación Arenisca Dura forma escarpes duros mientras que el Grupo Villeta se destaca por su suavidad y depresiones (Turoniano - Coniaciano). Hacia el techo del miembro se incrementan las intercalaciones de lutitas y niveles silíceos de color claro. Estas características, tanto del techo como de la base hace que su delimitación sea algo complicada, pero en la base de la Formación Plaeners se destaca un paquete grueso de lutitas azuladas con gran abundancia de foraminíferos, lo

cual marca un límite neto entre estas dos unidades (Julivert, 1963). En la sección tipo, Cerro El Cable, reportan un espesor de 449 m, en la carretera Guasca – Sueva se mide un espesor de 407 m y en la carretera Tabio – Subachoque tiene un espesor de 320m (Montoya & Reyes, 2003).

6.1.2.2 Formación Plaeners (Ksgpl)

Se destacan niveles constituidos por arcillolitas laminadas, capas delgadas, de dureza baja, también contiene limolitas silíceas en láminas compactas, con fractura concoidea y bancos de arenitas ortocuarzíticas de grano fino a muy fino (sector de Usaquén). La base de la formación está constituida por las lodolitas de color verde – azulados o azul con presencia de foraminíferos (siphogenerinoides), por consecuencia su contacto es neto con la Formación Arenisca Dura (Julivert, 1963). Con la Formación Arenisca Labor Tierna es transicional rápido, pues pasa de areniscas cuarzosas a paquetes arenosos espesos. En Sibaté, Vereda Fusunga, se levantó una sección de la formación de 95 m de espesor, en Mondoñedo, Quebrada Balsillas, presenta un espesor de 73 m y en Tausa, Boquerón de Tausa, presenta 187 m de espesor (Montoya & Reyes, 2003).

6.1.2.3 Formación Labor y Tierna (Ksglt)

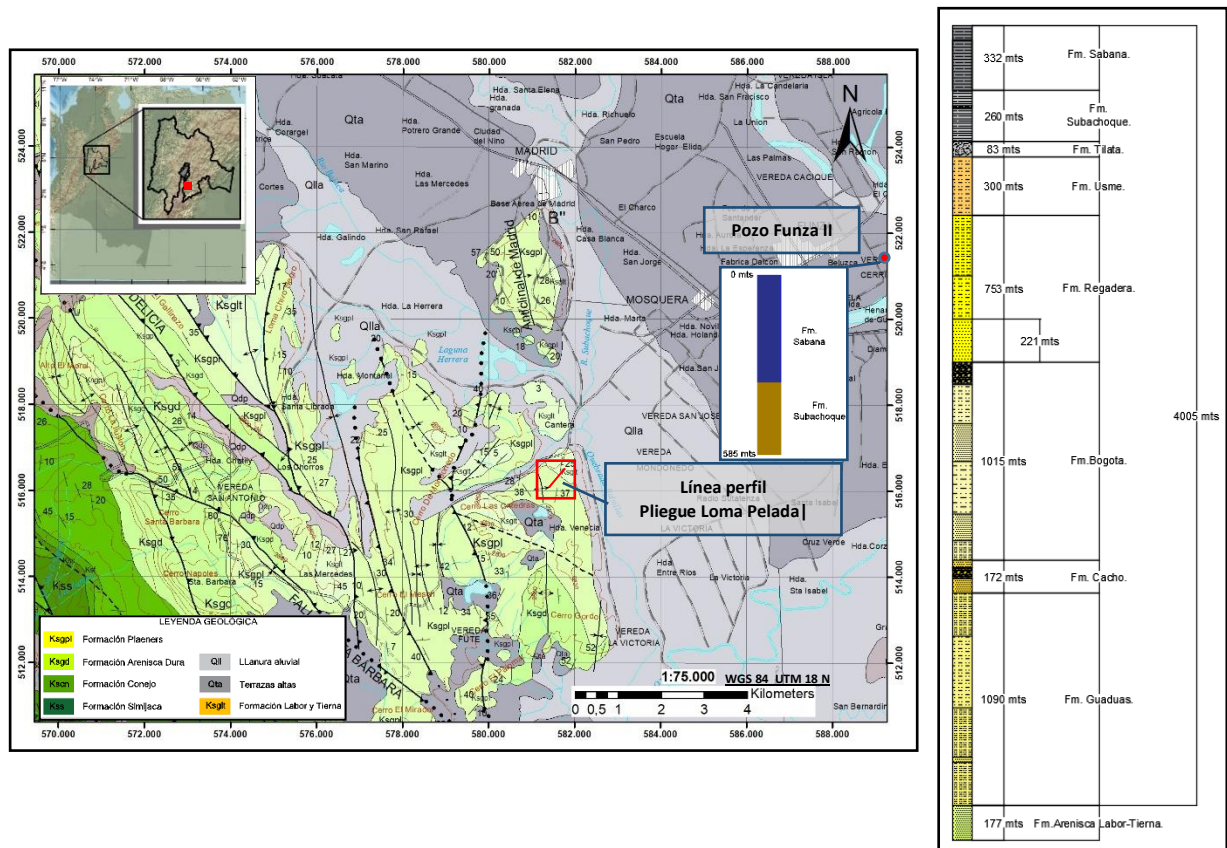
La unidad se caracteriza por capas de cuarzoarenitas de tamaño de grano fino a medio, constante, presenta intercalaciones de limolitas y arcillolitas. Se encuentran niveles silíceos, los cuales presentan Siphogenerinoides. Los contactos de base y tope son netos (Julivert, 1963). La Edad de la formación es Maastrichtiano tardío. La unidad puede alcanzar un espesor de 150 a 200 m en sector de Valle de Usme y Rio Soacha, 65 m en sector de Choachí, 100 m en el sector de Usaquén, 70 m en el sector de Chía, en el sector de Mondoñedo, Vereda Los Puentes, la unidad presenta un espesor de 62 m y en la Vereda Piedra Colorada, Subachoque, éste es de 95 m (Montoya & Reyes, 2003).

6.1.3 Formación Guaduas (KTg)

Esta unidad se encuentra por encima de la Formación Guadalupe, su límite es neto. Las rocas de la formación son principalmente lutitas con intercalaciones de areniscas. Su espesor esta entre 700 y 1000 m (Subachoque). La edad de esta formación es Maastrichtiano (Julivert, 1963).

Una vez descritas las unidades más representativas para el área de estudio, quedan los siguientes interrogantes: i) de como las rocas del Grupo Guadalupe y las formaciones del Paleógeno están dispuestas por debajo de la cobertura Cuaternaria de la Sabana este sector, ii) ¿si el Guadalupe continua con la misma inclinación (23° al NE) o si cambia de ángulo de buzamiento?, iii) si las formaciones Guaduas, Cacho, Bogotá, Regadera, Usme y Tilatá presentan la misma inclinación que el Guadalupe y que tanto es el espesor presente de estas en este segmento de la Sabana (Figura 6.1.3 [27]). En el sector se han realizado varios pozos para el aprovechamiento de agua subterránea pero la mayoría no pasa de la Formación Subachoque, uno de ellos fue realizado cerca a la población de Funza (Pozo-Funza II, Figura 6.1.3 [27]) alcanzando una profundidad de 585 mts (Torres et al., 2005). Es difícil estimar sin la ayuda de métodos geofísicos o pozos profundos el espesor de las unidades que hay entre la Formación Subachoque y el tope del Grupo Guadalupe.

Figura 6.1.3. Mapa geológico a escala 1:75.000 y columna estratigráfica generalizada para la Sabana de Bogotá [27], geología tomada de la plancha 227 Ingeominas 1998.



6.2 Geología estructural

La Sabana de Bogotá presenta una geometría en forma de sinclinorio sobre el cual se encuentra una cobertura sedimentaria cretácica – paleógena (en el eje axial), neógena y cuaternaria (sobre las anteriores y en el resto del área de la Sabana). La mayoría de las estructuras de la región se desarrollaron principalmente en las rocas del Grupo Guadalupe que presenta un espesor considerable de capas resistentes intercaladas con unidades blandas. La estructura del sinclinorio de la Sabana se caracteriza por presentar sinclinales amplios con núcleos ocupados por unidades del terciario y anticlinales apretados y estrechos (Julivert, 1963).

En cuanto a los mecanismos que han afectado la cobertura sedimentaria y dado lugar a las diferentes estructuras de la Sabana según Julivert (1963) se encuentran: la tectónica de fallas de zócalo (basamento), halocinesis, gravedad y erosión.

Gómez (1985) propone una tectónica para la Sabana de Bogotá de fallamiento transversal, dislocación, basculamiento y hundimiento de bloques.

Otro estilo de deformación propuesto para la Cordillera Oriental es el de tectónica de piel delgada en la parte central de la cordillera donde se asocian los pliegues NE de los alrededores de la Sabana de Bogotá con fallas de cabalgamiento que presentan vergencia al NW y SE (Camargo, 1995).

Kammer (1999) plantea un origen transpresivo para la Cordillera Oriental donde propone la aplicación de un modelo de transpresión sencilla y homogénea para el plegamiento del segmento denominado Bogotá.

En el informe de la Geología de la Sabana de Bogotá (2005) del Servicio Geológico Colombiano se proponen dos estilos estructurales para la Sabana determinados por la dirección de las estructuras principales, un estilo es predominantemente NE, donde las fallas principales son de cabalgamiento y presentan vergencia al oriente. El otro estilo estructural se encuentra ubicado al occidente donde las fallas principales presentan una tendencia al NW y cabalgamientos con vergencia hacia el oeste.

6.3 Pliegue Loma Pelada

Para la aplicación práctica de la modelación análoga y cinemática se identificó un pliegue monoclinial ubicado al SW de Sabana de Bogotá (Mosquera-Cundinamarca), donde los estratos plegados y fallados de la Formación Arenisca Dura (Ksgd) presentan poca

variación en los espesores y alto a medio grado de compactación (se puede afirmar que se comportan como una sola capa- flujo flexural), lo cual permite que la modelación análoga se aproxime bastante al comportamiento mecánico de los estratos y la geometría del pliegue. A continuación, se realiza una descripción detallada de la geometría y niveles del pliegue objeto de estudio.

6.3.1 Niveles.

Las rocas de la Formación Arenisca Dura que se encuentran expuestas en la cantera de Loma Pelada están constituidas por una intercalación rítmica de niveles o paquetes de arenitas de grano fino (principalmente), intercaladas con lodolitas (liditas y arcillolitas) de colores claros y estratificación en capas de diferente espesor (Figura 6.3.1 [28]).

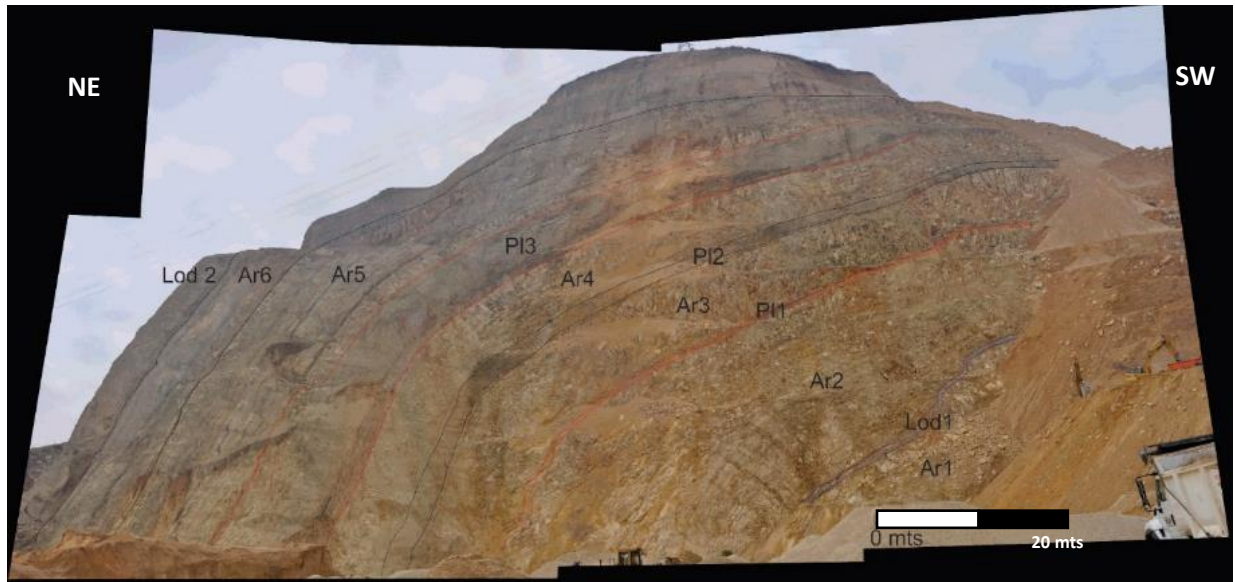
Para la descripción y diferenciación se delimitan los estratos que componen el pliegue en niveles y capas. Los niveles agrupan capas de litología y espesor dominante, los cuales se denominarán con la abreviatura Ar de arenita y Lod de lodolita. Las capas con litologías de arenitas y liditas que presentan partición en forma de “panelas” se denominaran plaeners (Pl) dentro del pliegue, más por el tipo de fracturamiento que por referencia a la Formación Plaeners. Los límites entre los niveles y capas están dados por contactos netos de la misma litología arenita-arenita, y de diferente litología arenita-lodolita y arenita-lidita. Estos límites son por lo general fácilmente observables y de marcar a nivel de afloramiento y en fotografías de perfil. Los espesores de las capas se darán en centímetros (cm) y estarán descritos por la siguiente terminología: capas de espesor muy fino (< 1 cm), capas de espesor fino (1 – 10 cm), capas de espesor medio (10 – 30 cm), capas de espesor grueso (30 – 100 cm) y capas de espesor muy grueso (> 100 cm).

A continuación, se describen los niveles y las capas, los cuales serán numerados desde la base del pliegue, hasta los estratos ubicados en la parte alta del pliegue.

6.3.1.1 Nivel Ar1.

Aflora en la base expuesta del pliegue y está compuesto por capas de arenitas de tamaño de grano fino de color blanco y amarillo claro bien seleccionadas, las capas son de espesor medio en la base que aflora y hacia el tope el espesor de las capas aumenta a grueso. Este nivel presenta la menor deformación de las capas, estas se encuentran casi horizontales, el fracturamiento predominante es perpendicular a la estratificación (Figuras 6.3.1 [28] y 6.3.1.2 [29]).

Figura 6.3.1 Corte pliegue monoclinal cantera de Loma Pelada [28]. Niveles (Ar1 - Ar6), capas de lodolitas y plaeners.



6.3.1.2 Capa Lod1.

Suprayaciendo el nivel Ar1, se encuentra una capa de lodolitas moderadamente fisiles, que resaltan por el cambio en el grado de compactación y por presentar colores morados y grises. Esta capa se acomoda a la superficie irregular de la capa de arenitas A1, presentando ondulaciones y deformación dúctiles. El espesor total es aproximadamente de 1.20 mts (Figuras 6.3.1 [28] y 6.3.1.3 [30]).

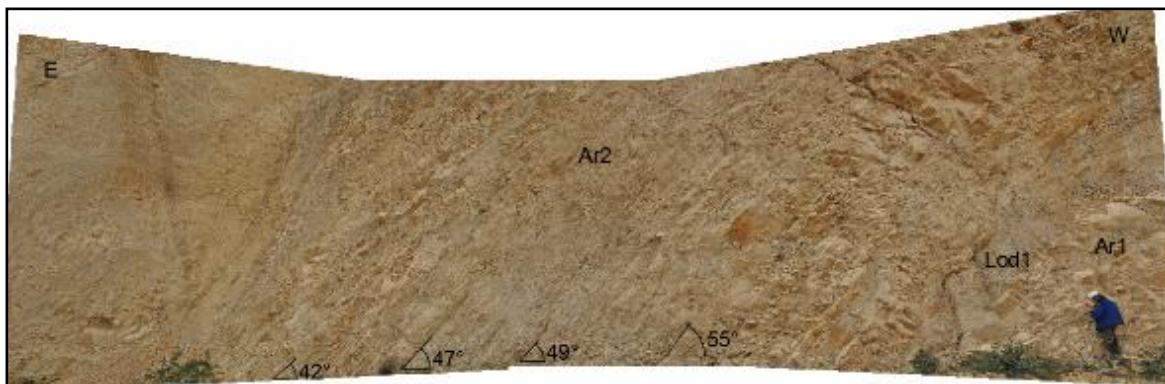
Figura 6.3.1.2 Nivel Ar1 [29].



6.3.1.3 Nivel Ar2.

Este nivel es el de mayor espesor dentro del pliegue (aproximadamente 25 mts) y se caracteriza por tener capas de espesor grueso, muy grueso y en menor medida medio, de arenitas de tamaño de grano fino. Las capas presentan buen grado de compactación y esporádicas retrodeformaciones suaves entre capas. En la base del nivel y hasta la mitad del mismo se presentan fracturas perpendiculares a la estratificación continuas con longitudes que alcanzan los 12 metros, estas fracturas podrían estar relacionadas a la actividad de la explotación o a la falla principal, en cuanto al ángulo de inclinación y dirección, hecho que se estudiara y discutirá más adelante. En este nivel es donde inicia la deformación más fuerte, cerca al eje del pliegue (Figuras 6.3.1 [26] y 6.3.1.3 [30]).

Figura 6.3.1.3. Niveles Ar1 y Ar2, capa Lod1 y ángulos de inclinación de las capas [30]. En la parte superior derecha se observa una fractura continua de 10 a 12 metros de longitud.



6.3.1.4 Capa PI1.

Capa de arenitas y lodolitas con fracturamiento paralelo a la estratificación, marca un cambio repentino en la sedimentación de capas gruesas del nivel Ar2 a uno de capas muy gruesas del nivel Ar3. Presenta tonos más claros lo que la hace fácil de diferenciar. Al igual que la capa de Lod1 se observan ondulaciones de las capas de este nivel más fuertes que la que se observa en los niveles superior e inferior (Figura 6.3.1 [28]).

6.3.1.5 Nivel Ar3.

Este nivel inicia con capas de arenitas de espesor medio que rápidamente aumentan a capas gruesas y muy gruesas. El nivel Ar3 resalta de los demás niveles por el espesor de las capas y el color blanco de las arenitas. En este nivel se ve el cambio más fuerte en el

ángulo de buzamiento de las capas, que vienen con una tendencia de suavemente inclinado a tener ángulos de buzamiento cercanos a 60° y 70° (Figura 6.3.1 [28]).

6.3.1.6 Capa PI2.

Esta capa de arenitas presenta notable fracturamiento en forma de prismas: En fotografías y en afloramiento PI2 contrasta con el nivel Ar3, ya que se observa un contacto neto y los espesores de las capas disminuyen súbitamente de capas muy gruesas (Ar3) a capas de espesor medio en PI2 (Figura 6.3.1 [28]). Con respecto al nivel superior Ar4 el cambio no es tan fácil de marcar ya que la base de Ar4 presenta espesores de capas muy parecidas a PI2, a diferencia de PI1 y Lod1, PI2 no presenta ondulaciones tan marcadas si no que sigue la curvatura de los niveles inferior y superior, esto se puede deber que este nivel en comparación con PI1 y Lod1 es más competente y no tan dúctil.

6.3.1.7 Nivel Ar4.

El nivel 4 de arenitas está compuesto en la base por capas de espesor grueso y hacia el tope termina con una capa de espesor muy grueso. Se observan fracturas paralelas a la estratificación que tienen continuidad de 1 a 2 metros. En este nivel la curvatura de las capas es más amplia y suave, no se observan ondulaciones ni retro deformaciones dentro del nivel (Figura 6.3.1 [28]).

6.3.1.8 Capa PI3.

Intercalación de capas medias de arenitas de grano fino con capas finas de lodolitas. Las capas de arenitas presentan predominante partición en prismas y continuidad a través del pliegue y fuera de este, se podría trabajar como capa guía, al igual que en Ar4 la curvatura es suave y amplia, en su base se observan niveles ondulados suaves (Figura 6.3.1.8 [29]).

6.3.1.9 Nivel Ar5.

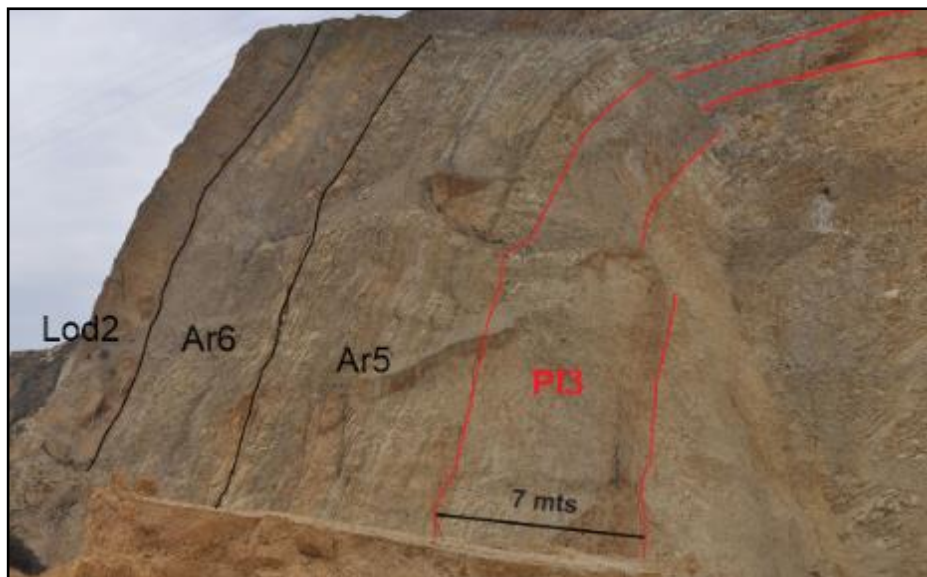
El nivel Ar5 de arenitas se puede subdividir en 2 subniveles (Ar5a y Ar5b), debido a que presentan diferentes espesores, deformación y fracturamiento de las capas que los componen. El subnivel Ar5a inicia con una capa de lodolitas rojizas en la base del nivel y termina en otra capa de lodolitas rojizas (parasecuencia) ubicada en la parte media del nivel. Entre las capas de lodolitas se encuentran capas medias principalmente y gruesas en menor proporción, de arenitas de tamaño de grano fino pardo amarillentas, con buen grado de compactación. El subnivel Ar5b presenta intercalación de capas medias y

gruesas de arenitas de tamaño de grano fino. Las capas de arenitas medias presentan retro deformación paralela a la estratificación (Figuras 6.3.1.8 [31] y 6.3.1.9 [32]).

6.3.1.10 Nivel Ar6.

Al igual que el nivel Ar5 el nivel Ar6 se puede dividir en dos subniveles, subnivel Ar6a y Ar6b. El subnivel Ar6a inicia con capas de espesor medio y luego pasan a gruesas de arenitas de tamaño de grano fino, con buen grado de compactación y moderadamente fracturadas. El subnivel Ar6b presenta mayor grado de deformación de las capas de espesor medio en la base del subnivel, luego presenta capas de espesor grueso y termina con capas de espesor medio a fino de arenitas, estas capas no presentan tan intensa deformación ni fracturamiento como al inicio del subnivel (Figura 6.3.1.8 [31]).

Figura 6.3.1.8. Flanco E del pliegue [31]. Capa PI3, Ar5, Ar6 y Lod2 con espesor aproximado.



6.3.1.11 Capa Lod2.

Lodolitas amarillas grisáceas con laminación paralela y ondulosa bastante fracturadas en la base de la capa principalmente. Se observan esporádicamente conchas de bivalvos, esta capa marca el contacto entre las arenitas de la Formación Arenisca Dura y las lodolitas de la Formación Plaeners (Figuras 6.3.1.8 [31] y 6.3.1.11 [33]).

Figura 6.3.1.9. Nivel Ar5 y subniveles Ar5a y Ar5b [32]. Dentro de las líneas rojas capa de arenitas retro deformadas.

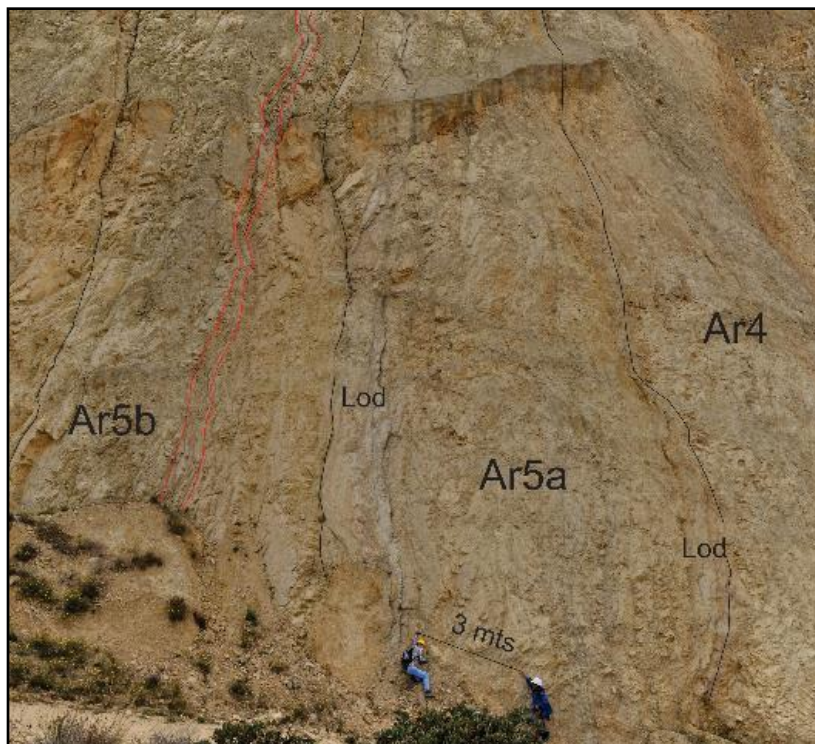
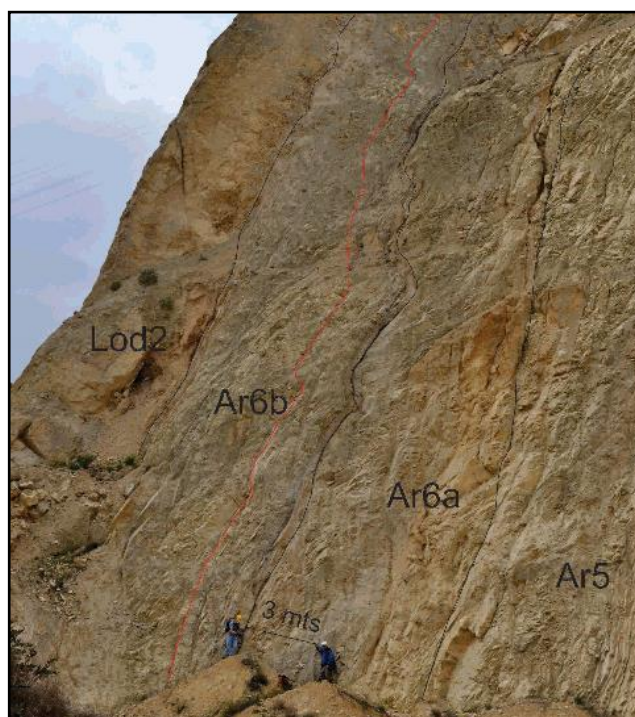


Figura 6.3.1.11. Niveles Ar5, Ar6, Lod2 y subniveles Ar6a y Ar6b [33]. Capa retro deformada entre los subniveles 6a y 6b limitada por la línea roja y negra.



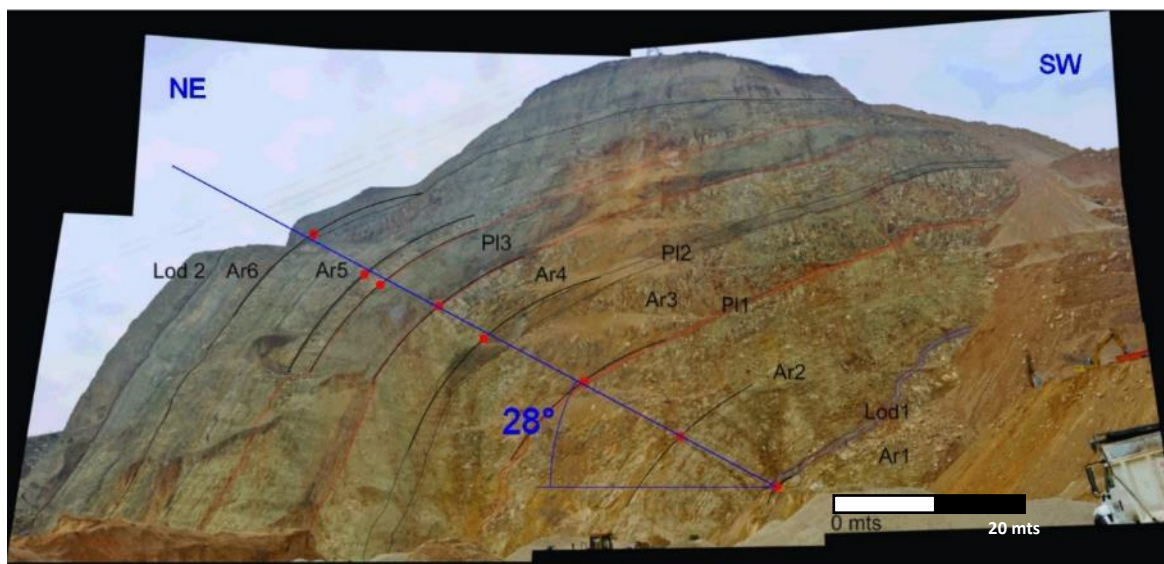
En general el fracturamiento de los niveles y capas de las arenitas es preferencialmente perpendicular y paralelo a la estratificación. La deformación que más se presenta dentro de los niveles y las capas es en ondulaciones suaves abiertas principalmente en las capas de arenitas, las máximas ondulaciones se observan en los niveles de lodolitas. Algunos niveles presentan retro deformaciones (esporádicas).

6.3.2 Geometría del pliegue.

A continuación, se describen algunos aspectos geométricos del pliegue monoclinial objeto de estudio.

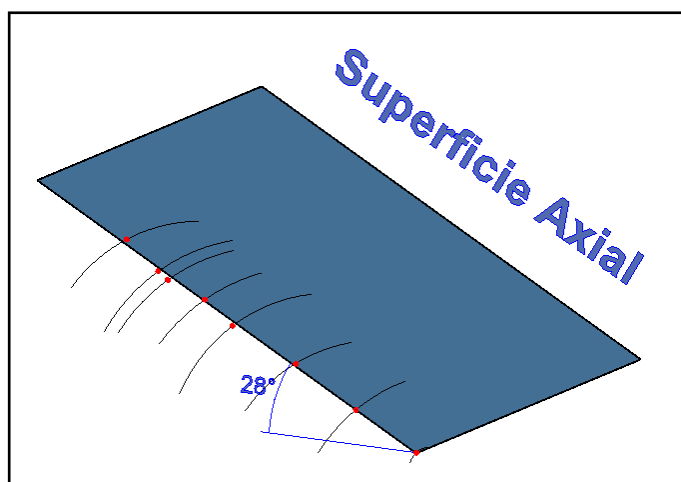
El pliegue se puede catalogar como armónico ya que el plegamiento de los niveles y capas presentan forma similar (zona de máxima curvatura) en dirección del eje axial. En cuanto a la simetría, el pliegue es asimétrico y presenta vergencia hacia el NE e inclinación al SW (Figura 6.3.2 [34] y 6.3.3 [35]). Con los puntos de máxima curvatura ubicados en el centro de los arcos que más se aproximan a la geometría de las capas en el eje del pliegue se infiere un posible trazo axial (Figura 6.3.2 [34]). Una vez obtenido el trazo axial del pliegue, se proyecta esta línea perpendicular en profundidad donde con el eje axial se genera una posible dirección de superficie axial (Figura 6.3.2 [35]).

Figura 6.3.2. Corte del pliegue LP [34]. Fotografía donde se observa la ubicación de los puntos de máxima curvatura de los niveles y capas (puntos rojos) y la línea recta en color azul que pasa a través de la mayoría de los puntos de máxima curvatura (trazo axial del pliegue).



Otra característica importante a la hora de clasificar y poder tratar los datos estructurales es la cilíndricidad del pliegue: Aparentemente el pliegue presenta una forma cilíndrica (corte por la explotación minera), pero el análisis de los datos de estratificación muestra un cabeceo del eje axial (17.1° al NW). Por lo tanto, a pesar de las evidencias de la no cilíndricidad estricta del pliegue, por simplicidad se tratará el pliegue objeto de estudio como cilíndrico a la escala del afloramiento.

Figura 6.3.2. Posible superficie axial del pliegue (plano azul) [35]. Puntos de máxima curvatura (rojos) y superficies curvas adyacentes a los puntos de máxima curvatura (arcos de color negro).



6.3.3 Datos estructurales.

Para el análisis de los planos de diaclasas y la clasificación de los mismos se ubican en el pliegue dentro de tres ejes coordenados a, b y c, para este caso se tomará el arreglo de ejes como se observa en la parte inferior de la figura 6.3.3 [36]). El eje **a** es vertical, el eje **b** es paralelo la estratificación y el eje **c** es perpendicular al eje **a**. Estos ejes no presentan significado cinemático ni dinámico. Dependiendo de la ubicación del plano medido se designará las primeras letras del plano que corresponde:

Planos so: Son los datos obtenidos en los planos de la estratificación de las capas.

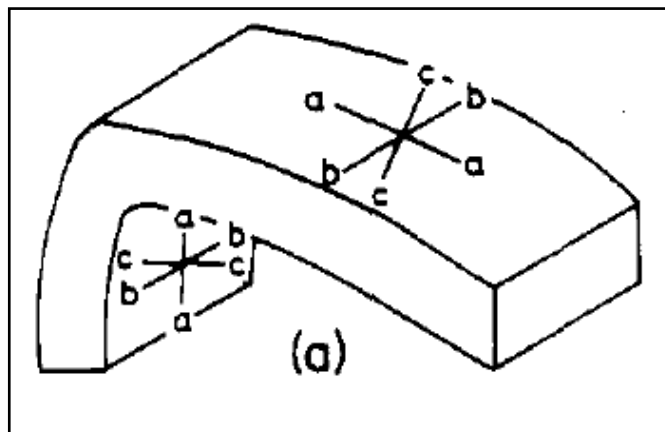
Planos Dab: Son los planos de diaclasas (D) cuya dirección de rumbo tienen tendencia o están cercanos a la dirección del plano ab (azimut promedio N 35 W).

Planos Dac: Son los planos de diaclasas cuya dirección tienen tendencia a la dirección del plano ac (azimut promedio N 55 E).

Planos Eac: Son planos cuya orientación son E-W.

Planos Eab: Planos con orientación promedio N-S.

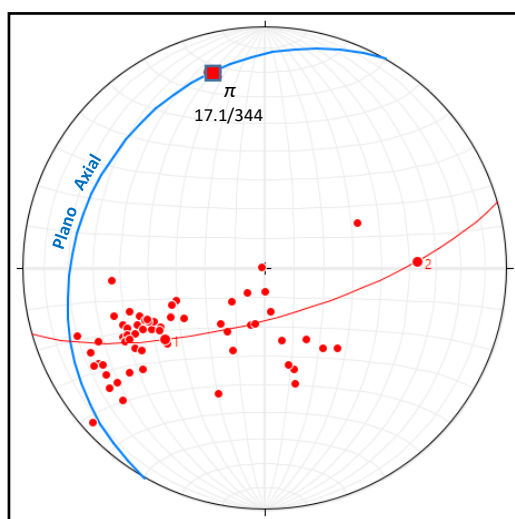
Figura 6.3.3. Ejes coordenados del pliegue [36]. Tomado de Hancock 1985, figura 17 pg 452.



6.3.3.1 Planos so

Con los datos de orientación de las capas en el pliegue (126 datos) y tomando la parte del pliegue que aflora como un pliegue cilíndrico se obtuvo gráficamente el círculo mayor y el polo (π - axis) que define el eje axial del pliegue (Figura 6.3.3 [37]).

Figura 6.3.3.1. Diagrama π de polos (círculo rojo) de la estratificación del pliegue [37]. Trend y plunge del eje del pliegue ($344^\circ, 17.1^\circ$) y plano axial ($209.9^\circ, 23.2^\circ$ W).



Gráficamente se obtuvo una inclinación de 28° para el plano o superficie axial (Figura 6.3.2 [35]) y por el análisis de los datos de estratificación se obtuvo un dato de 23.2° para tener en cuenta en la modelación análoga y cinemática.

6.3.3.2 Diaclasas

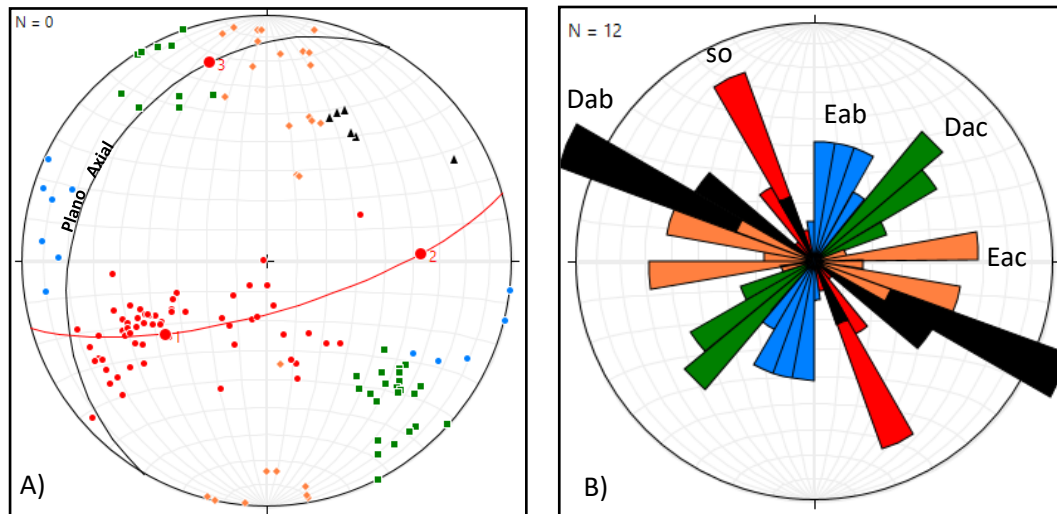
Se tomaron 57 datos de diaclasas en diferentes lugares del pliegue y cercanos a este (Tabla 6.3.3.2 [7]). Los datos fueron tomados en los diferentes niveles de la Formación arenisca dura (Ksgd) principalmente y en menor proporción en afloramientos de las formaciones Plaeners y Labor y Tierna.

Tabla 6.3.3.2. Datos para la evaluación de las diaclasas [7].

Diaclasas	# de datos	Rango de azimut de los planos en grados °	Rango de ángulos dip en grados °
Dab	7	305 - 345	52 – 76
Dac	37	35 - 70	50 – 90
Eab	12	N - S	70 – 90
Eac	29	E - W	30 – 90

De la tabla 6.3.3.2 [7] se puede indicar que la mayoría de los planos de diaclasas se forman en la dirección perpendicular al eje del pliegue (Dac) y en la dirección EW (diagrama de polos 6.3.3.2 A [38]). Por la posición actual de las capas plegadas y las orientaciones preferenciales de la mayoría de las diaclasas (Dac y Eac) se podría sugerir un origen pre plegamiento para la formación de estas. En el diagrama rosa de los datos de estratificación y las diaclasas figura 6.3.3.2 B [38] se puede observar la distribución del rumbo de los planos. La mayoría de los datos de diaclasas Dab presentan mayor tendencia a la dirección EW que a la dirección promedio de la estratificación (az promedio 325°) y a la dirección del eje del pliegue (344°).

Figura 6.3.3.2. A) Diagrama de polos de las diaclasas (izq), círculos de color rojo so, cuadros de color verde Dac, triángulos de color magenta Dab, círculos de color azul Eab y diamantes de color naranja Eac. B) Diagrama rosa de la distribución de datos de rumbos de estratificación y diaclasas (der) [38].



A continuación, se muestran dos fotografías que presentan muy buena exposición de una capa de lodolitas ubicada en el techo del pliegue justo en la terminación del anticlinal e inicio del área del sinclinal, donde es posible correlacionar los diferentes planos de diaclasas (Figura 6.3.3.2 A y B [39]). En la fotografía A de la figura 6.3.3.2 A [39] se observa como los planos conjugados Dab y Dac forman ángulos agudos sobre el eje a, mayores de 60° que por definición las clasificarían como fracturas conjugadas de cizalla (Hancock 1985). En la fotografía B de la figura 6.3.3.2 B [39], el ángulo entre los planos conjugados es menor a 60° lo cual en este caso las clasificaría como fracturas híbridas.

Figura 6.3.3.2. Fotografías de pavimentos realizados en lodolitas techo del pliegue [39]. Líneas de color verde planos de diaclasas Dab, líneas de color negro diaclasas Dac, líneas de color naranja diaclasas Eac y líneas de color rojo diaclasas Eab.





Capítulo 7 Modelamiento cinemático trishear

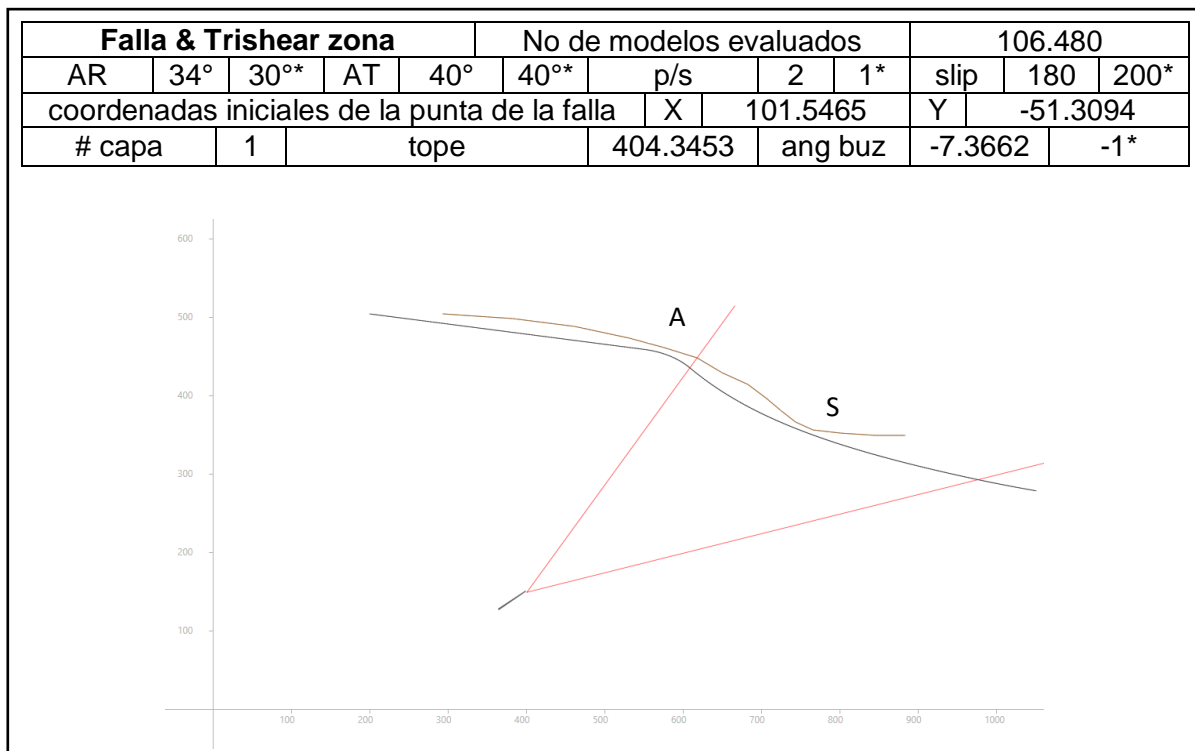
7.1 Modelamiento cinemático vs modelamiento análogo

Para el modelamiento cinemático con trishear se emplea el programa FaultFoldForward desarrollado por Allmendinger (2012). FaultFoldForward es la actualización del programa FaultFold (disponible en la página de Rick Allmendinger's Stuff), este permite crear modelos de avance (forward) de perfiles en áreas balanceadas. Se pueden generar perfiles de pliegues por flexión de falla y pliegues por propagación de falla usando el modelo cinemático trishear. (Erslev 1991; Allmendinger 1998, 2000; Hardy; Zehnder 2000; Cardozo 2003). El programa permite introducir las seis variables del modelo trishear (ángulo de rampa, ángulo trishear, deslizamiento, p/s, y las coordenadas X y del tipo de la falla). Las secciones pueden tener múltiples fallas, donde se puede variar el ángulo durante el desarrollo de la sección, además estimar la magnitud de la deformación por medio de la generación de elipses de deformación. En esta versión se incluye la opción de grid search parameters (Allmendinger 1998), donde se puede reducir el tiempo de búsqueda de los parámetros trishear de un perfil objeto de estudio. A continuación, se corren los modelos y se comparan con los resultados de los ensayos análogos y luego con el perfil del pliegue natural.

7.1.1 Fallamiento Inverso

En la figura 7.1.1 [40] se observa el resultado de la modelación en FaultFoldForward de uno de los ensayos análogos de componente inverso con ángulo de rampa (AR) de 30° . Los parámetros iniciales (ubicados en la parte superior Figura 7.1.1 [40]) para correr el modelo cinemático se obtuvieron después de digitalizar la capa guía (borde superior del ensayo análogo) y ejecutar la opción grid search parameters. Los valores base para la grilla de búsqueda se obtuvieron de los utilizados en el ensayo análogo (datos con * en la parte superior de la gráfica 7.1.1 [40]). La estructura final en ambos casos es un monoclin. La curvatura del anticlinal (A) en el modelo cinemático es cerrada y de poca amplitud, y la curvatura del sinclinal (S) es suave y muy abierta. Caso contrario en el perfil del modelo análogo, donde la curvatura del anticlinal es suave y abierta y la del sinclinal es un poco cerrada y de poca amplitud.

Figura 7.1.1. Perfiles de la modelación análoga y cinemática AR 30° [40]. Línea de color café representa el perfil de la capa guía de la modelación análoga y la línea de color negro el perfil de la modelación cinemática. La zona trishear está representada por las líneas de color rojo, y la punta de la falla con la línea corta de color negro en la parte inferior.



Además de las diferencias mencionadas anteriormente se evidencian discrepancias en los valores iniciales de la modelación entre ambos modelos. El ángulo de rampa difiere en 4° , la relación p/s en 0.5 (en el ensayo análogo es de 1), el deslizamiento en 20 (200 en el ensayo análogo), el ángulo de buzamiento de la capa guía (cercano a 0°) y en el modelo análogo es de -7.3662° y en las coordenadas iniciales de la punta de la falla.

En el modelo cinemático con ángulo de rampa a 60° (Figura 7.1.1 [41]), al igual que en el modelo cinemático a 30° se obtiene al final de la modelación la estructura monoclinas. Las diferencias entre el perfil del modelo análogo y el cinemático persisten, la curvatura del anticlinal y sinclinal de ambos modelos no coinciden a detalle, pero en términos generales se obtiene la estructura final y geometría general. En los parámetros de búsqueda se puede ampliar el rango del valor de p/s que en gran medida afecta el estilo de plegamiento (Hardy and Ford, 1997), para obtener unas curvaturas muy suaves y amplias como las que presenta el anticlinal en el perfil análogo lo ideal sería trabajar con relaciones de p/s cercanas a 0, pero el modelo análogo maneja relaciones p/s de 1, donde la magnitud del deslizamiento es muy cercana o igual a la magnitud de propagación. En cuanto a los límites de la zona trishear (líneas de color rojo) en el modelo cinemático a 60° , se observa que coinciden con los ejes del anticlinal y sinclinal del modelo análogo, caso contrario en el modelo cinemático con ángulo de rampa a 30° . Al parecer mientras más bajo sea el ángulo de la rampa en el modelo cinemático, menor es la coincidencia de los límites de la zona trishear con los ejes del sinclinal y anticlinal del modelo análogo.

La última modelación cinemática inversa que se presenta es la generada con ángulo de falla a 90° (Figura 7.1.1 [42]). Como en los perfiles anteriores el resultado final de la modelación cinemática es una estructura monoclinas. Las diferencias entre el perfil del modelo análogo y el cinemático disminuyen bastante en comparación con los anteriores (30° y 60°), la curvatura del anticlinal y sinclinal de ambos modelos presentan mayor similitud. En parte superior de la Figura 7.1.1 [42] se muestran los parámetros iniciales del modelamiento cinemático obtenidos en la grilla de búsqueda para la modelación de la capa generada. En este ensayo la cantidad de modelos evaluados por el programa disminuye, ya que al ser la falla vertical el área de búsqueda de la punta de la falla disminuye, haciendo que sean menos los modelos a evaluar. Se siguen presentando diferencias considerables entre los parámetros de entrada de la modelación cinemática y los parámetros iniciales en la modelación análoga, principalmente en la relación p/s, el deslizamiento y las coordenadas iniciales de la punta de la falla.

Figura 7.1.1. Grafica resultado de la modelación en FaultFoldForward AR 60° [41]. Perfil del pliegue natural línea de color café, perfil de la modelación línea de color negro, zona trishear líneas de color rojo y falla línea corta de color negro inferior, los datos con *son del modelamiento análogo.

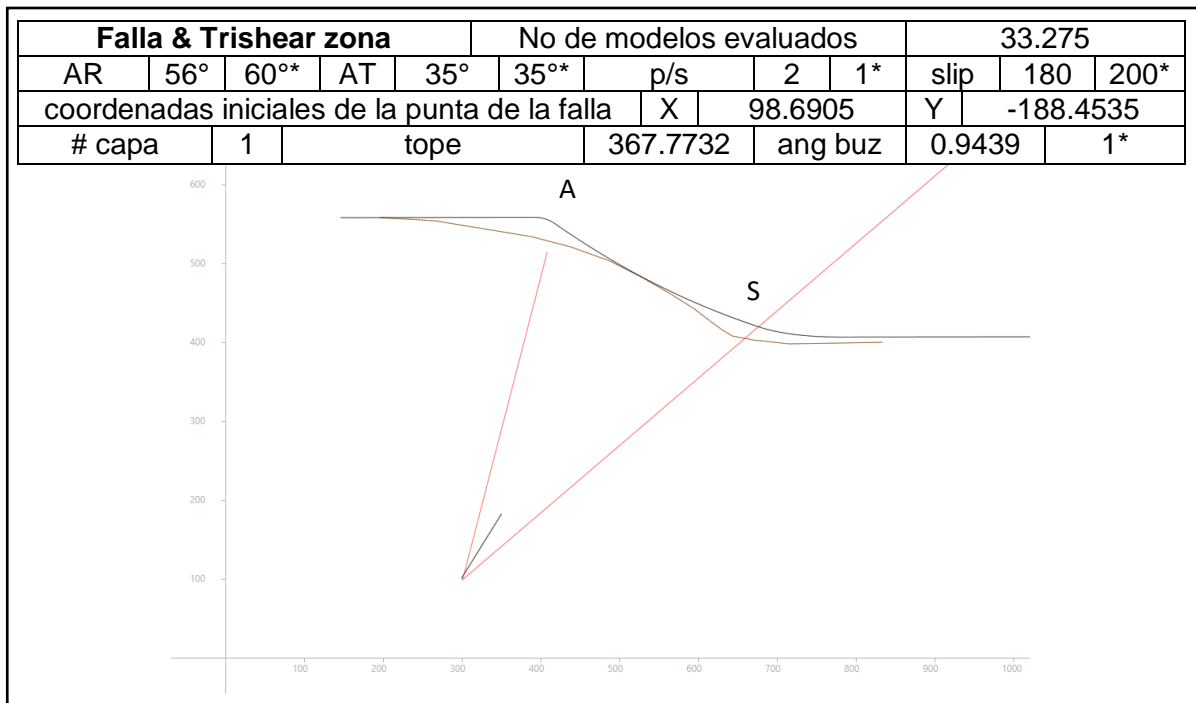
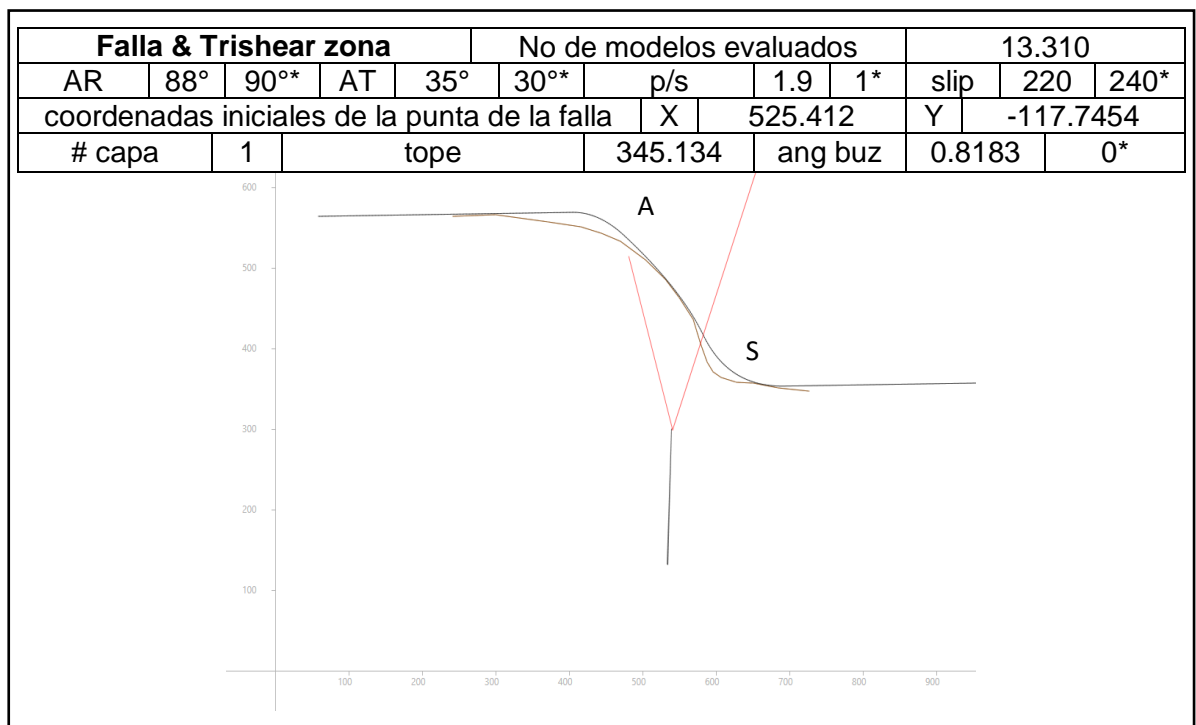


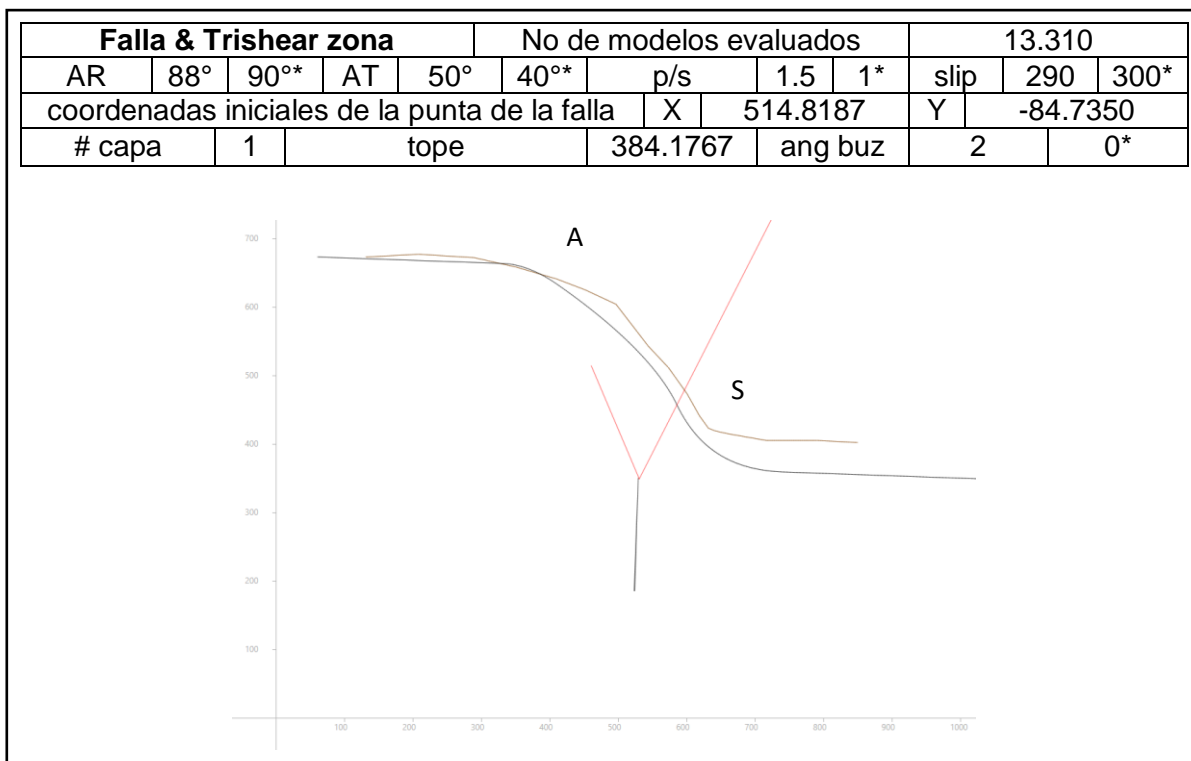
Figura 7.1.1. Grafica resultado de la modelación en FaultFoldForward AR 90° [42].



7.1.2 Fallamiento normal

En la figura 7.1.2 [43] se observa el perfil obtenido en la modelación cinemática del tope de la capa de arcilla del modelo análogo con ángulo de rampa a 90° que presenta una componente normal de movimiento. Se obtiene al final de la modelación una estructura monoclin. Las diferencias entre el perfil del modelo análogo y el cinemático son similares al resultado de la modelación cinemática a 90° (inversa). En este caso las diferencias en los parámetros iniciales de la modelación cinemática y análoga disminuyen en comparación con los obtenidos en el ensayo con falla vertical inversa.

Figura 7.1.2. Grafica resultado de la modelación en FaultFoldForward AR 90° [43]. Perfil del pliegue natural línea de color café, perfil de la modelación línea de color negro, zona trishear líneas de color rojo y falla línea corta de color negro inferior, los datos con *son del modelamiento análogo.



Los ensayos análogos con ángulos de rampa de 30° y 60° no se analizan, ya que las geometrías finales en estos ensayos presentan estructuras de colapso limitadas por fallas que siguen la dirección de la falla principal que van desde el anticlinal hacia el sinclinal y esto no se observa en el pliegue natural.

7.2 Modelamiento cinemático vs estructura natural

Se realizó el modelamiento cinemático del perfil del pliegue de la cantera Loma Pelada, en el cual se empleó el tope de la Formación Arenisca Dura (Ksgd) como capa guía para modelación. En la figura 7.2 [44] se observa la gráfica obtenida de la modelación y en la parte superior los resultados de los parámetros iniciales de la modelación cinemática, obtenidos a partir del algoritmo de la grilla de búsqueda que utiliza el programa. Como se había mencionado anteriormente con ángulos de rampa intermedios a altos ($\geq 40^\circ$) el modelo cinemático generado por el programa FaultFoldForward presenta mayor aproximación en la geometría del pliegue a modelar, por lo cual en este caso la modelación inversa con ángulo de rampa a 55° presenta un alto grado de aproximación con el perfil de la capa guía del pliegue de la estructura natural. El resultado es un pliegue monoclinial, con anticlinal y sinclinal con charnelas con curvaturas suaves y de poca amplitud (Figura 7.2 A) [44]). Según la modelación efectuada la relación p/s = 3, lo cual indica que el deslizamiento o salto de la falla (216 mts) se da en la Formación Simijaca (Kss) y de ahí se propaga hasta el contacto entre Conejo y la Arenisca Dura ,648 mts (Figura 7.2 B) [44]).

7.3 Modelamiento análogo vs estructura natural

Una vez obtenidos los parámetros para el modelamiento cinemático de la capa guía del pliegue natural, se procede a determinar cuál de las geometrías y características de los ensayos análogos es el que más se aproxima a la geometría del pliegue de la cantera Loma Pelada (LP). Se obtiene que la geometría final del ensayo número 12 (falla inversa) es la que más se aproxima a la geometría de la capa guía del pliegue natural (Figura 7.3 [45]). Se encuentra que la terminación del anticlinal en el pliegue natural y la terminación en el modelo análogo son muy similares, la inclinación del plano axial del pliegue observado en LP se puede explicar de alguna manera con el modelo análogo, donde la terminación de las fallas y el desplazamiento del material rotan en dirección del eje sinclinal y presentan al final ángulos diferentes al plano de falla principal.

En ambos modelos la zona más deformada se encuentra a partir de línea de trazo axial hacia abajo, en el modelo análogo se evidencia por la intensa deformación del marcador circular que termina en una elipse fracturada y elongada (Figura 7.3 [45]), y en el pliegue natural el buzamiento de las capas cambia de ángulos suaves de 20° - 35° a ángulos fuertes de 60° - 70° de inclinación (Figura 6.3.2 [34]).

Figura 7.2. Graficas resultado de la modelación cinemática [44].A) Perfil del pliegue natural línea de color café, perfil de la modelación línea de color negro, zona trishear líneas de color rojo y falla línea corta de color negro inferior, B) Perfil resultado de la modelación cinemática y pliegue natural.

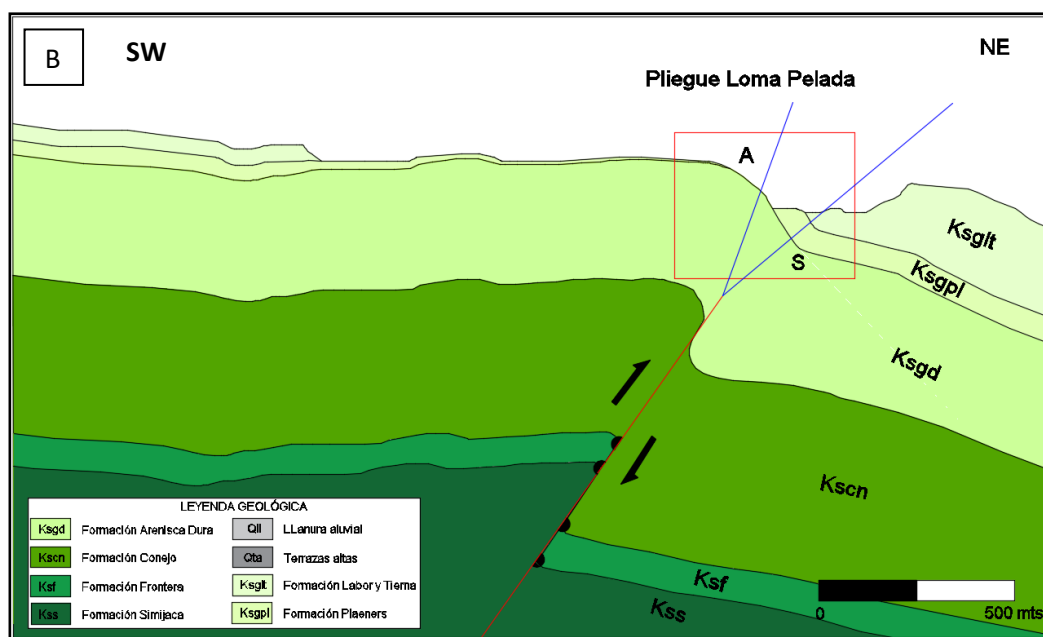
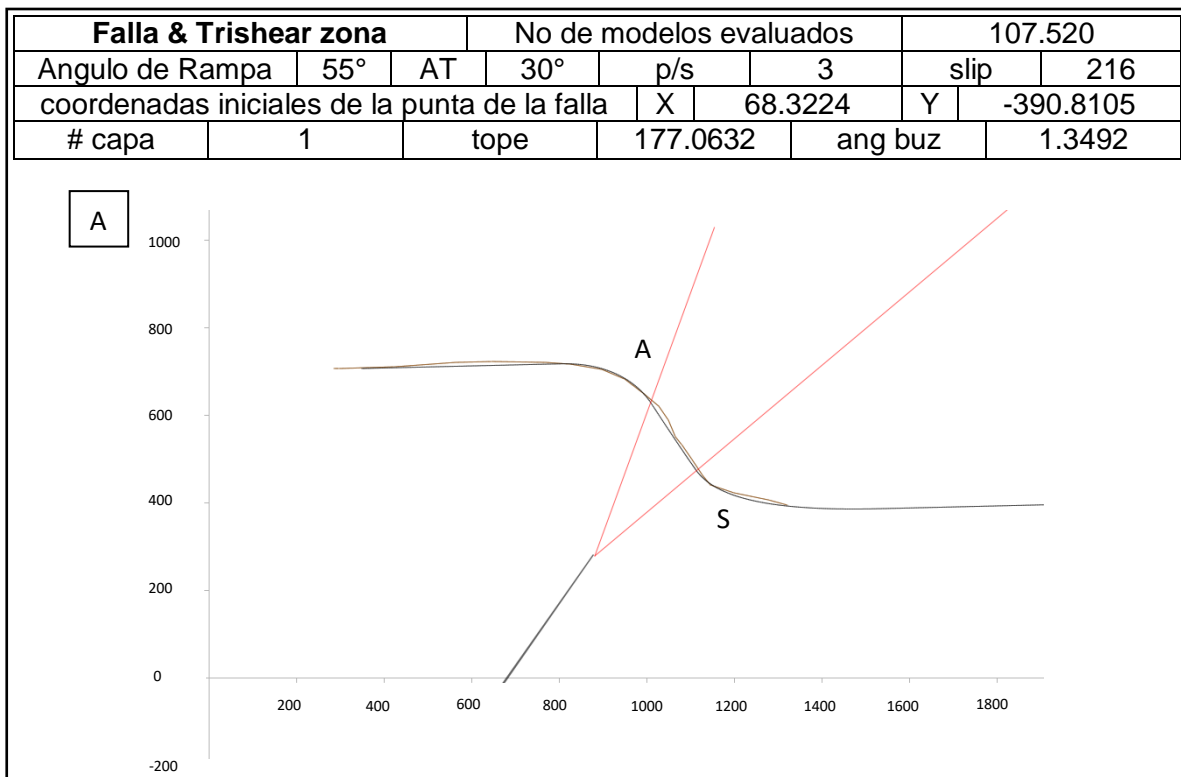
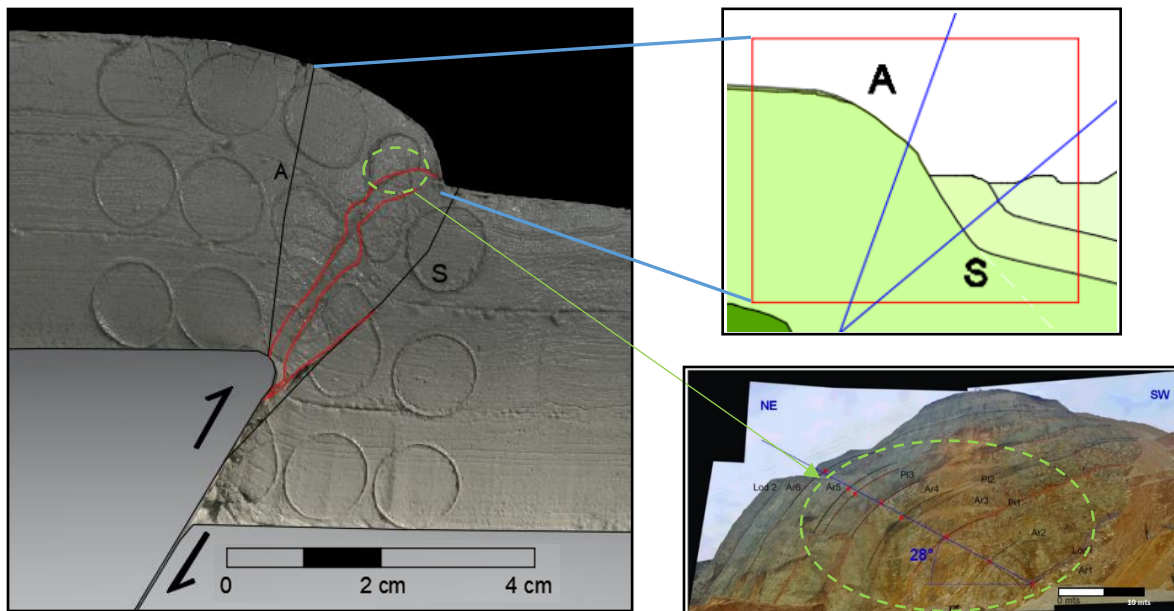


Figura 7.3. Grafica comparativa del modelo análogo #12 y natural LP [45].



7.4 Modelamiento cinemático vs modelamiento análogo

También se comparan los parámetros del ensayo # 12 con los obtenidos en la modelación cinemática de la sección 7.2: ángulo de rampa de 60° (55° modelo cinemático), ángulo trishear de 50° (30° modelo cinemático), relación $p/s = 1$ (3 modelo cinemático).

Comparando los dos modelos de las capas guías, se observa que el resultado final es la estructura monoclin. La curvatura de la charnela del anticlinal es suave y abierta en ambos modelos, en cambio la curvatura de la charnela del sinclinal en el modelo análogo es apretada y la del modelo cinemático es suave y amplia. Como se ha visto en todos los ensayos de la modelación cinemática el programa trata de distribuir homogéneamente la deformación en la zona triangular, a diferencia del modelamiento análogo donde las condiciones de borde, tasa de deformación, ángulo de la falla y la plasticidad de las mezclas hacen que la deformación en la zona triangular no sea del todo homogénea, esto se puede expresar en los patrones de deformación y la curvatura de las charnelas de anticlinal y sinclinal en los modelos análogos.

Capítulo 8 Análisis y discusión de resultados

El pliegue monoclinual de Loma Pelada (LP) descrito en el capítulo 6, muestra una máxima deformación y fracturamiento dentro de una zona triangular que inicia en profundidad y se propaga para formar el pliegue actual, el estilo de deformación de este contrasta con la morfología de los alrededores, donde se observan capas moderadamente plegadas y con buzamientos suaves, algunas casi horizontales (Figura 8. [46]). Este estilo de deformación de LP y los encontrados al norte en el anticlinal de Madrid y al sur con el anticlinal de Cerro Gordo podrían ser la expresión de un frente de deformación inverso (por la morfología de los pliegues) fragmentado en bloques, donde en medio de estas estructuras las capas de las unidades del Grupo Guadalupe se encuentran moderadamente plegadas y algunas sub horizontales, por lo cual es viable un modelo de bloques separados por fallas locales de rumbo, en donde unos bloques se encuentran poco deformados y otros fuertemente a moderadamente plegados, los más deformados podrían estar siendo afectados por fallas locales con componente de movimiento inverso asociadas a una falla principal profunda o a fallas de despegue, lo cual es conforme con la interpretación para este sector propuesta por Gómez (1985), Figura 1.1 B [4].

Teniendo en cuenta la geometría y posible origen del pliegue monoclinual de LP, se aplicó la modelación análoga y cinemática. En la modelación análoga, se asumieron varias simplificaciones entre otras donde : i) se modelo el pliegue natural como si los niveles y capas descritos actuaran en términos generales como una sola capa, ii) considerar que los efectos de borde entre las capas de arcilla y los bloques de aluminio son mínimos, iii) que las tasas de deformación eran las adecuadas según la bibliografía consultada, iv) el contraste reológico de las unidades litológicas simuladas (areniscas-lodolitas) es similar al del modelo análogo, v) modelar una falla ciega, donde su ángulo, salto y ubicación de la punta son generados en la modelación cinemática y vi) que el análisis de curvatura y la geometría de las capas plegadas en el pliegue natural son los argumentos más relevantes a tener en cuenta en la modelación análoga y cinemática, esto sin excluir los datos de campo.

Pero a su vez la modelación análoga permitió: i) modelar materiales particulados debidamente escalados, ii) incluir la acción de la presencia de fluidos como el agua en las capas modeladas, iii) observar la evolución de los patrones de deformación y fracturamiento generales, y poderlos contrastar mas no comparar con los observados en el pliegue natural, iv) obtener los parámetros base para la modelación cinemática, v)

obtener una estructura monoclinal similar a la del pliegue natural observado, e inferir la presencia del sinclinal en profundidad.

Figura 8. Fotografía panorámica de la morfología en los alrededores de Loma Pelada A) Al SW de la cantera Loma Pelada, y B) panorámica de unidades al N de la cantera Loma Pelada [46].



Es evidente que los perfiles obtenidos en la modelación análoga difieren a escala detallada de los perfiles obtenidos en la modelación cinemática siendo estrictos en la curvatura del anticlinal y sinclinal, pero en términos generales se cumple con la generación y geometría general de la estructura monoclinal final.

Algunas de las diferencias en los modelos se pueden explicar de alguna manera por las siguientes razones: i) en el modelo cinemático trishear, el eje o la zona central de la zona triangular es paralelo al plano de la falla e inicia en un punto específico ubicado en la punta de la falla, en los modelos análogos el área de la punta de la falla del bloque colgante es mayor al del modelo cinemático, y los puntos donde inician los ejes del anticlinal y sinclinal son diferentes, esto y el hecho de la plasticidad de las capas de arcilla, permite una rotación del eje central de la zona triangular hacia el eje del anticlinal y de alguna manera afectar el paralelismo con el plano de la falla principal en los ensayos análogos, ii) en los modelos análogos se generan espacios entre el bloque yacente y el bloque colgante, además pequeñas imperfecciones en las superficies de las láminas que simulan los bloques (especialmente en las puntas), en la modelación cinemática estas imperfecciones no existen, por lo cual esto puede estar afectando el ángulo de la rampa, el ángulo trishear y la relación p/s , iii) por otra parte la plasticidad de las mezclas de arcilla, hace que la geometría en el tope del anticlinal sea amplia y suave, y cerrada en el sinclinal, lo cual difiere un poco con las geometrías finales en la modelación cinemática donde las curvaturas del anticlinal y sinclinal no presentan grandes contrastes como en la modelación análoga.

Si se requiere mayor semejanza en las curvaturas de la modelación cinemática con las generadas en la modelación análoga y las presentes en las estructuras naturales, sería necesario correr más ensayos con rangos mayores intervalos o pasos menores en los parámetros de búsqueda, lo cual tomaría más horas de procesamiento en la grilla de búsqueda (> de 100.000 modelos serían > de 6 horas de búsqueda) o intentar con los scripts en Matlab de Cardozo y Aanonsen (2009), cuyos algoritmos de optimización son más rápidos en la búsqueda pero menos robustos que el algoritmo de la grilla de búsqueda. Lo ideal sería trabajar con ambos algoritmos.

Capítulo 9 Conclusiones

La arcilla RN es una arcilla que presenta cualidades para modelación análoga de pliegues por propagación de falla generados en ambientes distensivos y/o compresivos, por su intermedia plasticidad y alto contenido de sílice permite generar fallas puntuales y pliegues con diferentes rangos de amplitud y grado de curvatura.

Se establecieron los rangos de los porcentajes de contenido de agua en las mezclas (45% a 48%) que permiten generar pliegues y fallas, los cuales en términos generales se pueden presentar en el pliegue objeto de estudio.

La zona de máxima deformación en la modelación análoga, cinemática y en el pliegue natural presenta una forma triangular (en perfil) como lo estipula el modelo cinemático trishear.

La zona delimitada en el monoclinas por los ejes del anticlinal y sinclinal presenta al mismo tiempo corte y deformación del material dentro de ella, la máxima deformación y corte se concentra en la zona central, y de la zona central se propaga hacia los ejes o límites de la zona triangular, (principalmente en el fallamiento inverso), por lo anterior se puede decir que el tipo de deformación en los ensayos es heterogénea ya que se concentra en una zona y no es uniforme en toda la zona triangular.

Aunque es difícil delimitar la zona triangular en estados iniciales de la deformación en la capa que simula la cobertura sedimentaria, al parecer el área de la zona de deformación cambia de tamaño durante el ensayo, tiene su origen en la punta de la falla con un ángulo pequeño de apertura y termina con un ángulo de apertura mayor al final del ensayo, hecho que contrasta en la modelación cinemática donde el ángulo trishear es un parámetro inicial y no cambia durante toda la modelación.

Cuando la modelación análoga y cinemática se realiza con ángulos de rampa moderados a altos aumenta el nivel concordancia entre los perfiles obtenidos. Por lo tanto, se logró que el perfil de la capa guía de la estructura natural sea muy parecido al generado por la modelación cinemática, dándole un aceptable nivel de confianza de los parámetros iniciales obtenidos, para generar la estructura natural objeto de este estudio.

El pliegue monoclinal que aflora en la cantera Loma Pelada es un pliegue que se pudo generar por la propagación de una falla local inversa con ángulo de falla de 55° , la punta de la falla y ápice de la zona triangular se propaga hasta el contacto entre las formaciones Conejo y Arenisca Dura (300 mts de profundidad), el ángulo trishear es de 30° y la relación p/s es de 3.

Bibliografía

Acosta, J. & Ulloa, C. (2001): Geología de la Plancha 208 – Villeta Escala 1:100.000, Memoria explicativa, 83 p., Ingeominas, Bogotá.

Acosta, J. & Ulloa, C. (2002). Memoria explicativa de la geología de la plancha 208. Villeta. INGEOMINAS. 84 p. Bogotá

Allmendinger, R. (1998). Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics*, VOL. 17, No. 4, August, p. 640-656.

Allmendinger, R. (2012). Program FaultFoldForward. V. 6.

Arch, J., Maltman, A.J., Knipe, R.J. (1988). Shear-zone geometries in experimentally deformed clays: the influence of water content, strain rate and primary fabric. *Journal of Structural Geology* 10, 91–99.

Atmaoui, N. (2005). Development of pull-apart basins and associated structures by the riedel shear mechanism: insight from scaled clay analogue models. Der Fakultät für Geowissenschaften der Ruhr-Universität Bochum zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften.

Bain, G.W., Beebe, J.H. (1954). Scale model reproduction of tension faults. *American Journal of Science* 252, 745–754.

Camargo, G. (1995). Elementos estructurales del área de la Sabana de Bogotá y alrededores. VI Congreso Colombiano del Petróleo. Bogotá, p. 8.

Cardozo, N., Bhalla, K., Zehnder, A., Allmendinger, R. (2002). Mechanical models of fault propagation folds and comparison to the trishear kinematic model. *Journal of Structural Geology* 25 (2003), p. 1- 18.

Cardozo, N. (2005). Trishear modeling of fold bedding data along a topographic profile. *Journal of Structural Geology* 27, p. 495–502.

Cardozo, N and Aanonsen, S. (2009). Optimized trishear inverse modeling. *Journal of Structural Geology* 31, pp 546-560.

Cloos, H. (1928). Experimente zur inneren Tektonik. *Centralbl Mineral Pal* 5:609-621.

Cooke and Van der Elst, (2012). Rheologic testing of wet kaolin reveals frictional and bi-viscous behavior typical of crustal materials. *Geophysical Research Letters*, Vol. 39

Davis, G. H., Reynolds, S. J and Kluth, C. F. (2011). *Structural geology of rocks and regions* 3rd Edition. JOHN WILEY & SONS, INC. 839 p.

Eisenstadt, G., Oliver, M. (2015). Estimating inversion: results from clay models. Nanyang Technological University, June.

Eisenstadt, G. Sims, D. (2005) Evaluating sand and clay models: do rheological differences matter? *Journal of Structural Geology* 27, p. 1399–1412.

Erslev, E. A., (1991), Trishear fault-propagation folding. *Geology* 19, p. 617–620.

Erslev, E. A., and Rogers, J. (1993). Basement-cover geometry of Laramide fault-propagation folds, in Laramide basement deformation in the Rocky Mountain foreland of the Western United States. C.J Schmidt, R.B, Chase and E.A. Erslev, *Spec. Pap. Geol.Soc. Am*, 280, 125-146.

Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge: Cambridge University Press.

Gómez, H. (1985). Principales rasgos estructurales al suroccidente de la Sabana de Bogotá. *Revista C.I.A.F.*, Bogotá, Vol. 10 (1), p 45-57.

Hancock, P. (1985). Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal Structural Geology*, Vol 7, pp 437-457.

Hardy, S., Ford, M. (1997). Numerical modeling of trishear fault propagation fold. *Tectonics*, VOL. 16, No. 5, October, p. 841-854.

Hardy, S and Finch, E. (2006). Discrete element modelling of the influence of cover strength on basement-involved fault-propagation folding. *Tectonophysics* 415, pp 225-238.

Hubbert, M. K. (1937), Theory of scale models as applied to the study of geologic structures: *Geological Society of America Bulletin*, v. 48, p. 1459–1519.

Ingeominas, (1998), Mapa geológico de la plancha 227 La Mesa. Escala 1:100.000.

Julivert, M. (1963). Rasgos Tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras. *Boletín geológico*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Vol. 13-14, pp.1-104.

Kammer, A. (1999). Observaciones acerca del origen transpresivo de la Cordillera Oriental. *Geología Colombiana*, Santafé de Bogotá, Vol. 24, p. 29-53.

Keating, D. P and Fischer, M. P. (2008). An experimental evaluation of the curvature-strain relation in fault-related folds. *AAPG Bulletin*, v. 92, no. 7 July, p. 869–884.

Lobo-Guerrero, A. (1992) *Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana*, trabajo presentado en las VII Jornadas Geotécnicas de la Sociedad Colombiana de ingenieros, octubre 22, Bogotá. 20 pág.

Montoya, D. & Reyes, G. (2003). Mapa geológico de la Plancha 209 Zipaquirá. Escala 1:100.000. INGEOMINAS, Bogotá.

Montoya, D. & Reyes, G. (2005). *Geología de la Sabana de Bogotá*. Ingeominas.

Maltman, A. (1987). Shear zones in argillaceous sediments—an experimental study. In: Jones, M.E., Preston, R.M. (Eds.), *Deformation of Sediments and Sedimentary Rocks* Geological Society Special Publication, 29, pp. 77–87.

Miller, J.F., Mitra, S. (2011). Deformation and secondary faulting associated with basement-involved compressional and extensional structures. *AAPG Bulletin*, V. 95, No. 4, April, p. 675-689.

Mitra, S., Miller, J.F. (2013). Strain variation with progressive deformation in basement-involved trishear structures. *Journal of Structural Geology* 53, p. 70-79.

Oertel, G. (1965). The mechanism of faulting in clay experiments. *Tectonophysics* 221, 325–344.

Pollard, D and Segall, P. (1987). Theoretical displacements and stresses near fractures in rock: With applications to faults, joints, veins, dikes, and solution surfaces, in *Fracture Mechanics of Rock*. B.K Atkinso, pp 277-349. Academic, San Diego, Calif.

Sims D (1993) The rheology of clay: a modeling material for geologic structures. *EOS, Transactions of the American Geophys. Union, Abstracts*, 74:569.

Smart K, Ferrill D., and Morris A. (2009). Impact of interlayer slip on fracture prediction from geomechanical models of fault-related folds. *AAPG Bulletin*, v. 93, no. 11 (November 2009), p. 1447–1458.

Smart, K. et al. (2010). Geomechanical modeling of and extensional fault-propagation-fold: Big Brushy Canyon monocline, Sierra Del Carmen. *AAPG Bulletin*, v. 94, no. 2 (February), p. 221–240.

Suppe J (1983). Geometry and kinematic of fault-bend folding. *American Journal Of Science*, vol 283. P 684-721

Suppe J (1984). *Principles of Structural Geology*. Prentice Hall College Inc., London.

Suppe, J., Medwedeff, D. A. (1990). Geometry and kinematics of fault-bend folding. *Eclogae Geol. Helv.*, 83 (3): 409-454.

Tchalenko J S (1970) Similarities between shear zones of different magnitudes. *Geol Soc Am Bull* 81:1625-1640.

Terzaghi, K., Peck, R.B. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley, New York.

Velandia, F., De Bermoudes, O. (2002). Fallas longitudinales y transversales de la Sabana de Bogotá, Colombia. *Boletín de Geología*. Vol. 24, No 39, Enero - Junio.

Weijermars, R., Jackson, M., Vendeville, B. (1993) Rheological and tectonic modeling of salt provinces. *Tectonophysics*, 217. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, p. 143-174.

Withjack, M.O., Olson, J., Peterson, E. (1990). Experimental models of extensional forced folds. *The American Association of Petroleum Geologist. Bulletin*. 74 (7), p. 1038-1054.

Withjack, M. O., Schlische, R. W., and Henza, A. (2007). Scaled Experimental Models of Extension: Dry Sand vs. Wet Clay. *Houston Geological Society Bulletin*, v. 49, No 8, p. 31-49.

Withjack, M. O., Schlische, R. W. (2006). Geometric and experimental models of extensional fault-bend folds. Geological Society, London, Special Publications, 253, 285–305.

Withjack, M. O., Schlische, R. W., and Henza, A. (2007). Scaled Experimental Models of Extension: Dry Sand vs. Wet Clay. Houston Geological Society Bulletin, v. 49, No 8, p 31-49.

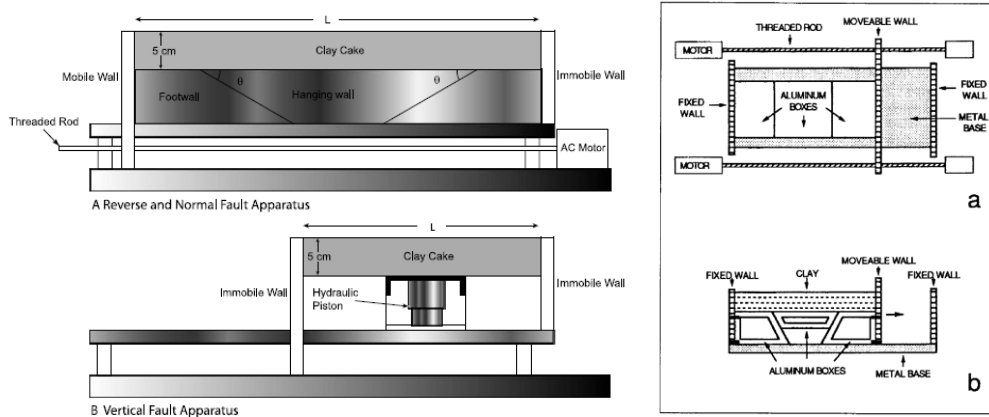
Zehnder, A. T., Allmendinger, R. W. (2000). Journal of Structural Geology 22, p. 1009.

Apéndice A: Trabajo de laboratorio.

1. Máquinas de deformación.

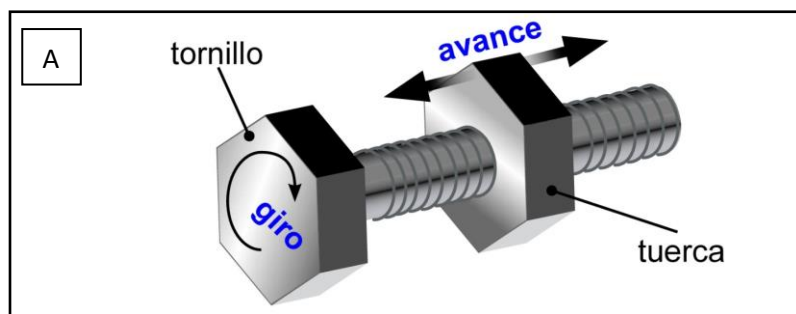
Las máquinas de deformación utilizadas en este estudio se diseñaron teniendo en cuenta los mecanismos y esquema de las máquinas usadas por autores como Withjack et al., (1990) y Miller y Mitra (2011, Figura 1), con algunas modificaciones.

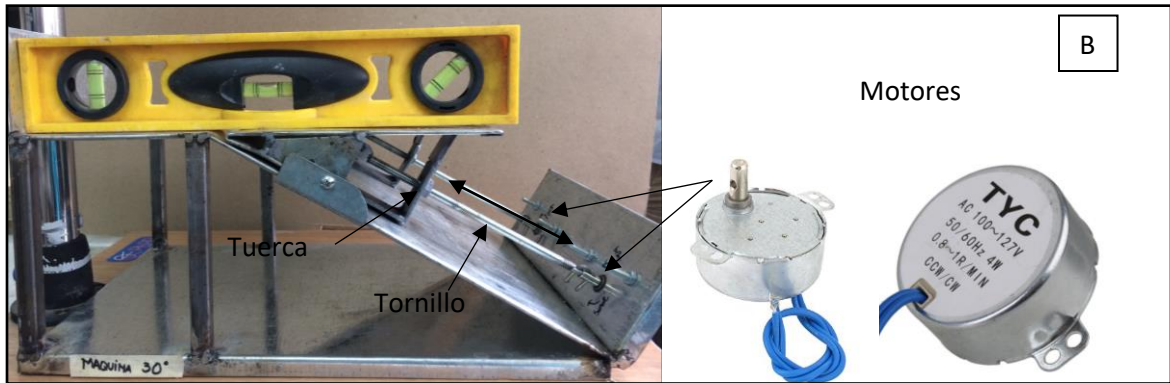
Figura 1. Modelos de máquinas de deformación.



Se utilizó como mecanismo de movimiento el denominado tipo husillo, el cual permite realizar movimientos longitudinales en dos direcciones por medio del giro de un tornillo central, el giro se da por la acción de dos motores eléctricos sincronizados, los cuales pueden cambiar la dirección de giro invirtiendo la polaridad (Figura 2).

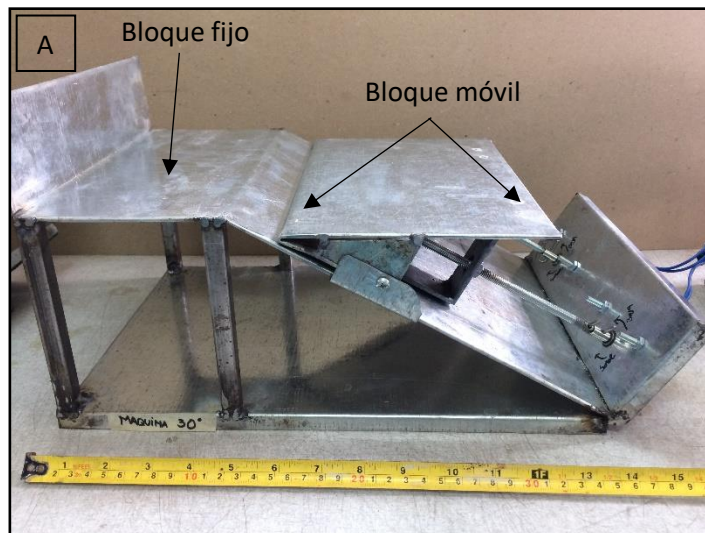
Figura 2. Mecanismo de movimiento tipo husillo. A) mecanismo tipo husillo., B) Mecanismo tipo husillo en máquina de deformación con ángulo de rampa de 30° y motores.

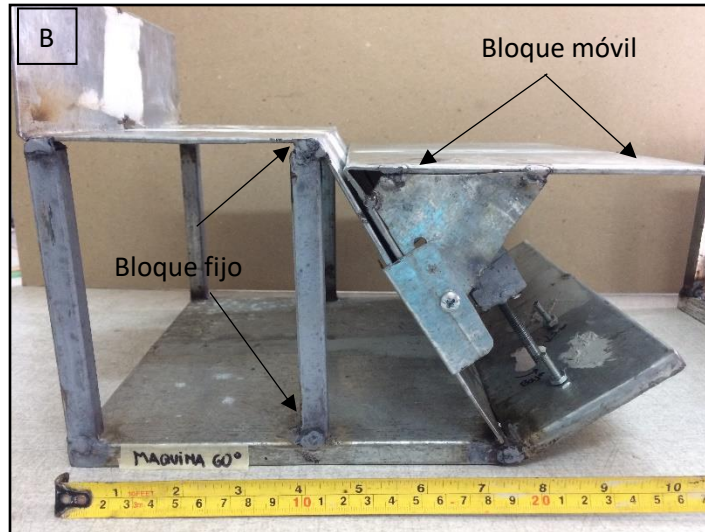




Las máquinas constan de dos partes: i) el bloque móvil que representa el bloque colgante que realiza los movimientos verticales hacia arriba y hacia abajo, el cual se encuentra conectando por un tornillo con los motores y ii) el bloque fijo que representa el bloque yacente (Figura 3).

Figura 3. Máquinas de deformación y sus partes. A) Máquina de 30° y B) máquina de 60°.

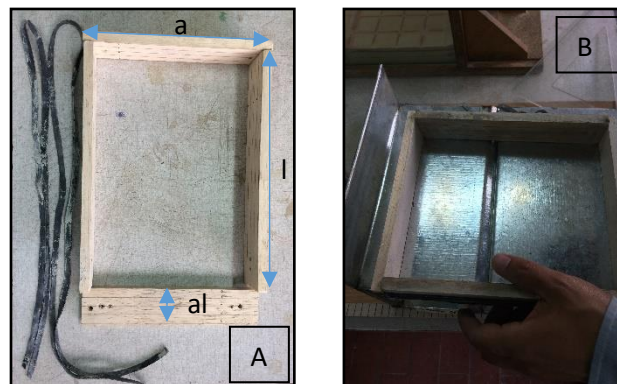




2. Preparación de las mezclas.

Antes de proceder a preparar las mezclas se calcula el volumen de la capa o las capas de arcilla-agua que van a simular la cobertura sedimentaria. En este caso se mide el largo (l), ancho (a) y alto (al) interno del marco de madera que servirá de sostén a la capa mientras se coloca sobre las máquinas de deformación (Figura 4).

Figura 4. Marco de madera y amarres de caucho. A) Marco de madera y B) Marco armado con los amarres de caucho sobre la máquina de deformación.



Una vez calculado el volumen de la capa de arcilla-agua y teniendo ya establecido la densidad de la mezcla que se va modelar, se procede a calcular la cantidad de masa total de la mezcla despejandolo de la formula de densidad y así determinar los contenidos en gramos de agua y arcilla en polvo.

Ejemplo: volumen de la capa $18\text{cm} \times 12\text{cm} \times 4\text{cm} = 864\text{ cm}^3$

$$\rho = m / v$$

tenemos un volumen de la capa de 864 cm^3

el valor de la densidad se da con la que queremos modelar por ejemplo 1.6 gr/cm^3

tenemos ρ y v hallamos la masa de la mezcla $= m = \rho \cdot v$; $1.6\text{ gr/cm}^3 \times 864\text{ cm}^3$

$= 1382.4\text{ gr}$ masa total de la mezcla de agua + arcilla en polvo.

Luego determinamos el % de agua en la mezcla a modelar, para estos ensayos se determino un rango de 45% a 48% del total de la masa de la mezcla, en este ejemplo se realiza con un 45% de contenido de agua en la mezcla el cual lo multiplicamos por el total de la masa de la mezcla, donde encontramos que:

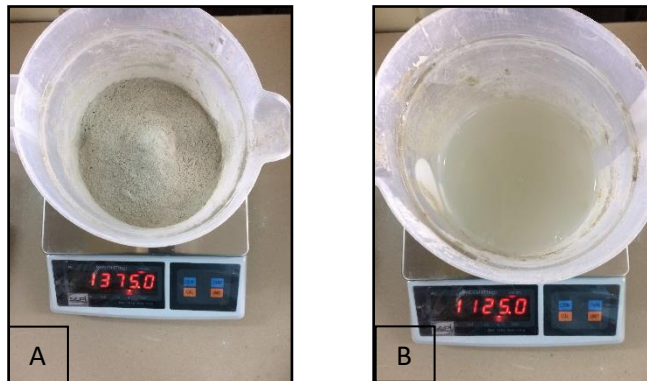
$$0.45 \times 1382.4\text{ gr} = \mathbf{622.08\text{ gr de agua}},$$

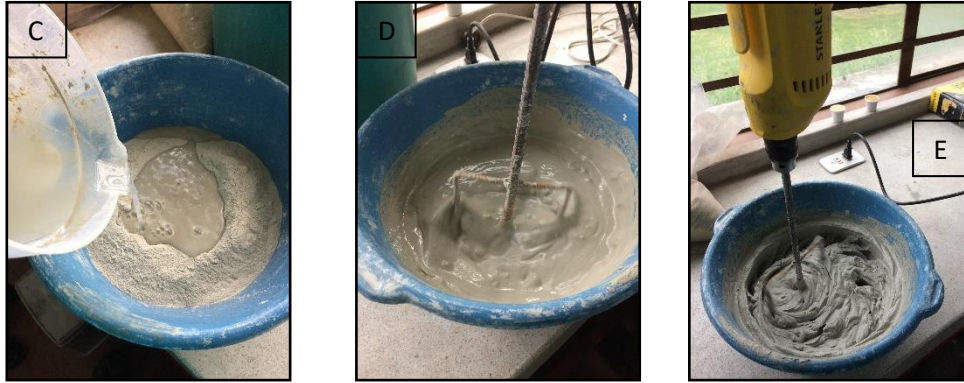
El contenido de arcilla en polvo seria:

$$1382.4\text{ gr (peso total de la mezcla)} - 622.08 = \mathbf{760.62\text{ gr}}$$

Pesamos por separado el agua y la arcilla en polvo (Figura 5) y luego mezclamos vigorosamente por 20 minutos, al total del peso calculado de la mezcla se le debe sumar 100 o 150 gr teniendo en cuenta las pérdidas de material durante la preparación y no quedar cortos de material al momento del llenado del marco de madera.

Figura 5. Preparación de las mezclas. A y B pesaje de arcilla en polvo y agua, C, D y E mezcla de agua y arcilla.



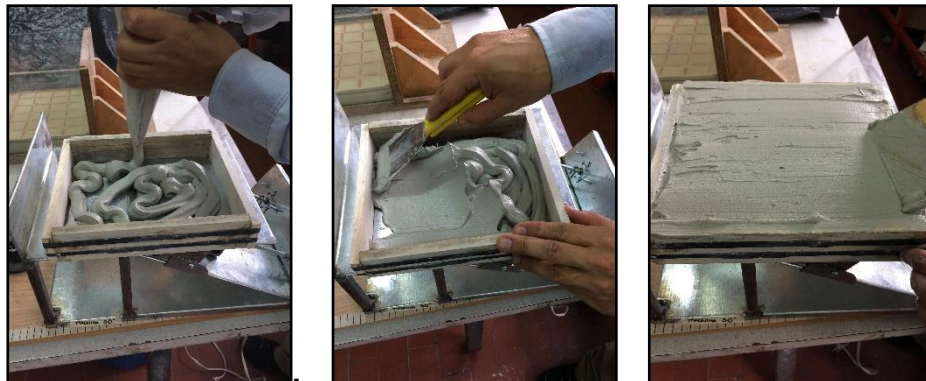


Se aconseja mezclar por un intervalo mínimo de 20 minutos para obtener una pasta homogénea y obtener una consistencia como de crema chantilli de bizcochería, donde la pasta fluye muy poco y se deja trabajar fácilmente.

3. Ajuste de las capas y colocación de marcadores.

En estos ensayos se utilizaron dos métodos de colocación de las mezclas en los moldes: 1) con la ayuda de una manga de pastelería y ii) colocando la mezcla directamente con la ayuda de palas plásticas y espátulas, en ambos casos se trata de colocar las mezclas lo más homogéneamente posible sin dejar espacios dentro de la mezcla (Figura 6).

Figura 6. Colocación de las mezclas en los marcos.



Antes de colocar el molde vacío y llenarlo con la mezcla se aconseja dejarlo lo más cercano al borde de la parte superior de las máquinas, para después poder arreglar (perfilar) la cara que va a quedar para la colocación de los marcadores (horizontales y circulares) y posterior registro fotográfico.

Una vez terminado el llenado del molde con la mezcla de arcilla se deja reposar por un día para que la mezcla se homogenice y rellene si hay espacios vacíos o discontinuidades dentro de la pasta.

Al día siguiente (o mínimo 12 horas) se retiran con mucho cuidado los cauchos que sostienen el armazón y también las tablas laterales del marco tratando al mínimo de perturbar la mezcla y generar imperfecciones dentro y fuera de la mezcla.

Luego con una espátula o llana plástica se alisan las partes laterales y superior de la pasta o torta que se forma, para luego colocar los marcadores horizontales o circulares.

Los marcadores horizontales se pueden realizar con la punta de un alfiler o aguja, haciendo líneas muy superficiales en la superficie de la capa.

Los marcadores circulares se pueden hacer con un cilindro metálico o plástico de 1 cm de diámetro y de 10 a 15 cm de largo para poderlo manejarlo más fácilmente. (Figura 4.2 A del texto).

4. Otros materiales.

Figura 7. Materiales para la preparación de las mezclas. 1) Balde plástico, 2) pala metálica, 3) espátula, 4) manga de pastelería, 5) espátula plástica, 6) palustre pequeño, 7) envase plástico con capacidad de 3 litros o más y 8) envase plástico graduado de un litro.



Figura 8. Materiales para tomar el tiempo y otros.

