



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**INFLUENCIA DE LA INYECCIÓN DE MAGMAS EN CUENCAS
INVERTIDAS: UNA APROXIMACIÓN POR MEDIO DE MODELACIÓN
ANALÓGICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

SEBASTIÁN FELIPE VILLARROEL BUSTAMANTE

PROFESORA GUÍA:
LUISA DEL CARMEN PINTO LINCOÑIR

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CÉSAR ARRIAGADA ORTEGA
REYNALDO CHARRIER GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE: Geólogo
POR: Sebastián Villarroel Bustamante
FECHA: 15 de noviembre de 2016
PROFESORA GUÍA: Luisa Pinto Lincoñir

INFLUENCIA DE LA INYECCIÓN DE MAGMAS EN CUENCAS INVERTIDAS: UNA APROXIMACIÓN POR MEDIO DE MODELACIÓN ANALÓGICA

Estudios de modelación analógica han mostrado que factores tales como el ángulo de oblicuidad y la carga sedimentaria afectan la deformación en ambientes de inversión tectónica de cuencas. Otros estudios de modelación analógica han mostrado que la inyección de magmas en la corteza frágil influye en la deformación durante la compresión y extensión. Sin embargo, hasta ahora no se ha analizado el proceso de inversión con inyección de fluidos de baja viscosidad por medio de modelación analógica. Por lo tanto, el presente trabajo analizó esta relación, variando la temporalidad y la velocidad de inyección de fluidos.

Para lograr este objetivo, el presente estudio consideró dos etapas: 1) el desarrollo de un dispositivo y pruebas de materiales que permitieran la modelación planteada; 2) la realización de modelos análogos con ambos procesos, y su aplicación a un caso real. El dispositivo incluyó la posibilidad de realizar extensión, compresión oblicua e inyección de fluido. Se trabajó con una mezcla de arena de cuarzo muy fina y microesferas de vidrio para modelar la corteza frágil y permitir la inyección del fluido similar al magma. Este fluido corresponde a un aceite hidrogenado de coco de baja viscosidad.

La determinación de la mezcla adecuada de cuarzo molido y microesferas de vidrio, y los valores de velocidad de extensión, compresión e inyección para la modelación se logró mediante una serie de 3 modelos de inversión sin inyección, y una serie estática de 8 modelos con inyección de fluidos. Una vez fijados estos valores se modeló la inversión de cuenca con inyección de magma en dos series: alta y baja velocidad de inyección. Dentro de ellas se varió la temporalidad de la inyección: antes, durante y posterior a la inversión tectónica.

Los resultados de la modelación indican que el fluido inyectado influye en la deformación, principalmente en los modelos donde este se inyecta durante la inversión tectónica: se generan patrones complejos de estructuras, y varía la forma en la que se distribuye el acortamiento en el sistema. A su vez, la forma del intrusivo es controlada por la presencia de estructuras activas, por las que este se canaliza. Para los modelos con inyección posterior a la inversión, el fluido asciende de manera más dispersa.

Los resultados fueron aplicados a la Cuenca Extensional de Abanico de los Andes Centrales (33°-36°S), la cual fue invertida en el Mioceno temprano, y las dos franjas de intrusivos que se encuentran en ella. Estos permitieron postular que: a) La franja intrusiva del Mioceno inferior, de emplazamiento sintectónico a la inversión de Abanico, tendría un control estructural que la localiza en la traza del Sistema de Falla San Ramón; b) la franja intrusiva del Mioceno medio a superior, de emplazamiento posterior a la inversión tectónica, se encuentra cerca del Sistema de Falla El Diablo, presentando una mayor distribución espacial, por lo que su control estructural no es evidente.

No tengo todo calculado
Ni mi vida resuelta
Solo tengo una sonrisa
Y espero una de vuelta

“La vuelta al mundo”
Calle 13

Agradecimientos

Primero que todo, quiero agradecer a mi profesora guía, Luisa Pinto, por confiar en mí para realizar este trabajo, por su apoyo y orientación durante toda esta etapa. También quiero agradecer a los profesores César Arriagada y Reynaldo Charrier, miembros de la comisión por sus comentarios y ayuda en el desarrollo de este trabajo. Además me gustaría agradecer al profesor Gregory De Pascale y al profesor Osvaldo Carvajal, con quienes compartí varios semestres, y a la profesora Sofía Rebolledo por su paciencia, buena onda y ayuda que me brindó tanto como jefa, como profesora y como persona.

Me gustaría dar las gracias enormemente a Blanca Baccola, por toda su paciencia, ayuda, conversaciones y confianza que compartió conmigo. También agradecer a todos los funcionarios de geología, quienes me han ayudado en más de una ocasión: a Rosita Flores, Verónica Carrasco, William Godoy, Mariela Delgado, Carlos Gómez, Carlos Alvarado, Roberto Valles, Annisa Pizarro. A los funcionarios que han colaborado en el desarrollo de esta memoria: Manuel Cáceres de hidráulica, Maximiliano Aliaga de IDIEM, Carolina Smith de IDIEM. A las tías de la biblioteca, con quienes compartí varios años de mi etapa universitaria: Mariana Peralta, Jovanna González, Claudia Gálvez, Lili Aedo, Rosa Leal, Loreto González, Gloria Mundaca; y Jaque Carabantes, con quien empecé una amistad en la biblioteca y ha seguido hasta ahora. A todos los otros funcionarios, cuyos nombres no sé, pero con quienes he cruzado una palabra y han sido parte también de esta etapa. A mis profesores del colegio, en especial a Blanca Galleguillos, Masami Kobayashi y Marcela Caquisane, quienes además de buenas profesoras que potenciaron mis ganas por aprender, fueron excelentes personas conmigo y me apoyaron cuando lo necesité.

Agradecer a mis amigos del colegio, Carlos Jiménez y Roberto Ponce por una amistad que ha vencido el paso de los años y las distancias que nos separan; a mis amigos de plan común, Pablo Moreno, Mati Salinas, Valentín Muñoz, Fran Torre, Mabel Espinoza, con quienes inicié esta etapa y compartí muchos buenos momentos. A mis amigos de la geo-generación: Pablo Moreno (de nuevo), Kari Allende, Berni Alvear, Bego Urtubia, Andrés “Negro” Gómez, Juanito Cáceres, Pipe González, Abraham San Juan, Nico Garrido, Rodrigo “Gogo” Castro, Tomás “Chemi” Aldunate, Chiri Pizarro, Cami Vera, entre varios otros con quienes pasé años de estudio, terrenos, carretes y demases. A los cabros de la biblioteca, Bastián Sanhueza, Hugo González y Pablo Moreno (deja de seguirme) por las risas que hacían mucho más amena la pega. A mis amigos de la sala, Kari Allende (de nuevo) y Pancho Encina, con quienes pasé casi todos los días del último (par de) año(s), con todo el estrés, las tallas y toda la convivencia que compartimos este tiempo. A José Bustamante por sus buenos consejos para la modelación analógica. A Seba Herrera e Ítalo Payacán por la ayuda, comentarios e información que compartieron conmigo. También a todos los amigos que he conocido en geo, ya sea haciendo clases, en la sala de memoristas o en el día a día, gracias por la buena onda.

A Katherine, mi compañera de vida, quien ha estado ahí en todo momento para escucharme, aconsejarme y brindarme todo su apoyo; por ayudarme en toda esta etapa, por acompañarme trabajando en la u hasta tarde, y por poder sacarme una sonrisa cuando la necesitaba. Eres la mejor, gracias por todos estos momentos y por todos lo que vendrán en el futuro.

Por último, y los más importantes, a mi familia. A mis abuelos, por todo su sacrificio, que aunque no todos estén acá, sepan que les agradezco mucho; a mis tíos y primos por todo su cariño. Final y especialmente, a mis padres y a mis hermanos, quienes me han dado todo, y me han hecho la persona que soy ahora, por haber estado siempre que los necesité, por darme todo el amor y el apoyo que he necesitado a lo largo de mi vida, sin ustedes no sería nada, ni tampoco hubiese logrado todo esto. Esto es para todos ustedes.

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. FORMULACIÓN DEL ESTUDIO PROPUESTO.....	1
1.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.4. METODOLOGÍA GENERAL	4
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	5
2.1. GENERALIDADES.....	5
2.2. MATERIALES ANÁLOGOS.....	5
2.2.1. CORTEZA FRÁGIL	5
2.2.2. MAGMA	8
2.3. DISPOSITIVO.....	10
2.3.1. MOTOR	11
2.3.2. BOMBA.....	12
2.4. PRUEBAS DE MATERIALES Y VARIACIÓN DE PARÁMETROS	13
2.4.1. PRUEBAS DE ARENA.....	13
2.4.2. PRUEBAS DE ACEITE	14
2.4.3. PRUEBAS DE MOTOR	14
2.4.4. PRUEBAS DE BOMBA	15
2.5. ESCALAMIENTO.....	16
CAPÍTULO 3. RESULTADOS DE MODELOS SEGÚN LA VARIACIÓN INDIVIDUAL DE LOS FACTORES INVERSIÓN E INYECCIÓN.....	21
3.1. MODELACIÓN DE LA INYECCIÓN.....	21
3.1.1. T05I.....	22
3.1.2. T06I2.....	22
3.1.3. T07I.....	25
3.1.4. BNM1	25
3.1.5. BNM2.....	28
3.1.6. NDFB.....	28
3.1.7. MI2.....	31
3.1.8. MI3.....	31
3.2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS MODELOS DE INYECCIÓN DE FLUIDOS SIN DEFORMACIÓN TECTÓNICA.	34
3.2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	35
3.2.2. INFLUENCIA DE LA PROPORCIÓN DE MICROESFERAS Y HARINA DE CUARZO (ME:HC)	35
3.2.3. INFLUENCIA DEL TIEMPO TOTAL DE INYECCIÓN	39
3.2.4. INFLUENCIA DE LA TASA DE INYECCIÓN	42
3.3. MODELACIÓN DE LA INVERSIÓN.....	45
3.3.1. T03ME: CASO PURAMENTE EXTENSIONAL	46
3.3.2. T03M2: EXTENSIÓN SEGUIDA DE INVERSIÓN A BAJA VELOCIDAD.....	49
3.3.3. BNI1: EXTENSIÓN SEGUIDA DE INVERSIÓN A VELOCIDAD MEDIA	52
3.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS MODELOS DE DEFORMACIÓN TECTÓNICA SIN INYECCIÓN DE FLUIDOS.	55
3.4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	56
3.4.2. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE INVERSIÓN	56
3.4.2.1. INFLUENCIA SOBRE LA DEFORMACIÓN EN SUPERFICIE	57
3.4.2.2. INFLUENCIA SOBRE EL DESARROLLO DE ESTRUCTURAS.....	58
CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE MODELOS SEGÚN LA COMBINACIÓN DE INVERSIÓN TECTÓNICA E INYECCIÓN DE FLUIDOS.....	60
4.1. CASOS BASE.....	61
4.1.1. NICD.....	61
4.1.2. BVND3.....	64
4.1.3. AVND.....	64
4.2. SERIE DE BAJA VELOCIDAD DE INYECCIÓN	67
4.2.1. BVAD	67
4.2.2. BVPD.....	70

4.2.3.	BVSD	73
4.3.	SERIE DE ALTA VELOCIDAD DE INYECCIÓN	76
4.3.1.	AVAD	76
4.3.2.	AVPD	79
4.3.3.	AVSD	82
4.4.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS MODELOS INVERSIÓN TECTÓNICA E INYECCIÓN DE FLUIDOS.....	85
4.4.1.	CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	87
4.4.2.	INFLUENCIA DE LA COMBINACIÓN DE INYECCIÓN E INVERSIÓN TECTÓNICA.....	87
4.4.2.1.	INFLUENCIA SOBRE LA DEFORMACIÓN EN SUPERFICIE	87
4.4.2.2.	INFLUENCIA SOBRE EL DESARROLLO DE ESTRUCTURAS.....	97
4.4.2.3.	INFLUENCIA SOBRE LA MORFOLOGÍA DEL INTRUSIVO	100
CAPÍTULO 5. IMPORTANCIA DE LA MODELACIÓN ANALÓGICA DE INVERSIÓN TECTÓNICA CON INYECCIÓN DE FLUIDOS DE BAJA VISCOSIDAD EN LA TECTÓNICA ANDINA DE CHILE CENTRAL		
.....		103
5.1.	RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA	103
5.1.1.	ANTECEDENTES GENERALES	103
5.1.2.	MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	103
5.1.2.1.	ROCAS ESTRATIFICADAS (CENOZOICAS).....	103
5.1.2.2.	ROCAS INTRUSIVAS	105
5.1.2.3.	ESTRUCTURAS	106
5.1.3.	DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA EXTENSIONAL DE ABANICO.....	108
5.1.4.	INVERSIÓN TECTÓNICA DE LA CUENCA	108
5.1.5.	ETAPAS POSTERIORES A LA INVERSIÓN	110
5.2.	DISCUSIÓN SOBRE LA APLICACIÓN DE LA MODELACIÓN ANALÓGICA AL CASO DE LA CUENCA DE ABANICO.....	111
5.2.1.	APLICACIÓN A LA CUENCA EXTENSIONAL	111
5.2.2.	APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN A LA INVERSIÓN TECTÓNICA CENOZOICA EN CHILE CENTRAL	112
5.3.	LIMITACIONES EN LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS.....	117
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		119
6.1.	SOBRE LOS MODELOS CON VARIACIÓN INDIVIDUAL DE INVERSIÓN E INYECCIÓN.....	119
6.2.	SOBRE LOS MODELOS CON VARIACIÓN COMBINADA DE INVERSIÓN E INYECCIÓN.....	120
6.3.	SOBRE LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS A LA CUENCA DE ABANICO.....	121
6.4.	RECOMENDACIONES	122
BIBLIOGRAFÍA		123
ANEXOS		137
ANEXO 1: DETALLE DE LOS MODELOS REALIZADOS.....		138
A1.1.	SERIE T01.....	139
A1.2.	SERIE T02.....	139
A1.3.	SERIE T03.....	140
A1.4.	SERIE T04.....	144
A1.5.	SERIE T05.....	144
A1.6.	SERIE T06.....	145
A1.7.	SERIE T07.....	146
A1.8.	SERIE BN.....	147
A1.9.	SERIE NDFB.....	148
A1.10.	SERIE MI.....	149
A1.11.	SERIE BV	151

Índice de tablas

TABLA 2.1 DATOS DE LOS MATERIALES ANÁLOGOS A LA CORTEZA FRÁGIL ENTRE LA BIBLIOGRAFÍA (GALLAND ET AL., 2006) Y EL PRESENTE TRABAJO.	7
TABLA 2.2 RESULTADO DE TAMIZAJE DE LOS DOS TIPOS DE MICROESFERAS.....	7
TABLA 2.3 ESPECIFICACIONES Y PROPIEDADES DEL MOTOR UTILIZADO	12
TABLA 2.4 DATOS DE LA DURACIÓN DE LA EXTENSIÓN (DISTANCIA NETA: 20 MM) E INVERSIÓN (DISTANCIA NETA: 40 MM), Y DE LA VELOCIDAD DEL PISTÓN PARA CADA MODELO SEGÚN EL AMPERAJE DEL MOTOR.....	15
TABLA 2.5 RESUMEN DEL ESCALAMIENTO REALIZADO EN ESTE TRABAJO.....	20
TABLA 3.1 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE INYECCIÓN DE FLUIDO SIN DEFORMACIÓN TECTÓNICA.	35
TABLA 3.2 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE INVERSIÓN TECTÓNICA.....	56
TABLA 3.3 AGRUPACIÓN DE LAS FALLAS NUEVAS SEGÚN SU MANTEO (LEVE, MODERADO O ALTO), TIPO (I: INVERSA; R: RUMBO) Y LONGITUD EN MM.....	59
TABLA 4.1 RESUMEN DE LOS MODELOS ANÁLOGOS REALIZADOS EN ESTE ÍTEM.	60
TABLA 4.2 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS QUE COMBINAN INYECCIÓN DE FLUIDO E INVERSIÓN TECTÓNICA.	86
TABLA 4.3 AGRUPACIÓN DE LAS FALLAS NUEVAS SEGÚN SU MANTEO (LEVE, MODERADO O ALTO), TIPO (I: INVERSA; R: RUMBO) Y LONGITUD EN MM.....	99
TABLA A.1: DETALLE DE TODOS LOS MODELOS REALIZADOS EN EL PRESENTE TRABAJO.....	138

Índice de figuras

FIGURA 1.1 GRÁFICOS DE TASA DE CONVERGENCIA PROMEDIO PARA LOS 30°S Y 40°S (A) Y DE ÁNGULO PROMEDIO DE OBLICUIDAD PARA LOS 30°S (B).	2
FIGURA 2.1 FOTOGRAFÍA EN MICROSCOPIO DE LAS MICROESFERAS UTILIZADAS EN EL PRESENTE TRABAJO.	6
FIGURA 2.2 HISTOGRAMA DEL TAMAÑO DE GRANO PARA LAS MICROESFERAS (A) EN VOLUMEN Y (B) EN PESO.	8
FIGURA 2.3 GRÁFICO DE VISCOSIDAD [PA S] EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA [°C] (MODIFICADO DE GALLAND <i>ET AL.</i> , 2006).	9
FIGURA 2.4 GRÁFICO DEL MANTEO DE LAS FALLAS EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE OBLICUIDAD. MODIFICADO DE BRUN Y NALPAS (1996)..	10
FIGURA 2.5 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL DISPOSITIVO FINAL GENERADO EN ESTE TRABAJO.	11
FIGURA 2.6 FOTO DEL MOTOR UTILIZADO EN LOS EXPERIMENTOS DEL PRESENTE TRABAJO.	12
FIGURA 2.7 FOTO DE LA BOMBA UTILIZADA EN ESTE TRABAJO.	12
FIGURA 3.1 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE (A) GALLAND <i>ET AL.</i> (2007, MODIFICADO) Y (B) ESTE TRABAJO.	21
FIGURA 3.2 RESUMEN EXPERIMENTO T05I.	23
FIGURA 3.3 RESUMEN EXPERIMENTO T06I2.	24
FIGURA 3.4 RESUMEN EXPERIMENTO T07I.	26
FIGURA 3.5 RESUMEN EXPERIMENTO BNM1.	27
FIGURA 3.6 RESUMEN EXPERIMENTO BNM2.	29
FIGURA 3.7 RESUMEN EXPERIMENTO NDFB.	30
FIGURA 3.8 RESUMEN EXPERIMENTO MI2.	32
FIGURA 3.9 RESUMEN EXPERIMENTO MI3.	33
FIGURA 3.10 ESQUEMA RESUMEN DE LAS ESTRUCTURAS Y LA MORFOLOGÍA DEL INTRUSIVO Y DEL DOMO GENERADO EN LOS MODELOS DE INYECCIÓN DE FLUIDO SIN DEFORMACIÓN TECTÓNICA.	34
FIGURA 3.11 GRÁFICO DE LA ALTURA DEL HALO DEL INTRUSIVO (A) Y DE LA RAZÓN ENTRE EL LARGO PROMEDIO (OP) Y EL ALTO (H) DEL DOMO (B) EN FUNCIÓN DE LA PROPORCIÓN DE MICROESFERAS EN LA MEZCLA.	36
FIGURA 3.12 GRÁFICO DE LA TEMPORALIDAD DEL ALZAMIENTO (BARRAS CON FRANJAS) Y DE LAS FALLAS PRIMARIAS (BARRAS SÓLIDAS) DEL DOMO EN FUNCIÓN DE LA PROPORCIÓN DE MICROESFERAS EN LA MEZCLA.	36
FIGURA 3.13 SERIE EN PERFIL DE LOS MODELOS DE INYECCIÓN DE FLUIDOS SIN DEFORMACIÓN TECTÓNICA, ORDENADOS DE MENOR (1) A MAYOR (8) PROPORCIÓN DE MICROESFERAS EN LA MEZCLA.	37
FIGURA 3.14 SERIE EN PLANTA DE LOS MODELOS DE INYECCIÓN DE FLUIDOS SIN DEFORMACIÓN TECTÓNICA, ORDENADOS DE MENOR (1) A MAYOR (8) PROPORCIÓN DE MICROESFERAS EN LA MEZCLA.	38
FIGURA 3.15 GRÁFICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE INYECCIÓN DE (A) LAS DIMENSIONES DOB (BARRAS CON FRANJAS) Y DPB (BARRAS SÓLIDAS); (B) DE LA RAZÓN ENTRE ELLAS; (C) DE LA RAZÓN OP/H DEL DOMO; Y (D) DE LA RAZÓN IOB DE INTRUSIVO.	39
FIGURA 3.16 SERIE EN PERFIL DE LOS MODELOS DE INYECCIÓN DE FLUIDOS SIN DEFORMACIÓN TECTÓNICA, ORDENADOS DE MENOR (1) A MAYOR (8) TIEMPO DE INYECCIÓN.	40
FIGURA 3.17 SERIE EN PLANTA DE LOS MODELOS DE INYECCIÓN DE FLUIDOS SIN DEFORMACIÓN TECTÓNICA, ORDENADOS DE MENOR (1) A MAYOR (8) TIEMPO DE INYECCIÓN.	41
FIGURA 3.18 SERIE EN PERFIL DE LOS MODELOS DE INYECCIÓN DE FLUIDOS SIN DEFORMACIÓN TECTÓNICA, ORDENADOS DE MENOR (1) A MAYOR (8) TASA DE INYECCIÓN DEL FLUIDO.	43
FIGURA 3.19 SERIE EN PLANTA DE LOS MODELOS DE INYECCIÓN DE FLUIDOS SIN DEFORMACIÓN TECTÓNICA, ORDENADOS DE MENOR (1) A MAYOR (8) TASA DE INYECCIÓN DEL FLUIDO.	44
FIGURA 3.20 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE (A) MUÑOZ (2007, MODIFICADO) Y (B) ESTE TRABAJO (CASO GENÉRICO PARA AMBAS VELOCIDADES DE CONVERGENCIA).	45
FIGURA 3.21 ESQUEMA DEL MOVIMIENTO QUE REALIZÓ EL PISTÓN EN LOS MODELOS DE INVERSIÓN TECTÓNICA.	46
FIGURA 3.22 FOTOS RESUMEN DEL EXPERIMENTO T03ME: CASO BASE DE SOLO EXTENSIÓN.	47
FIGURA 3.23 ESQUEMAS RESUMEN DEL EXPERIMENTO T03ME: CASO BASE DE SOLO EXTENSIÓN.	48

FIGURA 3.24 FOTOS RESUMEN DEL EXPERIMENTO T03M2: MODELO DE INVERSIÓN TECTÓNICA A BAJA VELOCIDAD.	50
FIGURA 3.25 ESQUEMAS RESUMEN DEL EXPERIMENTO T03M2: MODELO DE INVERSIÓN TECTÓNICA A BAJA VELOCIDAD.	51
FIGURA 3.26 FOTOS RESUMEN DEL EXPERIMENTO BNI1: MODELO DE INVERSIÓN TECTÓNICA A VELOCIDAD MEDIA.	53
FIGURA 3.27 ESQUEMAS RESUMEN DEL EXPERIMENTO BNI1: MODELO DE INVERSIÓN TECTÓNICA A VELOCIDAD MEDIA.	54
FIGURA 3.28 ESQUEMA RESUMEN DE LAS ESTRUCTURAS EN LOS MODELOS DE ESTA SERIE (A) EN PLANTA Y (B) EN PERFIL.	55
FIGURA 3.29 ESQUEMA GENÉRICO DE LAS ÁREAS ALZADAS EN LA ZONA W Y E DE LA CUENCA.	55
FIGURA 3.30 GRÁFICOS DE LA DEFORMACIÓN EN SUPERFICIE PARA CADA MODELO (AMBOS EN MM): (A) LA ELEVACIÓN MÁXIMA DE LA SUPERFICIE, MEDIDA DESDE SU ALTURA INICIAL; Y (B) EL ANCHO MÁXIMO DE LA DEFORMACIÓN EN SUPERFICIE.	57
FIGURA 3.31 GRÁFICO DE LA DIFERENCIA PROMEDIO ENTRE LAS ÁREAS ALZADAS EN EL BORDE ORIENTAL Y OCCIDENTAL DE LA CUENCA [mm^2].	58
FIGURA 3.32 GRÁFICOS DE LAS FALLAS (A) REACTIVADAS Y (B) NUEVAS PARA CADA MODELO.	58
FIGURA 3.33 GRÁFICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE MANTEOS.	59
FIGURA 4.1 FOTOS DEL MODELO BASE NICD: CASO BASE CON INVERSIÓN TECTÓNICA, PERO SIN INYECCIÓN DE FLUIDOS.	62
FIGURA 4.2 ESQUEMAS DEL MODELO BASE NICD: CASO BASE CON INVERSIÓN TECTÓNICA, PERO SIN INYECCIÓN DE FLUIDOS.	63
FIGURA 4.3 FOTOS DE LOS MODELOS BASE BVND3 Y AVND: CASOS BASE SIN INVERSIÓN, SOLO CON INYECCIÓN A BAJA Y ALTA VELOCIDAD, RESPECTIVAMENTE.	65
FIGURA 4.4 ESQUEMAS DE LOS MODELOS BASE BVND3 Y AVND: CASOS BASE SIN INVERSIÓN, SOLO CON INYECCIÓN A BAJA Y ALTA VELOCIDAD, RESPECTIVAMENTE.	66
FIGURA 4.5 FOTOS DEL MODELO BVAD: SERIE DE BAJA VELOCIDAD DE INYECCIÓN ANTERIOR A LA INVERSIÓN TECTÓNICA.	68
FIGURA 4.6 ESQUEMAS DEL MODELO BVAD: SERIE DE BAJA VELOCIDAD DE INYECCIÓN ANTERIOR A LA INVERSIÓN TECTÓNICA.	69
FIGURA 4.7 FOTOS DEL MODELO BVPD: SERIE DE BAJA VELOCIDAD DE INYECCIÓN POSTERIOR A LA INVERSIÓN TECTÓNICA.	71
FIGURA 4.8 ESQUEMAS DEL MODELO BVPD: SERIE DE BAJA VELOCIDAD DE INYECCIÓN POSTERIOR A LA INVERSIÓN TECTÓNICA.	72
FIGURA 4.9 FOTOS DEL MODELO BVSD: SERIE DE BAJA VELOCIDAD DE INYECCIÓN DURANTE LA INVERSIÓN TECTÓNICA.	74
FIGURA 4.10 ESQUEMAS DEL MODELO BVSD: SERIE DE BAJA VELOCIDAD DE INYECCIÓN DURANTE LA INVERSIÓN TECTÓNICA.	75
FIGURA 4.11 FOTOS DEL MODELO AVAD: SERIE DE ALTA VELOCIDAD DE INYECCIÓN ANTERIOR A LA INVERSIÓN TECTÓNICA.	77
FIGURA 4.12 ESQUEMAS DEL MODELO AVAD: SERIE DE ALTA VELOCIDAD DE INYECCIÓN ANTERIOR A LA INVERSIÓN TECTÓNICA.	78
FIGURA 4.13 FOTOS DEL MODELO AVPD: SERIE DE ALTA VELOCIDAD DE INYECCIÓN POSTERIOR A LA INVERSIÓN TECTÓNICA.	80
FIGURA 4.14 ESQUEMAS DEL MODELO AVPD: SERIE DE ALTA VELOCIDAD DE INYECCIÓN POSTERIOR A LA INVERSIÓN TECTÓNICA.	81
FIGURA 4.15 FOTOS DEL MODELO AVSD: SERIE DE ALTA VELOCIDAD DE INYECCIÓN DURANTE LA INVERSIÓN TECTÓNICA.	83
FIGURA 4.16 ESQUEMAS DEL MODELO AVSD: SERIE DE ALTA VELOCIDAD DE INYECCIÓN DURANTE LA INVERSIÓN TECTÓNICA.	84

FIGURA 4.17 ESQUEMA RESUMEN DE LAS ESTRUCTURAS Y DEL INTRUSIVO EN UN MODELO CON INYECCIÓN POSTERIOR A LA INVERSIÓN TECTÓNICA EN PLANTA (A) Y EN PERFIL (B).....	85
FIGURA 4.18 GRÁFICOS DE LA DEFORMACIÓN EN SUPERFICIE PARA CADA MODELO (AMBOS EN MM): (A) LA ELEVACIÓN MÁXIMA DE LA SUPERFICIE; Y (B) EL ANCHO MÁXIMO DE LA DEFORMACIÓN EN SUPERFICIE.....	89
FIGURA 4.19 GRÁFICOS DE LA DIFERENCIA ENTRE LAS ÁREAS ALZADAS EN EL BORDE ORIENTAL Y OCCIDENTAL DE LA CUENCA (AMBAS EN <i>mm</i> ²): (A) PARA CADA PERFIL Y (B) PROMEDIO DE LOS PERFILES B, C Y D EN CADA MODELO.	90
FIGURA 4.20 MAPAS DEL DESPLAZAMIENTO TOTAL.	91
FIGURA 4.21 MAPAS DEL DESPLAZAMIENTO DIRECCIÓN E-W.	94
FIGURA 4.22 MAPAS DEL ACORTAMIENTO EN DIRECCIÓN E-W.....	95
FIGURA 4.23 MAPAS DE LA ROTACIÓN DE LOS MARCADORES.....	96
FIGURA 4.24 GRÁFICOS DE LAS FALLAS (A) REACTIVADAS Y (B) NUEVAS PARA CADA MODELO.	98
FIGURA 4.25 GRÁFICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE MANTEOS PARA LOS MODELOS FINALES.....	99
FIGURA 4.26 GRÁFICOS DE (A) LA ALTURA, (B) EL LARGO, (C) EL ANCHO APROXIMADO Y (D) EL PROMEDIO DE LAS DIMENSIONES EN PLANTA DEL HALO DEL INTRUSIVO.	102
FIGURA 5.1 MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE LA CUENCA DE ABANICO (MODIFICADO DE MUÑOZ <i>ET AL.</i> , 2014).	107
FIGURA 5.2 ESQUEMA E-W COMPARATIVO ENTRE EL MODELO DE EVOLUCIÓN PROPUESTO POR FOCK (2005, MODIFICADO) Y LOS MODELOS ANÁLOGOS DE EXTENSIÓN OBTENIDOS EN ESTE TRABAJO.	112
FIGURA 5.3 MAPA GEOLÓGICO DEL ÁREA DE LA CUENCA DE ABANICO (FOCK, 2005; MODIFICADO).	115
FIGURA 5.4 ESQUEMA E-W COMPARATIVO ENTRE EL MODELO DE EVOLUCIÓN DE LA ETAPA COMPRESIVA PROPUESTO POR FOCK (2005, MODIFICADO) Y LOS MODELOS ANÁLOGOS DE INVERSIÓN TECTÓNICA OBTENIDOS EN ESTE TRABAJO.	116
FIGURA A1 MODELO T01M2: SOLO EXTENSIÓN (2 CM).....	139
FIGURA A2 MODELO T02I (SOLO INYECCIÓN AL 10% DE LA BOMBA)	139
FIGURA A3 MODELO T03I (SOLO INYECCIÓN AL 10% DE LA BOMBA)	140
FIGURA A4 MODELO T03I2 (SOLO INYECCIÓN AL 10% DE LA BOMBA)	140
FIGURA A5 MODELO T03I3 (SOLO INYECCIÓN AL 20% DE LA BOMBA)	141
FIGURA A6 MODELO T03I4 (SOLO INYECCIÓN AL 15% DE LA BOMBA)	141
FIGURA A7 MODELO T03M2 (SOLO INVERSIÓN TECTÓNICA)	142
FIGURA A8 MODELO T03ME (SOLO EXTENSIÓN)	143
FIGURA A9 MODELO T03IK (INYECCIÓN DE UN ACEITE SUSTITUTO 1)	143
FIGURA A10 MODELO T04I (INYECCIÓN EN UN MODELO DE SOLO HARINA DE CUARZO).....	144
FIGURA A11 MODELO T05IA (INYECCIÓN DE UN ACEITE SUSTITUTO 2).....	144
FIGURA A12 MODELO T05I (SOLO INYECCIÓN AL 15% DE LA BOMBA)	145
FIGURA A13 MODELO T06I (SOLO INYECCIÓN AL 15% DE LA BOMBA)	145
FIGURA A14 MODELO T06I2 (SOLO INYECCIÓN AL 10% DE LA BOMBA)	146
FIGURA A15 MODELO T07I (SOLO INYECCIÓN AL 20% DE LA BOMBA)	146
FIGURA A16 MODELO BNI1 (SOLO INVERSIÓN TECTÓNICA)	147
FIGURA A17 MODELO BNM1 (SOLO INYECCIÓN AL 15% DE LA BOMBA).....	147
FIGURA A18 MODELO BNM2 (SOLO INYECCIÓN AL 30% DE LA BOMBA).....	148
FIGURA A19 MODELO NDFB (SOLO INYECCIÓN AL 15% DE LA BOMBA).....	148
FIGURA A20 MODELO NDFB2 (SOLO INYECCIÓN AL 20% DE LA BOMBA).....	149
FIGURA A21 MODELO MI1 (SOLO INYECCIÓN AL 15% DE LA BOMBA).....	149
FIGURA A22 MODELO MI2 (SOLO INYECCIÓN AL 15% DE LA BOMBA).....	150
FIGURA A23 MODELO NDFB (SOLO INYECCIÓN AL 10% DE LA BOMBA).....	150
FIGURA A24 MODELO BVND (SOLO INYECCIÓN AL 10% DE LA BOMBA).....	151
FIGURA A25 MODELO BVND2 (SOLO INYECCIÓN AL 10% DE LA BOMBA).....	151

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Formulación del estudio propuesto

A lo largo de la historia geológica de Chile, se han producido variaciones del ambiente tectónico, como lo son los ciclos de extensión y compresión del Jurásico-Cretácico y del Cenozoico (Charrier *et al.*, 1994, 1996, 1997; Godoy y Lara, 1994). Se ha propuesto que estas variaciones habrían sido causadas por el cambio en la velocidad de convergencia de las placas tectónicas (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza, 1998). Esto ha influido en diferentes procesos de deformación, como la inversión tectónica de cuencas (Charrier *et al.*, 2002). Uno de los casos interesantes en Chile corresponde a la inversión de la cuenca extensional de Abanico en los Andes centrales de Chile, entre los 33°S y 36°S, producida en el Mioceno Inferior (Charrier *et al.*, 1994, 1996, 2000, 2002, 2005; Godoy y Lara, 1994; Kay y Kurtz, 1995; Godoy *et al.*, 1999; Jordan *et al.*, 2001; Giambiagi *et al.*, 2003a, 2003b; Fock, 2005; Muñoz-Sáez *et al.*, 2014).

Para el caso de la Cuenca de Abanico, no se conoce con certeza la existencia de una relación directa de tipo causa-efecto entre las variaciones de la tasa de convergencia de las placas y los períodos extensivos y compresivos. Sin embargo, el desarrollo extensional de esta cuenca coincide con un período de baja tasa de convergencia (6 cm/año) durante el Eoceno-Oligoceno (37-23 Ma), seguido de un período de aumento en esta tasa (hasta 15 cm/año) en el Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (23-16 Ma) (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza, 1998), el que también coincide con una fase de compresión e inversión de esta cuenca (Figura 1.1) (Charrier *et al.*, 1994, 1996, 2002, 2005; Godoy y Lara, 1994; Jordan *et al.*, 2001; Fock, 2005).

El concepto de inversión tectónica se inició durante el estudio de cuencas marinas petrolíferas (Lamplugh, 1920; Stille, 1924; Pruvost, 1930; Voigt, 1963), pero luego se amplió a otro tipo de ambientes sedimentarios y tectónicos, como aquellos de ambiente continental en regímenes de subducción. Sobre estos estudios, se han realizado una serie de modelos análogos para investigar los factores que afectan la deformación en estos ambientes. Los modelos análogos son una representación simplificada y a pequeña escala de procesos estructurales de deformación que ocurren en la naturaleza (Hubbert, 1937; Ramberg, 1981), orientados a estudiar la influencia de distintos parámetros en la deformación. Estos factores, como la velocidad y/o el ángulo de convergencia, la sedimentación sintectónica o la inyección de fluidos, se pueden variar en los distintos experimentos (Nalpas y Brun, 1993; Nalpas *et al.*, 1995; Brun y Nalpas, 1996; Dubois *et al.*, 2002; Galland *et al.*, 2003, 2006, 2007, 2009; Panien *et al.*, 2005; Pinto *et al.*, 2010).

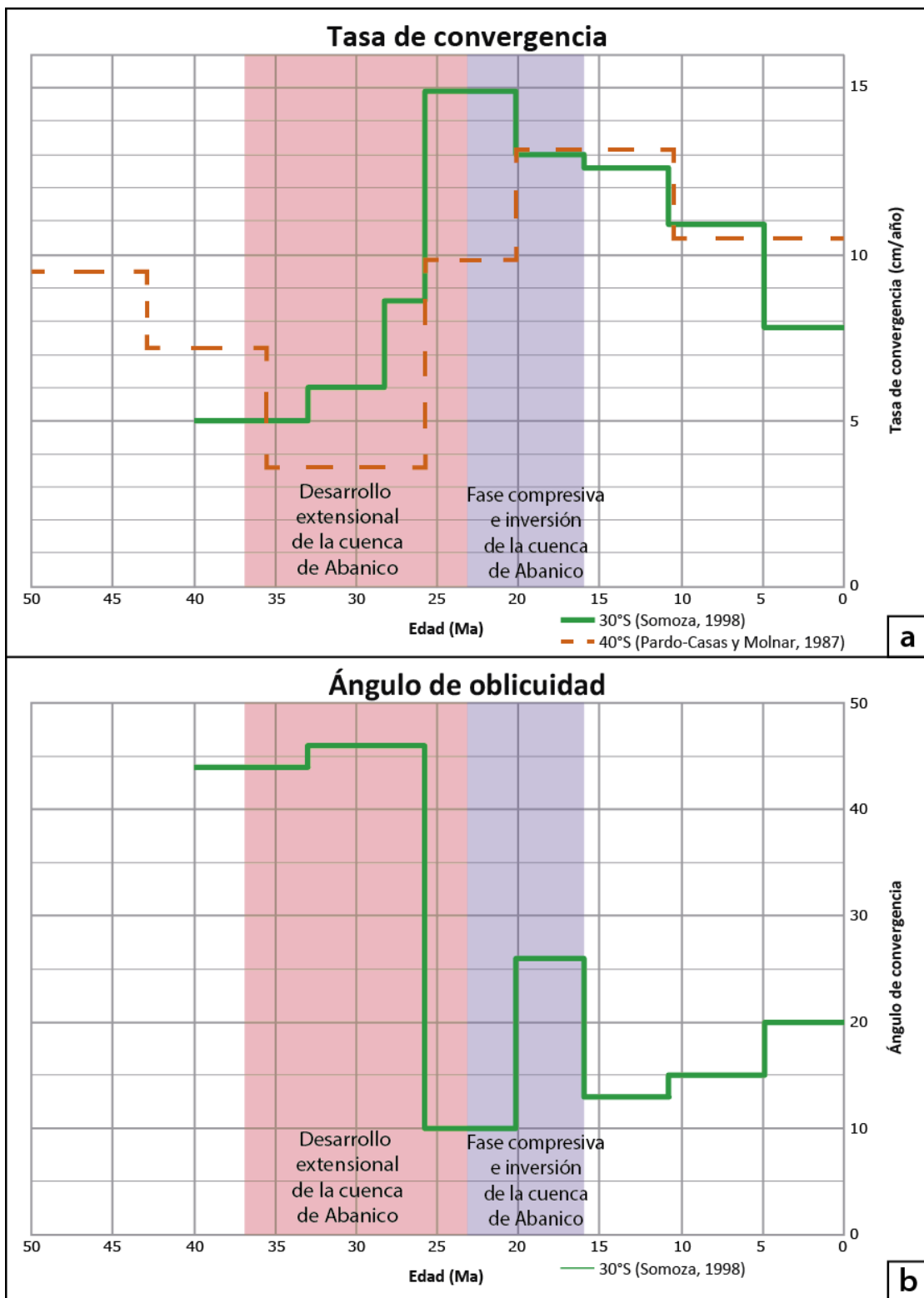


Figura 1.1 Gráficos de tasa de convergencia promedio para los 30°S y 40°S (a) y de ángulo promedio de oblicuidad para los 30°S (b). Se señalan las fases de desarrollo extensional (franja azul) y la de compresión e inversión (franja roja) de la Cuenca Abanico. Datos en línea punteada anaranjada extraídos de Pardo-Casas y Molnar (1987); datos en línea continua verde extraídos de Somoza (1998).

En trabajos previos de modelación de inversión tectónica, se ha analizado la influencia de la carga en la formación de los sistemas estructurales (Pruvost, 1930; Nalpas y Brun, 1993; Nalpas *et al.*, 1995; Brun y Nalpas, 1996; Nalpas, 1996; Dubois *et al.*, 2002; Panien *et al.*, 2005; Del Ventisette *et al.*, 2006; Muñoz, 2007; Pinto *et al.*, 2010; Muñoz-Sáez *et al.*, 2014). Las investigaciones concluyeron que una inversión óptima es generada por una extensión ortogonal al margen, seguida por una compresión oblicua, de ángulo menor a 45° con respecto a las estructuras formadas (Letouzey, 1990; Brun y Nalpas, 1996; Panien *et al.*, 2005; Del Ventisette *et al.*, 2006); y que, si la sedimentación ocurre durante la fase extensional, el efecto de la carga es más significativo a que si lo hiciera durante la compresión (Muñoz, 2007; Pinto *et al.*, 2010; Muñoz-Sáez *et al.*, 2014). Por otra parte, la inyección de fluidos de baja viscosidad se ha analizado para modelos análogos estáticos, de extensión o de compresión ortogonal, los que muestran una influencia de este factor en la formación de estructuras (Galland *et al.*, 2003, 2006, 2007). También se han realizado recientes estudios sobre la inversión tectónica con inyección de fluidos de alta viscosidad (Martínez *et al.*, 2016). Sin embargo, uno de los factores que aún no se ha estudiado, y que resulta interesante de conocer, corresponde a la influencia de fluidos magmáticos de baja viscosidad durante la inversión, esta sea tanto por la tasa de inyección como por su temporalidad.

En este contexto, para este estudio, se propuso un análisis de inversión de cuenca con inyección de fluidos de baja viscosidad por medio de modelos análogos, en los cuales se estudió, de manera sistemática, la influencia de la velocidad de inyección y la temporalidad de esta durante el proceso de inversión de la cuenca. Los resultados obtenidos en el presente trabajo proporcionaron una idea de los efectos que tiene este parámetro en la inversión tectónica de la Cuenca de Abanico y cuencas similares junto con la reactivación de las estructuras en ella presentes.

1.2. Hipótesis de trabajo

La inyección de fluidos en el proceso de inversión de una cuenca es un factor determinante para la reactivación de estructuras preexistentes y la formación de nuevas, lo cual puede ser argumentado por un estudio cualitativo y cuantitativo del efecto de la inyección de fluidos durante distintas etapas de la fase compresiva mediante modelos análogos de inversión de cuenca.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es analizar, mediante la modelación analógica de inversión de cuencas, la influencia de la velocidad de intrusión de magmas y su temporalidad con respecto a la compresión de estructuras preexistentes.

1.3.2. Objetivos específicos

- a. Confeccionar un dispositivo para la modelación analógica que permita analizar la inyección de fluidos en ambiente extensional y compresivo.
- b. Validar los materiales a usar en los modelos análogos.
- c. Identificar, entre los parámetros primarios: volumen inyectado, velocidad de inyección, viscosidad del fluido, velocidad de convergencia y temporalidad de la inyección, el que tenga mayor influencia en el desarrollo y características de las estructuras y de la deformación.
- d. Comparar los resultados obtenidos con casos de cuencas invertidas en la naturaleza; en particular, analizar el caso de la Cuenca Abanico.

1.4. Metodología general

La modelación analógica de inversión tectónica de cuenca se hizo sobre la base de trabajos anteriores de inversión (Muñoz, 2007) y de inyección de fluidos de baja viscosidad en compresión (Galland *et al.*, 2003, 2006, 2007) y en extensión (Galland *et al.*, 2006). En trabajos previos, se han realizado experimentos para validar el escalamiento de este tipo de modelos (Hubbert, 1937; Ramberg, 1981) y de los materiales que en ellos se utilizan (Galland *et al.*, 2003, 2006). Por lo tanto, en el presente trabajo, se usaron materiales similares, y se ajustaron a las necesidades del dispositivo generado, respetando el escalamiento.

Para la inversión, primero se extendió perpendicularmente al margen, y luego se comprimió con un ángulo de convergencia de 30° con respecto al borde (Brun y Nalpas, 1996). En lugar de un hemigraben, se usó el caso de un graben generado por un sistema de fallas planas, similar a lo visto por Muñoz (2007) con dos de estas estructuras, caso ya usado para experimentos análogos de la Cuenca Abanico. Por otra parte, para incorporar el efecto de fluidos, se usó un aceite vegetal que es sólido a temperatura ambiente, pero se vuelve un fluido newtoniano de baja viscosidad a 50°C (densidad 0.9 g cm⁻³ y viscosidad 10⁻² Pa s) (Galland *et al.*, 2003, 2006, 2007, 2009). En lugar de arena, se utilizó una mezcla de microesferas de vidrio y cuarzo molido de grano fino (o “harina de cuarzo”), la que, según lo propuesto por Galland *et al.* (2006), disminuye la percolación del aceite (ver Ítem 2.2.1).

Una vez unidos los modelos de inversión tectónica (Muñoz, 2007) y de inyección de fluidos (Galland *et al.*, 2003, 2006, 2007), se varió la velocidad de inyección, además de su temporalidad con respecto a la inversión tectónica de manera de estudiar cómo se ve afectada la formación de estructuras por este parámetro.

En este trabajo, con el fin de aislar de mejor manera los parámetros a analizar, no se consideraron los factores de erosión, niveles de despegue, ni variaciones reológicas significativas entre las capas del modelo. Sin embargo, sí se realizó sedimentación durante la fase extensional, de modo de mantener la altura del modelo lo más constante posible para que el fluido tenga un mayor espesor que atravesar.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. Generalidades

La modelación analógica se ha utilizado desde fines del siglo XIX como una representación a pequeña escala de fenómenos geológicos naturales que deforman la corteza (Hubbert, 1937; Ramberg, 1981). Este método permite analizar la influencia de algunos parámetros en los procesos geológicos que provocan la geometría y la dinámica de la deformación, tales como velocidades y ángulos de convergencia, erosión o sedimentación durante el movimiento, distintas reologías, etc. (Nalpas y Brun, 1993; McClay y White, 1995; Brun y Nalpas, 1996; Gartrell *et al.*, 2005; Del Ventisette *et al.*, 2006; Muñoz, 2007; Pinto *et al.*, 2010; entre otros).

Las estructuras formadas en modelos análogos son mucho más pequeñas, se desarrollan en un rango de tiempo mucho menor y requieren esfuerzos de menor magnitud al correspondiente a la realidad. Por esto, es importante que el escalamiento sea apropiado para cada modelo y que los materiales utilizados tengan propiedades afines a sus símiles en la naturaleza. Así, la deformación producida en este tipo de experimentos permitiría llegar a conclusiones válidas y aplicables a la escala de la naturaleza (Hubbert, 1937; Ramberg, 1981; Davy y Cobbold, 1991).

2.2. Materiales análogos

2.2.1. Corteza frágil

En trabajos anteriores, se han utilizado diversos materiales para representar la corteza. La corteza frágil ha sido homologada con materiales como arena, arcilla, microesferas de vidrio, etc.; mientras que la corteza dúctil se ha representado con materiales que presenten una alta viscosidad, como lo son la silicona, la plasticina o la miel (Malavielle, 1984; Davy, 1986; Ballard, 1989; Davy y Cobbold, 1991; Martinod, 1991; Gutscher, 1996; entre otros).

En el presente trabajo, se consideró solo la parte frágil de la corteza, es decir, aproximadamente los 10 km superiores de ella. Esta parte superior corresponde a niveles superficiales del basamento o a la cobertura sedimentaria de este. Debido a este comportamiento frágil, la arena es el candidato ideal utilizado normalmente para este tipo de modelación (Faugère y Brun, 1984).

Por otra parte, el factor inyección de fluidos trajo consigo ciertas limitaciones. En la naturaleza, el magma asciende por fracturas en la roca de caja más que por los poros que ella podría tener, por lo que es importante reflejar ese comportamiento preferencial en los modelos a realizar. Algunos de los materiales granulados que se han mencionado anteriormente pueden no representar fielmente la corteza para la evaluación de este parámetro, pues su tamaño de grano permite la percolación de fluidos de baja viscosidad entre sus poros. Es por esto que se hizo necesario considerar una granulometría muy fina, de modo de disminuir lo más posible la permeabilidad del material, y así también la percolación del fluido dentro de la arena, pues esta permeabilidad es proporcional al cuadrado del tamaño de grano (Galland *et al.*, 2006). Otro modo de evitar la percolación es utilizar materiales que tengan una tendencia

hidrofóbica, pero esto conllevaría problemas al momento de humedecer el modelo para realizar cortes transversales.

En consecuencia, se utilizó una arena de cuarzo molido de grano fino, denominada “Harina de cuarzo”. Este polvillo, de diámetro inferior a $75\ \mu\text{m}$, presenta una alta cohesión (valores de referencia según Galland *et al.* (2006) en la Tabla 2.1) y un alto ángulo de fricción interna (valores de referencia según Galland *et al.* (2006) en la Tabla 2.1), por lo que no permite un óptimo desarrollo de estructuras en extensión como las esperadas según trabajos anteriores (Brun y Nalpas, 1996; Panien *et al.*, 2005; Del Ventisette *et al.*, 2006; Muñoz, 2007; Pinto *et al.*, 2010; entre otros), sino que genera fracturas más bien verticales, las que no se adecúan al presente estudio (Figura A1 en Anexo 1).

Para solucionar los problemas de la alta fricción de la harina de cuarzo, se le añadió microesferas de vidrio de granulometría similar (Figura 2.1), cuyos valores de cohesión y de ángulo de fricción son más bajos que los del cuarzo molido (Galland *et al.*, 2006). Esta mezcla presenta valores intermedios en los parámetros mencionados (Tabla 2.1), por lo que es lo suficientemente fina como para disminuir la percolación de fluido y tendría valores de cohesión y ángulo de fricción que permitirían el desarrollo de estructuras extensionales como es esperable.

Se utilizaron dos tipos de microesferas: la primera es una mezcla entre Premix 93 y CQ Promix-AD —de ahora en adelante “microesferas tipo I”—; la segunda corresponde a microesferas MS-MH —de ahora en adelante “microesferas tipo II”. En la Tabla 2.1 se realiza una comparación de las propiedades de los materiales usados por Galland *et al.* (2006) y este trabajo; mientras que en la Tabla 2.2 se muestra la distribución de la granulometría de los dos tipos de microesferas con las que se trabajó; en ella también se ve que ambos tipos presentan una distribución similar de granulometría, y un comportamiento similar también, por lo que se usaron indistintamente para los modelos (Figura 2.2).

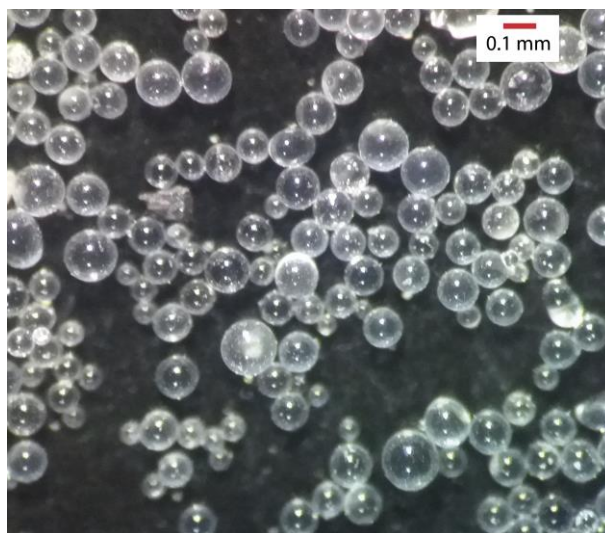


Figura 2.1 Fotografía en microscopio de las microesferas utilizadas en el presente trabajo. La barra roja representa la escala de 0.1 mm. Se puede notar la alta esfericidad y suavidad del material, lo que se ve reflejado en baja cohesión y ángulo de fricción interna (referencias de valores según Galland *et al.* (2006) en la Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Datos de los materiales análogos a la corteza frágil entre la bibliografía (Galland *et al.*, 2006) y el presente trabajo. Se señalan los valores de tamaño de grano (μm), cohesión (Pa), ángulo de fricción interna y densidad (g cm^{-3}).

Propiedad	Microesferas (“mE”)	Harina de cuarzo (“HC”)	Mezcla 20:3 (mE:HC)
Tamaño de grano (μm) ⁽¹⁾	30 ⁽²⁾ -155 ⁽³⁾	20 ⁽²⁾ -75 ⁽³⁾	145 ⁽³⁾
Cohesión (Pa)	1,5 ⁽²⁾	288 ⁽²⁾	147 ⁽³⁾
Áng. de fricción interna	25° ⁽²⁾	40° ⁽²⁾	29° ⁽³⁾
Densidad (g/cm^3)	1,56 ⁽²⁾ -1,57 ⁽³⁾	1,33 ⁽²⁾ -1,16 ⁽³⁾	1,64 ⁽³⁾

⁽¹⁾ El autor no señala si el valor del tamaño de grano corresponde a un promedio, solo lo menciona como “alrededor de”. En el presente trabajo se utiliza la media estadística dada por el tamizaje.

⁽²⁾ Valores según Galland *et al.* (2006).

⁽³⁾ Valores medidos en el presente trabajo.

Tabla 2.2 Resultado de tamizaje de los dos tipos de microesferas. Porcentaje acumulado que pasa por la malla tanto en volumen como en peso.

Número de malla	Tamaño malla (micras)	Microesferas Tipo I		Microesferas Tipo II	
		% _{ac} en volumen	% en peso	% _{ac} en volumen	% en peso
50	300	100,0	100,0	99,95	99,9
60	250	92,3	93,1	99,8	99,7
80	180	46,6	45,1	53,5	51,4
100	150	33,1	32,0	32,5	31,3
120	125	10,4	9,9	9,4	9,0
140	106	0,0	0,0	2,3	2,2
170	90	0,0	0,0	0,9	0,9

El material usado para representar la corteza frágil permite una pequeña percolación del fluido a medida que se inyecta y asciende, lo que se asimilaría el halo de la intrusión en la roca caja. El espesor de este halo depende tanto del tamaño de grano como de la cohesión y el ángulo de fricción del material: para el caso de harina de cuarzo corresponde un halo muy delgado (Figura A10 en Anexo 1); mientras que para los casos con mayor proporción de microesferas se genera un halo más grueso (otros modelos en Ítem 3.1 y Anexo 1). Es importante aclarar que, a pesar de esta percolación de fluido en la arena, la morfología de la intrusión no varió mayormente en ambos casos, por lo que se consideraron válidos ambos resultados.

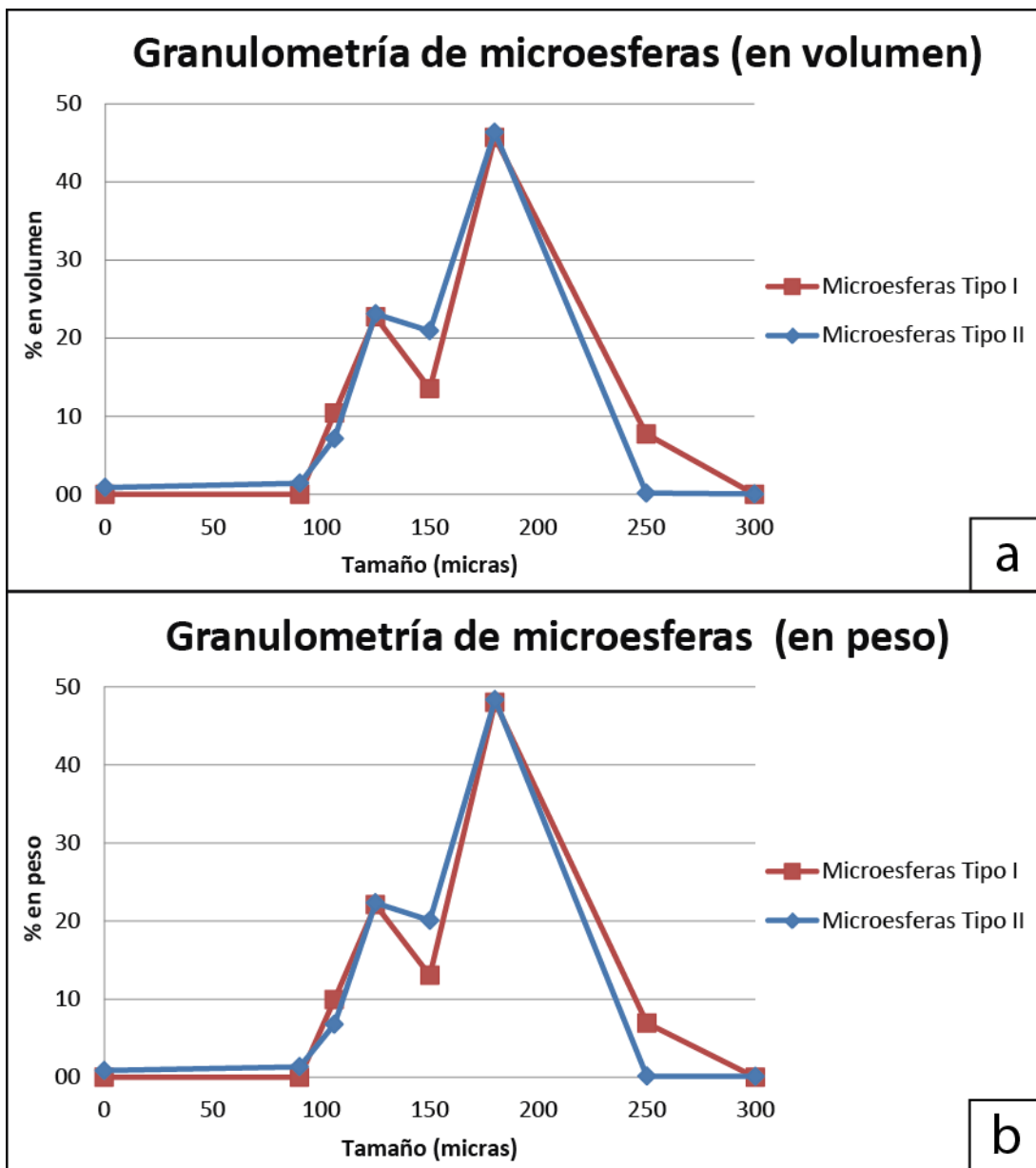


Figura 2.2 Histograma del tamaño de grano para las microesferas (a) en volumen y (b) en peso. En rojo se presentan las microesferas tipo I; en azul, las tipo II. El tamaño medio es de 161 μm y de 154 μm , respectivamente.

2.2.2. Magma

Los fluidos que se inyectaron en el modelo son análogos al magma que asciende por la corteza frágil, ya sea como dique o como *sill*. El principal material para representar estos fluidos de alta viscosidad en trabajos previos ha sido la silicona, e.g. “*silicone putty*” (Ramberg, 1967, 1981; Dixon y Summers, 1985, 1986; Weijermars y Schmeling, 1986; Dixon y Simpson, 1987; Merle y Vendeville, 1992; Brun, 1999, Martínez *et al.*, 2016), cuya viscosidad varía entre $7 \cdot 10^2$ Pa s según las usadas por Corti *et al.* (2005) y entre 2.5 y $7.5 \cdot 10^3$ Pa s según las usadas por Román-Berdiel *et al.* (1997). Por otro lado, los estudios realizados para magmas de menor viscosidad son más recientes; en ellos, se ha utilizado aceite vegetal hidrogenado para simular magmas de composición basáltica a riolítica (Galland *et al.*, 2003, 2006, 2007, 2009).

Para estudiar la influencia del ascenso de magma en estructuras frágiles de la corteza superior, en este trabajo se consideró un magma poco viscoso. El material usado para modelar el magma es un aceite hidrogenado de coco llamado “Végétaline” (Galland *et al.*, 2003, 2006, 2007, 2009), comercializado en Francia. Este aceite se encuentra sólido a temperatura ambiente, y se vuelve un fluido newtoniano de baja viscosidad sobre los 31°C. A 50°C, su densidad es de $\approx 0.9 \text{ g cm}^{-3}$ y su viscosidad de 10^{-2} Pa s (Galland *et al.*, 2003; en el presente trabajo se verificaron algunos valores); esta última varía muy poco para temperaturas mayores a 31°C (Figura 2.3). Se trabajó con el fluido entre 50°C y 60°C, temperaturas entre las cuales la viscosidad varía entre un rango de $1.3 \cdot 10^{-2}$ y $1.8 \cdot 10^{-2} \text{ Pa s}$ (Figura 2.3). Al solidificarse, el volumen del aceite decrece en menos de un 4% (Galland *et al.*, 2003), por lo que no representa una limitación para efectos de este trabajo.

Viscosidad (Pa s) en función de la Temperatura (°C)

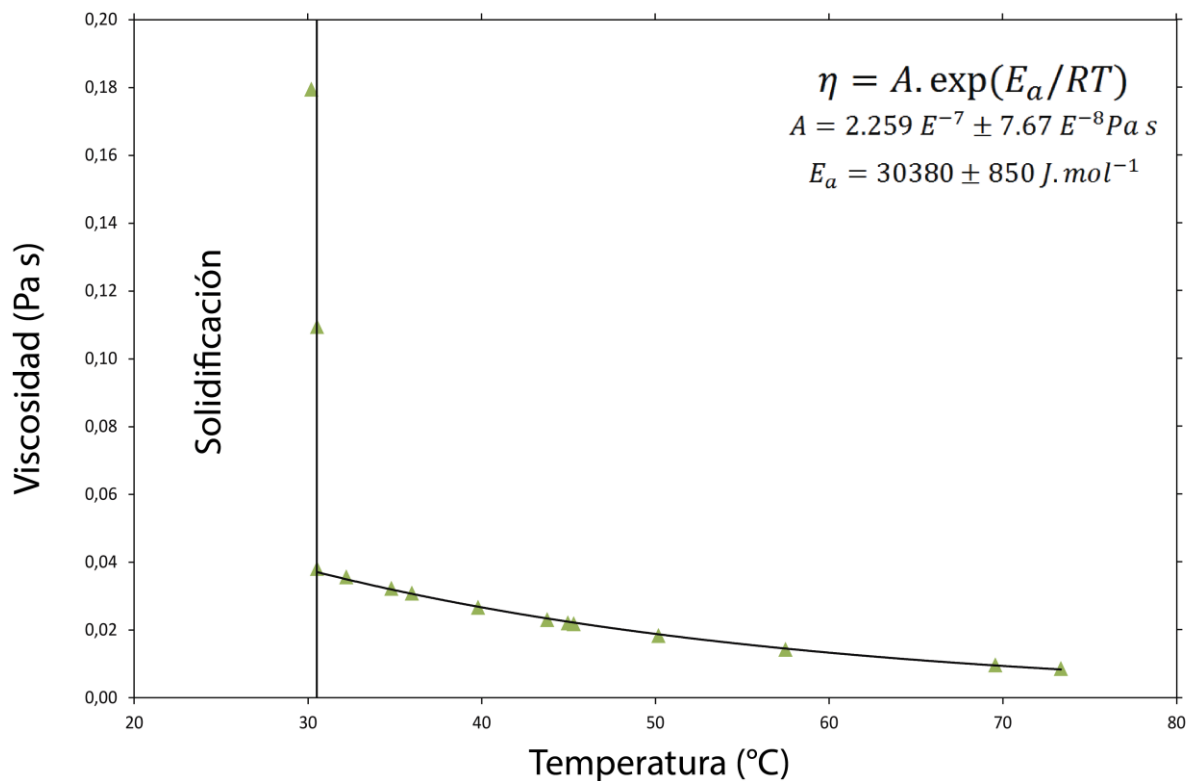


Figura 2.3 Gráfico de viscosidad [Pa s] en función de la temperatura [°C] (Modificado de Galland *et al.*, 2006). Se puede notar el leve cambio en la viscosidad para temperaturas sobre los 50°C. En el presente trabajo, se realizaron modelos con el fluido entre 50°C y 60°C, lo que entrega un rango de viscosidad entre 0,013 y 0,018 Pa s.

2.3. Dispositivo

El diseño, confección y validación del dispositivo de modelación analógica se llevó a cabo durante el presente trabajo. Basándose en dispositivos anteriores presentes en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, se realizó un prototipo al que se le hicieron una serie de modificaciones para ajustarlo a las necesidades que debían cumplirse para el funcionamiento correcto y el logro de los objetivos de esta investigación. Las dos funciones principales que debía cumplir el dispositivo eran la movilidad del pistón para realizar la deformación, tanto en extensión como en compresión, y la inyección del fluido símil del magma durante estas etapas.

Para la primera función, se utilizó un motor de velocidad reducida conectado al pistón mediante una guía tipo tornillo. Este motor debía empujar el pistón a una velocidad constante sin importar la carga de la arena. Se usó un *switch* que pudiera invertir el giro del motor para poder cambiar de extensión a compresión. En cuanto a la oblicuidad del movimiento del pistón, se modificó la base, de modo que se pudiese ajustar la dirección de la guía que movería la muralla (ver Ítem 2.3.1). Según Brun y Nalpas (1996), para ángulos de oblicuidad altos, la deformación generada por la inversión es absorbida por nuevas fallas inversas en lugar de reactivarse las fallas normales previas; en cambio, para bajos ángulos, sí se reactivan las fallas normales previas y, en algunos casos, también se forman fallas de rumbo (Figura 2.4). De acuerdo a esto, se utilizó un ángulo de convergencia de 30° con respecto al borde del pistón, siendo este un ángulo óptimo para la reactivación de estructuras (Brun y Nalpas, 1996).

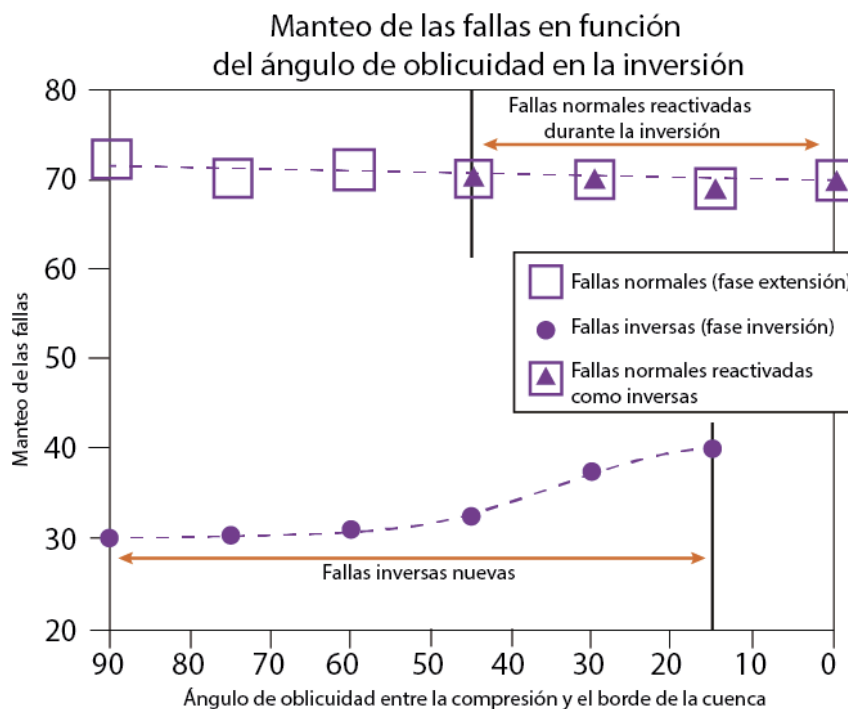


Figura 2.4 Gráfico del manteo de las fallas en función del ángulo de oblicuidad. Modificado de Brun y Nalpas (1996). Para ángulos de oblicuidad altos ($>45^\circ$), no hay reactivación de fallas normales como inversas (representadas por cuadrados en la figura), sino que la deformación se absorbe mediante fallas inversas nuevas de bajo manteo (puntos en la figura). Para ángulos bajos ($<45^\circ$), se produce la reactivación de las fallas normales de la cobertura sedimentaria (cuadrados con un triángulo en la figura), junto con fallas inversas de ángulos moderados.

La inyección de fluido se logró con el uso de una bomba hidráulica, la que obtenía el aceite desde un recipiente que mantenía la temperatura de este entre 50°C y 60°C. La bomba se conectó en su salida a una manguera adosada a la placa del pistón (Figura 2.5), la cual, a modo de jeringa, inyectó el fluido en la discontinuidad de velocidad, ubicada en el borde de la placa. Esta manguera tenía un diámetro exterior de 4 mm e interior de 2 mm y poseía un corte en 45° (ver Ítem 2.3.2).

El dispositivo final se realizó en acrílico de 10 mm de espesor, consistía en una base de 90 cm x 49.6 cm, con paredes que formaban una caja cuadrada de 49.6 cm de lados y 15.8 cm de altura. Estos muros eran desmontables para facilitar su limpieza, traslado y almacenamiento. Fuera de las murallas se ubicaba el motor y la bomba (Figura 2.5).

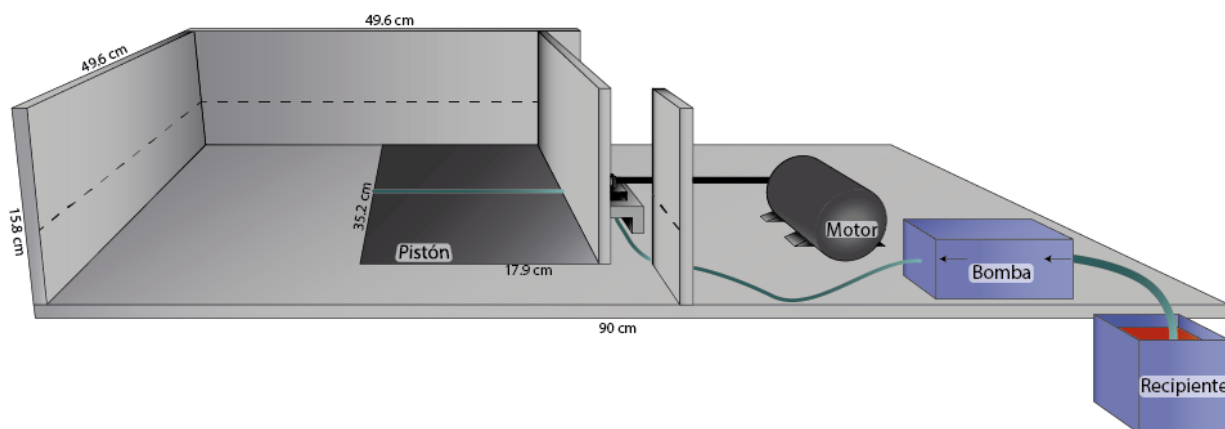


Figura 2.5 Diagrama esquemático del dispositivo final generado en este trabajo. La manguera delgada que sale de la bomba va adosada a la placa basal del pistón y termina en el borde de este (punto de discontinuidad de velocidad, VD por sus siglas en inglés). La línea punteada representa la altura total de las capas de arena (6 cm). Durante la etapa compresiva de la deformación, se inyecta el fluido a través de la bomba. Ver más detalles de las especificaciones del motor, de la bomba y de las dimensiones del dispositivo en el texto.

2.3.1. Motor

Se utilizó un motor de velocidad reducida para mover el pistón (Figura 2.6), sus propiedades se muestran en la Tabla 2.3. La velocidad de giro del motor se asocia al amperaje que recibe, por lo que, para poder variar esta velocidad, se utilizó un transformador al que se le podía variar la corriente que emitía. Según los valores de revoluciones del motor, se acopló una extensión en forma de tornillo, de modo de transmitir estos giros en un avance recto del pistón, tanto en extensión como en compresión.

Para la fase extensional del modelo, se realizó un movimiento ortogonal del pistón; mientras que para la inversión se comprimió en un ángulo de 30° con respecto a su borde, siendo este un ángulo óptimo para la reactivación de estructuras según Brun y Nalpas (1996) (Figura 2.4). Este cambio de ángulo se logró moviendo la posición del motor en la base y rotando el hilo del motor con respecto a un pivote en el soporte del pistón. La compresión oblicua aplicada posterior a la extensión se realizó de modo tal que el acortamiento perpendicular al borde del pistón (discontinuidad de velocidad o “VD”) tuviera la misma magnitud que la extensión inicial.

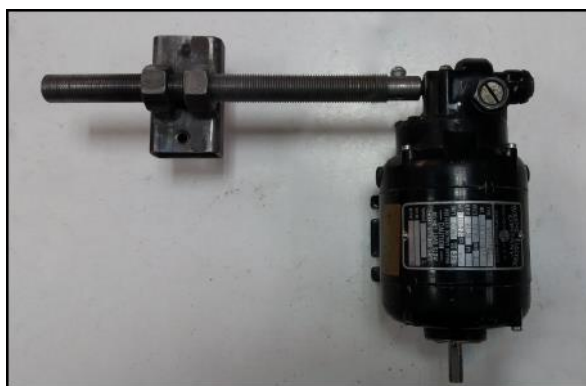


Figura 2.6 Foto del motor utilizado en los experimentos del presente trabajo. Las especificaciones se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Especificaciones y propiedades del motor utilizado

Fabricante	Bodine Electric Company
Tipo	NSH-12R
No.	T0322008
Voltaje	12 DC
Amperaje	2 A
R.P.M.	2130
HP	1/150
Torque	0.3 in lbs
R.P.M.	3.7
Razón	576:1

2.3.2. Bomba

Se usó una bomba para fluidos como la que se muestra en la Figura 2.7. La operación de esta bomba es simple, presenta un regulador de paso para el volumen de fluido inyectado, el que va de 0% a 100%. Se utilizaron mangueras de dos tamaños: la que conectaba el reservorio con la bomba era de 7 mm de diámetro, mientras que la que inyectaba el fluido en el VD era de solo 2 mm de diámetro.



Figura 2.7 Foto de la bomba utilizada en este trabajo.

Se realizaron pruebas de duración constante para calibrar el flujo de aceite entregado en función del porcentaje de paso de la bomba. Para flujos pequeños como los que se utilizaron, existe una relación lineal entre ambos factores, por lo que se puede obtener fácilmente el volumen entregado a partir del porcentaje de paso y el tiempo de operación de la bomba. Sin embargo, esta linealidad variaba levemente con la temperatura, por lo que antes de cada prueba se calibró la bomba para fijar bien el porcentaje de paso de la bomba para obtener más precisión en el cálculo del volumen y la velocidad de la inyección.

2.4. Pruebas de materiales y variación de parámetros

Antes de considerar los materiales finales y de fijar los valores de los parámetros a utilizar en los modelos, se realizó una serie de pruebas con distintas combinaciones, tanto de la mezcla de harina de cuarzo y microesferas, como de los diferentes tipos de aceite, su velocidad de inyección, etc. Se probó por separado la función de movimiento y la de inyección del dispositivo. Es importante recalcar que, por motivos prácticos, algunos de estos parámetros se descartaron de modo experimental, mientras que otros se descartaron por sus propiedades físicas. A continuación, se presentan las evaluaciones y consideraciones para algunos de ellos.

2.4.1. Pruebas de arena

Tal como se mencionó anteriormente (Ítem 2.2.1), para representar la corteza frágil se utilizó una mezcla de harina de cuarzo y microesferas. La proporción entre ellas tenía que ser tal de que se pudiera inyectar el aceite sin que este percolara entre los poros y a la vez permitiera un buen desarrollo de las estructuras, tanto de extensión como de inversión.

De acuerdo a lo trabajado por Galland *et al.* (2006), el modelo hecho con una mezcla homogénea de harina de cuarzo y microesferas se utilizó solo para el caso de inyección durante la fase extensional, mientras que para el caso de inyección durante la compresión y el caso de inyección sin movimiento se alternaron ambos materiales en capas de distinto espesor. La mezcla homogénea utilizada en ese trabajo tenía una proporción entre microesferas y cuarzo molido de 20:5 en volumen. Sin embargo, en el presente trabajo, al tener una granulometría diferente a los estudios anteriores, se tuvo que buscar empíricamente una proporción que produzca resultados similares a los ya validados en esos trabajos anteriores (Capítulo 3).

Otro parámetro que se fijó fue la altura de la secuencia de capas de arena con la que se armó el modelo. Para todas las pruebas se ocupó una altura de 6 cm, con excepción de un modelo que se realizó con una mayor altura (8 cm), pero el resultado no fue el esperado, ya que el fluido solo percoló en la arena y no ascendió ni produjo la deformación en superficie que se generó en los otros casos de menor altura (Figura A13 en Anexo 1). Es así como se descartó usar un espesor mayor a los 6 cm considerados en un principio.

Por último, se varió la forma en la que se construía la secuencia de arena. Se probaron dos maneras: (1) depositándola con una pala, para luego comprimirla y aplanarla, y (2)

cerniendo la arena con un colador, para luego solo aplanar la superficie. De acuerdo a lo que se veía en la compactación del material, se optó por la segunda alternativa, puesto que se obtenía una densidad más homogénea (Krantz, 1991) y se perturbaba menos las capas una vez sedimentadas.

2.4.2. Pruebas de aceite

Antes de realizar pruebas con el aceite de coco hidrogenado utilizado en investigaciones anteriores (Galland et al., 2003, 2006, 2007, 2009), se buscaron otros productos sustitutos para representar el magma. Es así como se consideró usar pectina (heteropolisacárido obtenido de células vegetales que al contacto con agua forma un gel viscoso). Sin embargo, las propiedades del producto no eran muy constantes, variando considerablemente su viscosidad según su concentración.

Luego, se realizaron pruebas con el aceite de coco hidrogenado ("*Végétaline*") para comprobar la similitud con los resultados conseguidos por Galland et al. (2006), y los modelos eran equivalentes a los obtenidos en estudios previos (Capítulo 3 y Anexo 1).

Para una mejor implementación del dispositivo de modelación analógica, se buscó un sustituto del aceite en Chile que fuese más sencillo de obtener, pero que poseyera las mismas características y comportamiento del aceite de coco "*Végétaline*". Se encontraron dos tipos de aceite de coco hidrogenado con propiedades similares, las que fueron probadas en modelos con el fin de ver su aplicabilidad y posibilidad de sustitución para el producto inicial. Ambos son líquidos a las temperaturas a las que se trabajó (~50°C), pero se vuelven sólidos a temperaturas más bajas que el aceite original, por lo que la aplicabilidad al momento de cortar el modelo no es tan eficiente como con el producto original.

En los modelos en los cuales se inyectaron estos dos últimos aceites, se notó que su percolación en la arena era mucho mayor que la de los otros modelos hechos con el primer aceite, produciendo una notoria subsidencia del domo generado durante y posterior a la inyección (Figura A9 y Figura A11 en Anexo 1). Por lo que finalmente se descartaron estos dos sustitutos, y se optó por utilizar el aceite "*Végétaline*" para los modelos realizados.

2.4.3. Pruebas de motor

La velocidad de giro del vástago acoplado al motor depende, como se dijo anteriormente, del amperaje que este recibe. Para regular este giro, se utilizó un transformador que podía entregar amperajes entre 3 y 12 Å. Con esto, se encontró que la velocidad mínima de giro del motor era de 0.7 RPM, lo que se traduciría en velocidad lineal mediante el hilo de la guía del pistón. Así, se obtuvo que la velocidad mínima que generaba el motor (a 4.5 Å) era de unos 1.2 ± 0.2 mm/min, la que sería utilizada para extensión; por otro lado, para la posterior inversión tectónica, se usó una velocidad de 2.1 ± 0.2 mm/min (a 6 Å), más rápida que la extensión para sincronizar mejor con la inyección del fluido (Ítem 3.3). Si bien estas velocidades pueden ser consideradas algo altas para efectos de escalamiento (Ítem 2.5), se comprobó que no afectan mayormente el desarrollo de las estructuras (Ítem 3.3).

En la Tabla 2.4, se muestran los tiempos que demoró el dispositivo en la extensión y en la inversión; se hace la diferencia entre las pruebas preliminares (PP, Ítem 3.3) y las pruebas finales (PF, Capítulo 4).

Tabla 2.4 Datos de la duración de la extensión (distancia neta: 20 mm) e inversión (distancia neta: 40 mm), y de la velocidad del pistón para cada modelo según el amperaje del motor. Los valores de velocidad positiva son para extensión; los negativos, para inversión. Se separa entre las pruebas preliminares (PP, Ítem 3.3) y las pruebas finales (PF, Capítulo 4).

	Modelo	Amp. Motor (A)	Duración (M:S)	Tiempo (min)	Velocidad (mm/min)
Extensión PP	T03M2	4,5	19:4	19,1	1,05
	T03ME	4,5	16:51	16,9	1,19
	BNI1	4,5	14:27	14,5	1,38
Extensión PF	NICD	4,5	13:00	13,0	1,54
	BVAD	4,5	12:30	12,5	1,60
	AVAD	4,5	14:15	14,3	1,40
	BVPD	4,5	12:30	12,5	1,60
	BVSD	4,5	12:30	12,5	1,60
	AVPD	4,5	13:50	13,8	1,45
	AVSD	4,5	11:45	11,8	1,70
Inversión PP	T03M2	4,5	47:30	47,5	-0,84
	BNI1	6	33:21	18,9	-2,12
Inversión PF	NICD	6	18:00	18,0	-2,22
	BVPD	6	15:30	15,5	-2,58
	BVSD	6	18:00	18,0	-2,22
	AVPD	6	16:11	16,2	-2,47
	AVSD	6	17:45	17,8	-2,25

2.4.4. Pruebas de bomba

Como se mencionó anteriormente (Ítem 2.3.2), la bomba utilizada posee un regulador que controla el caudal entregado en función del porcentaje de paso. A pesar de que los caudales varían un poco entre cada prueba, la relación entre ellos y el porcentaje es lineal para todos los casos. Por lo tanto, para fijar una velocidad de inyección más precisa, se calibró la bomba antes de los experimentos para obtener el porcentaje adecuado que permitiría obtener dicho caudal.

El caudal del caso base, donde la inyección tiene un rango medio de velocidad, se fijó en unos 0.167 mL/s, por lo que, de acuerdo a las capacidades de la bomba, el porcentaje de paso de la bomba variaría entre 10% y 20% de su capacidad (detalle del caudal de cada prueba en Capítulo 3, 4 y Anexo 1). Este valor de caudal se fijó después de realizar pruebas de calibración del flujo, de modo que se encuentre un buen escalamiento con la realidad para magmas cuyas velocidades varían entre 0.01 y 1 m/s (Spence y Turcotte, 1985; Battaglia y Bachelery, 2003; Roman *et al.*, 2004; Ítem 2.5) y que su comportamiento se ajuste para los modelos realizados (Ítem 3.1).

2.5. Escalamiento

Como se dijo anteriormente, el escalamiento entre la naturaleza y los modelos es una de las etapas más complejas de estos experimentos. De este escalamiento depende la aplicabilidad de los modelos a la realidad. La teoría de escalamiento fue aplicada por primera vez a las estructuras geológicas por Hubbert (1937) y Ramberg (1981), posteriormente, fue discutida por Shemenda (1983), Davy (1986), Richard (1991), Davy y Cobbold (1991), Cobbold y Jackson (1992) y Weijermans *et al.* (1993) para modelos tipo frágil-dúctil.

La representatividad de un modelo análogo depende principalmente de la similitud geométrica (escalamiento de longitudes y ángulos), de la similitud cinemática (escalamiento del tiempo que demora en ocurrir una variación de forma y/o posición) y de la similitud dinámica (escalamiento de fuerzas y otros parámetros actuando sobre una masa) con la naturaleza (Hubbert, 1937; Ramberg, 1981).

Al calcular el factor de escalamiento de los parámetros físicos entre el sistema natural y el modelo, se debe tener en consideración la longitud (l), la gravedad (g), el estrés (σ), la viscosidad (η), la velocidad (v) y la densidad (ρ). Estos pueden ser obtenidos a partir de otros tres parámetros: la masa m (en gramos), la longitud l (en metros) y el tiempo t (en segundos) (Tondji Biyo, 1995), o viceversa. El factor de escalamiento entre el modelo y la naturaleza es la razón entre los dos valores de cada parámetro, es decir, se definen como $X^* = X_{\text{mod}}/X_{\text{nat}}$, donde X es el parámetro a escalar. Finalmente, a partir de ellos, se pueden obtener factores de escalamiento para otros parámetros, ya sea velocidad (v), densidad (ρ), etc.

Los datos utilizados para el escalamiento de las dimensiones y parámetros de los modelos se obtuvieron como una aproximación a la cuenca invertida del Cenozoico en Chile Central a partir de la bibliografía. Esto, al ser una aproximación, permitió una ampliación a las aplicaciones de estos modelos, pudiendo así ser adaptados a otras cuencas. La longitud y el tiempo tienen razones independientes, por lo que se pueden escoger las razones que mejor se ajusten al experimento.

Para los experimentos, se consideró que el factor de escalamiento de la gravedad (g^*) es unitario, pues este parámetro es fijo y afecta de la misma manera a la naturaleza que al experimento.

$$g^* = \frac{g_{\text{mod}}}{g_{\text{nat}}} = \frac{9.8 \text{ m/s}^2}{9.8 \text{ m/s}^2} = 1$$

Para la longitud, se reprodujeron estructuras de kilómetros o decenas de kilómetros, como lo son los diques, lacolitos y planos de falla en modelos de centímetros de largo. También se modeló en centímetros otras longitudes kilométricas como lo son la profundidad de la cuenca, en este caso la Cuenca de Abanico (2.5 - 3 km según Fock (2005), obtenidos por la diferencia de espesor entre la Formación Abanico y la Formación Farellones) y su ancho mínimo (70 - 80 km, según Fock (2005), dado por la distancia entre la Cordillera Principal y el borde oriental de la Cordillera de la Costa). Por lo tanto, el factor de escalamiento de longitud viene dado por:

$$l^* = \frac{l_{mod}}{l_{nat}} = \frac{1 \text{ cm}}{1 \text{ km a } 10 \text{ km}} = \frac{0.01 \text{ m}}{1000 \text{ m a } 10000 \text{ m}} = 10^{-5} \text{ a } 10^{-6}$$

La evolución de la cuenca de Abanico se puede dividir en dos etapas: una de extensión (de unos 14 Ma); y una de inversión tectónica (de unos 7 Ma) (Charrier *et al.*, 2002, 2005, 2007; Fock, 2005). Estos períodos fueron modelados en alrededor de 20 minutos (Ítem 2.4.3), de modo que el factor de escalamiento para el tiempo quedó como:

$$t^* = \frac{t_{mod}}{t_{nat}} = \frac{20 \text{ min}}{10 \text{ Ma}} = \frac{3.81 \cdot 10^{-5} \text{ años}}{10^7 \text{ años}} = 3.81 \cdot 10^{-12}$$

Es así como la velocidad de convergencia, al depender de los parámetros anteriores, se definió con un factor de escalamiento teórico definido como:

$$v_{c_{teorico}}^* = \frac{l^*}{t^*} = \frac{10^{-5} \text{ a } 10^{-6}}{3.81 \cdot 10^{-12}} = 2.6 \cdot 10^5 \text{ a } 2.6 \cdot 10^6$$

Según datos de Pardo-Casas y Molnar (1987) y Somoza (1998), la velocidad de convergencia de la placa de Nazca con la Sudamericana es de unos 6 cm/año durante el Eoceno-Oligoceno (coincidente con el desarrollo extensional de la cuenca), y de unos 15 cm/año durante el Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (coincidente con la etapa de inversión de la misma). Así, esta velocidad del orden de algunos centímetros por año se reflejó como la velocidad de movimiento del pistón de acuerdo a:

$$v_{c_{t_{mod}}} = v_{c_{t_{nat}}} \cdot v_{c_t}^* \approx 1 \frac{\text{cm}}{\text{año}} \cdot 2.6 \cdot 10^{5-6} = 2.6 \cdot 10^{5-6} \frac{\text{cm}}{\text{año}} = 0.5 \text{ a } 5 \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

Sin embargo, siendo esta una velocidad mínima a la que tendría que moverse el pistón, resultó imposible de practicar, pues un movimiento tan veloz no permitiría el óptimo desarrollo de las estructuras que se desean formar en la modelación. Es por esto que se hizo una variación del factor de escalamiento de la velocidad de acuerdo a la real capacidad del motor que permite que las estructuras se formen adecuadamente (Ítem 2.4). Es así como el factor de escalamiento para la velocidad que se usó en este trabajo quedó definido como:

$$v_c^* = \frac{v_{c_{mod}}}{v_{c_{nat}}} = \frac{0.04 \text{ cm/min}}{1 \text{ cm/año}} = \frac{20000 \text{ cm/año}}{1 \text{ cm/año}} = 2 \cdot 10^4$$

Es decir, el factor de velocidad que se utilizó en este trabajo (v_c^*) es solo un orden de magnitud menor que el teórico ($v_{c_{teorico}}^*$).

La densidad de rocas sedimentarias varía entre 2 y 2.7 g/cm³ (Daly, 1966), mientras que para las rocas volcánicas el rango varía entre 2.4 y 2.9 g/cm³ (Daly, 1966; Johnson y Olhoeft, 1984). Por otro lado, la mezcla de microesferas y harina de cuarzo tenía una densidad de 1.64 g/cm³. Es así como el factor de escalamiento de densidad fue:

$$\rho^* = \frac{\rho_{mod}}{\rho_{nat}} = \frac{1.64 \text{ g cm}^{-3}}{2.7 \text{ g cm}^{-3}} = 0.61$$

En general, la deformación de las rocas de la corteza frágil se fractura de acuerdo al criterio de ruptura lineal de Mohr-Coulomb (Byerlee, 1978), el cual describe un comportamiento reológico independiente del tiempo, que se describe de la siguiente manera:

$$\tau = C_o + \sigma \tan \phi$$

Donde C_o es la cohesión, σ es el estrés normal, τ es el estrés de cizalle y ϕ es el ángulo de fricción interna.

Todas estas fuerzas deben tener el mismo rango de razón de escalamiento, es decir, que todas tienen el factor de escalamiento σ^* , el cual se calcula mediante un parámetro adimensional de la proporción entre fuerzas de cuerpo (gravedad) y fuerzas de superficie (estrés):

$$\Pi_F = \frac{\rho \cdot g \cdot l}{\sigma_t}$$

Donde ρ es la densidad, g es la gravedad, l es la longitud y σ_t es el estrés.

La razón entre las fuerzas de cuerpo y las de superficie se mantiene de la naturaleza al modelo, por lo que el factor de escalamiento de este parámetro es unitario.

$$\Pi_F^* = \frac{\Pi_{F_{mod}}}{\Pi_{F_{nat}}} = \frac{\rho_{mod} \cdot g_{mod} \cdot l_{mod} \cdot \sigma_{nat}}{\rho_{nat} \cdot g_{nat} \cdot l_{nat} \cdot \sigma_{mod}} = \frac{\rho^* \cdot g^* \cdot l^*}{\sigma^*} \approx 1$$

Luego, y considerando que el factor de escalamiento de la gravedad es unitario, se puede despejar el factor de escalamiento del estrés como:

$$\sigma^* \approx \rho^* \cdot g^* \cdot l^* = 6.1 \cdot 10^{-6} \text{ a } 6.1 \cdot 10^{-7}$$

Los valores de cohesión para rocas competentes varían entre 10^7 Pa para la caliza y 10^8 Pa para el mármol (Schellart, 2000; y las referencias ahí citadas), por lo que los valores de cohesión para el modelo deben caer en el rango entre 6 y 600 Pa, aproximadamente. La cohesión medida para la mezcla utilizada en este trabajo es de 147 Pa (Tabla 2.1).

El ángulo de fricción interna en rocas sedimentarias varía entre 26° y 45° (Schellart, 2000; y las referencias ahí citadas). Al ser una característica geométrica, en escalamientos este parámetro tuvo un factor unitario.

$$\phi^* = \frac{\phi_{mod}}{\phi_{nat}} = 1$$

Es así como el rango de ángulos para el modelo también estuvo entre 26° y 45°.

La velocidad de propagación del magma en la naturaleza varía según la composición. Para diques basálticos, estudios geofísicos han arrojado una velocidad de unos 0.1 a 1 m/s (Spence y Turcotte, 1985; Battaglia y Bachelery, 2003; Roman *et al.*, 2004); mientras que, para composiciones más riolíticas o graníticas, se tienen velocidades rondando los 10² m/s. Es así como el valor de la velocidad de propagación del magma varió entre 0.01 y 1 m/s.

Por otra parte, en este trabajo se utilizaron caudales de fluido de unos 0.16 mL/s o 1.6·10⁻⁷ m³/s. El dispositivo inyectó el fluido con una manguera de diámetro interno de 2 mm y un corte de 45°, lo que entregó un área de salida de 4.4 mm² o 4.4·10⁻⁶ m². Así, la velocidad lineal de inyección del fluido quedó de unos 3.6·10⁻² m/s. El factor de escalamiento fue diferente al de la velocidad de convergencia (v_c^*) pues ambas velocidades son de órdenes de magnitud de diferencia (cm/s para la transferencia de magma en la corteza, y cm/año para la tasa de convergencia; de Saint Blanquat *et al.*, 2011), por lo que el escalamiento simultáneo de ambos parámetros según el mismo factor resulta impracticable. Luego, el factor para la velocidad del magma se pudo definir como:

$$v_m^* = \frac{v_{m_{mod}}}{v_{m_{nat}}} = \frac{3.6 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1}}{0.01 \text{ a } 1 \text{ m s}^{-1}} = 3.6 \text{ a } 3.6 \cdot 10^{-2}$$

Los esfuerzos de la viscosidad dentro del magma tienden a ser mucho menores que los esfuerzos tectónicos (Galland *et al.*, 2003). Si se define un parámetro adimensional como la razón entre el estrés de la viscosidad (σ_v) y el estrés tectónico (σ_t) como:

$$\Pi_S = \frac{\sigma_v}{\sigma_t}$$

La razón entre este parámetro en el modelo y en la naturaleza debería ser unitario para que los esfuerzos de la viscosidad estén correctamente escalados. Es así como se obtuvo que:

$$\Pi_S^* = \frac{\Pi_{S_{mod}}}{\Pi_{S_{nat}}} = \frac{\sigma_{v_{mod}} \cdot \sigma_{t_{nat}}}{\sigma_{v_{nat}} \cdot \sigma_{t_{mod}}} = \frac{\sigma_v^*}{\sigma_t^*} \approx 1$$

Si se considera el magma y el aceite como fluidos newtonianos, se tiene que el estrés desviatorio (σ_v') es proporcional a la viscosidad (η) y a la tasa de deformación ($\dot{\epsilon}$) de la forma:

$$\sigma_v' = 2\eta\dot{\epsilon}$$

lo que, al reemplazarse en la ecuación anterior, entrega que:

$$\sigma_t^* \approx \dot{\epsilon}^* \eta^*$$

En donde η^* es el factor de escalamiento de la viscosidad, y ε^* es el factor de la tasa de deformación, la que se puede expresar en función del factor de la velocidad del magma v_m^* y de la longitud l^* . Es así como el factor de escalamiento de la viscosidad quedó definido como:

$$\eta^* = \frac{\sigma_t^* l^*}{v_m^*} = \frac{6.1 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-5}}{3.6 \cdot 10^0 a^{-2}} = 1.7 \cdot 10^{-9} a 1.7 \cdot 10^{-11}$$

La viscosidad del aceite a las temperaturas usadas en este trabajo se encontraban entre los 0.018 y 0.013 Pa s para los 50°C y 60°C, respectivamente (Figura 2.3). Por su parte, los magmas reales tienen viscosidades que, como su velocidad de propagación, dependen de la composición que tengan, desde 10 Pa s para basálticos hasta 10^{18} Pa s para graníticos parcialmente cristalizados (Merle y Vendeville, 1995; Petford *et al.*, 1993; Spera, 1980). Este trabajo intentó analogar magmas poco viscosos de composición basáltica a riolítica, cuyas viscosidades se encuentran entre 10 Pa s para magmas basálticos con alto contenido de agua y alta temperatura hasta unos 10^7 Pa s para magmas silíceos pobres en volátiles con algo de cristalización (Petford *et al.*, 1993; Romano *et al.*, 2003; Polacci *et al.*, 2004; Dingwell *et al.*, 1993).

De acuerdo al factor de escalamiento η^* , el aceite de coco representaría magmas con viscosidades del orden de:

$$\eta_{nat} = \frac{\eta_{mod}}{\eta^*} = \frac{0.013 a 0.018}{1.7 \cdot 10^{-9} a^{-11}} \approx 10^7 a 10^9$$

Es decir que, para ciertas condiciones de velocidad, el factor de escalamiento de viscosidad resultó ser preciso, mientras que para otras, no se alejó tanto de los valores que podrían encontrarse en la naturaleza.

Finalmente, en la Tabla 2.5, se presenta un resumen del escalamiento realizado en este trabajo.

Tabla 2.5 Resumen del escalamiento realizado en este trabajo. Para cada parámetro, se presenta el rango de valores en la naturaleza, en el experimento y su respectivo factor de escalamiento. Para más detalles de cálculos y algunas consideraciones, ver el texto.

Parámetro	Unidad de medida	Valores en naturaleza	Valores en experimentos	Factor de escalamiento
Gravedad (g)	m s ⁻²	9.8	9.8	1
Longitud (l)	m	$10^3 a 10^4$	10^{-2}	$10^{-5} a 10^{-6}$
Tiempo (t)	años	10^7	$3.81 \cdot 10^{-5}$	$3.81 \cdot 10^{-12}$
Vel. Convergencia (v_c)	m año ⁻¹	1	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$
Densidad* (ρ)	g cm ⁻³	2.7	1.64	0.61
Esfuerzos (σ)	Pa	$10^7 a 10^8$	6 a 600	$6.1 \cdot 10^{-6} a^{-7}$
Áng. de fricción (ϕ)	-	26° a 45°	26° a 45°	1
Vel. Magma (v_m)	m s ⁻¹	0.01 a 1	$3.6 \cdot 10^{-2}$	$3.6 \cdot 10^0 a^{-2}$
Viscosidad (η)	Pa s	10 a 10^7	0.013 a 0.018	$1.7 \cdot 10^{-9} a^{-11}$

*Valores para el modelo, obtenidos a partir del factor de escalamiento, el que fue calculado en función de factores de otros parámetros.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DE MODELOS SEGÚN LA VARIACIÓN INDIVIDUAL DE LOS FACTORES INVERSIÓN E INYECCIÓN

Se realizaron series de pruebas para analizar cómo influyen los parámetros a variar en el desarrollo de la deformación de los modelos. Se seleccionaron como válidos para este análisis 11 experimentos, los que se dividieron en dos series: una de inyección de fluidos sin inversión tectónica (8 modelos), y otra de deformación tectónica sin inyección (3 modelos); el resto de los experimentos previos son presentados en la serie de Anexos al final del trabajo (Anexo 1). A continuación, se muestran ambas series de experimentos, señalando los valores de los parámetros ingresados para cada uno.

3.1. Modelación de la inyección

Se realizaron 8 modelos de inyección sin deformación, en los que se variaron los parámetros: mezcla de microesferas y harina de cuarzo (mE:HC); velocidad de la inyección de fluido (cuantificada en mL/s), y tiempo de inyección (en segundos). Para este último, en algunos casos, se fijó un valor, mientras que para otros se obtuvo por el momento en que el fluido llegó a superficie. Se buscó obtener resultados similares a los ya validados por Galland *et al.* (2003, 2006, 2007, 2009).

El principal cambio entre los modelos de trabajos anteriores y este trabajo es la mezcla de microesferas y harina de cuarzo. En trabajos anteriores, los modelos de inyección estática o durante la compresión se realizaron solo con harina de cuarzo o con una intercalación de capas de ambos materiales (Galland *et al.*, 2003, 2006, 2007); mientras que la mezcla homogénea solo se usó para los modelos extensionales (Galland *et al.*, 2006). Esta diferencia con los trabajos anteriores solo genera cambios en el grosor del intrusivo, pero su morfología sigue siendo similar (Figura 3.1).

Estos modelos permitieron conocer la temporalidad del alzamiento y del afloramiento de las fallas generadas, las dimensiones de la deformación o “domo” (DOB y DPB: dimensiones en centímetros del domo ortogonal y paralelo al VD, respectivamente; D_{prom} : promedio entre DOB y DPB; H_{domo} : altura final en centímetros y en porcentaje de alzamiento) y del intrusivo (IOB: dimensión en centímetros del halo del intrusivo ortogonal al borde, y H_{intr} : altura en centímetros del halo del intrusivo; la metodología para obtener cortes de perfil de los modelos no permitió una medición precisa de la dimensión del halo del intrusivo paralelo al borde, por lo que no se consideró ese dato). Los resultados obtenidos estas pruebas preliminares permitieron fijar los valores para los parámetros que fueron posteriormente usados en las pruebas finales (Capítulo 4).

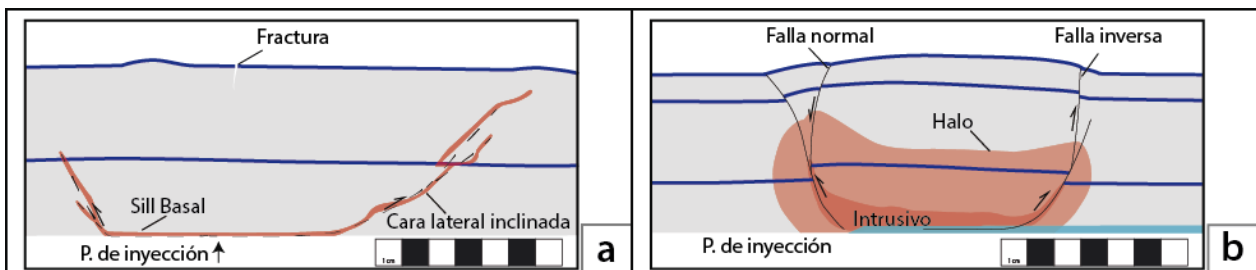


Figura 3.1 Comparación de los modelos de (a) Galland *et al.* (2007, Modificado) y (b) este trabajo. La principal diferencia entre los modelos radica en la composición de la mezcla utilizada. Solo el caso de inyección durante la fase extensional tiene una mezcla homogénea entre microesferas y harina de cuarzo como el utilizado en este trabajo (Galland *et al.*, 2006); los otros casos (compresión y estático) son con solo harina de cuarzo o con capas intercaladas de ambos materiales (Galland *et al.*, 2003, 2006, 2007). Sin embargo, esto solo afecta en el grosor del intrusivo, pero su forma sigue siendo similar (Ítem A1.4).

3.1.1. T05I

Este modelo fue realizado con una proporción en volumen de microesferas y harina de cuarzo de 24:4 (86% y 14%, respectivamente). La velocidad de inyección fue de 0.101 mL/s (15% de la capacidad de la bomba) durante un tiempo de 552 segundos (09:12 minutos), lo que entregó un volumen inyectado teórico de 56 mL.

El domo comenzó a notarse en superficie tan solo a 2 minutos de haber empezado la prueba, pero el ascenso fue más notorio a los 5 minutos cuando las fallas producidas por el intrusivo llegaron a superficie; a los 6 minutos el alzamiento se canalizó hacia el E del domo inicial. Al final del experimento (09:12 minutos), el fluido alcanzó la superficie (Figura 3.2.a-b).

Las dimensiones finales del domo fueron de 8.74 cm para DOB y 8.76 cm para DPB, medidas que dejaron una razón DOB:DPB \approx 1 (Figura 3.2.a-b). Además, el modelo se elevó un 9.05% (altura final de 6.6 cm, Figura 3.2.c-d), lo que generó una razón $D_{prom}:H_{domo}=1.33$.

Por otro lado, el intrusivo tuvo una dimensión IOB de 13.54 cm, y H_{intr} de 4.19 cm, lo que entregó una razón IOB: $H_{intr}=3.23$ (Figura 3.2.c-d).

3.1.2. T06I2

Para el modelo T06I2 la proporción en volumen mE:HC fue de 20:3 (87% y 13%, respectivamente). Durante 1200 segundos (20:00 minutos), se inyectó el fluido a 0.173 mL/s (10% de la capacidad de la bomba), lo que arrojó un volumen inyectado teórico de 208 mL.

Para este experimento, el domo comenzó a notarse a 7 minutos del inicio, pero las primeras fallas llegaron a superficie a los 10 minutos, mientras que las fallas secundarias se desarrollaron en el interior del domo desde los 13 minutos. En este modelo, el fluido no alcanzó la superficie (Figura 3.3.a-b).

La morfología final del domo alcanzó los 13.2 cm para DOB y 12.63 cm para DPB. Esto entregó una razón DOB:DPB=1.05 (Figura 3.3.a-b). La elevación máxima de la superficie fue un 9.29% más alta que la altura inicial, llegando a los 6.61 cm (Figura 3.3.c-d). La razón $D_{prom}:H_{domo}$ fue de 1.95.

El intrusivo, similar al caso anterior, tuvo un largo de 13.29 cm y H_{intr} de 4.41 cm, con una razón IOB: $H_{intr}=3.01$ (Figura 3.3.c-d).

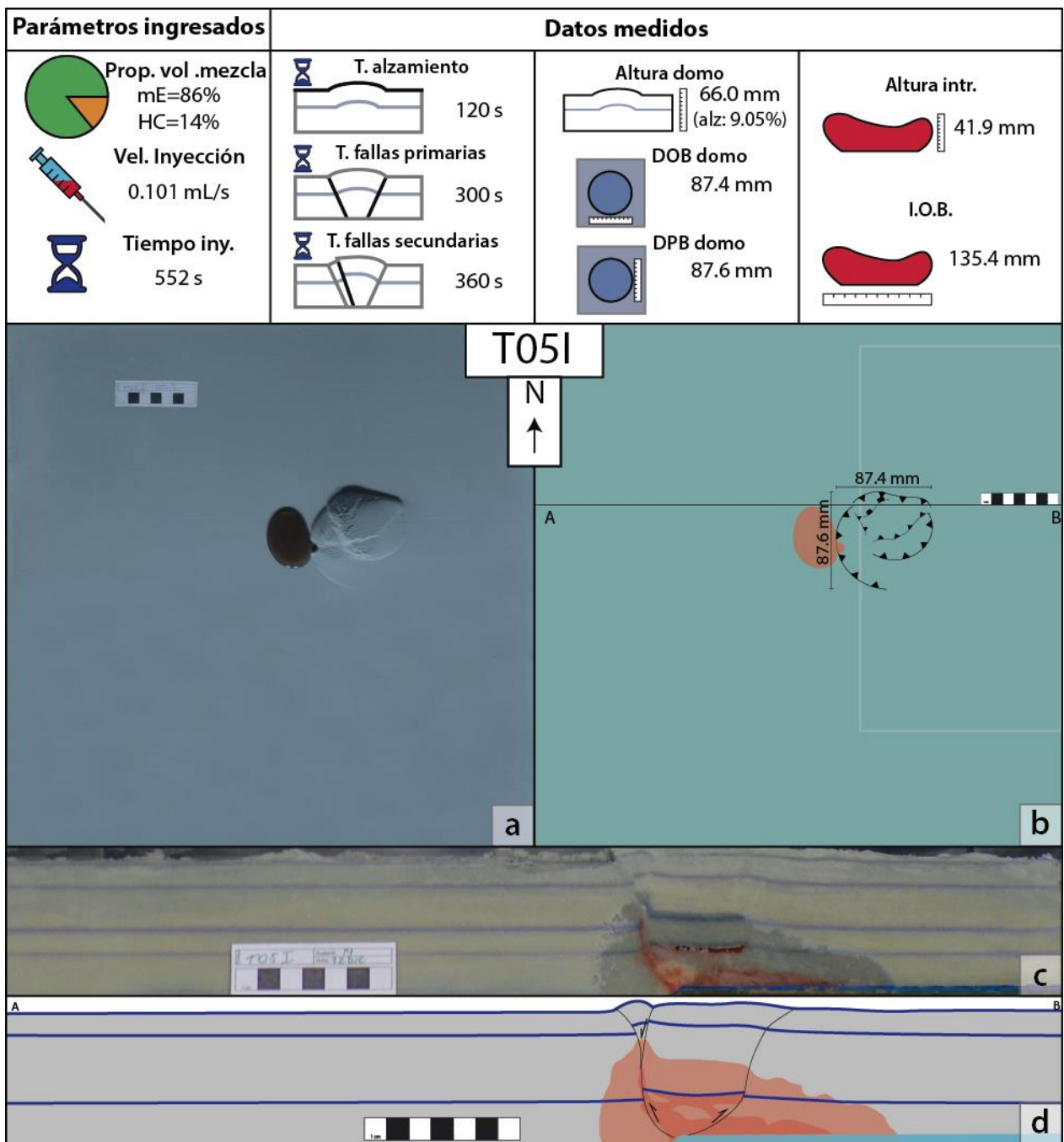


Figura 3.2 Resumen experimento T05I. Parámetros fijados para el modelo, y datos medidos. a) Foto en planta del resultado final del experimento (09:12 minutos). Se produjo extrusión del fluido, pero no subsidencia importante. b) Esquema del resultado en planta del experimento (a partir de la imagen a). Se marca la posición que tuvo la placa, la manguera y el corte del perfil (mostrado en la imagen c), además de las dimensiones del domo. c) Corte del perfil (30 cm) mostrado en la imagen c. El intrusivo (teñido de rojo) tiende a mantenerse bajo, y subir por las fallas; el halo del intrusivo (marcado más oscuro) tiene una morfología similar. d) Esquema del corte en perfil (misma ubicación que imagen c). El intrusivo se marca en rojo oscuro; el halo, en rojo claro. La línea celeste en la parte inferior representa la proyección de la manguera, el fluido se inyecta desde su extremo W. Detalles de las siglas y mediciones en el ítem 3.1.

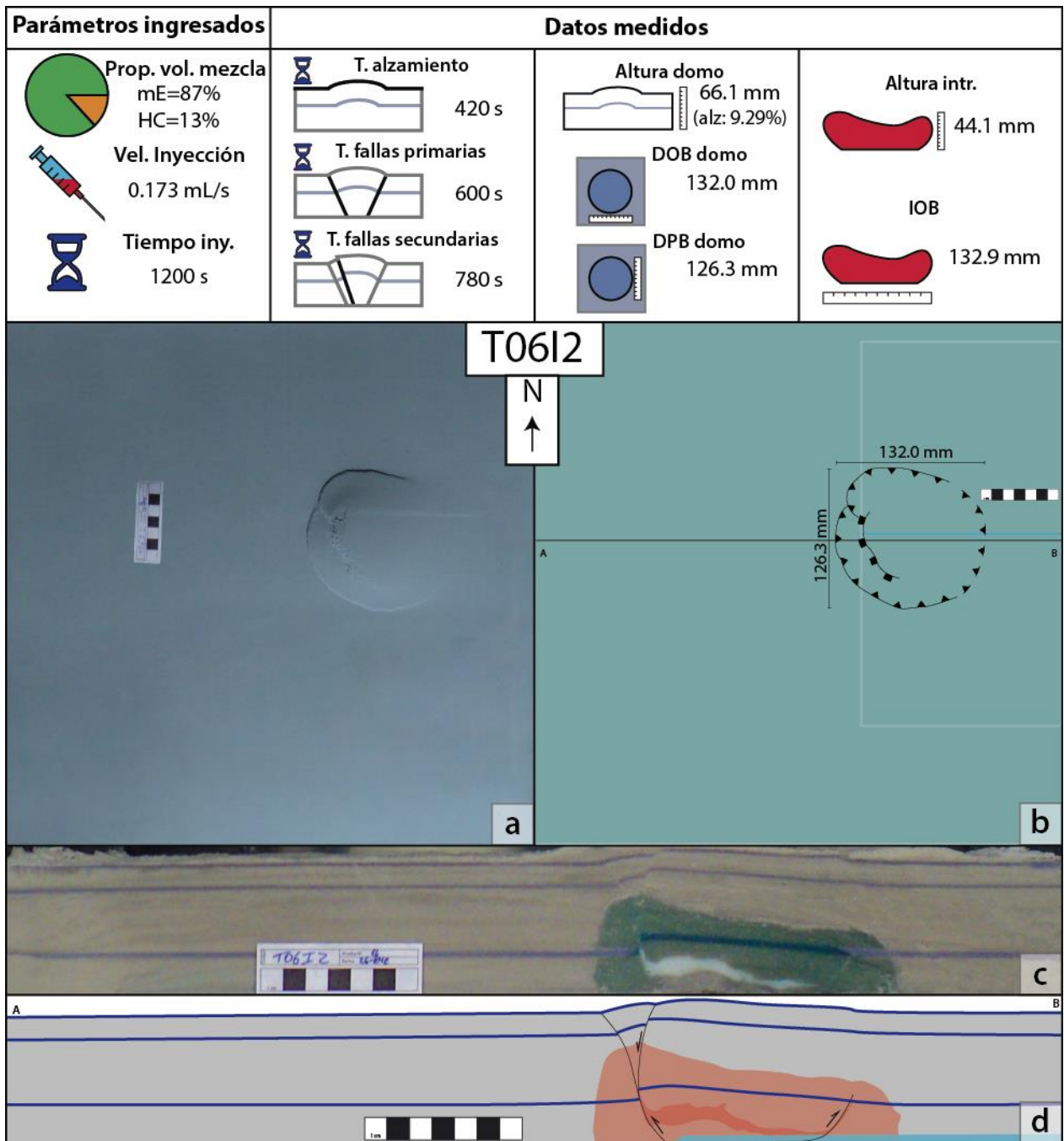


Figura 3.3 Resumen experimento T0612. Parámetros fijados para el modelo, y datos medidos. a) Foto en planta del resultado final del experimento (20:00 minutos). No se produjo extrusión del fluido ni subsidencia importante. b) Esquema del resultado en planta del experimento (a partir de la imagen a). Se marca la posición que tuvo la placa, la manguera y el corte del perfil (mostrado en la imagen c), además de las dimensiones del domo. c) Corte en perfil (27 cm) mostrado en la imagen c). El intrusivo (blanco y sin teñir en este caso) tiende a mantenerse bajo, y subir por las fallas; el halo del intrusivo (marcado más oscuro) tiene una morfología similar. d) Esquema del corte en perfil (misma ubicación que imagen c). El intrusivo se marca en rojo oscuro; el halo, en rojo claro. La línea celeste en la parte inferior representa la proyección de la manguera, el fluido se inyecta desde su extremo W. Detalles de las siglas y mediciones en el ítem 3.1.

3.1.3. T07I

En este experimento se usó una proporción en volumen mE:HC de 20:4 (83% y 17%, respectivamente). La velocidad de inyección fue de 0.150 mL/s (20% de la capacidad de la bomba), y se inyectó durante 612 segundos (10:12 minutos); el volumen inyectado teórico fue de 92 mL.

El domo comenzó a formarse a los 3 minutos aproximadamente. Las primeras fallas afloraron a los 7 minutos, y a los 10 minutos el alzamiento se propagó hacia el W. La prueba finalizó cuando el fluido llegó a la superficie a los 10:12 minutos (Figura 3.4.a-b).

Las dimensiones finales del domo fueron de 10.54 cm para DOB y 8.94 cm para DPB, medidas que dejaron la razón DOB:DPB=1.18 (Figura 3.4.a-b). Además, el modelo se elevó un 10.44% (altura final de 6.7 cm, Figura 3.4.c-d) lo que generó una razón $D_{prom}:H_{domo}=1.45$.

Por otro lado, el intrusivo tuvo una dimensión IOB de 9.30 cm, y H_{intr} de 4.62 cm, lo que entregó una razón IOB: $H_{intr}=2.01$ (Figura 3.4.c-d).

3.1.4. BNM1

En el modelo BNM1 la proporción en volumen mE:HC fue de 20:3 (87% y 13%, respectivamente). Por 1200 segundos (20:00 minutos), se inyectó el fluido a 0.107 mL/s (15% de la capacidad de la bomba), lo que arrojó un volumen inyectado teórico de 128 mL.

Para este experimento, el domo comenzó a notarse levemente a los 5 minutos, pero las primeras fallas llegaron a superficie pasados los 9 minutos, mientras que a los 13 minutos se comenzó a notar una progresión del ascenso hacia el E del domo inicial. En este modelo, el fluido no alcanzó la superficie, además se produjo una importante subsidencia del domo una vez terminada la prueba (Figura 3.5.a-b).

La morfología final del domo alcanzó los 8.9 cm para DOB y 8.69 cm para DPB. Esto entregó una razón DOB:DPB=1.02 (Figura 3.5.a-b). La elevación máxima de la superficie fue un 7.39% más alta que la altura inicial, llegando a los 6.48 cm (Figura 3.5.c-d). La razón $D_{prom}:H_{domo}$ fue de 1.36.

El intrusivo tuvo un largo de 9.24 cm y H_{intr} de 4.78 cm, con una razón IOB: $H_{intr}=1.93$ (Figura 3.5.c-d).

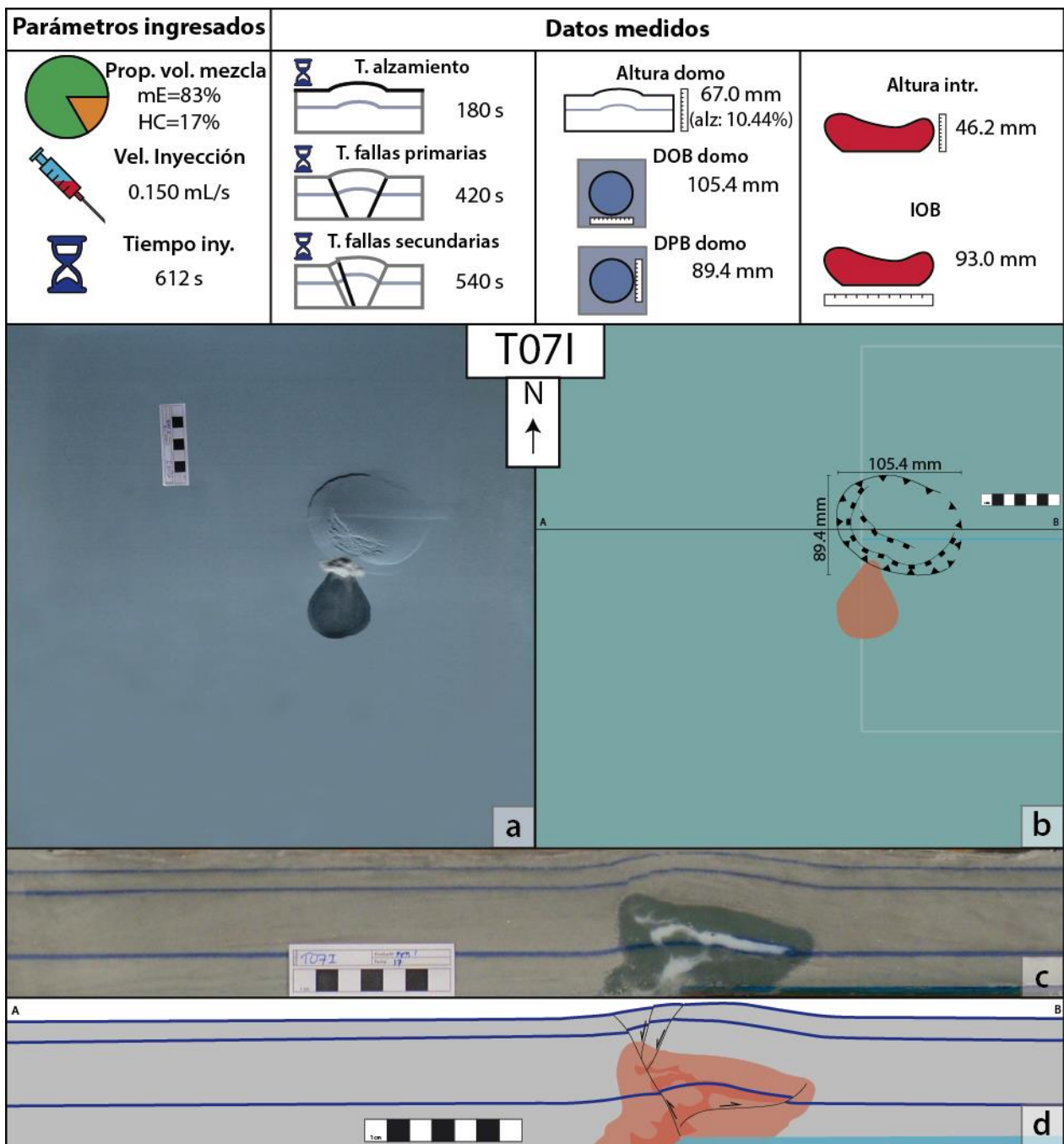


Figura 3.4 Resumen experimento T071. Parámetros fijados para el modelo, y datos medidos. a) Foto en planta del resultado final del experimento (10:12 minutos). Se produjo extrusión del fluido, y una leve subsidencia. La arena blanca se utilizó como tapón para la extrusión. b) Esquema del resultado en planta del experimento (a partir de la imagen a). Se marca la posición que tuvo la placa, la manguera y el corte del perfil (mostrado en la imagen c), además de las dimensiones del domo. c) Corte en perfil (28 cm) mostrado en la imagen c. El intrusivo (en blanco, sin teñir en este caso) tiende a subir, para luego expandirse lateralmente sobre el nivel guía más bajo, presenta una leve tendencia a canalizarse por las fallas; el halo del intrusivo (marcado más oscuro) tiene una morfología similar. d) Esquema del corte en perfil (misma ubicación que imagen c). El intrusivo se marca en rojo oscuro; el halo, en rojo claro. La línea celeste en la parte inferior representa la proyección de la manguera, el fluido se inyecta desde su extremo W. Detalles de las siglas y mediciones en el ítem 3.1.

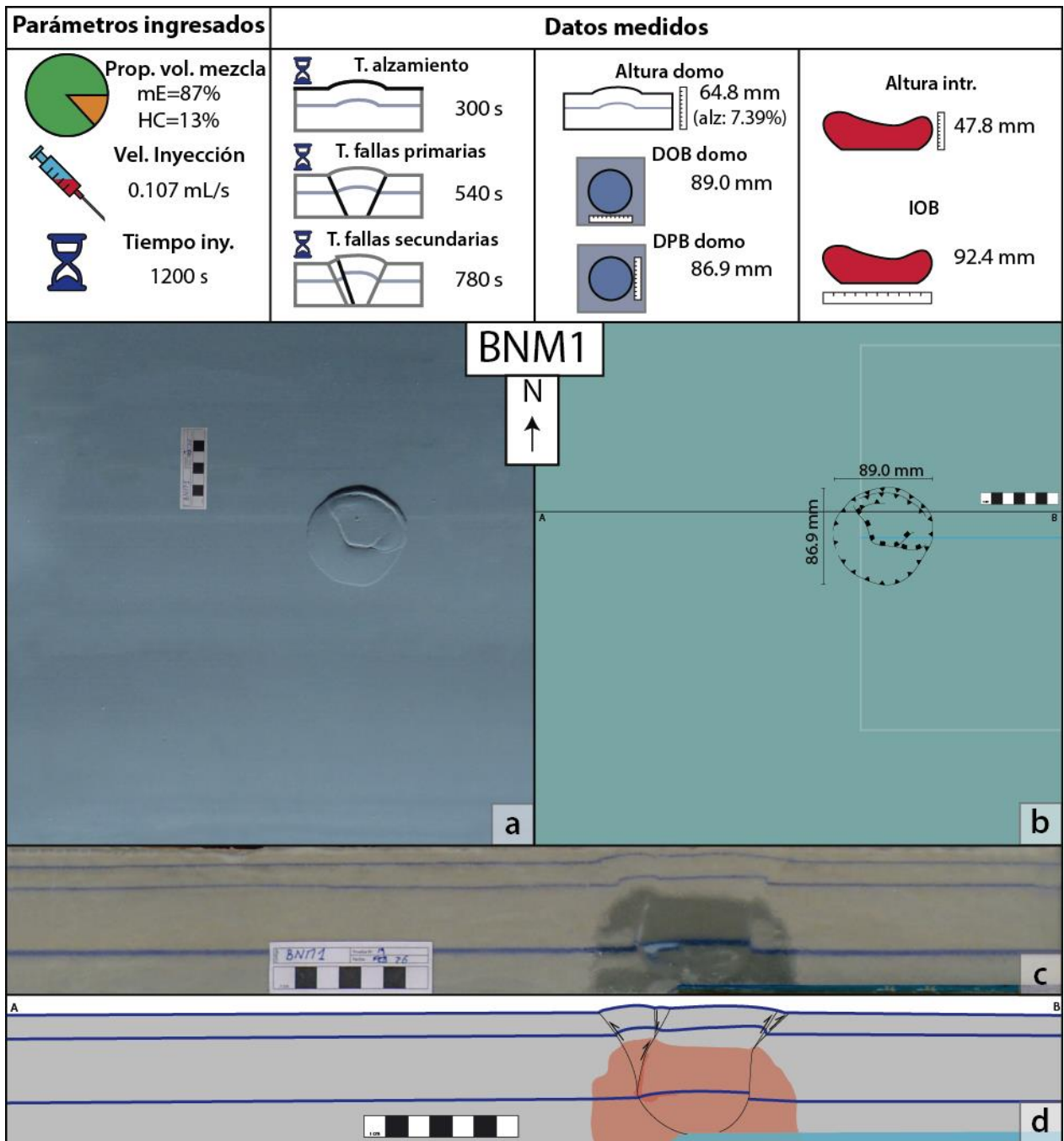


Figura 3.5 Resumen experimento BNM1. Parámetros fijados para el modelo, y datos medidos. a) Foto en planta del resultado final del experimento (20:00 minutos). No se produjo extrusión del fluido, pero sí una importante subsidencia. b) Esquema del resultado en planta del experimento (a partir de la imagen a). Se marca la posición que tuvo la placa, la manguera y el corte del perfil (mostrado en la imagen c), además de las dimensiones del domo. c) Corte en perfil (29 cm) mostrado en la imagen c. El intrusivo (en blanco, sin teñir en este caso) tiende a subir por las fallas y concentrarse en el primer nivel guía; el halo del intrusivo (marcado más oscuro) tiene una morfología similar. d) Esquema del corte en perfil (misma ubicación que imagen c). El intrusivo se marca en rojo oscuro; el halo, en rojo claro. La línea celeste en la parte inferior representa la proyección de la manguera, el fluido se inyecta desde su extremo W. Detalles de las siglas y mediciones en el ítem 3.1.

3.1.5. BNM2

Al igual que el caso anterior, el modelo BNM2 tuvo una proporción en volumen mE:HC de 20:3 (87% y 13%, respectivamente). La velocidad inicial se fijó en 0.137 mL/s (15% de la capacidad de la bomba), pero esta velocidad no se vio reflejada en ascenso del domo, por lo que, tras 14 minutos sin variación, se subió a 0.250 mL/s (30% de la capacidad de la bomba). Los tiempos se asignaron considerando como tiempo inicial el momento en que se cambió la velocidad. Luego de 300 segundos (05:00 minutos) de haber subido la velocidad, se detuvo la prueba, lo que entregó un volumen inyectado teórico de 75 mL.

El domo comenzó a ascender a los 2 minutos. Ya a los 3 minutos se marcaron las fallas en superficie, y a los 4 minutos se creó una falla secundaria por donde se canalizó el ascenso hasta el final del experimento. Para este caso, el fluido no alcanzó la superficie. Luego de terminado el modelo, el domo experimentó subsidencia (Figura 3.6.a-b).

Las dimensiones del domo generado fueron de 7.27 cm para DOB y 8.23 cm para DPB, lo que entregó una razón $DOB:DPB=0.88$ (Figura 3.6.a-b). La altura final del domo fue de 6.38 cm (aumentó en un 5.91% con respecto a la altura inicial, Figura 3.6.c-d), por lo que la razón $D_{prom}:H_{domo}$ fue de 1.22.

El intrusivo formado en este experimento fue de 8.42 cm de IOB, y de 4.27 cm de H_{intr} , lo que entregó una razón $IOB:H_{intr}=1.97$ (Figura 3.6.c-d).

3.1.6. NDFB

Para el modelo NDFB, la proporción mE:HC fue de 20:4 (83% y 17%, respectivamente). Por 300 segundos (05:00 minutos), se inyectó el fluido a 0.103 mL/s (10% de la capacidad de la bomba), pero al no verse ascenso del domo, se subió la velocidad a 0.130 mL/s (15% de la capacidad de la bomba), la que se mantuvo por 940 segundos (15:40 minutos). Esto arrojó un volumen inyectado teórico de 122 mL.

Para este experimento, el domo comenzó a notarse levemente al minuto de haber variado la velocidad, y las fallas no llegaron a superficie sino hasta los 13 minutos desde que se modificó la inyección; no hubo fallas secundarias. En este modelo, el fluido no alcanzó la superficie, y la subsidencia posterior no fue tan importante como en casos anteriores (Figura 3.7.a-b).

La morfología final del domo alcanzó los 7.41 cm para DOB y 8.17 cm para DPB. Esto entrega una razón $DOB:DPB=0.91$ (Figura 3.7.a-b). La elevación máxima de la superficie fue solo un 3.33% más alta que la altura inicial, llegando a los 6.21 cm (Figura 3.7.c-d). La razón $D_{prom}:H_{domo}$ fue de 1.26.

El intrusivo tuvo un largo de 7.9 cm y H_{intr} de 3.86 cm, con una razón $IOB:H_{intr}=2.05$ (Figura 3.7.c-d).

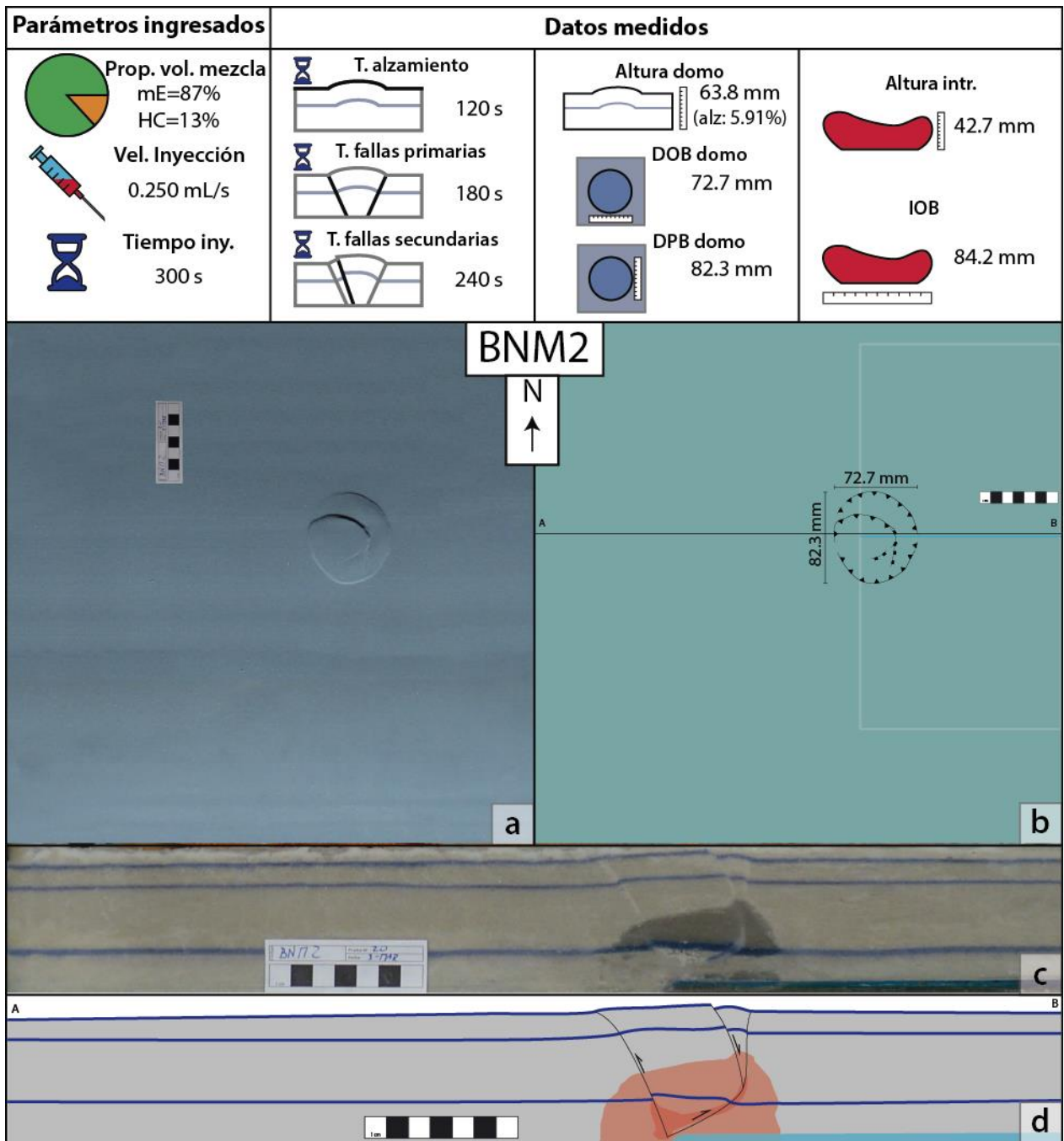


Figura 3.6 Resumen experimento BNM2. Parámetros fijados para el modelo, datos medidos. a) Foto en planta del resultado final del experimento (05:00 minutos). No se produjo extrusión del fluido, pero sí una leve subsidencia. b) Esquema del resultado en planta del experimento (a partir de la imagen a). Se marca la posición que tuvo la placa, la manguera y el corte del perfil (mostrado en la imagen c), además de las dimensiones del domo. c) Corte en perfil (28 cm) mostrado en la imagen c. El intrusivo (en blanco, no se tiñó para este modelo) tiende a concentrarse en la parte baja de las fallas, para luego subir por ellas; el halo del intrusivo (marcado más oscuro) tiene una morfología similar. d) Esquema del corte en perfil (misma ubicación que imagen c). El intrusivo se marca en rojo oscuro; el halo, en rojo claro. La línea celeste en la parte inferior representa la proyección de la manguera, el fluido se inyecta desde su extremo W. Detalles de las siglas y mediciones en el ítem 3.1.

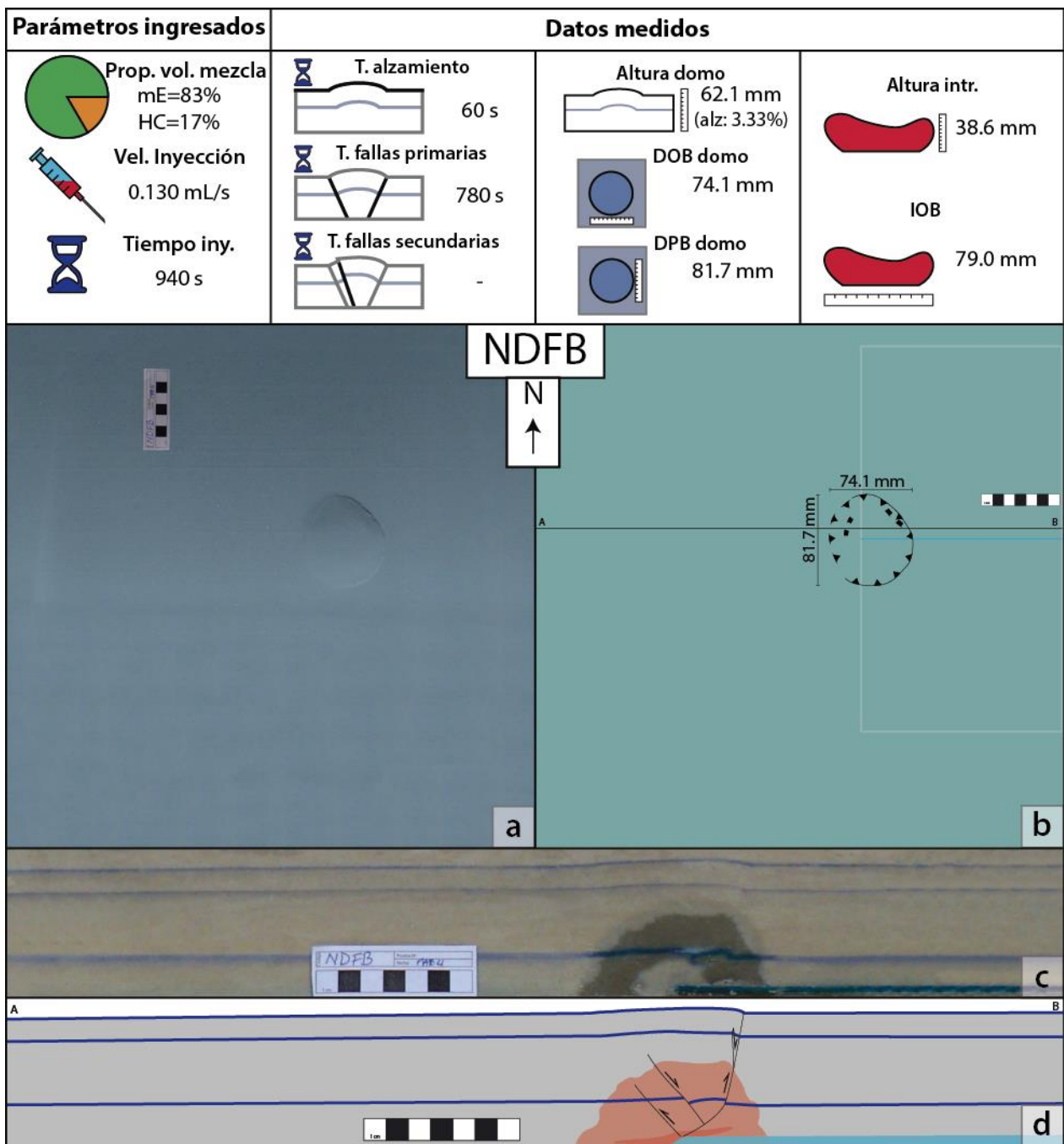


Figura 3.7 Resumen experimento NDFB. Parámetros fijados para el modelo, y datos medidos. a) Foto en planta del resultado final del experimento (15:40 minutos). No se produjo extrusión del fluido, solo un leve descenso del domo. b) Esquema del resultado en planta del experimento (a partir de la imagen a). Se marca la posición que tuvo la placa, la manguera y el corte del perfil (mostrado en la imagen c), además de las dimensiones del domo. c) Corte en perfil (28 cm) mostrado en la imagen c. El intrusivo no se ve con claridad en la imagen (lo blanco corresponde mayormente a arena humedecida), pero tiende a mantenerse bajo y subir levemente por las fallas; el halo del intrusivo se marcó más oscuro. d) Esquema del corte en perfil (misma ubicación que imagen c). El intrusivo se marca en rojo oscuro; el halo, en rojo claro. La línea celeste en la parte inferior representa la proyección de la manguera, el fluido se inyecta desde su extremo W. Detalles de las siglas y mediciones en el Ítem 3.1.

3.1.7. MI2

En este experimento se usó una proporción en volumen mE:HC de 20:5 (80% y 20%, respectivamente). La velocidad de inyección fue de 0.140 mL/s (15% de la capacidad de la bomba), y se inyectó durante 1200 segundos (20:00 minutos); el volumen inyectado teórico fue de 168 mL.

El domo comenzó a formarse a los 4 minutos aproximadamente. En este modelo las fallas no alcanzaron la superficie, y tampoco lo hizo el fluido (Figura 3.8.a-b).

Las dimensiones finales del domo fueron de 11.42 cm para DOB y 10.68 cm para DPB, medidas que dejaron la razón DOB:DPB=1.07 (Figura 3.8.a-b). Además, el modelo se elevó un 4.16% (altura final de 6.26 cm, Figura 3.8.c-d), lo que generó una razón $D_{prom}:H_{domo}=1.77$.

Por otro lado, el intrusivo tuvo una dimensión IOB de 12.57 cm, y H_{intr} de 2.29 cm, lo que entregó una razón IOB: $H_{intr}=5.49$, la más alta de esta serie de modelos (Figura 3.8.c-d).

3.1.8. MI3

Este modelo fue realizado con una proporción en volumen de microesferas y harina de cuarzo de 20:3 (87% y 13%, respectivamente). La velocidad de inyección fue de 0.157 mL/s (10% de la capacidad de la bomba) durante un tiempo de 272 segundos (04:32 minutos), lo que entregó un volumen inyectado teórico de solo 43 mL.

El domo comenzó a notarse en superficie antes del primer minuto de haber empezado la prueba, y ya al segundo minuto, las fallas llegan a superficie. Al final del experimento (04:32 minutos), el fluido alcanzó la superficie, y tiempo después el vacío generado por el aceite que salió provocó un pequeño agujero en el domo (Figura 3.9.a-b).

Las dimensiones finales del domo fueron de 8.17 cm para DOB y 8.52 cm para DPB, medidas que dejaron la razón DOB:DPB=0.96 (Figura 3.9.a-b). Además, el modelo se elevó un 7.23% (altura final de 6.47 cm, Figura 3.9.c-d), lo que generó una razón $D_{prom}:H_{domo}=1.29$.

Por otro lado, el intrusivo tuvo una dimensión IOB de 6.20 cm, y H_{intr} de 4.49 cm, lo que entregó una razón IOB: $H_{intr}=1.38$, la menor de toda esta serie (Figura 3.9.c-d).

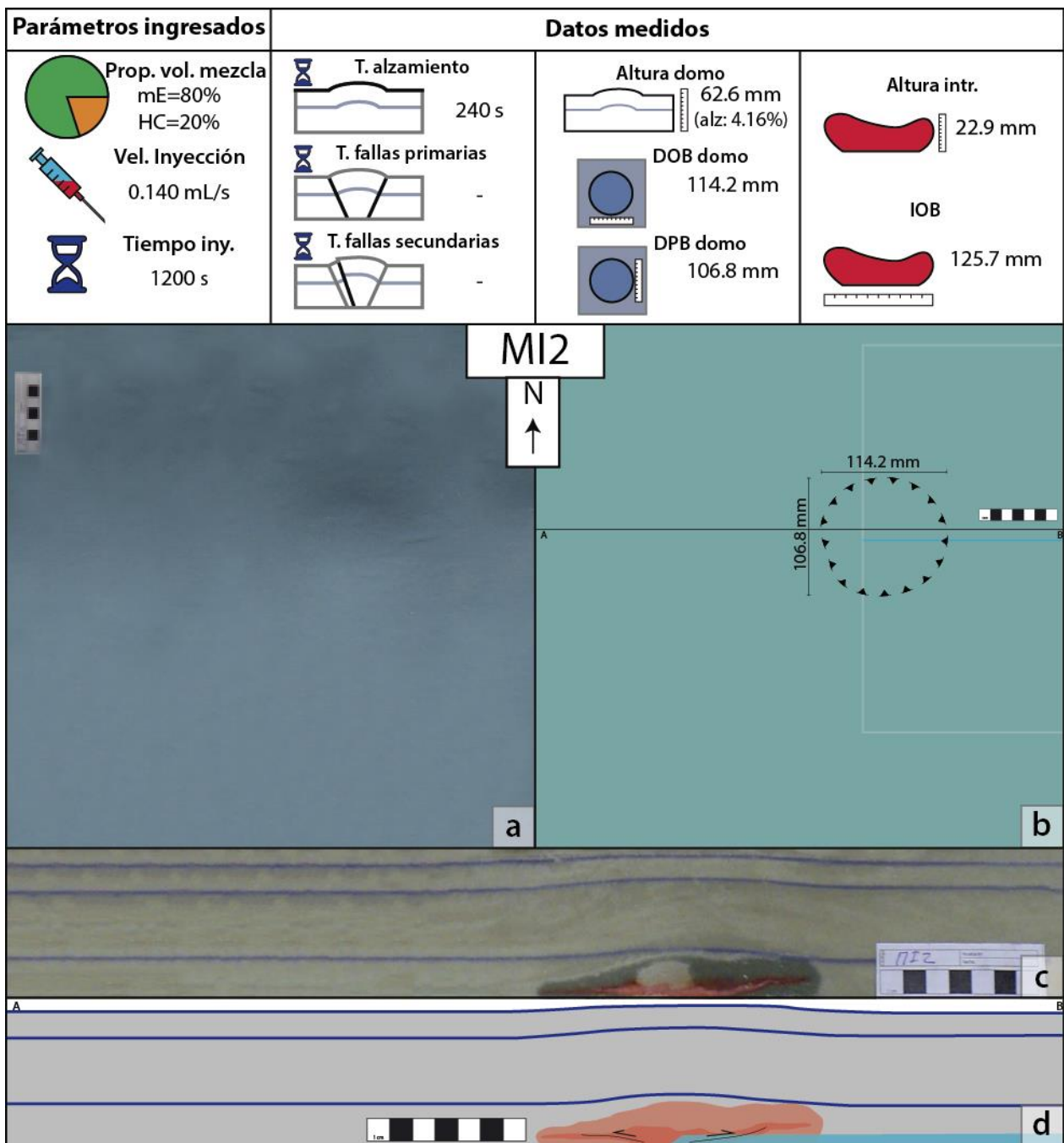


Figura 3.8 Resumen experimento MI2. Parámetros fijados para el modelo, y datos medidos. a) Foto en planta del resultado final del experimento (20:00 minutos). No se produjo extrusión del fluido, ni afloraron las fallas. b) Esquema del resultado en planta del experimento (a partir de la imagen a). Se marca la posición que tuvo la placa, la manguera y el corte del perfil (mostrado en la imagen c), además de las dimensiones del domo. c) Corte en perfil (28 cm) mostrado en la imagen c. El intrusivo (teñido en rojo) tiende a mantenerse bajo, y subir levemente por las fallas; el halo del intrusivo (marcado más oscuro) tiene una morfología similar. En blanco se ve un poco de arena humedecida d) Esquema del corte en perfil (misma ubicación que imagen c). El intrusivo se marca en rojo oscuro; el halo, en rojo claro. La línea celeste en la parte inferior representa la proyección de la manguera, el fluido se inyecta desde su extremo W. Detalles de las siglas y mediciones en el ítem 3.1.

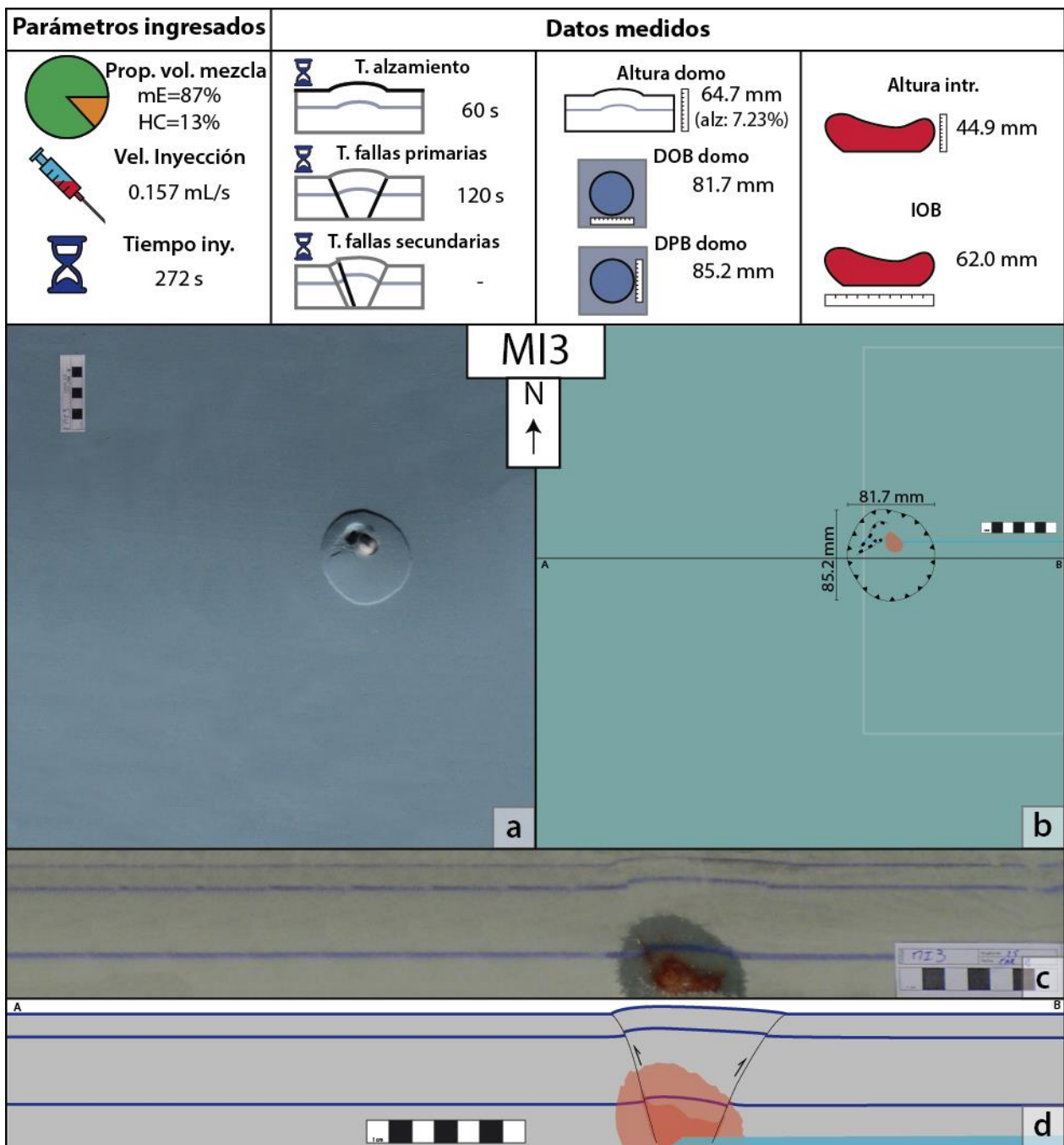


Figura 3.9 Resumen experimento MI3. Parámetros fijados para el modelo, y datos medidos. a) Foto en planta del resultado final del experimento (04:32 minutos). Se produjo extrusión del fluido, lo que generó un agujero en el modelo. La arena blanca se usó como tapón para el fluido. b) Esquema del resultado en planta del experimento (a partir de la imagen a). Se marca la posición que tuvo la placa, la manguera y el corte del perfil (mostrado en la imagen c), además de las dimensiones del domo. c) Corte en perfil (28 cm) mostrado en la imagen c. El intrusivo (en rojo) tiende a concentrarse en la parte baja de las fallas, y subir por ellas; el halo del intrusivo (marcado más oscuro) tiene una morfología similar, aunque más redondeada. d) Esquema del corte en perfil (misma ubicación que imagen c). El intrusivo se marca en rojo oscuro; el halo, en rojo claro. La línea celeste en la parte inferior representa la proyección de la manguera, el fluido se inyecta desde su extremo W. Detalles de las siglas y mediciones en el ítem 3.1.

3.2. Análisis y discusión de los modelos de inyección de fluidos sin deformación tectónica.

Como se ha visto en los experimentos anteriormente mostrados, el fluido inyectado al ascender formó un domo en la superficie del modelo. Este domo presentó una morfología circular a levemente elipsoidal en planta (Figura 3.10.a). Las fallas inversas primarias (Fip en la Figura 3.10.a) que definen esta elevación se producen por la inyección del fluido en profundidad, y a su vez ayudan al ascenso de este. En algunos casos, el fluido se canalizó hacia alguno de los lados del domo, lo que se manifestó en fallas inversas secundarias (Fis en la Figura 3.10.a) que, en su mayoría, se encontraron contenidas dentro de la elipse que formaban las fallas primarias. También fue posible encontrar fallas normales (Fn en la Figura 3.10.a) asociadas a una subsidencia posterior a la inyección. Esto se debe a la leve percolación del fluido en la arena, lo que hace disminuir el volumen del intrusivo y genera dicho descenso. Sin embargo, este efecto no fue analizado en este estudio.

El intrusivo también presentó una morfología elíptica en planta. Sin embargo, en perfil tuvo una forma más irregular, y su variación es más notoria entre los modelos realizados (Figura 3.10.b).

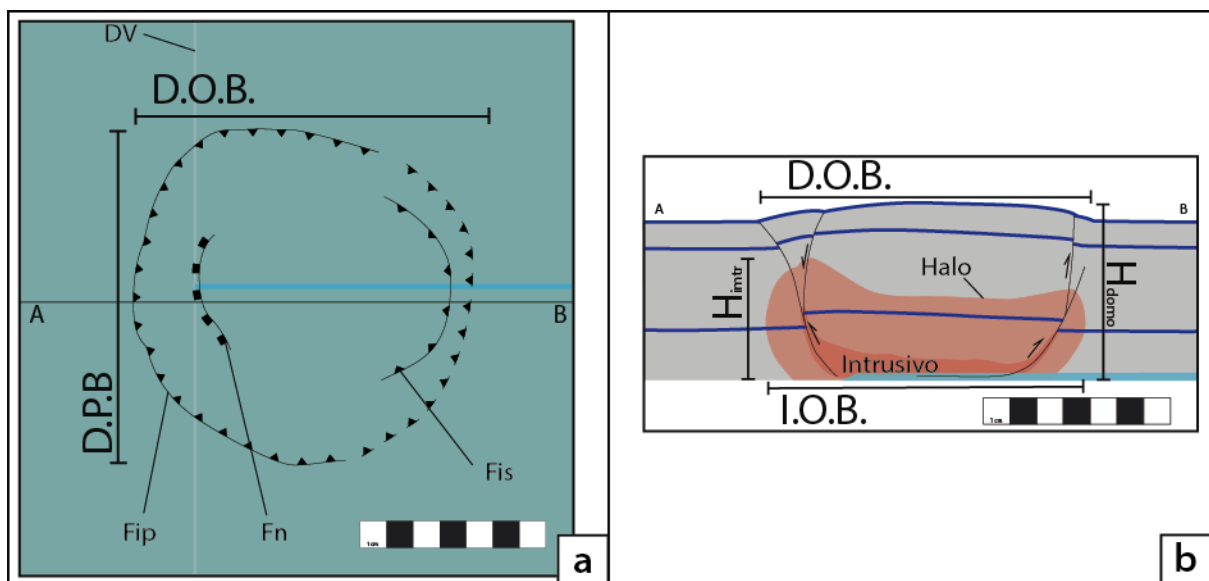


Figura 3.10 Esquema resumen de las estructuras y la morfología del intrusivo y del domo generado en los modelos de inyección de fluido sin deformación tectónica. Se señalan los parámetros DOB (dimensiones del domo ortogonales al borde), DPB (dimensiones del domo paralelas al borde), H_{domo} (altura del domo), IOB (dimensiones del intrusivo ortogonales al borde) y H_{intr} (altura del intrusivo). Además, se muestran las fallas inversas primarias (Fip), fallas inversas secundarias (Fis) y fallas normales (Fn). La línea celeste corresponde a la manguera por cuyo extremo izquierdo se inyectó el fluido; DV es el borde de la discontinuidad de velocidad asociada a los modelos con deformación tectónica.

Los datos medidos en los modelos corresponden a la temporalidad del alzamiento del domo, de las fallas primarias y secundarias, así como también las dimensiones del domo y del intrusivo. Estos valores se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resumen de los resultados de los modelos de inyección de fluido sin deformación tectónica.

Parámetros Secundarios	Modelos	T05I	T06I2	T07I	BNM1	BNM2	NDFB	MI2	MI3
Ingresados									
% _{vol} de microesferas en la mezcla		86%	87%	83%	87%	87%	83%	80%	87%
Velocidad de inyección (mL/s)		0.101	0.173	0.150	0.107	0.250	0.130	0.140	0.157
Tiempo de inyección (s)		552	1200	612	1200	300	940	1200	272
Obtenidos									
Temporalidad (s)	Alzamiento	120	420	180	300	120	60	240	60
	F. Primarias (Fip)	300	600	420	540	180	780	-	120
	F. Secundarias (Fis)	360	780	540	780	240	-	-	-
Dimensiones del domo (mm)	H _{domo}	66.0	66.1	67.0	64.8	63.8	62.1	62.6	64.7
	DOB	87.4	132.0	105.4	89.0	72.7	74.1	114.2	81.7
	DPB	87.6	126.3	89.4	86.9	82.3	81.7	106.8	85.2
Dimensiones del intrusivo (mm)	H _{intr}	41.9	44.1	46.2	47.8	42.7	38.6	22.9	44.9
	IOB	135.4	132.9	93.0	92.4	84.2	79.0	125.7	62.0

3.2.1. Características generales

A continuación, se analizan y discuten los principales resultados obtenidos en los modelos de inyección de fluido sin deformación tectónica según los parámetros ingresados (porcentaje en volumen de microesferas en la mezcla, velocidad de inyección y tiempo de inyección). Si bien existen tendencias en los resultados, puede que estas no sean tan claras como es esperable. Esto fue causado por la variación conjunta de más de un parámetro secundario en busca de la combinación óptima para la modelación analógica.

3.2.2. Influencia de la proporción de microesferas y harina de cuarzo (mE:HC)

Lo primero que se puede notar está relacionado con el porcentaje del volumen total de mezcla que corresponde a microesferas (razón mE:HC). Para los casos con mayor cantidad de microesferas, existe una tendencia a que la altura del intrusivo aumente (Figura 3.11.a), lo que podría estar relacionado con la densidad y la competencia de la arena utilizada en el modelo: una mayor proporción de microesferas implica que la densidad sea levemente menor, lo que disminuye el peso sobre el intrusivo. Esto se traduce en un menor esfuerzo por parte del intrusivo para ascender, y en consecuencia una mayor altura del intrusivo. Además, al tener mayor proporción de microesferas, aumenta la permeabilidad, por lo que el halo es más grueso. A pesar de esto, en casos de altas razones mE:HC, el fluido tiende a focalizarse más en las fallas (Figura 3.13).

Siguiendo con la influencia de la mezcla de microesferas y harina de cuarzo en la morfología del domo, se puede notar que, al aumentar esta proporción, la razón entre el largo promedio en planta (promedio entre DOB y DPB) y la altura del domo (H_{domo}) disminuye levemente, es decir, tiende a hacerse menos ancho y más alto (H_{domo}) disminuye levemente, es decir, tiende a hacerse menos ancho y más alto, con excepción del experimento T06I2 que no sigue la tendencia (Figura 3.11.b), lo que está ligado a lo mencionado anteriormente para la altura del intrusivo. A pesar de que presenten variaciones dentro de los modelos con la misma proporción –que serían producidas por la variación en conjunto de los otros parámetros, en particular del tiempo de inyección– temporalmente también hay una correlación según el porcentaje de microesferas: al aumentar esta razón, disminuye el tiempo entre el alzamiento y el desarrollo de las fallas primarias (Figura 3.12). Además de esto, se ve una tendencia a que al aumentar la razón mE:HC las fallas inversas principales (Fip) son más claras y continuas en planta (Figura 3.14), lo que pudo ser producido por una menor fricción del material, que genera superficies de falla más largas y suaves.

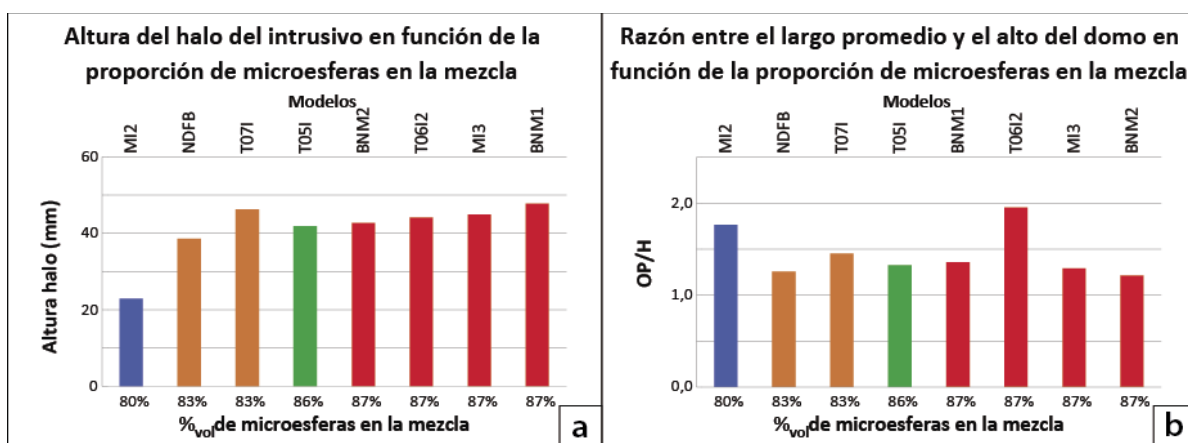


Figura 3.11 Gráfico de la altura del halo del intrusivo (a) y de la razón entre el largo promedio (OP) y el alto (H) del domo (b) en función de la proporción de microesferas en la mezcla. Se probaron 4 proporciones de volumen entre microesferas y harina de cuarzo: 80%-20%(barra azul); 83%-17% (barras anaranjadas); 86%-14% (barra verde), y 87%-13% (barras rojas). Para más detalle del análisis de este parámetro, ver el texto.

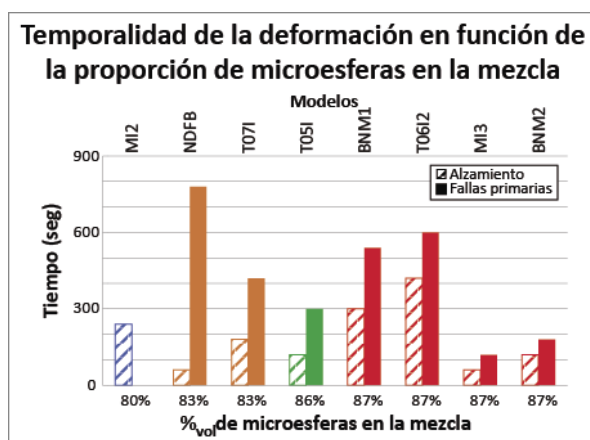


Figura 3.12 Gráfico de la temporalidad del alzamiento (barras con franjas) y de las fallas primarias (barras sólidas) del domo en función de la proporción de microesferas en la mezcla. Se probaron 4 proporciones de volumen entre microesferas y harina de cuarzo: 80%-20%(barra azul); 83%-17% (barras anaranjadas); 86%-14% (barra verde), y 87%-13% (barras rojas). Las diferencias existentes entre modelos de misma proporción serían producidas por la variación en conjunto de los otros parámetros como el tiempo de inyección. Para más detalle del análisis de este parámetro, ver el texto.

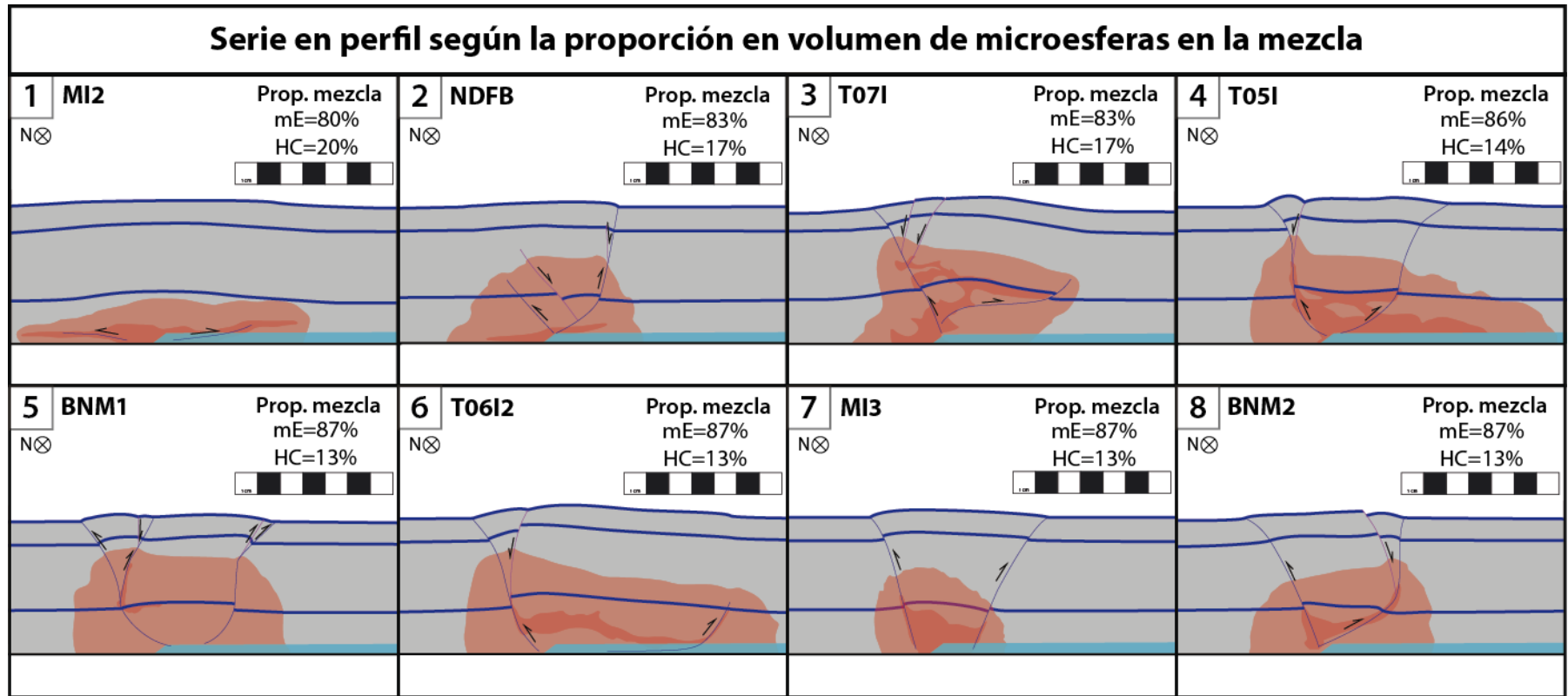


Figura 3.13 Serie en perfil de los modelos de inyección de fluidos sin deformación tectónica, ordenados de menor (1) a mayor (8) proporción de microesferas en la mezcla. Al aumentar la proporción de microesferas, aumenta también la altura del intrusivo y el grosor de su halo. También se aprecia una disminución en la razón largo/alto del domo y del intrusivo. Por último, al aumentar la proporción de microesferas se produce un aumento en la focalización del intrusivo en las fallas. Para más detalle de las tendencias, ver el texto.

Serie en planta según la proporción en volumen de microesferas en la mezcla

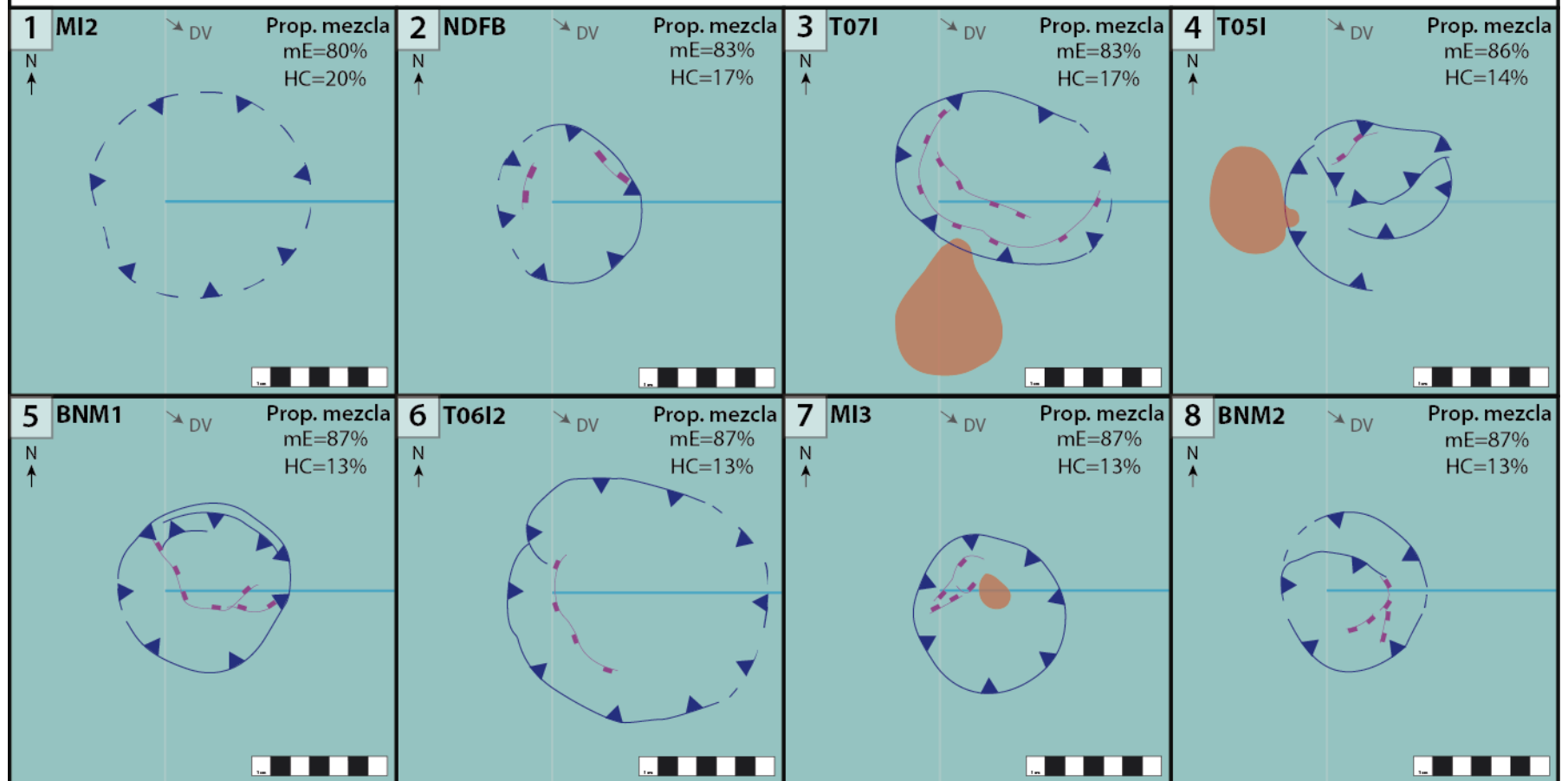


Figura 3.14 Serie en planta de los modelos de inyección de fluidos sin deformación tectónica, ordenados de menor (1) a mayor (8) proporción de microesferas en la mezcla. Se ve que al aumentar la proporción de microesferas las fallas primarias son más claras y continuas. Para más detalle de las tendencias, ver el texto.

3.2.3. Influencia del tiempo total de inyección

Dentro de las tendencias según el tiempo total de inyección, la más destacada tiene relación con las dimensiones del domo (DOB y DPB), las que aumentan para tiempos de inyección más altos (Figura 3.15.a y Figura 3.17). Este aumento fue proporcional entre ambos valores, es decir, la razón DOB:DPB se mantuvo más o menos constante a pesar de las variaciones de la duración del experimento (Figura 3.15.b). La razón entre las dimensiones en planta y la altura, tanto para el domo como para el intrusivo, está muy ligada a lo anterior. El primero se define como en el cociente entre “OP” (promedio entre DOB y DPB) y H_{domo} ; mientras que el segundo es la razón entre IOB y $H_{\text{intr.}}$. Se nota que, en ambos casos, para tiempos de inyección bajos esta razón es baja y cercana a 1. Por otro lado, para tiempos de inyección más altos, este cociente aumenta hasta valores cercanos a 2 para el domo o superiores a 3 para el intrusivo (Figura 3.15.c-d, Figura 3.16).

Las variaciones de los parámetros recién mencionados se explican en parte por el tipo de deformación que presenta el intrusivo a lo largo del tiempo: primero ocurre un alzamiento, para después desarrollarse lateralmente. Sin embargo, también está relacionado con la velocidad de inyección, pues algunos experimentos se terminaron en un menor tiempo, cuando el fluido alcanzó la superficie.

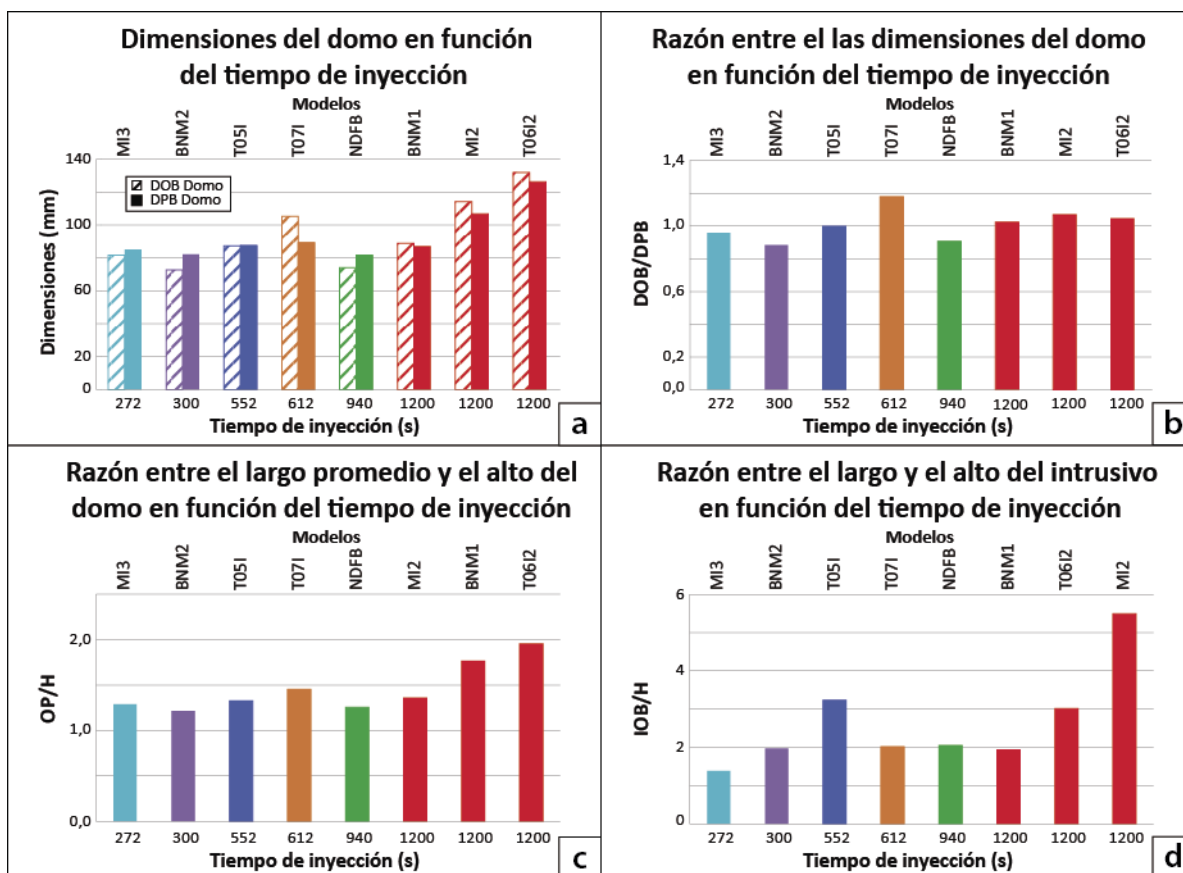


Figura 3.15 Gráfico en función del tiempo de inyección de (a) las dimensiones DOB (barras con franjas) y DPB (barras sólidas); (b) de la razón entre ellas; (c) de la razón OP/H del domo; y (d) de la razón IOB de intrusivo. Los modelos se realizaron durante 6 tiempos diferentes graficados en distintos colores: 272 segundos (barra celeste); 300 segundos (barra morada); 552 segundos (barra azul); 612 segundos (barra anaranjada), 940 segundos (barra verde); 1200 segundos (barra roja). Para más detalles del análisis, ver el texto.

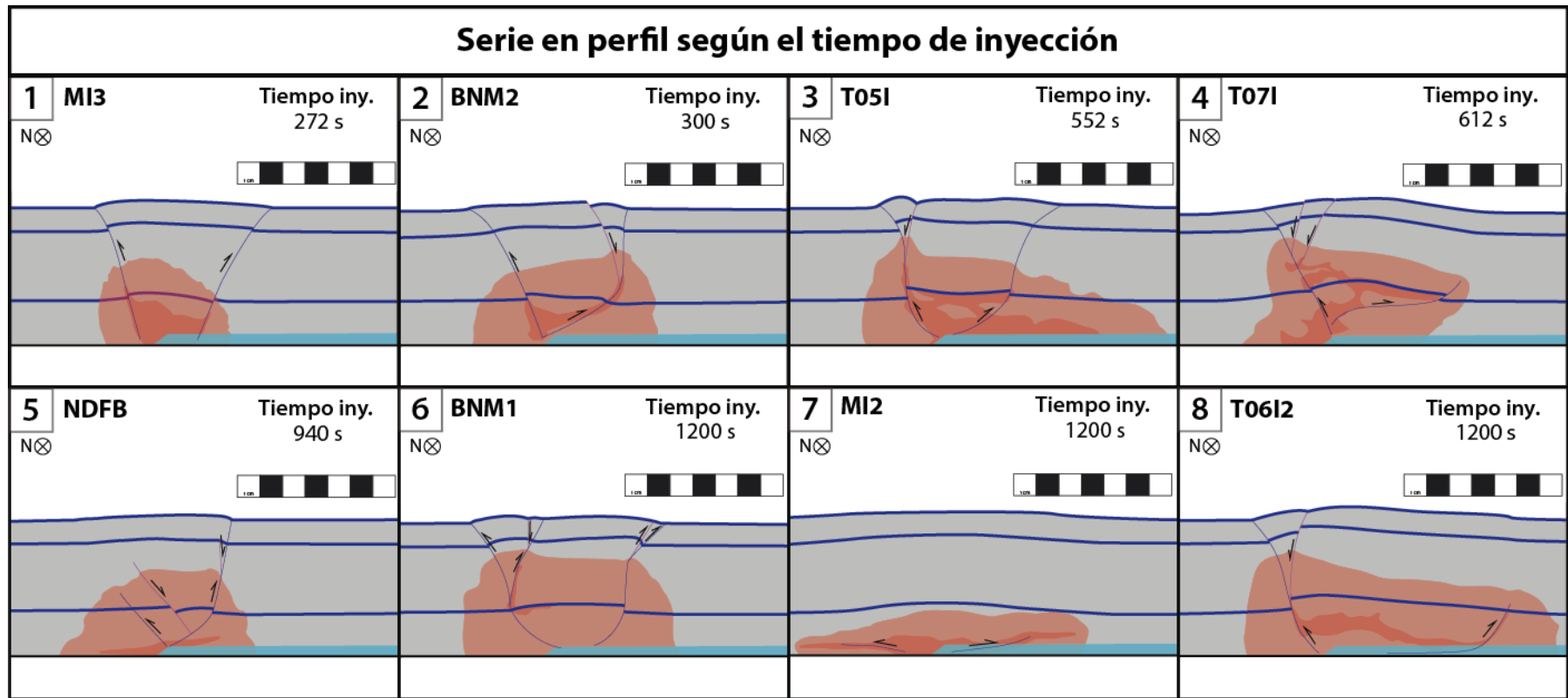


Figura 3.16 Serie en perfil de los modelos de inyección de fluidos sin deformación tectónica, ordenados de menor (1) a mayor (8) tiempo de inyección. Al aumentar el tiempo de inyección, aumentan las dimensiones del domo (acá solo se ve DOB) en similar proporción. Además, el cociente entre el largo del domo (OP, promedio entre DOB y DPB) y el alto final del domo aumenta, así también el cociente entre el largo del intrusivo (IOB) y su alto. Para más detalle de las tendencias, ver el texto.

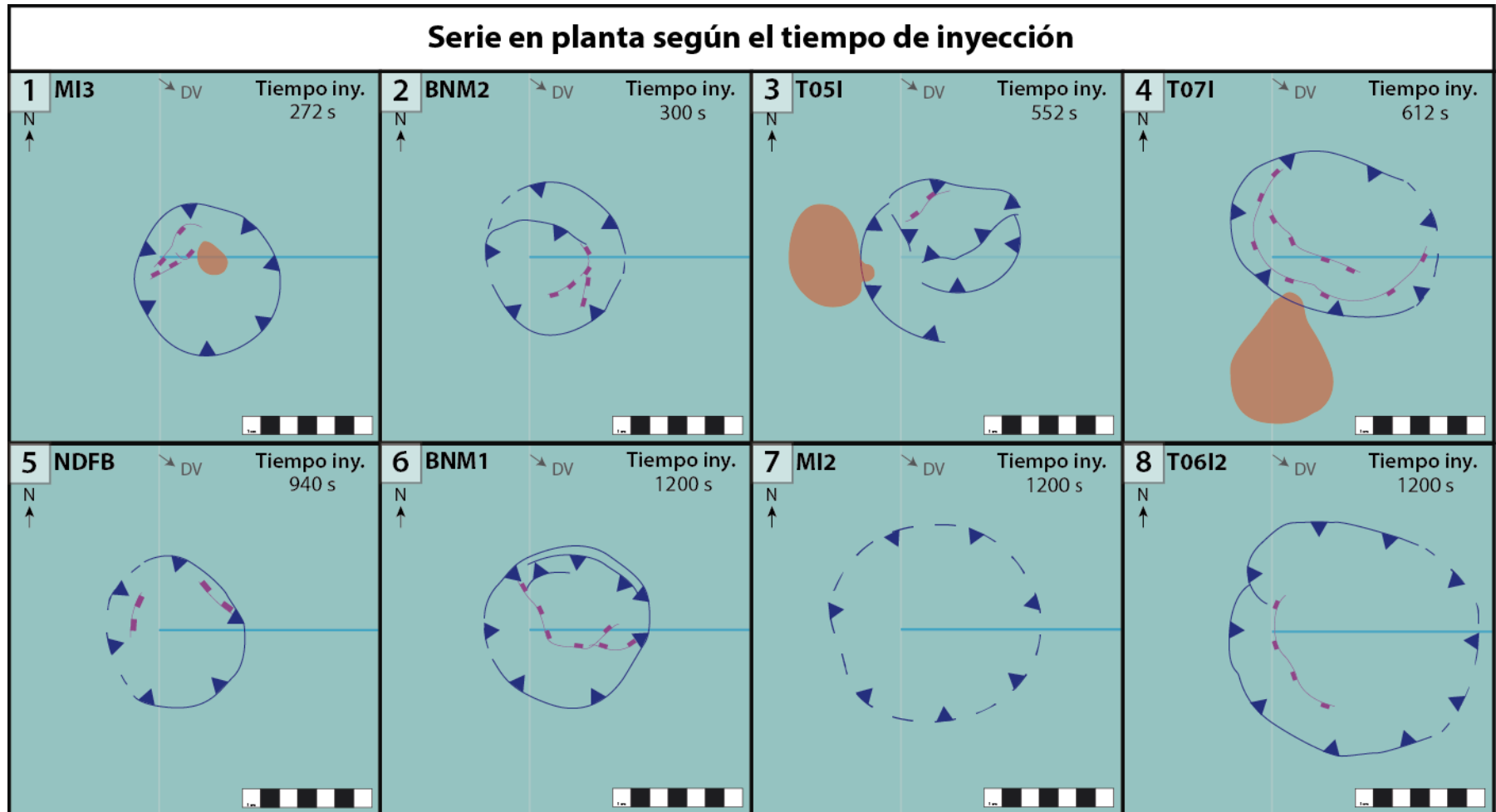


Figura 3.17 Serie en planta de los modelos de inyección de fluidos sin deformación tectónica, ordenados de menor (1) a mayor (8) tiempo de inyección. Se ve un claro aumento de las dimensiones del domo (DOB y DPB). Para más detalle de las tendencias, ver el texto.

3.2.4. Influencia de la tasa de inyección

Finalmente, con respecto a la tasa de inyección del fluido se ven relaciones menos claras. Una de ellas es que a mayor velocidad de inyección, el halo se hace más delgado con respecto al intrusivo que se encuentra más focalizado en las fallas (Figura 3.18). Esto se debe a que al moverse más rápido el fluido tuvo una menor percolación en la arena, comparada con los de baja velocidad que avanzan menos y expanden más su halo. Por último, para los casos extremos de baja y alta tasa de inyección, se generó un ascenso por fallas inversas secundarias (Fis), en contraste con el ascenso homogéneo por un único domo de los casos con velocidades de inyección media (Figura 3.19).

De acuerdo al análisis y a los resultados obtenidos en este capítulo, es que se sugiere que, para que la duración de la inyección no sea demasiado baja, la velocidad no debería sobrepasar los 0.200 mL/s. Además, para generar una mayor diferencia entre la velocidad alta y baja, se sugiere que el otro valor debe ser cercano a los 0.100 mL/s. Es así como se fijan los valores promedio de 0.105 mL/s y 0.175 mL/s para las velocidades de inyección baja y alta, respectivamente.

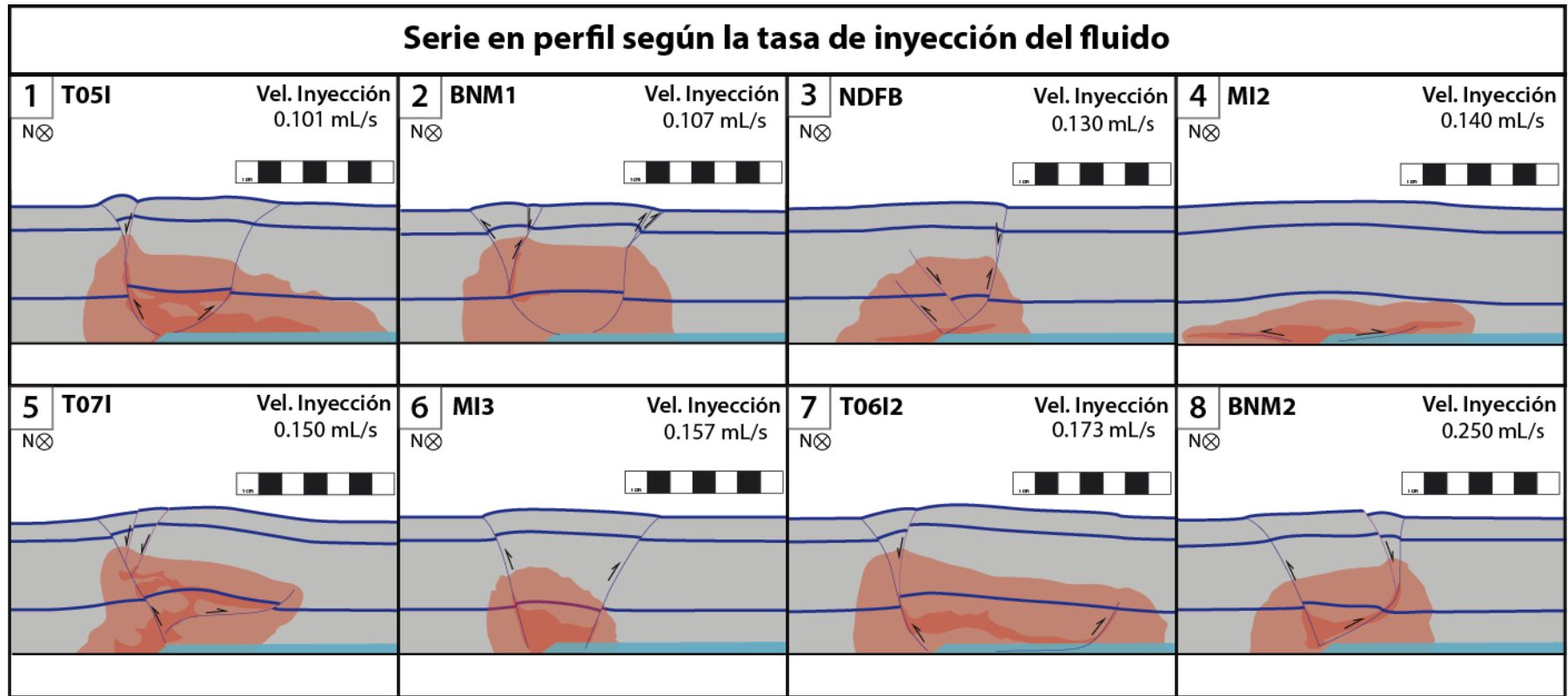


Figura 3.18 Serie en perfil de los modelos de inyección de fluidos sin deformación tectónica, ordenados de menor (1) a mayor (8) tasa de inyección del fluido. Al aumentar la velocidad de inyección, aumenta también la focalización del fluido en las fallas, y disminuye el grosor del halo del intrusivo. Para más detalle de las tendencias, ver el texto.

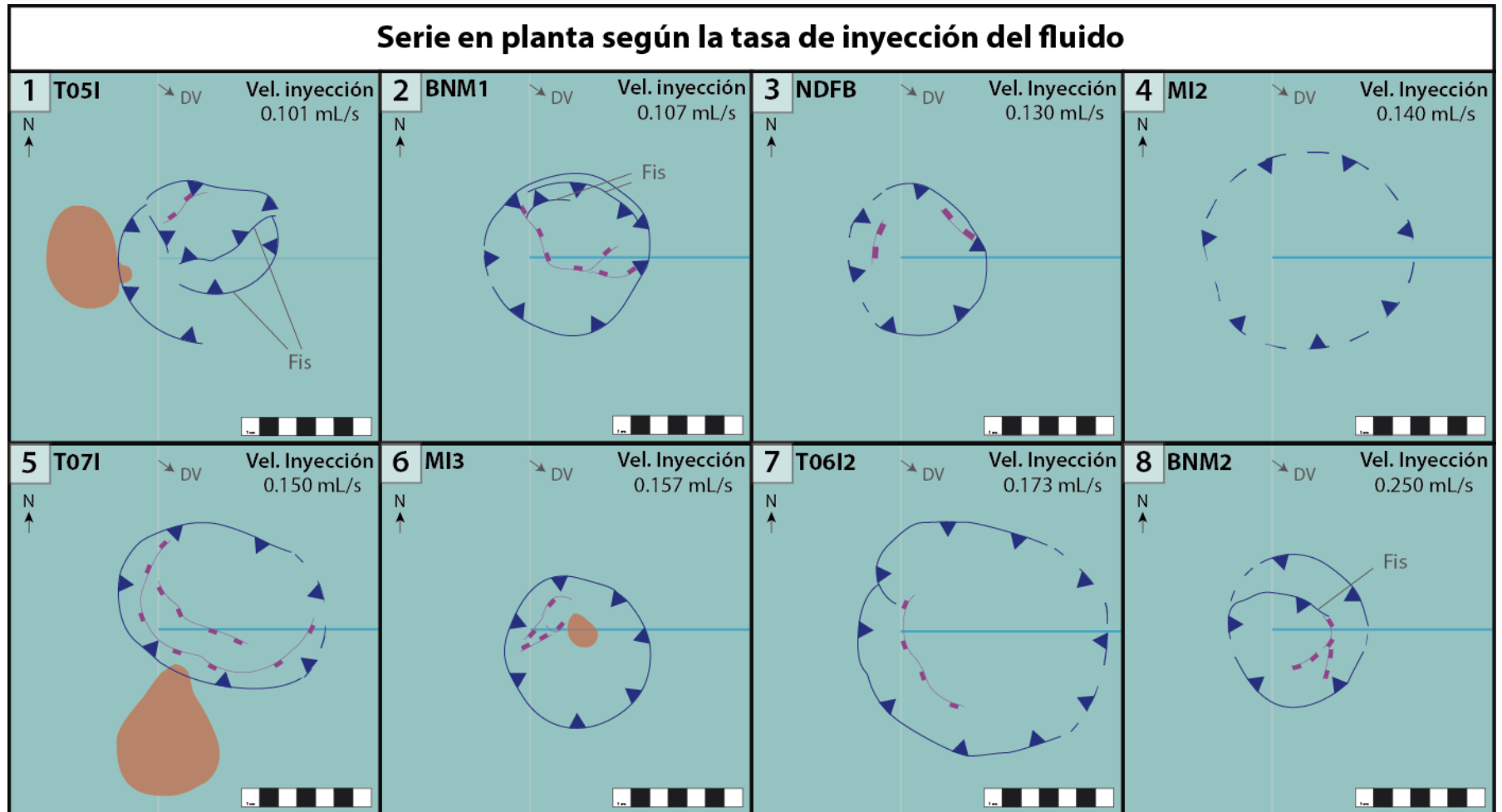


Figura 3.19 Serie en planta de los modelos de inyección de fluidos sin deformación tectónica, ordenados de menor (1) a mayor (8) tasa de inyección del fluido. Se puede notar que para los casos de menor y mayor velocidad se producen fallas inversas secundarias (Fis); mientras que para valores medios el ascenso tiende a ser más homogéneo mediante un único domo. Para más detalle de las tendencias, ver el texto.

3.3. Modelación de la inversión

Se hicieron 3 modelos de deformación sin inyección de fluido: uno puramente extensional (T03ME), el que se utilizó como caso base para visualizar la deformación en extensión; uno con extensión seguida de inversión a baja velocidad (T03M2); y uno con extensión seguida de inversión a velocidad media (BNI1). Además, se analizó si el comportamiento reológico de la mezcla 20:3 de microesferas y harina de cuarzo era similar a casos anteriores de modelación analógica de inversión tectónica (e.g., Muñoz, 2007); si bien la cohesión y el ángulo de fricción del material varía, esto solo se reflejó en los manteos y la cantidad de las fallas normales. Además, como se mencionó anteriormente (Ítem 1.4), dada la configuración del modelo sin una barra de silicona en la base como los utilizados por Muñoz (2007), el resultado no fue de dos graben, sino que solo de uno. Sin embargo, esta geometría no restringe el análisis, debido a que el presente trabajo busca representar un caso genérico de inversión de cuencas.

Otra de las consecuencias de la ausencia de la barra de silicona en la base del modelo es la jerarquía de fallas de rumbo: en los modelos de Muñoz (2007), estas solo se generaron como condición de borde, pues la zona central del modelo estaba aislada de ellas por la barra de silicona (Figura 3.20); en el presente trabajo, en cambio, las fallas oblicuas (rumbo con componente inversa) atravesaron gran parte del modelo, por lo que el acortamiento no pudo ser medido directamente en los cortes de perfil. Para poder medir acortamiento correctamente, sería necesario hacerlo mediante marcadores en superficie. Esta metodología no fue aplicada a los siguientes tres modelos de prueba, sino que solo se aplicó en las pruebas finales del trabajo (Capítulo 4).

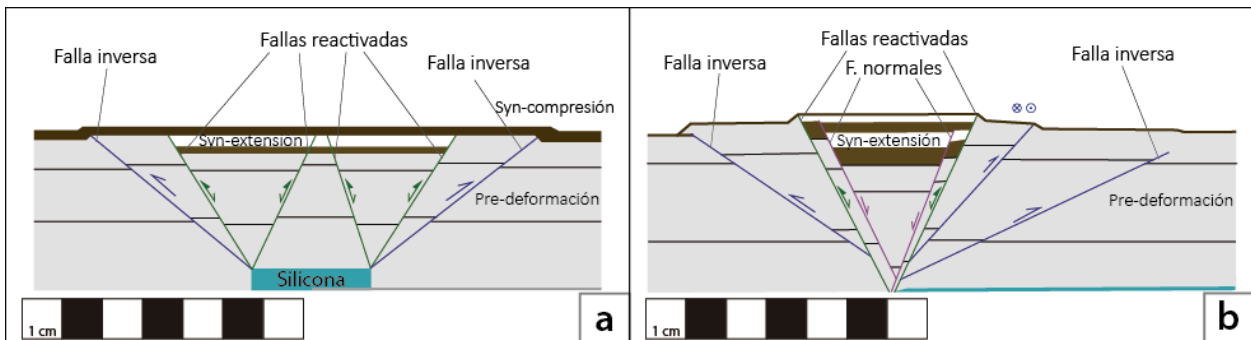


Figura 3.20 Comparación de los modelos de (a) Muñoz (2007, Modificado) y (b) este trabajo (caso genérico para ambas velocidades de convergencia). La presencia de silicona puede variar la disposición y cantidad de fallas normales (y, por ende, la cantidad de grabenes). Sin embargo, los modelos siguen siendo similares.

Uno de los modelos presentados en este Ítem corresponde a un caso base puramente extensional, cuyo fin es poder visualizar la deformación previa a la inversión tectónica; los otros dos son de inversión tectónica, uno de ellos tuvo sedimentación solo en el graben, mientras que al otro además se le realizó una sedimentación total una vez finalizada la extensión.

Para todos los casos se extendió 20 mm ortogonales al borde de la placa basal a una velocidad de 1.2 ± 0.2 mm/min (4.5 Å del motor, Figura 3.21.a), sedimentando dentro del graben en cuatro instancias a modo de depósitos syn-rift. Posteriormente, se realizó la inversión tectónica, comprimiendo con 30° respecto al borde de la placa hasta retornar al largo inicial (trayectoria de 40 mm; 20 mm ortogonales al borde, Figura 3.21.c). Esta compresión se realizó a velocidades distintas para los dos modelos: 0.8 mm/min (4.5 Å del motor) y 2.1 mm/min (6.0 Å del motor) para los modelos T03M2 y BNI1, respectivamente (Figura 3.21.b).

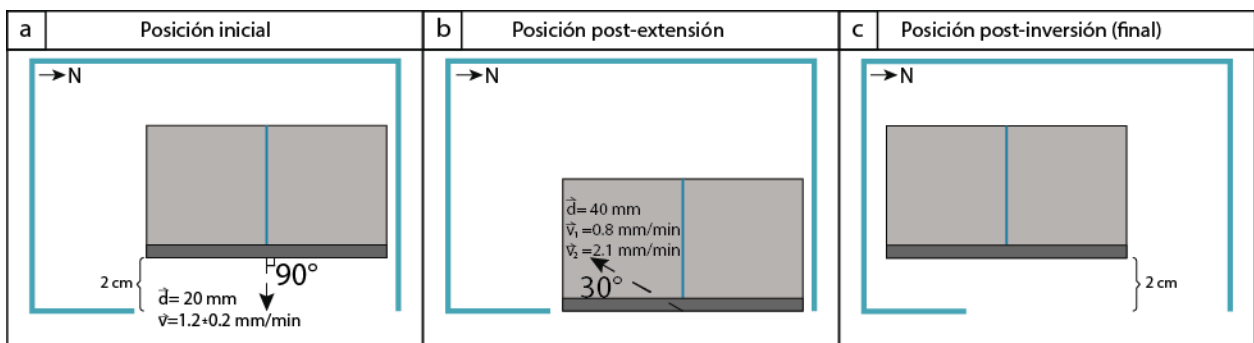


Figura 3.21 Esquema del movimiento que realizó el pistón en los modelos de inversión tectónica. La flecha discontinua representa el movimiento que tuvo el pistón a partir de la posición que tiene en ese momento. Las dimensiones no están a escala. (a) Posición inicial: el pistón realizó una extensión de 20 mm ortogonales al borde (VD). La velocidad de extensión es de 1.2 ± 0.2 mm/min. (b) Posición post-extensión: el pistón se movió comprimiendo el modelo con 30° respecto a la discontinuidad de velocidad (VD). La velocidad de inversión fue de 0.8 mm/min para el modelo T03M2 y de 2.1 mm/min para el BNI1; el modelo T03ME no se invertirá. (c) Posición post-inversión (final) del pistón. Luego de haberse invertido, el VD se alinea ortogonalmente con su posición inicial. Para efectos de las notaciones, se considera el pistón como el lado E del sistema.

3.3.1. T03ME: Caso puramente extensional

Se utilizó una proporción en volumen de microesferas y harina de cuarzo de 20:3 (87% y 13%, respectivamente). Al ser este un caso netamente extensional, la trayectoria del pistón solo fue una extensión de 20 mm ortogonales al borde, con una velocidad de 1.2 ± 0.1 mm/min. La duración del modelo fue de 16:51 minutos.

Las fallas normales que generaron el graben se notaron al minuto de empezado el modelo. Se generaron dos fallas normales principales en el borde E, y tres en el borde W (Figura 3.23.g). Se realizó sedimentación dentro del graben a los: 6 mm (5:23 minutos), 11 mm (10 minutos), 17 mm (15:03 minutos) y 20 mm (16:51 minutos) de extensión.

Como no hubo inversión en este modelo, no hubo alzamiento ni ancho post-inversión. Solo se midió el ancho de la deformación: 77.90 mm, que corresponde al ancho de la cuenca extensional generada.

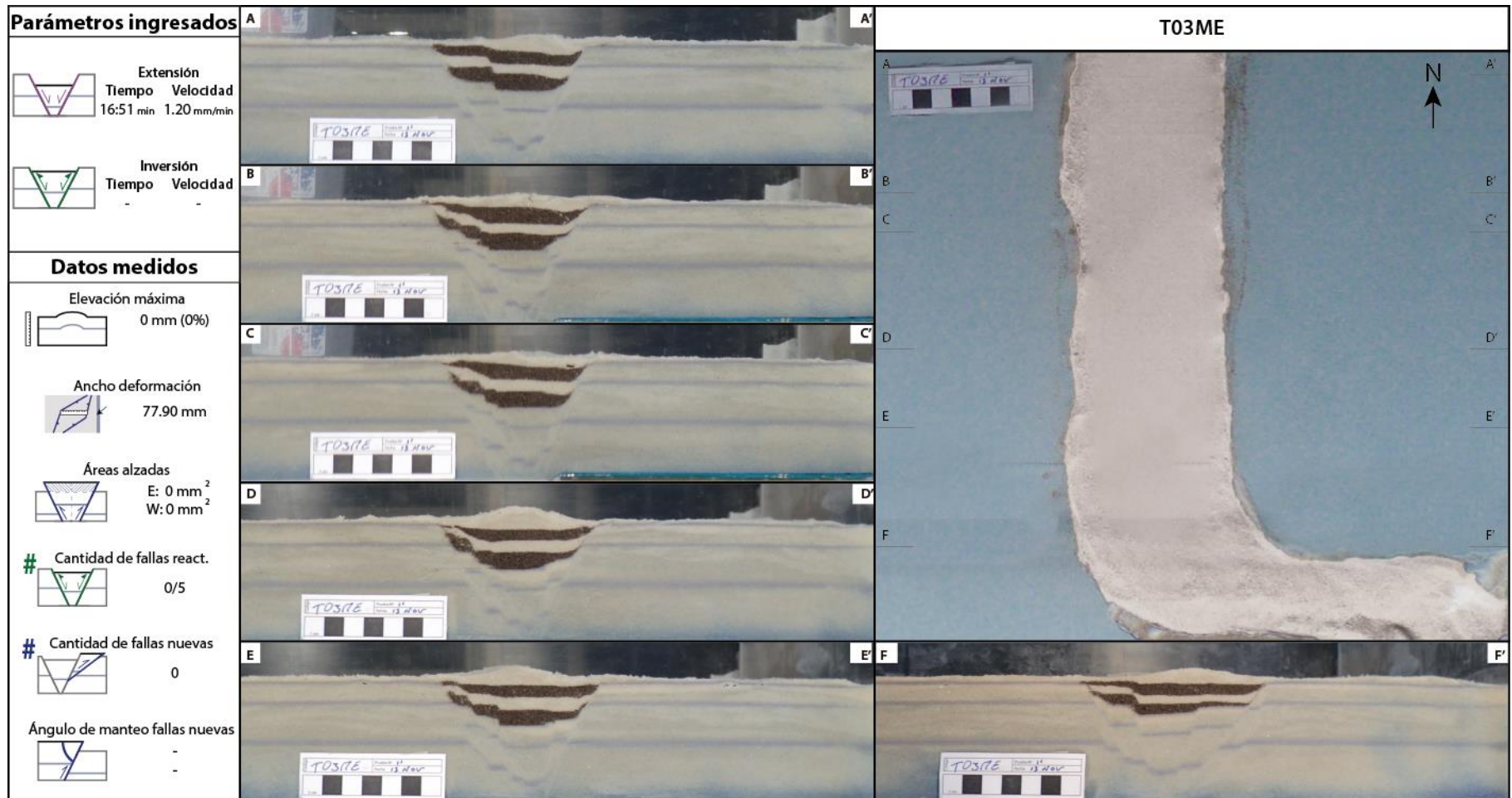


Figura 3.22 Fotos resumen del experimento T03ME: caso base de solo extensión. Parámetros fijados para el modelo, y datos medidos. a-f) Fotos de secciones verticales señaladas en (g). Los niveles de colores marrón y blanco del centro corresponden a depósitos syn-rift. g) Foto en planta del resultado final del modelo, la capa de arena blanca en el centro corresponde a la sedimentación durante la extensión dentro del graben. La escala es de 7 cm. Ver más detalles del modelo en el texto.

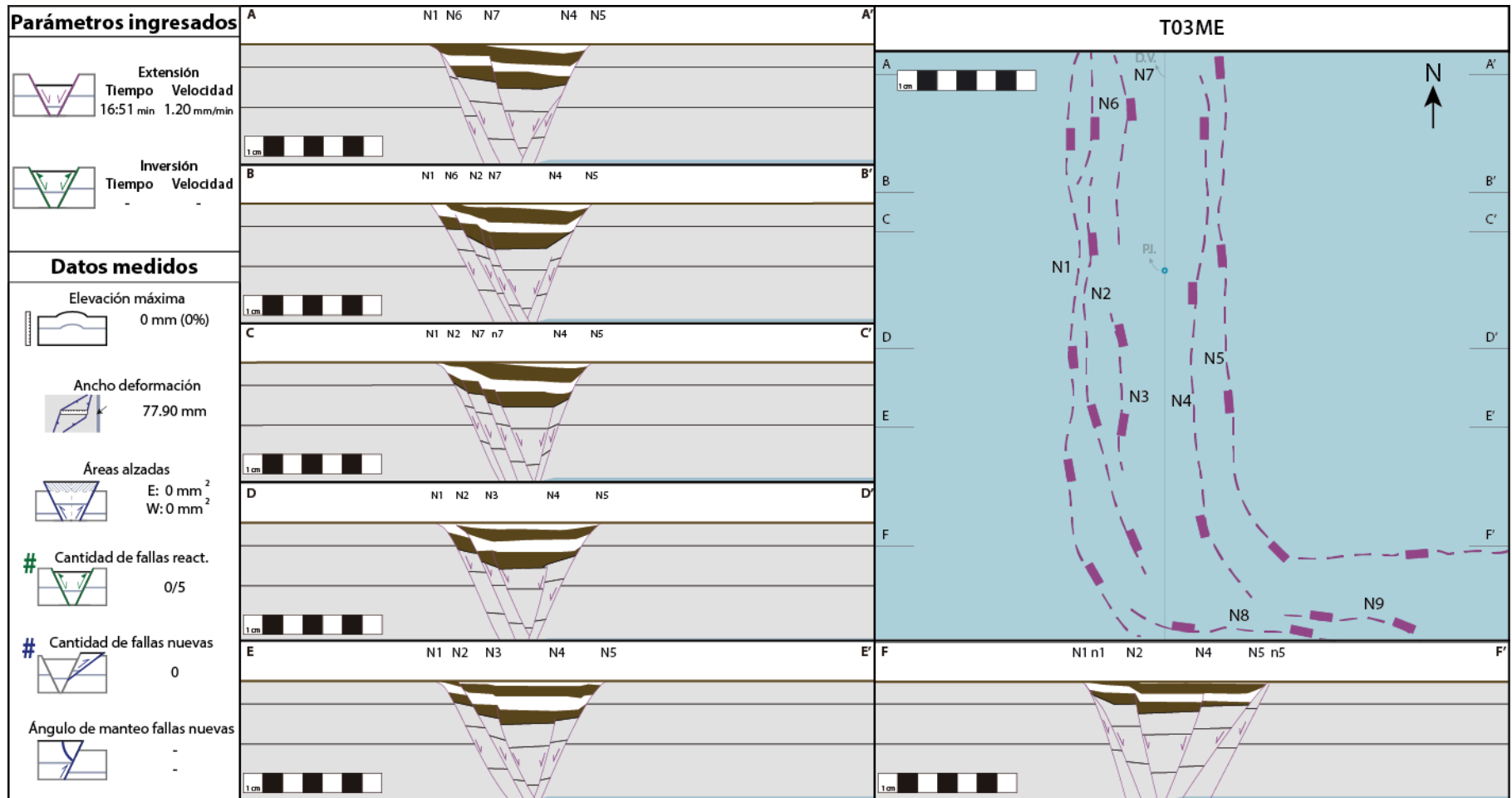


Figura 3.23 Esquemas resumen del experimento T03ME: caso base de solo extensión. Parámetros fijados para el modelo, y datos medidos. a-f) Esquemas de secciones verticales señaladas en (g). Los niveles de colores marrón y blanco del centro corresponden a depósitos syn-rift. g) Esquema en planta del resultado final del modelo. Las líneas rosadas (“N”) corresponden a fallas normales no reactivadas. La escala es de 7 cm. Ver más detalles del modelo en el texto.

3.3.2. T03M2: Extensión seguida de inversión a baja velocidad

Se utilizó una proporción en volumen de microesferas (“mE”) y harina de cuarzo (“HC”) de 20:3 (87% y 13%, respectivamente). La velocidad de extensión fue de 1.0 ± 0.1 mm/min, mientras que la de inversión fue de 0.8 ± 0.1 mm/min (Figura 3.21). El tiempo de la fase extensional fue de 19:04 minutos; por otro lado, el tiempo de la fase de inversión fue de 47:30 minutos.

Durante la fase extensional, las fallas normales que formaron el graben aparecieron de manera clara a los 3 mm (3 minutos) de movimiento. Se generaron dos fallas normales en el borde E, y tres en el borde W (Figura 3.25.g). Se realizó sedimentación dentro del graben en cuatro instancias: 5 mm (5:04 minutos), 10 mm (10 minutos), 15 mm (15:08 minutos) y 20 mm (19:04 minutos) de extensión.

En la etapa de inversión, recién a los 9 mm de acortamiento ortogonal (22 minutos) se notaron fallas oblicuas (de rumbo dextral con componente inversa) en los extremos norte y sur del modelo, pero en su mayoría se consideraron solo como condición de borde. Posterior a esto, a los 13 mm de acortamiento ortogonal (31 minutos), estas fallas aumentaron su largo, cruzando el modelo de norte a sur. Se contabilizaron cuatro fallas oblicuas principales, además de algunas de menor jerarquía (Figura 3.24.g y Figura 3.25.g). Los manteos de las fallas nuevas (notación de estas fallas en Figura 3.25) variaron desde los 36°E (I1) hasta los 58°E (I2) para las fallas al oeste de la cuenca, mientras que las del sector oriente fueron 61°W (I3), 35°W (I4) y 33°W (I5).

La reactivación de las fallas normales formadas en la primera etapa no fue evidente en planta para este modelo. Sin embargo, se vio que esta inversión ocurrió al comienzo de la etapa compresiva, cuando las fallas oblicuas solo se manifestaron en los bordes. Según se puede ver en perfil, las fallas reactivadas corresponden, al menos, a las dos más externas que formaron el graben (R1 y R2 en Figura 3.25). Las otras fallas normales no presentan reactivación notoria.

La elevación máxima de la superficie (a partir de su nivel inicial, Figura 3.28) medida para este modelo fue de 11.39 mm (18.9% de alzamiento). El ancho promedio de la deformación post-inversión fue de 160.36 mm. En el borde oriental de la cuenca, se alzó un área promedio de 671.89 mm^2 ; en el borde occidental, fueron 392.33 mm^2 , es decir, 279.56 mm^2 menos que en el E (un factor E/W de 1.83).

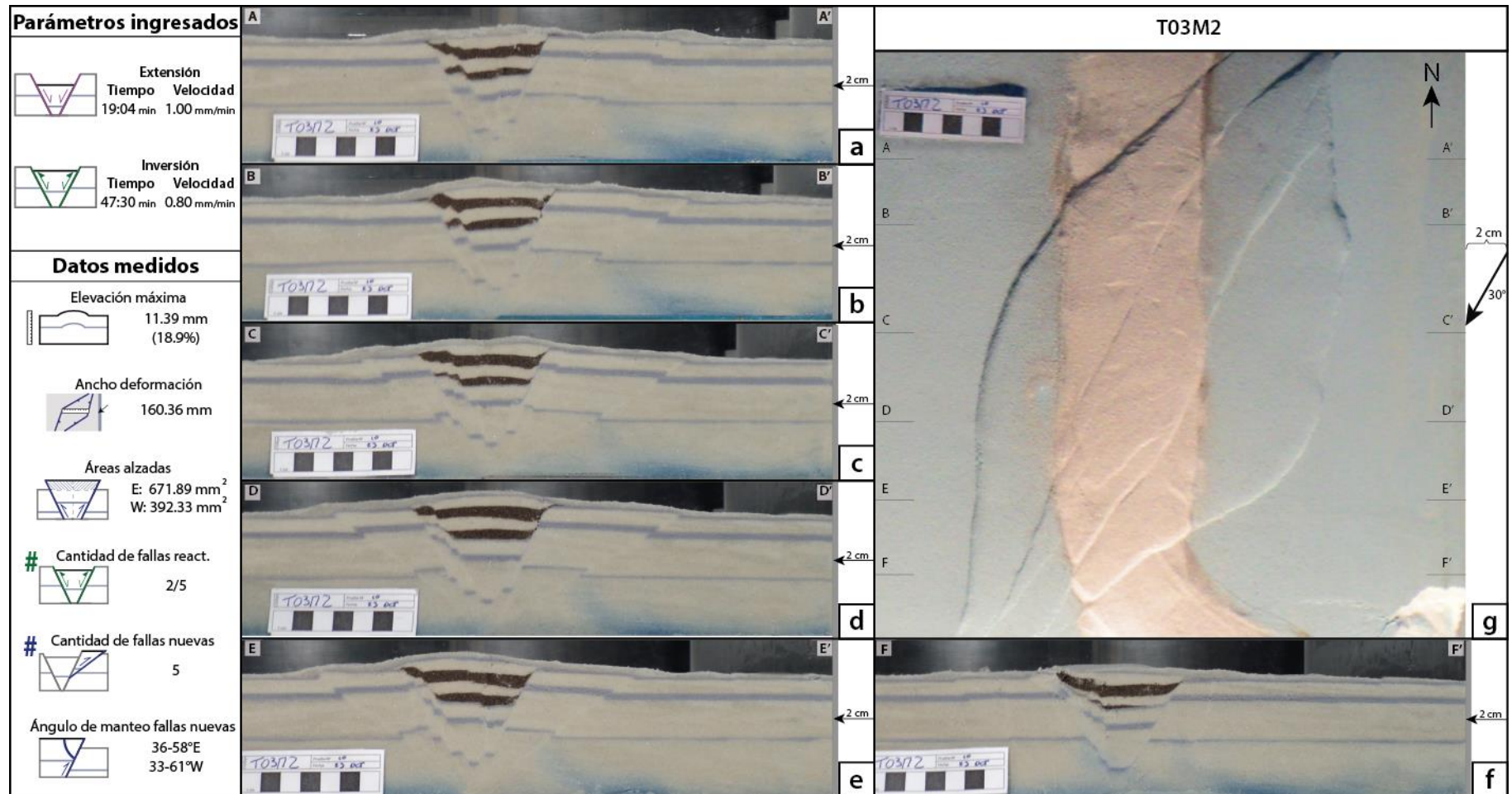


Figura 3.24 Fotos resumen del experimento T03M2: modelo de inversión tectónica a baja velocidad. Parámetros fijados para el modelo, y datos medidos. a-f) Fotos de secciones verticales señaladas en (g). Los niveles de colores marrón y blanco del centro corresponden a sedimentación durante la extensión. g) Foto en planta del modelo, la zona con arena blanca corresponde al graben inicial y el depósito syn-rift. La escala es de 7 cm. Ver más detalles del modelo en el texto.

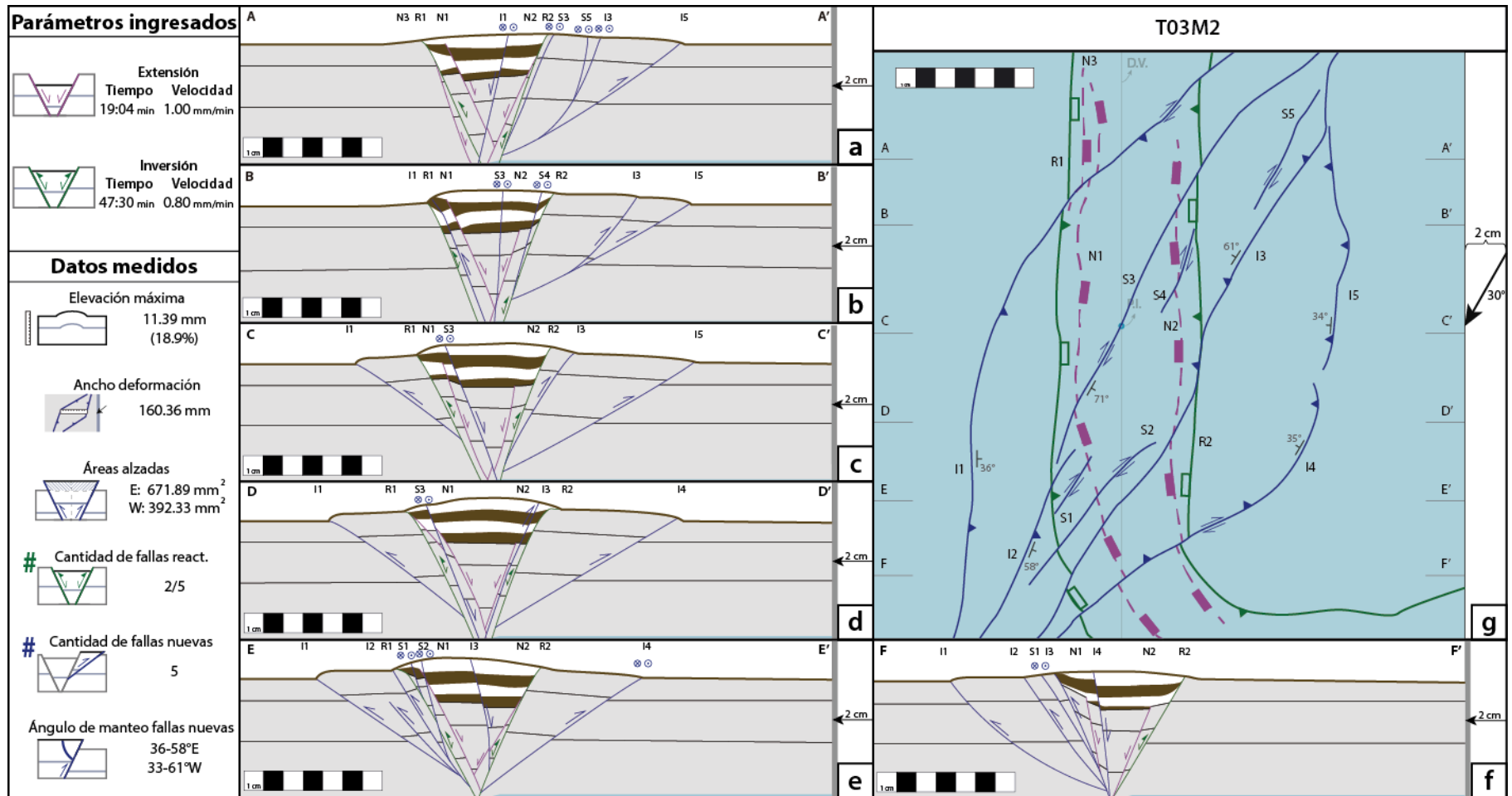


Figura 3.25 Esquemas resumen del experimento T03M2: modelo de inversión tectónica a baja velocidad. Parámetros fijados para el modelo, y datos medidos. a-f) Esquemas de secciones verticales señaladas en (g). Los niveles de colores marrón y blanco del centro corresponden a sedimentación durante la extensión. g) Esquema en planta del modelo. Las líneas rosadas (“N”) son fallas normales no reactivadas; las líneas verdes (“R”) son fallas normales reactivadas como inversas; las líneas azules (“I” o “S”) son fallas nuevas producidas durante la inversión. La escala es de 7 cm. Ver más detalles del modelo en el texto.

3.3.3. BNI1: Extensión seguida de inversión a velocidad media

Se utilizó una proporción mE:HC en volumen de 20:3 (87% y 13%, respectivamente). La velocidad de extensión fue de 1.3 ± 0.1 mm/min, mientras que la de inversión fue de 2.1 ± 0.1 mm/min (Figura 3.21). El tiempo de la fase extensional fue de 14:27 minutos; por otro lado, el tiempo de la fase de inversión fue de 18:54 minutos.

En la fase extensional, las fallas normales que formaron el graben se comenzaron a notar de manera clara a los 2 mm de extensión (2 minutos). Se generaron tres fallas normales en el borde E, y cuatro en el borde W. Se realizó sedimentación dentro del graben en cuatro instancias: 4 mm (2:40 minutos), 9 mm (5:58 minutos), 14 mm (10:10 minutos) y 20 mm (14:27 segundos) de extensión.

Durante la inversión del modelo, fallas oblicuas aparecieron primero como condiciones de borde a ambos lados del graben, pero no fue sino hasta los 15 mm de acortamiento ortogonal (14 minutos) que estas fallas fueron más claras a lo largo de todo el modelo. Nuevamente, se produjeron 4 fallas oblicuas principales, más algunas de menor importancia (Figura 3.26.g y Figura 3.27.g). Los manteos de las fallas nuevas (notación de estas fallas en Figura 3.27) variaron desde los 40°E (I1) hasta los 65° y 63°E (I2 y la parte sur de I3, respectivamente) para las fallas al oeste de la cuenca, mientras que las del sector oriente fueron 47°W (parte norte de I3), 61°W (I6) y 35°W (I7).

Para este caso, la inversión del graben se hizo notoria en el relieve durante las primeras instancias de la compresión, antes de que las fallas oblicuas comenzaran a visualizarse en el modelo. De las fallas normales generadas en la etapa extensional, las dos que delimitan el graben se invirtieron (R1 y R3 en Figura 3.27). Además, la segunda falla del borde opuesto al pistón también fue invertida (R4 en Figura 3.27).

La elevación máxima de la superficie medida para este modelo fue de 8.66 mm (14.4% de alzamiento). El ancho promedio de la deformación post-inversión fue de 157.79 mm. En el borde oriental de la cuenca, se alzó un área promedio de 506.20 mm^2 ; en el borde occidental, fueron 288.93 mm^2 ; es decir, en el E se alzó 217.27 mm^2 más que en el W (factor E/W de 1.86).

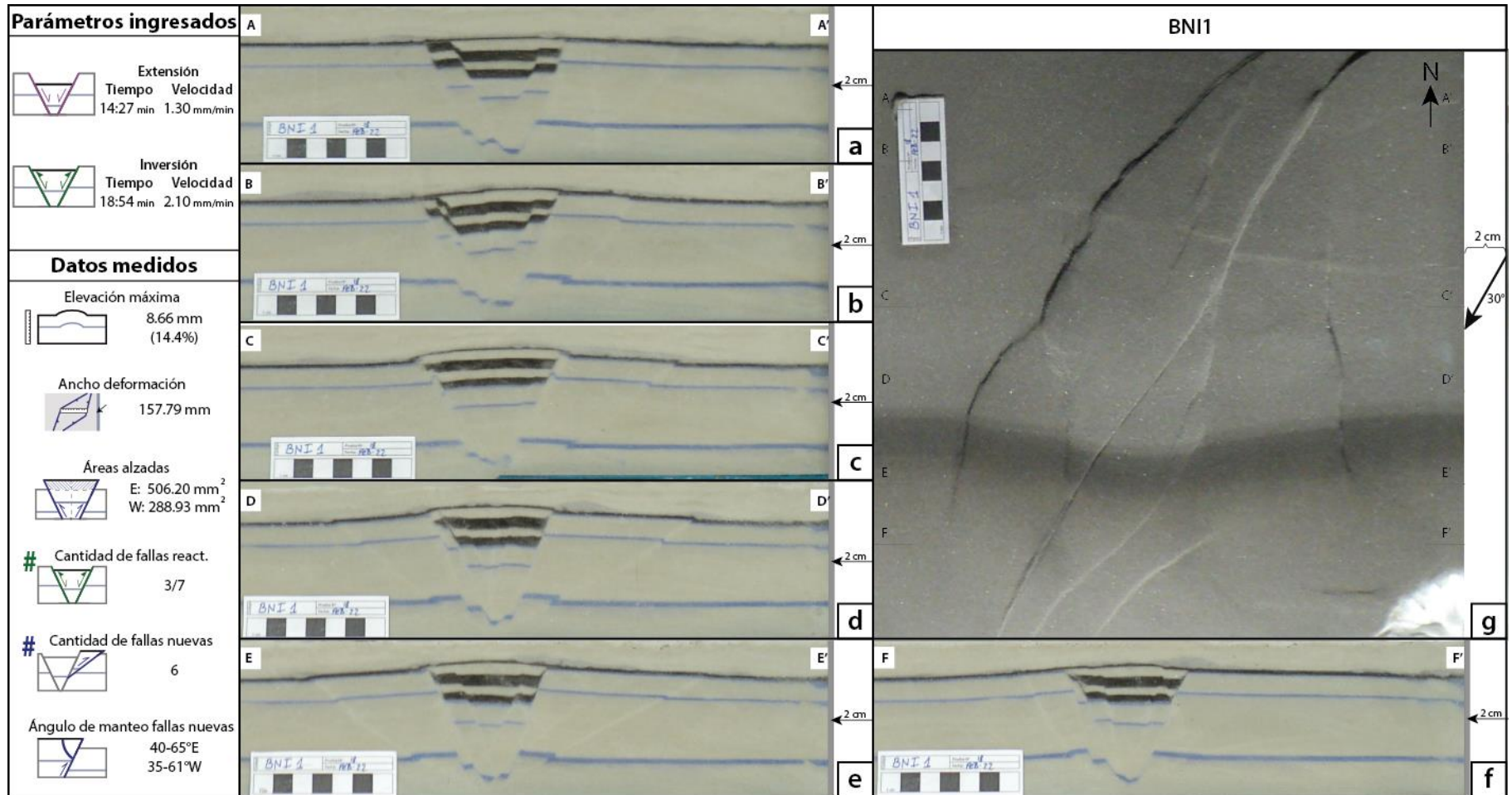


Figura 3.26 Fotos resumen del experimento BNI1: modelo de inversión tectónica a velocidad media. Parámetros fijados para el modelo, y datos medidos. a-f) Fotos de secciones verticales señaladas en (g). Los niveles de colores marrón y blanco del centro corresponden a sedimentación durante la extensión. g) Foto en planta del modelo. La escala es de 7 cm. Ver más detalles del modelo en el texto.

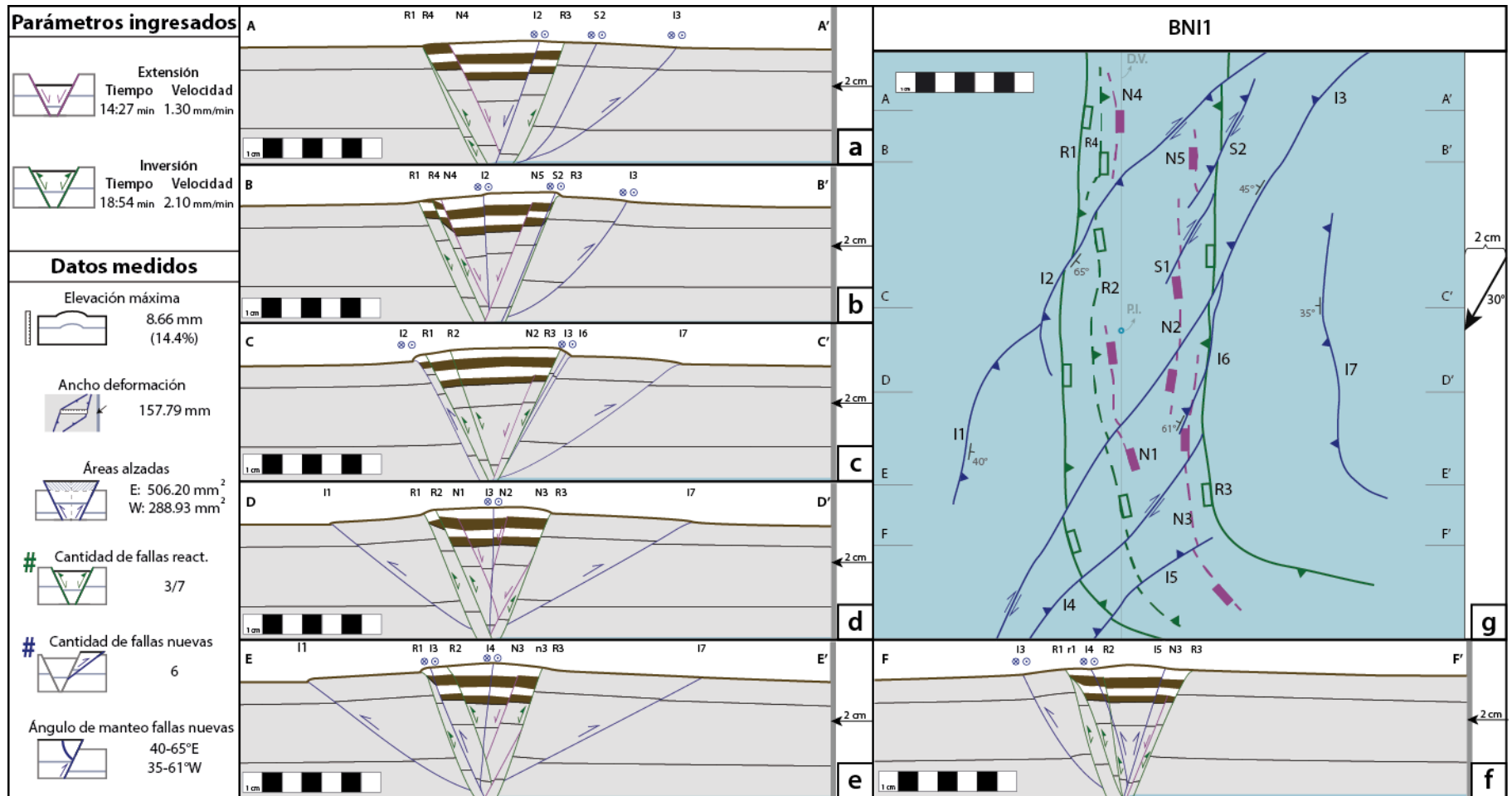


Figura 3.27 Esquemas resumen del experimento BNI1: modelo de inversión tectónica a velocidad media. Parámetros fijados para el modelo, y datos medidos. a-f) Esquemas de secciones verticales señaladas en (g). Los niveles de colores marrón y blanco del centro corresponden a sedimentación durante la extensión. g) Esquema en planta del modelo. Las líneas rosadas ("N") son fallas normales no reactivadas; las líneas verdes ("R") son fallas normales reactivadas como inversas; las líneas azules ("I" o "S") son fallas nuevas producidas durante la inversión. La escala es de 7 cm. Ver más detalles del modelo en el texto.

3.4. Análisis y discusión de los modelos de deformación tectónica sin inyección de fluidos.

Los modelos con inversión resultaron ser similares a pesar de las distintas velocidades de convergencia. Se reactivaron las fallas más externas de la cuenca (“R”), y se formaron numerosas fallas inversas, de rumbo y oblicuas que siguieron acomodando el acortamiento (Figura 3.28). Estas fallas nuevas (“S” o “I”) se producen a lo largo de todo el modelo y presentan un rumbo NNE, es decir, son oblicuas a la cuenca.

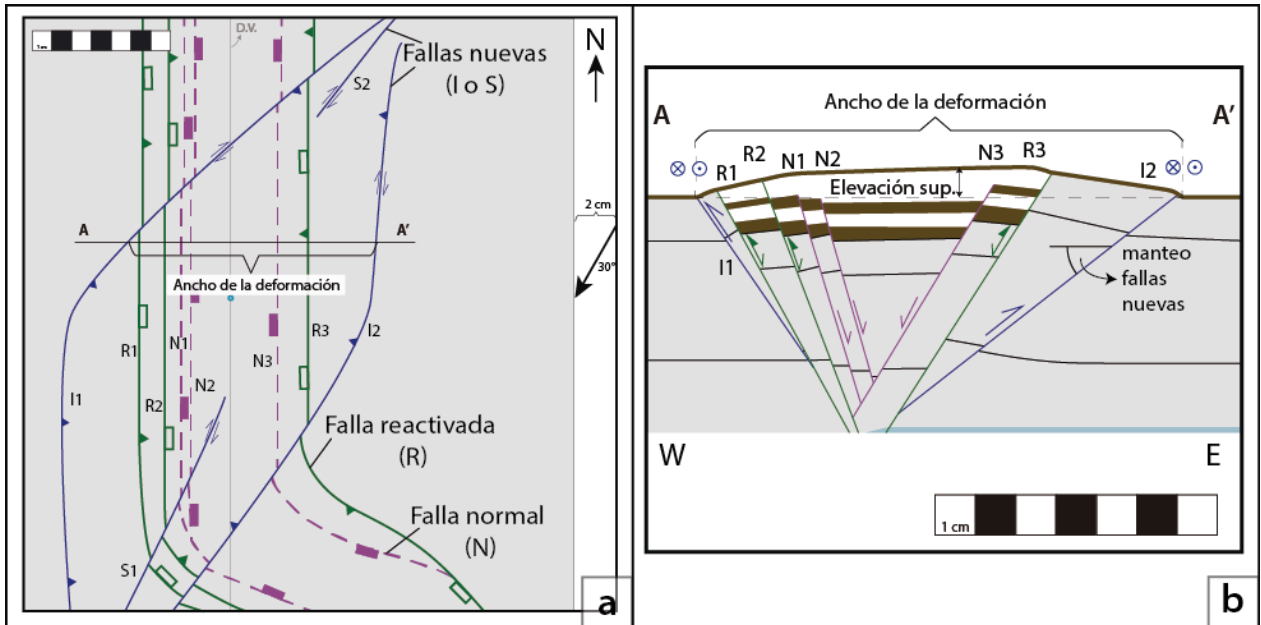


Figura 3.28 Esquema resumen de las estructuras en los modelos de esta serie (a) en planta y (b) en perfil. Se señalan las fallas normales (N, líneas rosadas), las reactivadas (R, líneas verdes) y las fallas nuevas (inversas, “I”; de rumbo, “S”; líneas azules). Se midió el ancho de la inversión, la elevación de la superficie y el área alzada al E y al W de la cuenca (Figura 3.29) y se promedió entre los perfiles. Para el manteo aparente en diferentes perfiles para cada falla nueva principal, y luego se corrigió al manteo real según el rumbo de estas; se presenta un manteo promedio de cada falla nueva (Tabla 3.3 y Figura 3.33).

Los datos medidos en los modelos corresponden a la elevación máxima de la superficie, el ancho de la deformación y al área alzada en el borde oriental y occidental de la cuenca (Figura 3.29). Además, se midió la cantidad de fallas reactivadas y de fallas nuevas, y el manteo promedio de estas últimas. Estos valores se resumen en la Tabla 3.2.

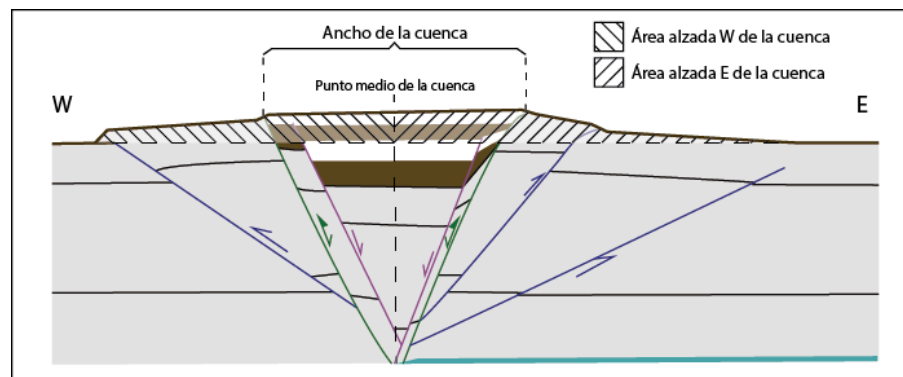


Figura 3.29 Esquema genérico de las áreas alzadas en la zona W y E de la cuenca. Se dividió a partir del punto medio de ella (línea vertical punteada). El dato entregado corresponde al promedio de áreas en los perfiles B, C y D de cada modelo.

Tabla 3.2 Resumen de los resultados de los modelos de inversión tectónica.

Datos medidos		Modelos	T03ME	T03M2	BNI1
Ingresados					
Velocidad de extensión (mm/min)			1.2 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.3 ± 0.1
Velocidad de inversión (mm/min)			–	0.8 ± 0.1	2.1 ± 0.1
Obtenidos					
Superficie	Elevación máx. de la sup. (mm)		–	11.39	8.66
	Ancho de la deformación (mm)		77.90	160.36	157.79
	Área alz. promedio E (mm ²)		–	671.89	506.20
	Área alz. promedio W (mm ²)		–	392.33	288.93
	Diferencia áreas alz. (mm ²)		–	279.56	217.27
	Razón áreas alz. (E/W)		–	1.71	1.75
Fallas reactivadas	Cantidad (% de las normales)		0/7 (0%)	2/5 (40%)	3/7 (43%)
Fallas principales nuevas	Cantidad		–	5	6
	Rango de ángulos de manto		–	36-58 E 33-61 W	40-65 E 35-61 W

3.4.1. Características generales

A continuación, se analizan y discuten los principales resultados obtenidos en los modelos de inversión tectónica sin inyección de fluidos según los parámetros ingresados (velocidad de extensión y velocidad de inversión). Se consideran las velocidades de extensión como iguales, pero no así las de inversión. Es según este último parámetro que se compara la deformación producida. El modelo T03ME se considera como un caso base dentro de esta serie, que además sirve para comprobar que el material utilizado permite la formación de un graben en lugar de fracturas subverticales.

3.4.2. Influencia de la velocidad de inversión

Si bien solo se realizaron dos modelos a comparar en esta sección, son suficientes para el objetivo de este ítem: comprobar la similitud entre los modelos con distintas velocidades de convergencia. Esto se hizo con el fin de poder ajustar el tiempo de la inversión con el de la inyección, por lo que se buscaba lograr un desarrollo similar de estructuras y deformación con respecto al caso de inversión a velocidad lenta.

Los modelos de baja y media velocidad de convergencia presentan algunas diferencias, pero muchos parámetros medidos resultan ser similares a pesar de ser realizados con distintas tasas de inversión.

3.4.2.1. Influencia sobre la deformación en superficie

Lo primero que se comparó en estos modelos es la deformación que presentan en su superficie: la elevación máxima, el ancho de la deformación producida y el promedio de las áreas alzadas en los cortes verticales efectuados.

La elevación del modelo fue mayor para el modelo de baja velocidad de convergencia, llegando a elevarse poco más de 11 mm, en comparación con los casi 9 mm del modelo de media tasa (Figura 3.30.a). La menor velocidad de inversión favorecería un mayor desplazamiento por las fallas, principalmente inversas, pues la menor fuerza que lo comprime permite un ascenso más lento y controlado; en cambio, la velocidad de inversión media se reflejó en una compresión mayor, que disminuyó el desplazamiento de los bloques a lo largo de los planos de falla. Sin embargo, al ser esta diferencia de elevación pequeña, no se consideró como un factor limitante en el desarrollo de estructuras.

Por otra parte, visualizando la deformación en planta, el ancho promedio de esta, medido ortogonal a la discontinuidad de velocidad (VD, Figura 3.28), resulta ser similar para los dos modelos invertidos, ambos cercanos a los 160 mm (Figura 3.30.b). En los dos casos, las estructuras nuevas generaron una forma sigmoideal, con nuevas fallas de rumbo NS a NE que atravesaron todo el modelo y aumentaron al doble el ancho promedio de la deformación generada, la que en su fase extensional se limitó a un graben de orientación NS de unos 80 mm de ancho.

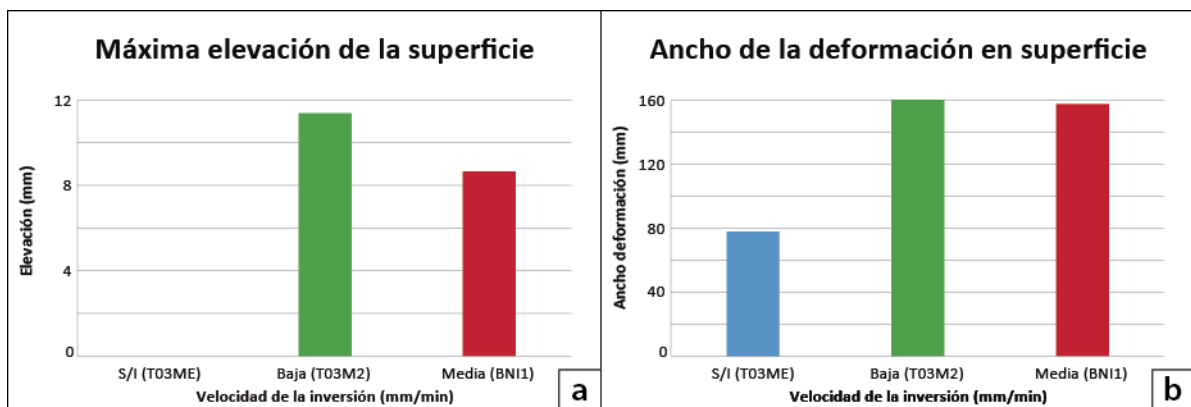


Figura 3.30 Gráficos de la deformación en superficie para cada modelo (ambos en mm): (a) la elevación máxima de la superficie, medida desde su altura inicial; y (b) el ancho máximo de la deformación en superficie. Cada color representa una velocidad de convergencia (azul para el caso base sin inversión, verde para baja tasa de convergencia y rojo para tasa media). Para detalles del análisis, ver el texto.

Si se compara el alzamiento en el borde oriental y occidental de la cuenca, se pueden encontrar diferencias más notorias, tanto entre estos dos bordes como entre ambos modelos. Para los dos experimentos, en el lado E se alzó una mayor área que en el lado W (Figura 3.31). Esto se explicaría por el manto de las estructuras orientales del sistema, las que, a diferencia de las occidentales, tienen un ángulo menor (Figura 3.25.a-f y Figura 3.27.a-f), y por ende, un mayor alzamiento. Por lo mismo, la traza de las fallas al E se encuentran más alejadas del eje de la cuenca que las del W, lo que se refleja también en diferencias en los alzamientos en cada lado (Figura 3.25.g y Figura 3.27.g). La diferencia entre ambos modelos se debería a lo mencionado anteriormente

sobre la diferencia de altura: una menor velocidad permite un mayor desplazamiento sobre el plano de falla, un mejor desarrollo de las estructuras, y finalmente más alzamiento de la superficie.

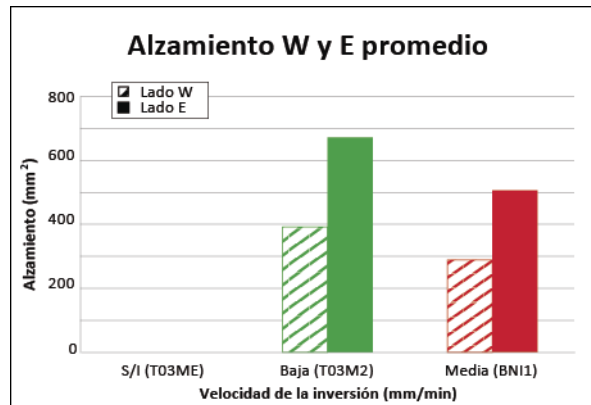


Figura 3.31 Gráfico de la diferencia promedio entre las áreas alzadas en el borde oriental y occidental de la cuenca [mm²]. Cada color representa una velocidad de convergencia (verde para baja tasa de convergencia y rojo para tasa media). Para detalles del análisis, ver el texto.

3.4.2.2. Influencia sobre el desarrollo de estructuras

Nuevamente, ambos modelos resultaron ser similares, tanto en la cantidad de fallas reactivadas como en la de fallas nuevas. En los dos casos, cerca del 40% de fallas normales se reactivaron como fallas inversas (Figura 3.32.a); y la cantidad de fallas principales nuevas, tanto inversas como de rumbo, fue similar, ambos alrededor de 5 (Figura 3.32.b), aunque el modelo de velocidad de convergencia media (BN11) presentó valores levemente más altos para los dos parámetros.

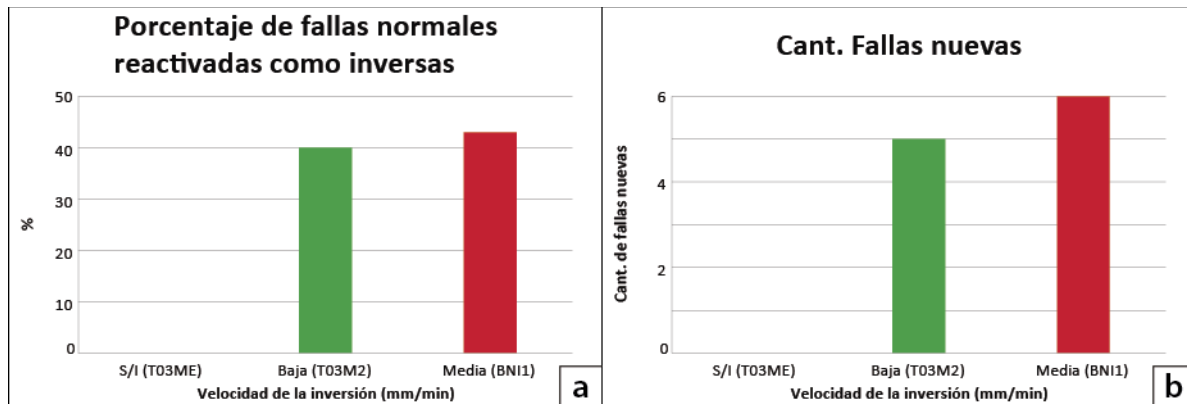


Figura 3.32 Gráficos de las fallas (a) reactivadas y (b) nuevas para cada modelo. Cada color representa una velocidad de convergencia (verde para baja tasa de convergencia y rojo para tasa media). Para detalles del análisis, ver el texto.

Los manteos de las fallas nuevas fueron similares entre ambos modelos, variando solo la longitud de las estructuras. Se distinguen rangos de manteo preferenciales que son similares en los dos casos: uno con manteo moderado hacia el E (35°E, falla inversa con y sin componente de rumbo); uno con manteo leve a moderado hacia el W (35-45°W, falla inversa); y dos zonas de manteo alto hacia ambos lados (>55°E y >55°W, fallas inversas) (Tabla 3.3 y Figura 3.33).

Tabla 3.3 Agrupación de las fallas nuevas según su manteo (leve, moderado o alto), tipo (I: inversa; R: rumbo) y longitud en mm.

Rango de Manteo		T03M2		BNI1	
35°E (mod.)	Nombre	I1		I1	
	Tipo	I/R		I	
	Manteo	36		40	
	Largo (mm)	111.4		33.4	
35-45°W (mod)	Nombre	I4	I5	I3	I7
	Tipo	I/R	I	I	I
	Manteo	35	34	45	35
	Largo (mm)	61.5	39.9	112.2	49.8
>55°E (alto)	Nombre	I2		I2	
	Tipo	I		I/R	
	Manteo	58		65	
	Largo (mm)	34.1		66.4	
>55°W (alto)	Nombre	I3		I6	
	Tipo	I		I	
	Manteo	61		61	
	Largo (mm)	108.8		26.9	

La tendencia en los manteos es que las fallas de mayor longitud sean las de manteo 35-45°W (Figura 3.33). Los otros rangos de falla presentaron una dispersión más grande de datos. Sin embargo, se observa una tendencia a desarrollar fallas de mayor longitud en el modelo de baja velocidad de convergencia (Figura 3.33.a); mientras que el de velocidad media desarrolló estructuras de manteo similar, pero de menor longitud (Figura 3.33.b). Si bien el largo de la falla puede variar, la disposición de ellas en los modelos tiende a ser parecida, tanto en la ubicación como en la morfología (Figura 3.25.g y Figura 3.27.g).

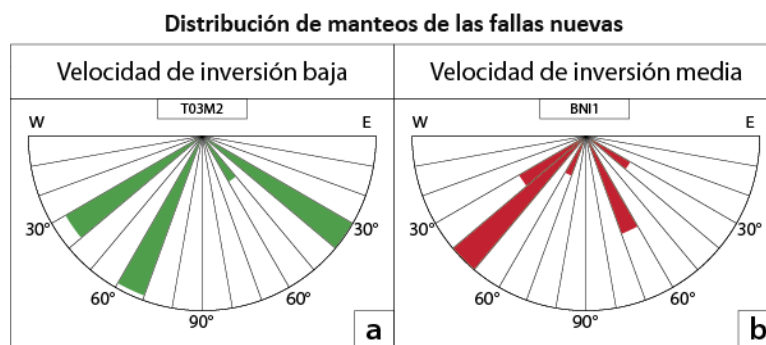


Figura 3.33 Gráfico de la distribución de manteos. Los datos de manteo se agruparon cada 10°. El largo del brazo representa la extensión de la(s) falla(s) dentro de ese rango de manteo. Los colores son los mismos que para los demás gráficos de este capítulo. Para detalles del análisis, ver el texto.

Por lo tanto, a pesar de que ambos modelos no fueron precisamente iguales, las diferencias entre ellos son leves, y no representarían una limitación para el análisis de las pruebas finales que combinaron inversión tectónica con inyección de fluidos. Esto permitió realizar la inversión tectónica a una velocidad media (2.1 ± 0.1 mm/min), la que se sincronizó mejor con la inyección (Ítem 3.1).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE MODELOS SEGÚN LA COMBINACIÓN DE INVERSIÓN TECTÓNICA E INYECCIÓN DE FLUIDOS

Una vez fijados algunos parámetros (proporción en volumen de mE y HC, altura de la secuencia de arena, velocidad de la inversión) y definidos los rangos de variación de otros (velocidad de inyección y temporalidad de esta) (Capítulo 2 y 3), se realizaron pruebas que combinaran estos últimos parámetros. Resulta importante mencionar que el material fino con el que se trabajó (harina de cuarzo) puede presentar leves variaciones en las series de producción, por lo que se realizó una refinación de este para homogeneizarla con respecto al usado en el Ítem 3.2. Los resultados obtenidos con este material refinado son más cercanos a los presentados en el capítulo anterior que los sin refinar (Anexo 1), pues mantienen las tendencias a pesar de variar levemente las dimensiones y valores medidos.

En este Ítem se configuró una matriz de 2x3 (Tabla 4.1): 2 velocidades de inyección (series de baja y alta velocidad: códigos BV y AV, respectivamente), y 3 temporalidades con respecto a la inversión tectónica (series de inyección anterior, posterior y durante la inversión: códigos AD, PD y SD, respectivamente). Según lo obtenido anteriormente (Ítem 3.2), se usó una velocidad alta de inyección de 0.175 mL/s, mientras que la velocidad baja de inyección fue de 0.105 mL/s (valores promedio de acuerdo a los resultados de las pruebas preliminares del Capítulo 3). Las tres temporalidades de la inyección utilizadas fueron antes, durante y posterior a la inversión, todas con estructuras extensionales previas (Tabla 4.1). A esta matriz se le añadieron tres casos base: uno de solo inversión tectónica sin inyección (NICD); uno de solo inyección a alta velocidad (AVND), y uno de solo inyección a baja velocidad (BVND3).

Tabla 4.1 Resumen de los modelos análogos realizados en este Ítem. Se muestra el parámetro primario y sus posibles valores, además del código asignado a cada experimento.

Parámetros primarios a variar		Temporalidad de la inyección			
		Sin extensión Ni inversión (ND)	Antes de la inversión (AD)*	Posterior a la inversión (PD)	Durante la inversión (SD)
Velocidad de inyección	Sin iny. (caso base)	–	NICD		
	Baja vel. (BV)	BVND3	BVAD	BVPD	BVSD
	Alta vel. (AV)	AVND	AVAD	AVPD	AVSD

* Para la serie AD se inyectó posterior a la extensión, y no se realizó inversión

Los datos obtenidos de los modelos corresponden a: elevación máxima de la superficie; ancho (E-W) de la deformación; áreas alzadas a ambos lados de la cuenca (Figura 3.29); cantidad de fallas reactivadas y nuevas tanto por el intrusivo (fallas “i” en las figuras) como por la inversión (fallas “I” y “S” en las figuras), diferenciadas solo en la serie con inyección posterior a la inversión. Dentro de las fallas reactivadas, solo se consideraron las que se notaban a simple vista; podría existir una leve reactivación en las otras fallas, pero sería de menor orden. También se obtuvo el manteo de las fallas nuevas, considerado como el promedio entre los manteos medidos en trazas de la falla fuera de la cuenca; el que se transformó desde manteo aparente a real según el ángulo del rumbo de la falla con respecto al corte de perfil. Para efectos de las notaciones, se considera que el pistón se encuentra en el lado oriente del sistema. Finalmente, se entregan las dimensiones del intrusivo y de su halo: para el halo se entrega la altura medida, el largo mayor medido ortogonal al borde del pistón (HOB) y un largo aproximado paralelo al borde (HPB) basado en la aparición del intrusivo en los cortes

en perfil; para el intrusivo solo se obtuvo la altura máxima medida y el largo mayor medido ortogonal al borde (IOB), por lo que se analiza con base en el halo del intrusivo.

4.1. Casos base

Para poder comparar de mejor manera la influencia de la combinación de los parámetros primarios, se realizaron tres experimentos control tanto de inversión tectónica (NICD en Tabla 4.1) como de solo inyección a ambas velocidades (BVND3 y AVND en Tabla 4.1). A continuación, se presentan los modelos con su respectiva configuración y resultados.

4.1.1. NICD

Corresponde al modelo de inversión tectónica sin inyección de fluido. Se extendió 20 mm ortogonales al borde de la placa a 1.54 mm/min, comprimiendo posteriormente con 30° con respecto al borde por 40 mm a 2.22 mm/min. La extensión demoró 13 minutos, mientras que la inversión demoró 18 minutos.

En la fase extensional se desarrollaron 5 fallas normales principales: dos en el E y tres en el W. Las primeras fallas aparecieron al poco tiempo de comenzado el experimento, mientras que las últimas afloraron a los 17 mm (10 minutos). La sedimentación en el graben se realizó en 4 instancias: 6 mm de extensión (4:10 minutos); 11 mm (7 minutos); 17 mm (10 minutos), y 20 mm (13 minutos). Posterior a esta última sedimentación en el graben, se aplicó una sedimentación completa al modelo de 1 mm de espesor.

Durante la inversión del modelo, las fallas normales más externas del graben son las que se invirtieron desde el primer momento, siendo la más occidental la de mayor notoriedad (R1, Figura 4.1 y Figura 4.2). Las otras tres fallas normales no presentan reactivación a simple vista. La primera de las fallas nuevas en aparecer fue I1 (8 mm de acortamiento ortogonal, falla inversa), seguida de I3 (11 mm de acortamiento ortogonal, falla inversa con componente de rumbo en los extremos), I4 (13 mm de acortamiento ortogonal, falla inversa pequeña asociada a I3) e I2 (15 mm de acortamiento ortogonal, falla de rumbo con componente inversa, similar a una extensión de I1); la falla I5 (inversa) no alcanzó a aflorar (disposición y nombres de las fallas en Figura 4.2). También se produjeron fallas de rumbo menores en los bordes del modelo (Figura 4.1.g y Figura 4.2.g). Los manteos de las fallas nuevas variaron desde los 34°E para I1 hasta los 67°E para las fallas al oeste de la cuenca, mientras que las del sector oriente fueron 47°W para I3, 45°W para I4 y 25°W para I5.

La elevación de la superficie medida en este modelo fue de 11.0 mm (18.3% más que la altura inicial). El ancho promedio de la deformación fue de 135.75 mm. En el borde oriental de la cuenca se alzó un área promedio de 625.18 mm²; en el borde occidental, 549.13 mm²; es decir, en el primero se alzó solo 76.04 mm² más que en el segundo (factor E/W de 1.14).

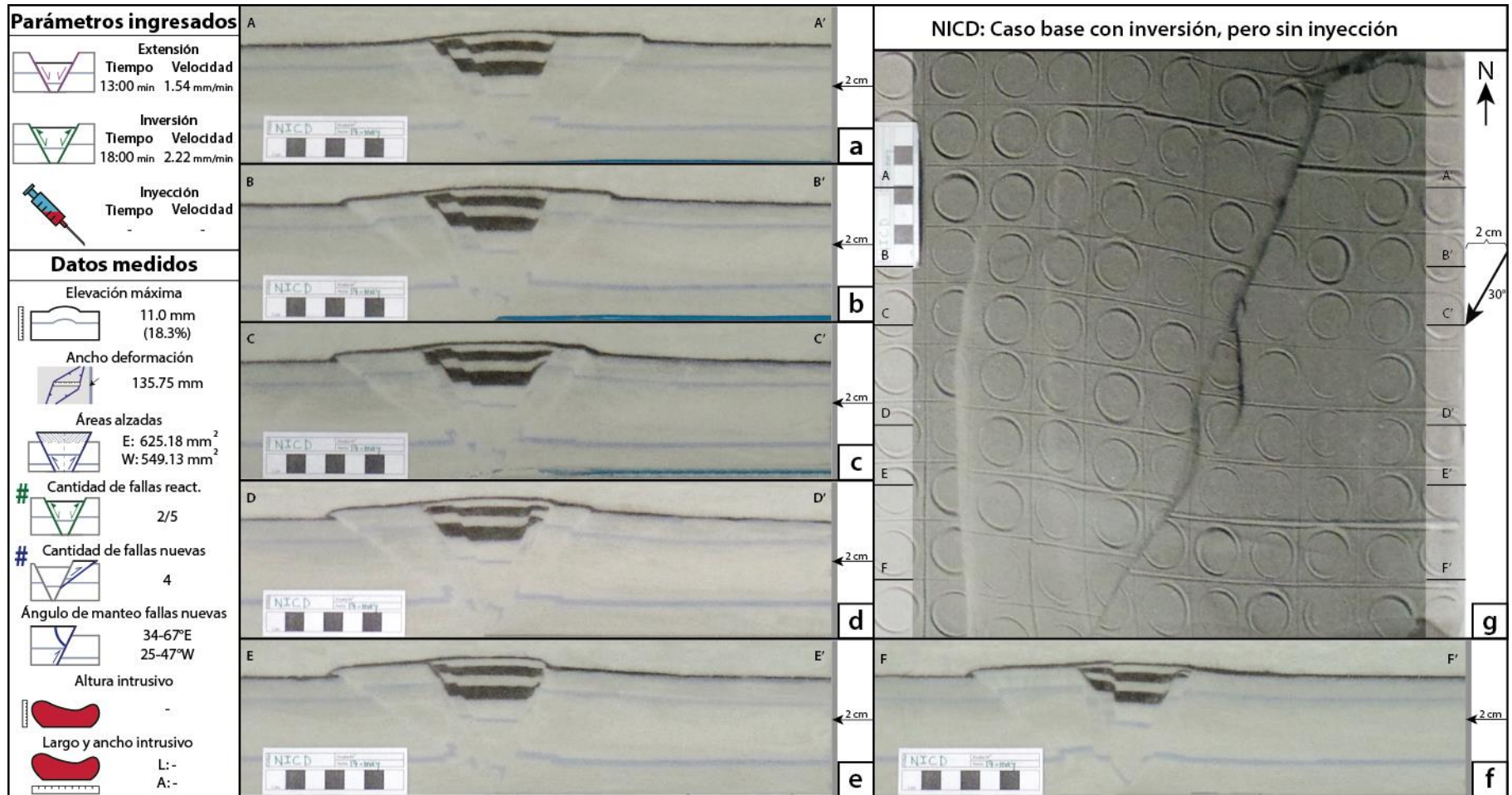


Figura 4.1 Fotos del modelo base NICD: Caso base con inversión tectónica, pero sin inyección de fluidos. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Fotos de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift. g) Foto en planta del resultado final del modelo, cada cuadrado marcado en la superficie mide 30x30 mm²; se marca la ubicación de los cortes a-f.

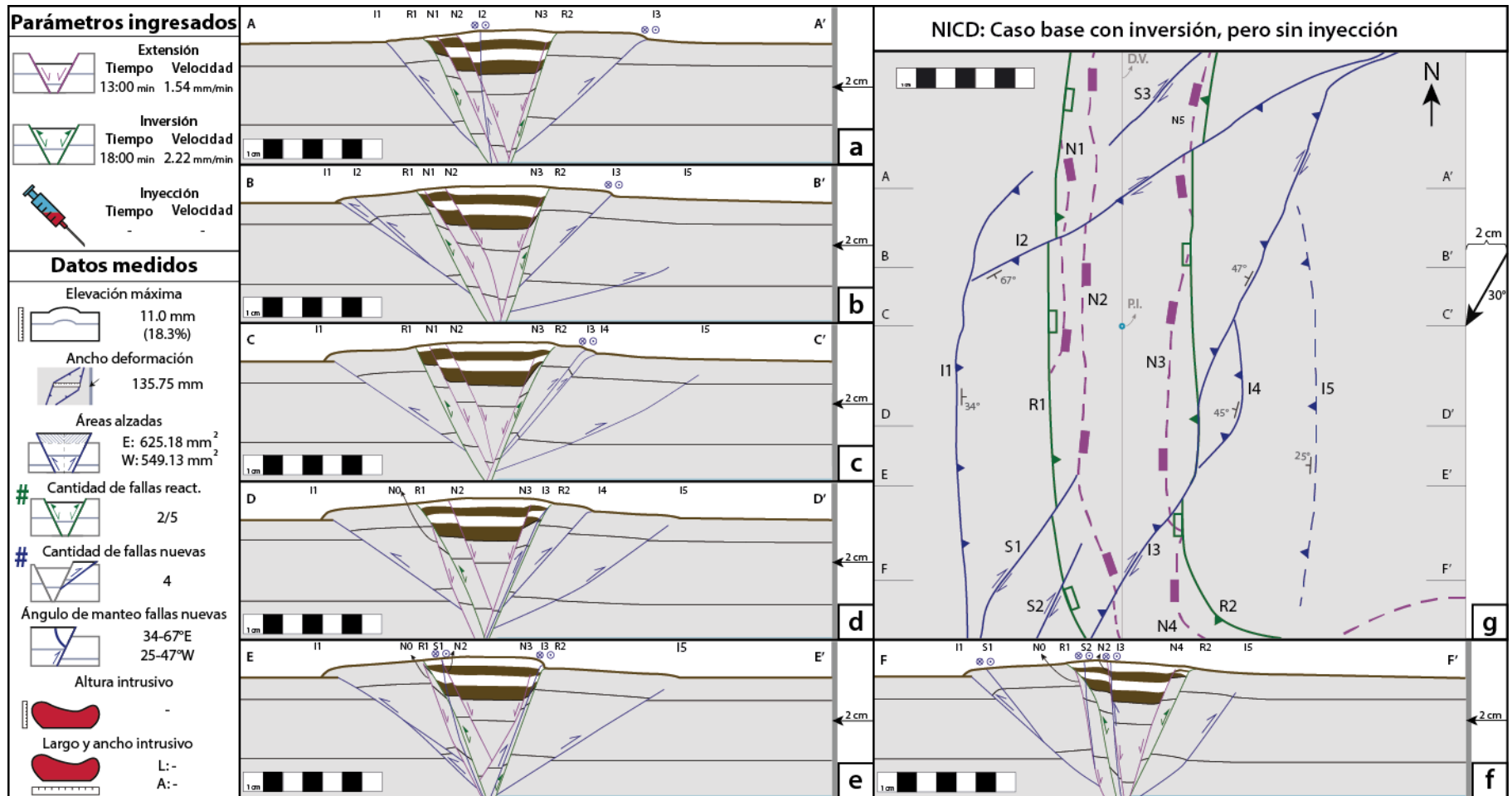


Figura 4.2 Esquemas del modelo base NICD: Caso base con inversión tectónica, pero sin inyección de fluidos. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Esquemas de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift. g) Esquema en planta del resultado final del modelo; se marca la ubicación de los cortes a-f, además del manteo de las fallas nuevas. Las líneas rosadas (“N”) son fallas normales no reactivadas; las líneas verdes (“R”) son fallas normales reactivadas como inversas; las líneas azules (“I” o “S”) son fallas nuevas producidas durante la inversión.

4.1.2. BVND3

A este modelo solo se le inyectó el fluido a baja velocidad (0.117 mL/s), no se le aplicó extensión ni inversión tectónica. La duración del experimento fue de 13 minutos, tiempo similar al de los modelos con inversión tectónica e inyección a baja velocidad (Ítem 4.2).

El domo comenzó a alzarse a los 7 minutos de iniciado el experimento, deformación que se mantuvo hasta el término de este sin que afloraran fallas en superficie. En esta ocasión, el fluido no alcanzó a llegar a superficie (Figura 4.3.a y Figura 4.4.a).

La elevación de la superficie fue de 3.3 mm (5.5% de la altura inicial). La morfología final del domo fue de 83.24 mm para el ancho de la deformación (dimensión ortogonal al borde del pistón o "DOB") y 80.64 mm para el largo de la deformación (dimensión paralela al borde del pistón o "DPB"). Por otra parte, las dimensiones del halo fueron de 42.93 mm de altura (altura del intrusivo: 29.21 mm), 73.5 mm de largo del halo ortogonal al borde o "HOB" (46.81 mm de largo del intrusivo ortogonal al borde o "IOB"), y 80 ± 10 mm de largo del halo paralelo al borde o "HPB".

4.1.3. AVND

Al igual que el caso anterior, al modelo AVND no se le realizó inversión tectónica, sino que solo tuvo inyección del fluido, pero ahora a alta velocidad (0.163 mL/s). La duración del experimento fue de solo 3:10 minutos.

Debido a la alta velocidad de inyección, el domo se empezó a notar a los 2 minutos de iniciado el experimento. Ya a los tres minutos se visualizaban marcadas fallas inversas con un notorio alzamiento de la superficie. La prueba concluyó a los 3:10 minutos con la extrusión del fluido (Figura 4.3.c y Figura 4.4.c).

La elevación de la superficie fue de 5.0 mm (8.3% de la altura inicial). La morfología final del domo fue de 61.59 mm para DOB (que equivale al ancho de la deformación) y 65.95 mm para DPB. Por otra parte, las dimensiones del halo fueron de 52.98 mm de altura (altura del intrusivo: 47.95 mm), 40.1 mm de HOB (21.07 mm de IOB), y 40 ± 10 mm de HPB.

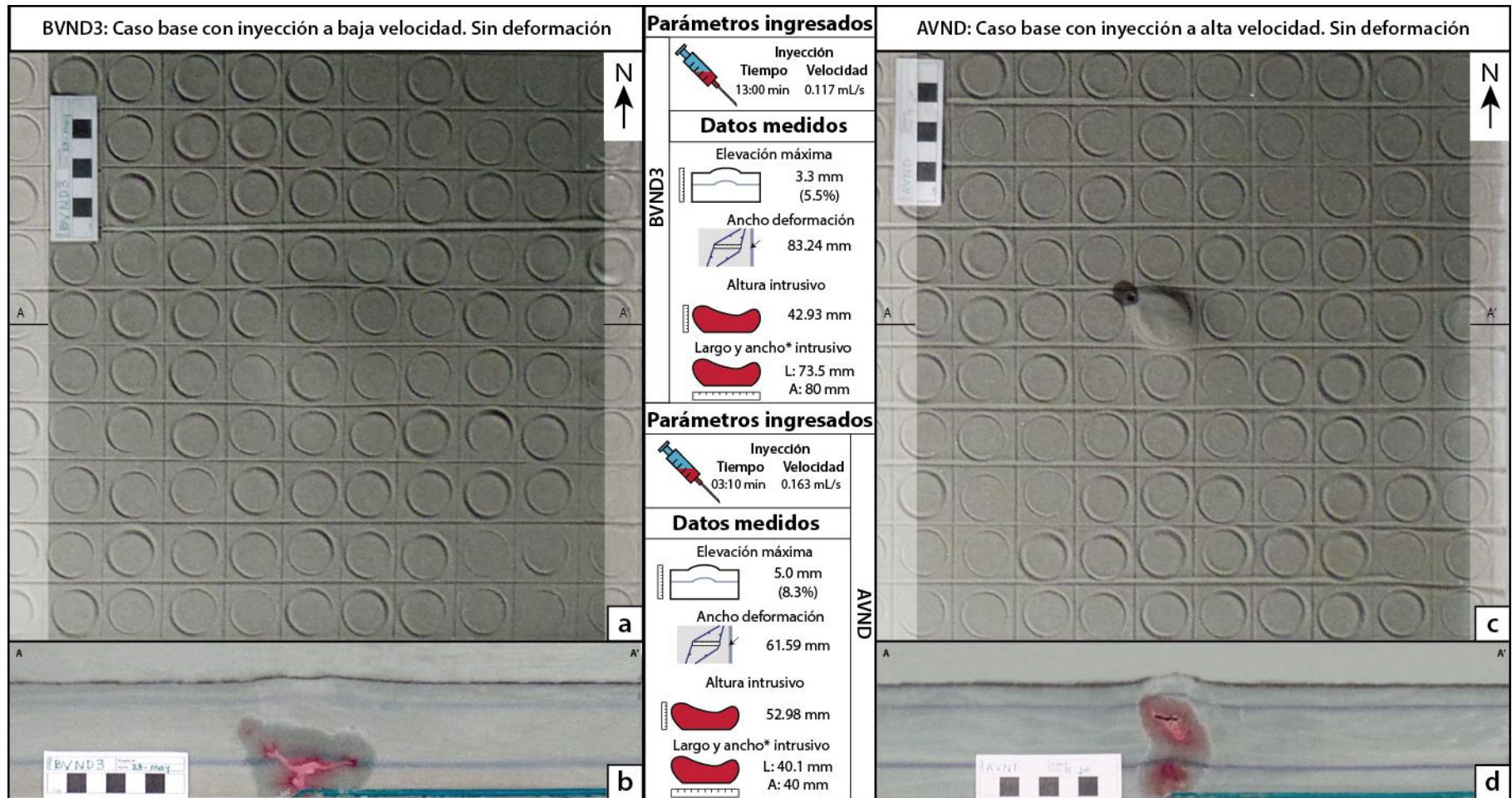


Figura 4.3 Fotos de los modelos base BVND3 y AVND: Casos base sin inversión, solo con inyección a baja y alta velocidad, respectivamente. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a) Foto en planta del resultado final del modelo BVND3: cada cuadrado marcado en la superficie mide 30x30 mm²; se marca la ubicación del corte A-A'. b) Foto de corte en perfil W-E del modelo BVND3: la ubicación de la traza del perfil se señala en (a). c) Foto en planta del resultado final del modelo AVND, cada cuadrado marcado en la superficie mide 30 mm; se marca la ubicación del corte A-A'. d) Foto de corte en perfil W-E del modelo AVND, la ubicación de la traza del perfil se señala en (c). * El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

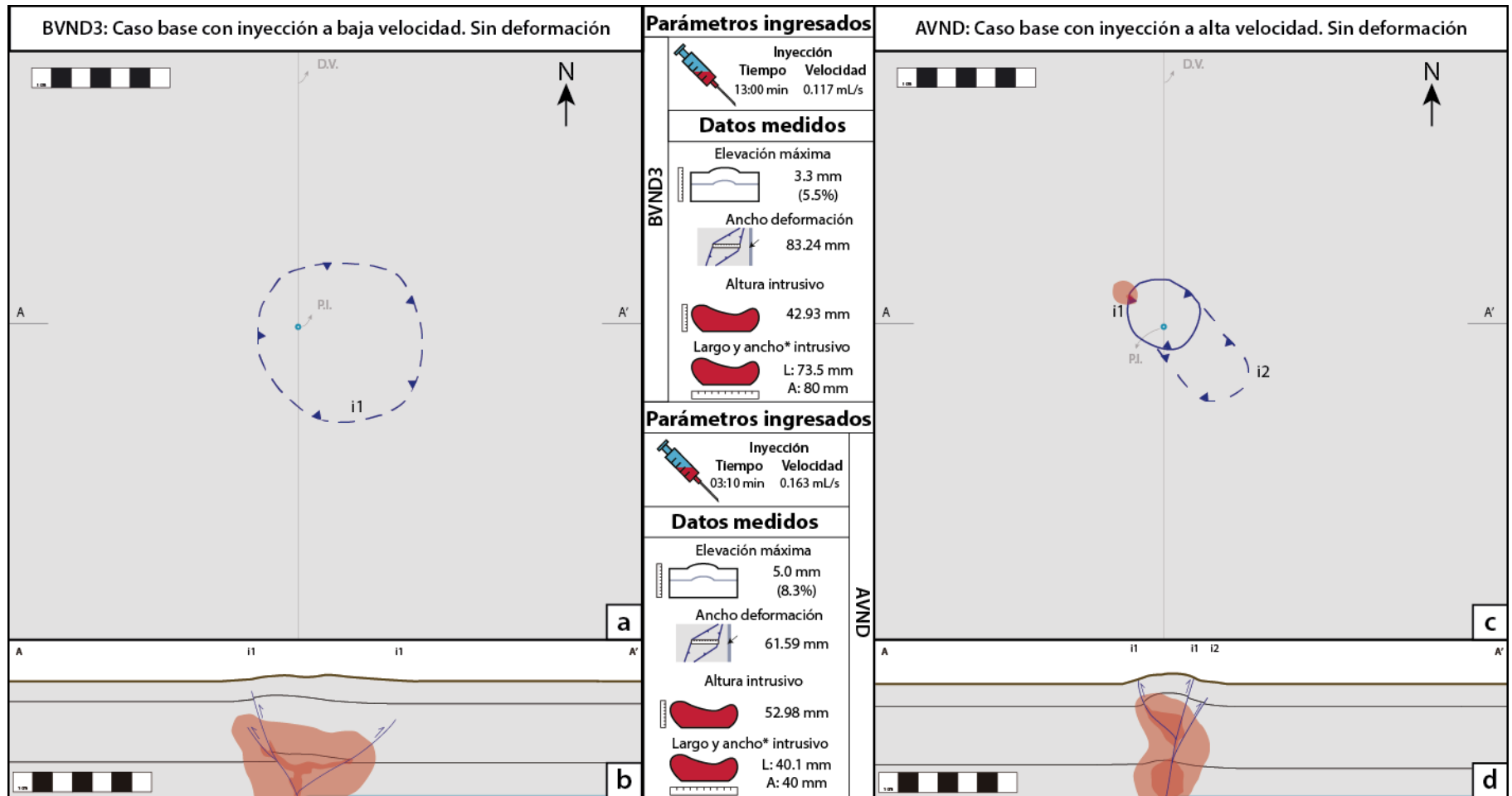


Figura 4.4 Esquemas de los modelos base BVND3 y AVND: Casos base sin inversión, solo con inyección a baja y alta velocidad, respectivamente. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a) Esquema en planta del resultado final del modelo BVND3; se marca la ubicación del corte A-A'. b) Esquema del corte en perfil W-E del modelo BVND3, la ubicación de la traza del perfil se señala en (a). c) Esquema en planta del resultado final del modelo AVND; se marca la ubicación del corte A-A'. d) Esquema del corte en perfil W-E del modelo AVND, la ubicación de la traza del perfil se señala en (c). Las líneas azules simbolizan fallas inversas. * El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

4.2. Serie de baja velocidad de inyección

La primera serie que combinó los factores de inyección e inversión tectónica fue la de baja velocidad de inyección. Esta serie consta de 3 modelos: inyección anterior a la inversión (BVAD); posterior a la inversión (BVPD), y durante la inversión (BVSD).

En todos estos modelos se extendió 20 mm de forma ortogonal al borde de la placa para posteriormente comprimir con 30° respecto al borde por 40 mm —salvo el modelo BVAD, en el que no se realizó inversión tectónica. La velocidad de extensión promedio en esta serie fue de 1.60 mm/min, mientras que la de inversión fue de 2.40 mm/min (6 Å del motor); la velocidad de inyección promedio del fluido fue de 0.100 mL/s.

4.2.1. BVAD

Este experimento tuvo la inyección del fluido después de la extensión del modelo, es decir, antes de la inversión tectónica. Sin embargo, no se realizó la inversión posterior por motivos de limitaciones del modelo. La extensión se hizo a 1.60 mm/min, durante 12:30 minutos. Luego se inyectó el fluido a 0.117 mL/s durante 5:20 minutos.

Se generaron 5 fallas normales principales: 3 en el lado W, y 2 en el lado E. Las más externas se desarrollaron desde el principio del experimento, mientras que las últimas lo hicieron a los 13 mm de extensión. Se realizaron 4 eventos de sedimentación dentro del graben generado: 5 mm (4 minutos); 10 mm (7:20 minutos); 16 mm (10:10 minutos), y 20 mm (12:30 minutos) de extensión. La falla más lejana al pistón se mantuvo activa hasta antes de la tercera sedimentación, mientras que las demás se desarrollaron hasta el final de la fase de extensión. Al terminar de extender, se cubrió por completo el modelo con una capa de 1 mm de espesor.

Posterior a esto, se comenzó la inyección del fluido. El domo se comenzó a notar a los 4 minutos desde iniciada la inyección. A los 5:20 minutos el fluido llegó a superficie sin haberse generado mayores fallas inversas en su ascenso (Figura 4.5.g y Figura 4.6.g). Sin embargo, hubo una reactivación local de las fallas normales en la zona donde intruyó el fluido (N5 y N6, Figura 4.5.c y Figura 4.6.c).

La elevación de la superficie del modelo fue de 4.1 mm (6.8% de la altura inicial); el ancho de la deformación abarcó 27.42 mm. En el lado E de la cuenca se alzó un área promedio de 36.21 mm²; en el lado W, solo 1.26 mm²; es decir, un gran porcentaje del alzamiento se produjo en la zona oriental de la cuenca (diferencia de 34.95 mm², y razón E/W de 28.73). Las dimensiones del halo fueron de 50.8 mm de altura (47.1 mm de altura del intrusivo), 41.8 mm de HOB (23.6 mm de IOB), y 40±10 mm de HPB.

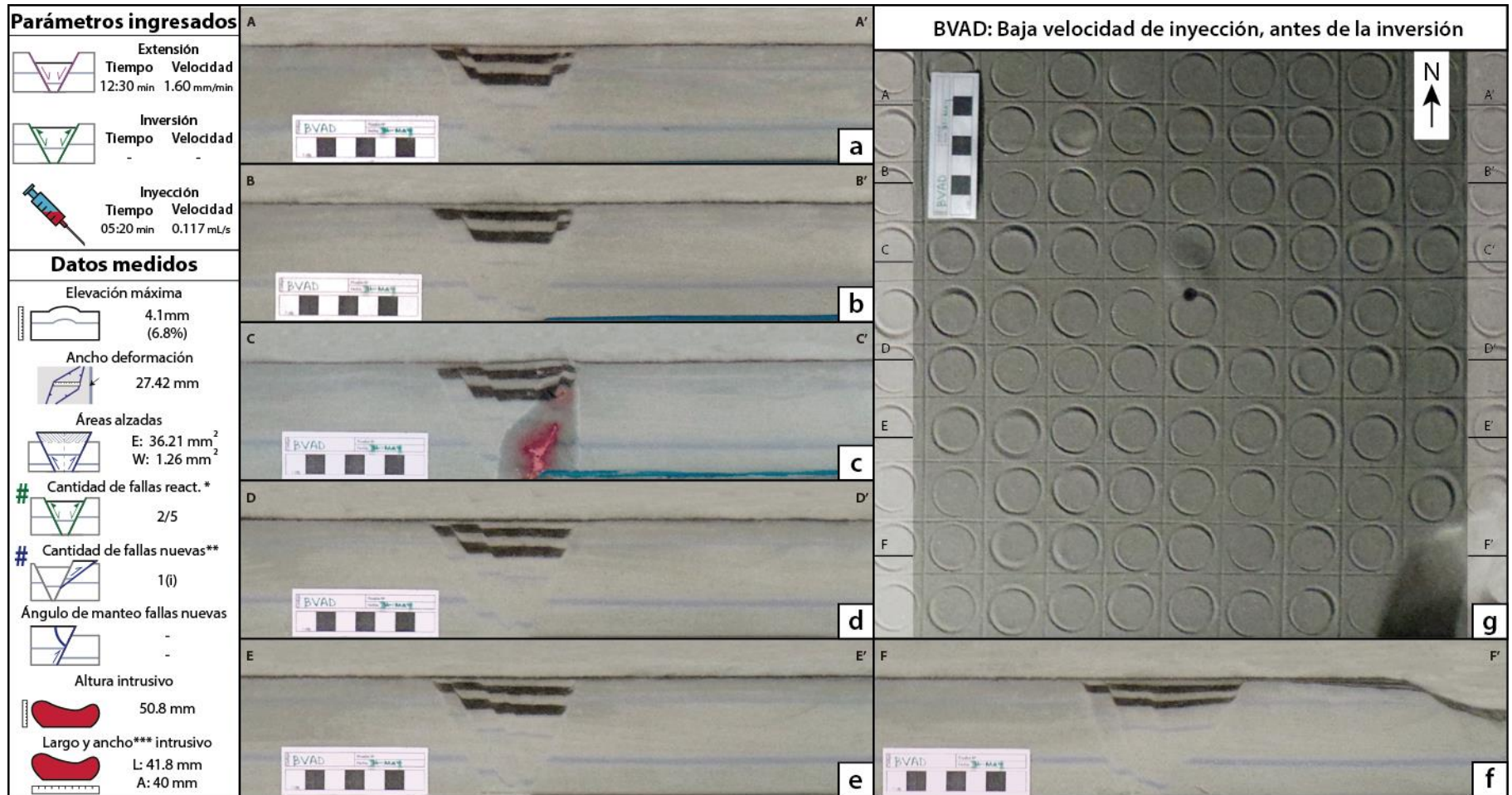


Figura 4.5 Fotos del modelo BVAD: Serie de baja velocidad de inyección anterior a la inversión tectónica. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Fotos de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift; el intrusivo se muestra en rojo (c). g) Foto en planta del resultado final del modelo, cada cuadrado marcado en la superficie mide 30x30 mm²; se marca la ubicación de los cortes a-f; el punto oscuro en el centro es el fluido que alcanzó la superficie. *Solo hubo reactivación local de fallas por el intrusivo. **Fallas nuevas producidas por la inyección. ***El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

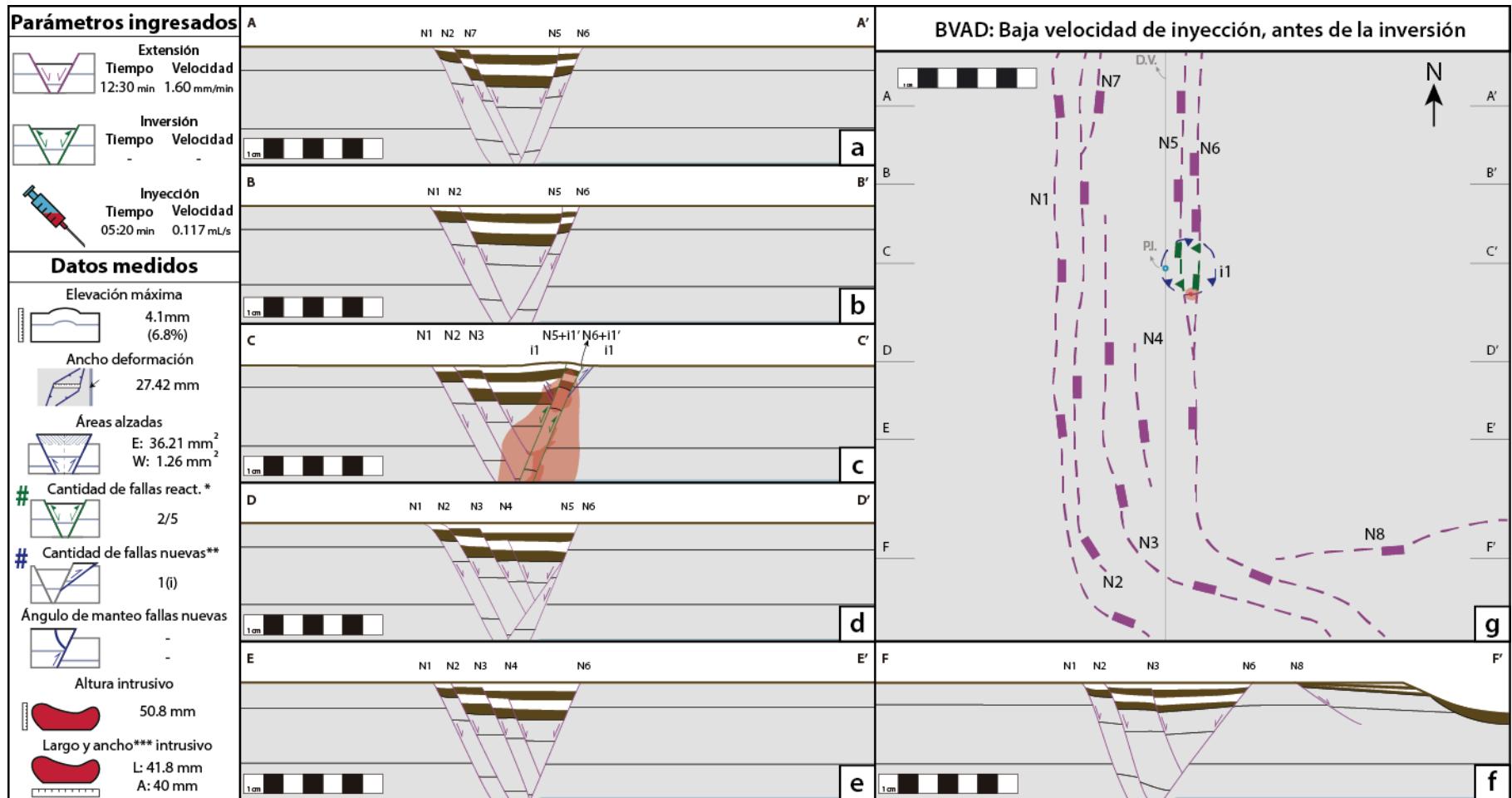


Figura 4.6 Esquemas del modelo BVAD: Serie de baja velocidad de inyección anterior a la inversión tectónica. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Esquemas de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift; el intrusivo se muestra en rojo oscuro y el halo en rojo claro (c). g) Esquema en planta del resultado final del modelo; se marca la ubicación de los cortes a-f; el punto rojo en el centro es el fluido que alcanzó la superficie. Las líneas rosadas ("N") son fallas normales no reactivadas; las líneas verdes ("R") son fallas normales reactivadas como inversas; las líneas azules ("i") son fallas nuevas producidas por la inyección. *Solo hubo reactivación local de fallas por el intrusivo. **Fallas nuevas producidas por la inyección ("i"). ***El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

4.2.2. BVPD

El modelo BVPD corresponde al experimento de inyección de fluido posterior a la inversión tectónica. La extensión inicial se realizó a 1.60 mm/min, mientras que la compresión tuvo una velocidad de convergencia de 2.58 mm/min. La extensión demoró 12:30 minutos, mientras que la inversión demoró 15:30 minutos. Luego de haber invertido el modelo, se comenzó la inyección del fluido a 0.097 mL/s durante 10:18 minutos.

Durante la extensión, se generaron 4 fallas normales principales: dos a cada lado del graben. Las más externas se desarrollaron al comienzo del modelo, mientras que las internas se desarrollaron aproximadamente a los 10 mm de extensión. Se sedimentó en 4 ocasiones: 5 mm (4 minutos); 10 mm (7:26 minutos); 15 mm (10:20 minutos), y 20 mm (12:30 minutos) de extensión. Las fallas se mantuvieron activas durante toda la fase extensional, a excepción de la más occidental, la que se solo actuó hasta antes de la tercera sedimentación. Luego de la última sedimentación dentro del graben, se cubrió todo el modelo con una capa de 1 mm de espesor.

Ya en la fase de inversión del experimento, se invirtieron notoriamente dos de las fallas normales: la falla interior del W, y la falla exterior del lado E (R1 y R2, respectivamente, Figura 4.7 y Figura 4.8). Aparentemente las otras fallas normales no presentaron reactivación. En cuanto a las fallas nuevas, se formaron tres (disposición y nombres de las fallas en Figura 4.8): I1 es la primera en aflorar (a los 12 mm de acortamiento ortogonal, falla inversa con componente de rumbo), la siguen I2 (13 mm de acortamiento ortogonal, falla inversa con componente de rumbo) y dos fallas inversas menores que no afloran en superficie: I3 e I4 (ambas a 17 mm de acortamiento ortogonal). Además, apareció una falla de rumbo de menor orden en el borde del modelo (S1, Figura 4.7.g y Figura 4.8.g). La falla I1 tiene un manteo de 37°E, mientras que I2 manteea con 48°W; las fallas I3 e I4 manteean con 28°W y 57°W, respectivamente.

Finalmente, se realizó la inyección de fluido en el modelo ya invertido. El domo comenzó a notarse a los 5 minutos de comenzada la inyección hasta el término del experimento, donde el fluido llegó a superficie a los 10:18 minutos (Figura 4.7.g y Figura 4.8.g). La falla inversa asociadas a la inyección ("i1" en Figura 4.8) no llegaron a superficie. Sin embargo, se reactivaron localmente las fallas R1 e I2 debido al ascenso del fluido (Figura 4.7.b-c y Figura 4.8.b-c).

La elevación de la superficie medida en este modelo fue de 11.2 mm (18.7% de la altura inicial), ubicadas en la zona donde intruyó el fluido; el ancho de la deformación fue de 125.46 mm. En el borde oriental de la cuenca se alzó un área promedio de 622.66 mm²; en el borde occidental, 424.66 mm²; es decir, una diferencia de 197.99 mm² (razón E/W de 1.47). Las dimensiones del halo fueron de 39.7 mm de altura (altura del intrusivo: 31.3 mm), 69.5 mm de HOB (57.5 mm de IOB), y 70±10 cm de HPB.

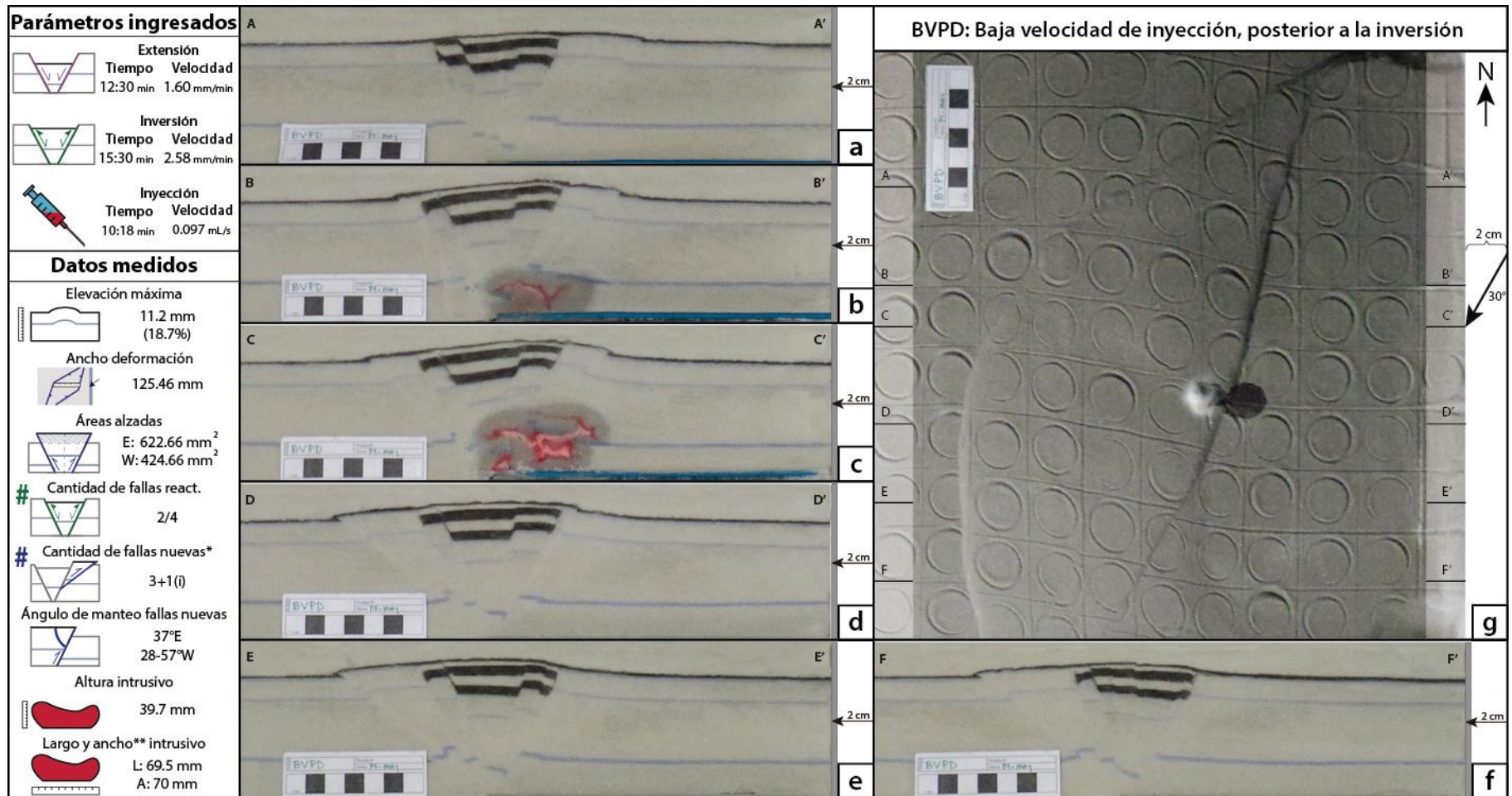


Figura 4.7 Fotos del modelo BVPD: Serie de baja velocidad de inyección posterior a la inversión tectónica. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Fotos de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift; el intrusivo se muestra en rojo (c). g) Foto en planta del resultado final del modelo; cada cuadrado marcado en la superficie mide 30x30 mm²; se marca la ubicación de los cortes a-f; el punto oscuro con arena blanca representa el lugar donde el fluido llegó a superficie. *Fallas nuevas producidas tanto por la inversión tectónica como por la inyección, en este caso hay tres de la fase de inversión + 1 de la etapa de inyección. **El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

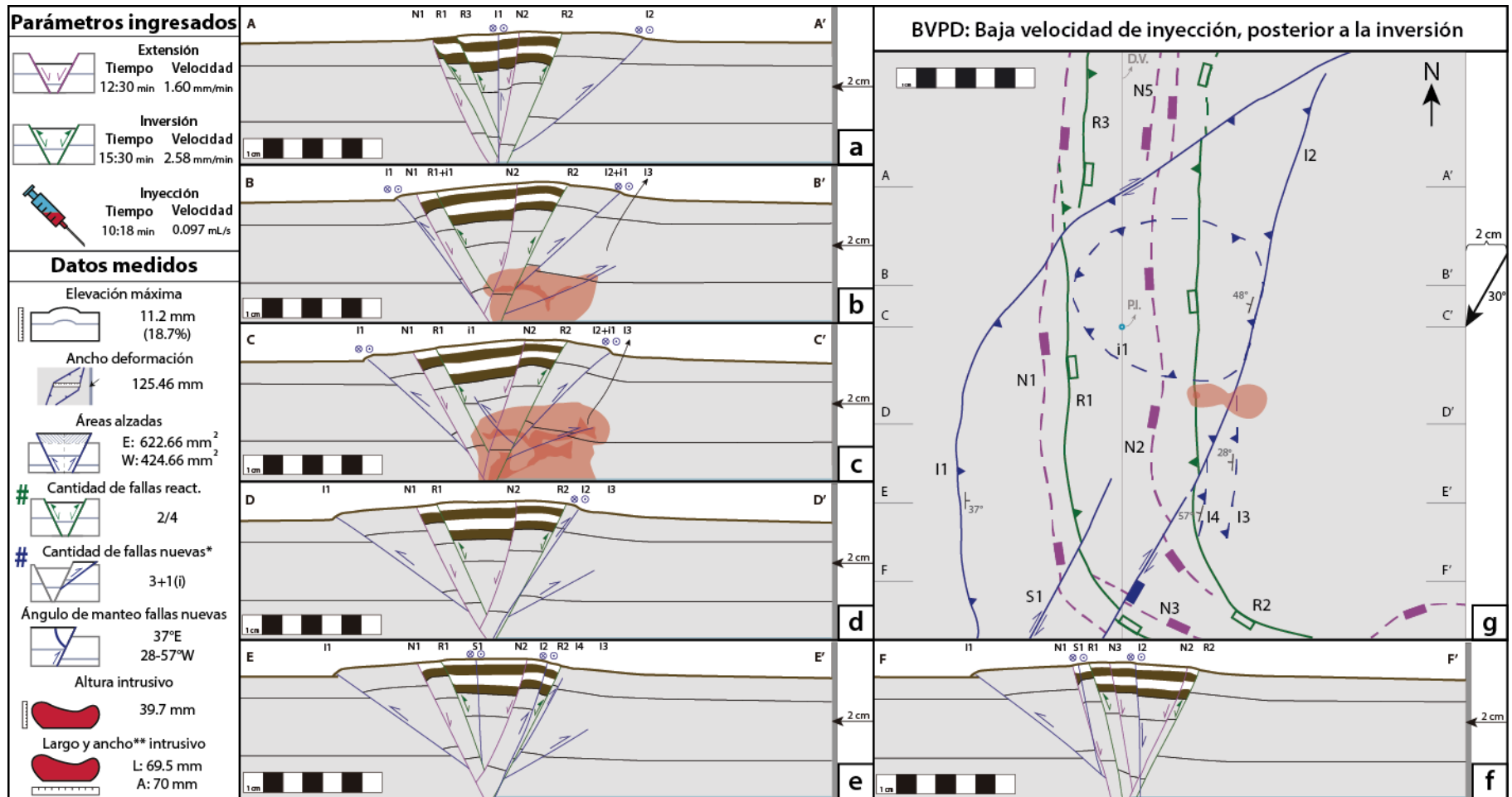


Figura 4.8 Esquemas del modelo BVPD: Serie de baja velocidad de inyección posterior a la inversión tectónica. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Esquemas de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift; el intrusivo se muestra en rojo (b y c). g) Esquema en planta del resultado final del modelo; se marca la ubicación de los cortes a-f; el punto rojo representa el lugar donde el fluido llegó a superficie. Las líneas rosadas ("N") son fallas normales no reactivadas; las líneas verdes ("R") son fallas normales reactivadas como inversas; las líneas azules ("i", "I" o "S") son fallas nuevas producidas durante la inversión e inyección. *Fallas nuevas producidas tanto por la inversión tectónica como por la inyección, en este caso hay tres de la fase de inversión + 1 de la etapa de inyección ("i"). **El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

4.2.3. BVSD

En este modelo, la inyección se realizó durante la inversión tectónica. La fase extensional se realizó a 1.6 mm/min durante 12:30 minutos, y la inversión se realizó a 2.22 mm/min durante 18 minutos. Se comenzó a inyectar a 0.100 mL/s luego de 5 minutos de empezada la inversión para que se hayan empezado a reactivar estructuras, y se prolongó por 13 minutos más.

Se formaron 6 fallas normales: 5 en el lado W, y solo una en el lado E. Las fallas más externas se notaron desde el comienzo, mientras que la última apareció a los 16 mm de extensión. Se sedimentó totalmente el graben a los 5 mm (4 minutos), a los 11 mm (7:20 minutos), a los 16 mm (10:10 minutos), y a los 20 mm (12:30 minutos) de extensión. Finalmente, se cubrió toda la superficie del modelo con una capa de 1 mm de espesor.

En la etapa de inversión del modelo, se reactivaron las dos fallas más externas del graben, una a cada lado, ninguna notoriamente más que la otra (R1 y R2, Figura 4.9 y Figura 4.10). Las otras fallas no presentaron reactivación visible. De las fallas nuevas formadas en esta fase (disposición y nombres de las fallas en Figura 4.10), las fallas I1 e I3 aparecen a los 10 mm de acortamiento ortogonal (ambas inversas con componente de rumbo), luego aparecen I4 (11 mm de acortamiento ortogonal, rumbo con componente inversa), I5 (13 mm de acortamiento ortogonal, inversa con componente de rumbo) e I2 (17 mm de acortamiento ortogonal, inversa). Adicionalmente, se produjeron algunas fallas de rumbo en el centro del modelo (S1) y como condiciones de borde (Figura 4.9.g y Figura 4.10.g). Las fallas I1 e I2 mantearon con 40°E y 39°E, respectivamente; mientras que I3 tuvo un manteo de 70°W, I4 de 63°W e I5 de 45°W.

Debido a que la inyección se realizó durante la inversión del modelo, no es posible aislar bien la temporalidad de la deformación producida por el intrusivo. Sin embargo, por sus formas más redondeadas, se infiere que estaría manifestada en las fallas I2 e I5 principalmente (Figura 4.9.g y Figura 4.10.g), además estas fallas aparecen después del inicio de la inyección. El fluido no llegó a superficie.

La elevación de la superficie fue de 9.9 mm (16.2% de la altura inicial) en la zona donde se ubica la mayor parte del intrusivo; el ancho promedio de la deformación fue de 155.95 mm. En el borde oriental de la cuenca se alzó un área promedio de 618.12 mm²; en el borde occidental, 463.64 mm²; es decir, en el primero se alzó 154.47 mm² más que en el segundo (razón E/W de 1.33), alrededor del doble de la diferencia del caso base NICD. El halo generado tuvo 28.84 mm de altura (intrusivo de 22.8 mm de altura), 86.0 mm de HOB (72.7 mm de IOB) y 90±10 mm de HPB.

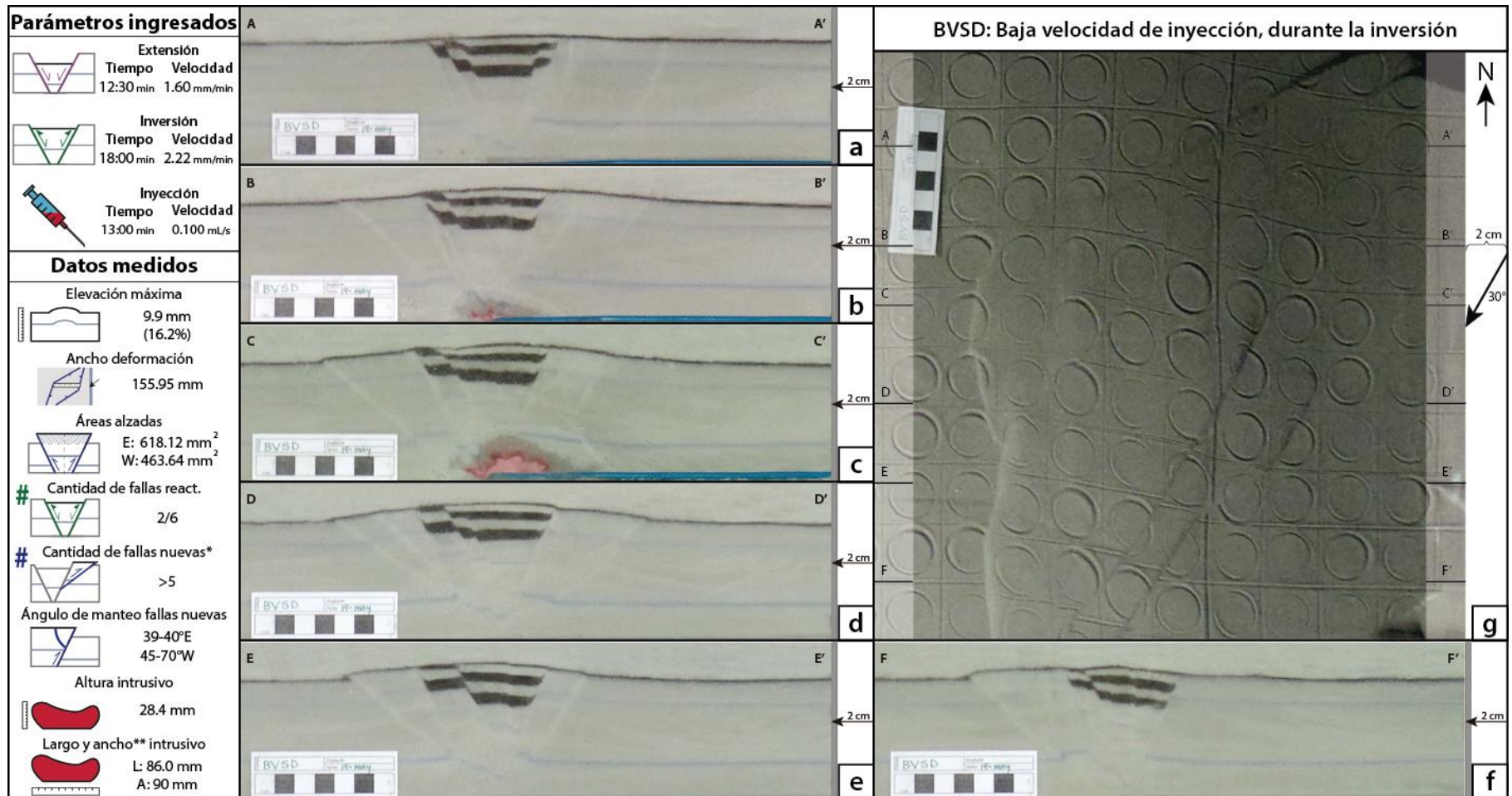


Figura 4.9 Fotos del modelo BVSD: Serie de baja velocidad de inyección durante la inversión tectónica. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Fotos de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift; el intrusivo se muestra en rojo (c). g) Foto en planta del resultado final del modelo; cada cuadrado marcado en la superficie mide 30x30 mm²; se marca la ubicación de los cortes a-f; el fluido no alcanzó la superficie. *Fallas nuevas producidas tanto por la inversión tectónica como por la inyección, en este caso no se pudieron diferenciar directamente. **El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

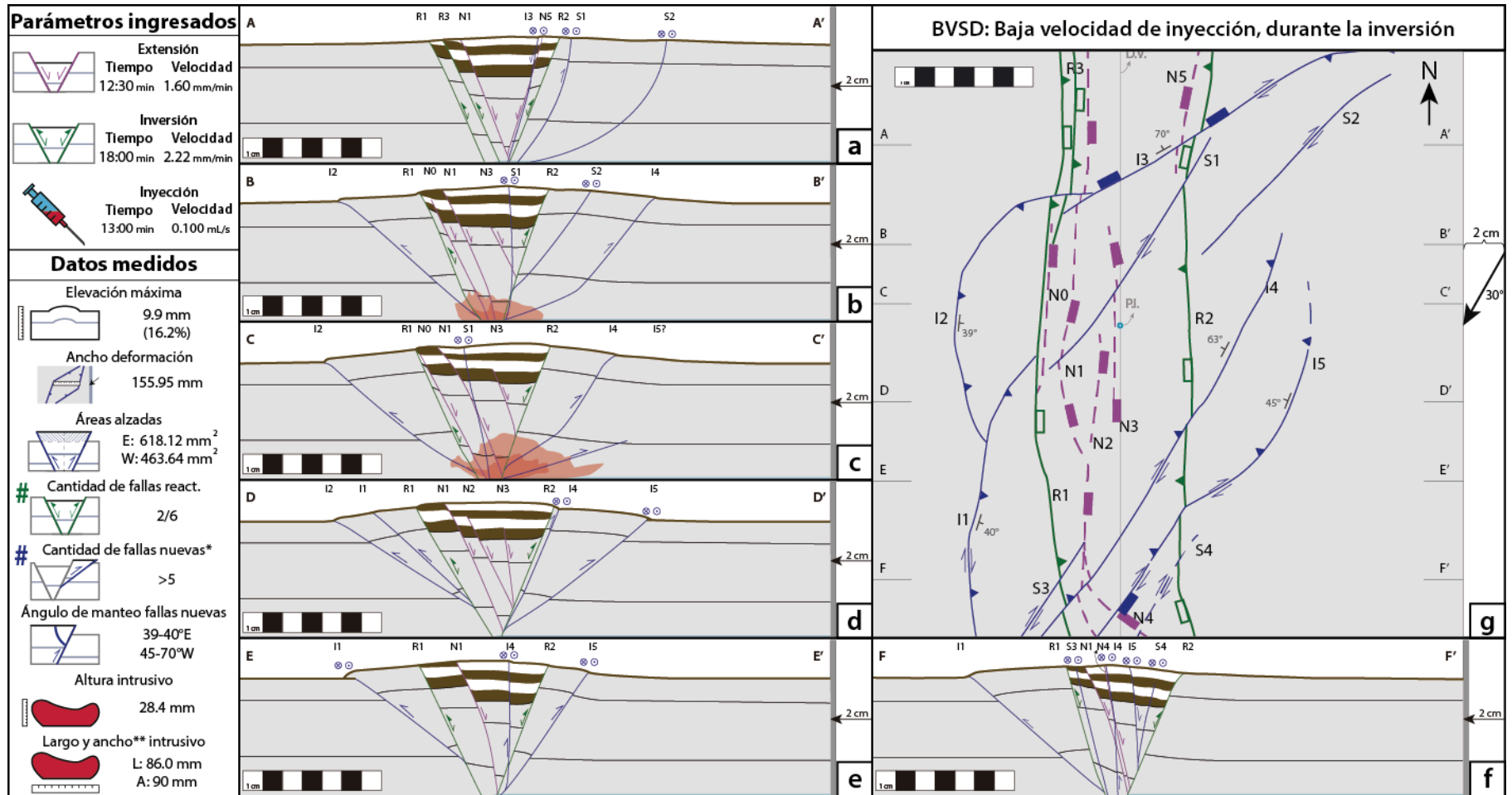


Figura 4.10 Esquemas del modelo BVSD: Serie de baja velocidad de inyección durante la inversión tectónica. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Esquemas de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift; el intrusivo se muestra en rojo oscuro y el halo en rojo claro (b y c). g) Esquema en planta del resultado final del modelo; se marca la ubicación de los cortes a-f; el fluido no alcanzó la superficie. Las líneas rosadas (“N”) son fallas normales no reactivadas; las líneas verdes (“R”) son fallas normales reactivadas como inversas; las líneas azules (“I” o “S”) son fallas nuevas producidas durante la inversión. *Fallas nuevas producidas tanto por la inversión tectónica como por la inyección, en este caso no se pudieron diferenciar directamente. **El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

4.3. Serie de alta velocidad de inyección

La segunda serie se realizó inyectando el fluido a alta velocidad. Al igual que la serie anterior, está constituida por 3 modelos según la temporalidad de la inyección: anterior a la inversión (AVAD); durante la inversión (AVSD), y posterior a la inversión (AVPD).

Siguiendo el mismo patrón antes mencionado, se extendió por 20 mm ortogonales al borde de la placa, y luego se invirtió con 30° respecto a ella por 40 mm para los modelos AVSD y AVPD; el modelo AVAD no tuvo inversión tectónica. La fase extensional se realizó, en promedio, a 1.52 mm/min (4.5 Å del motor), mientras que la inversión se hizo, en promedio, a 2.36 mm/min; el fluido se inyectó a 0.170 mL/s, también en promedio.

4.3.1. AVAD

Este experimento no tuvo inversión tectónica, sino que la inyección se produjo posterior a la fase extensional del modelo. Esta extensión tuvo una velocidad de 1.40 mm/min, y tomó 14:15 minutos; la inyección se hizo a 0.167 mL/s durante 8:20 minutos.

Se generaron 4 fallas normales principales: dos a cada lado del graben, más algunas menores en el borde opuesto al pistón. Nuevamente, las externas se comenzaron a notar desde el principio para dar paso a los 11 mm de extensión a fallas normales más al interior del graben. Se sedimentó en cuatro ocasiones: 5 mm (4 minutos); 10 mm (7:20 minutos); 14 mm (10:10 minutos), y 20 mm (14:15 minutos) de extensión. La falla normal interna E se desarrolló muy cercana a la externa, mientras que la falla normal interna W se produjo más distante de la externa, heredando toda la deformación de la falla externa, la que quedó inmóvil luego de la tercera sedimentación. Posterior a la extensión, se cubrió todo el modelo con una capa de 1 mm de espesor.

Luego de extender el modelo, se le inyectó el fluido. El domo apareció a los 3 minutos desde iniciada la inyección. A los 5 minutos se notan fallas inversas asociadas al ascenso; luego de esto, el alzamiento se propagó hacia un extremo del domo, por donde el fluido llegó a la superficie a los 8:20 minutos (Figura 4.11.g y Figura 4.12.g). Además de fallas inversas, el ascenso del fluido reactivó localmente la falla normal N6 (Figura 4.11.c-d y Figura 4.12.c-d).

La elevación de la superficie del modelo fue de 7.4 mm (12.4% de la altura inicial); en planta, el ancho de la deformación fue de 76.29 mm. En el lado E de la cuenca se alzó un área promedio de 266.18 mm²; en el lado W, solo 99.92 mm²; es decir, la mayoría del alzamiento se produjo en la zona oriental de la cueca (diferencia de 166.25 mm², y razón E/W de 2.66). Las dimensiones del halo fueron de 48.8 mm de altura (44.6 mm de altura del intrusivo), 57.9 mm de HOB (47.7 mm de IOB), y 70±10 mm de HPB.

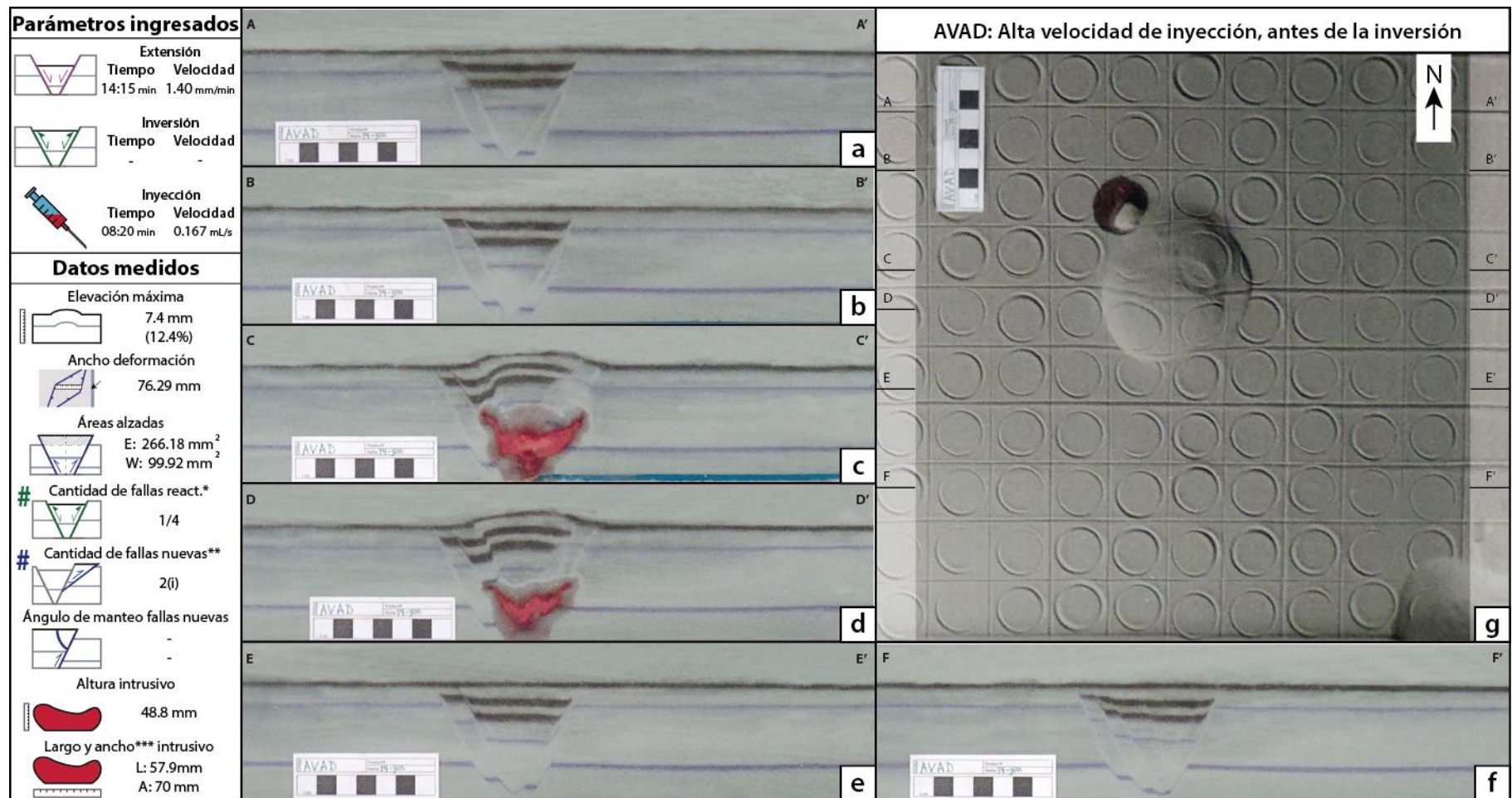


Figura 4.11 Fotos del modelo AVAD: Serie de alta velocidad de inyección anterior a la inversión tectónica. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Fotos de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift; el intrusivo se muestra en rojo (c y d). g) Foto en planta del resultado final del modelo, cada cuadrado marcado en la superficie mide 30x30 mm²; se marca la ubicación de los cortes a-f; el punto oscuro representa el lugar donde el fluido que alcanzó la superficie. *Solo hubo reactivación local de fallas por el intrusivo. **Fallas nuevas producidas tanto por la inversión tectónica como por la inyección, en este caso solo hay producidas por inyección. *** El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

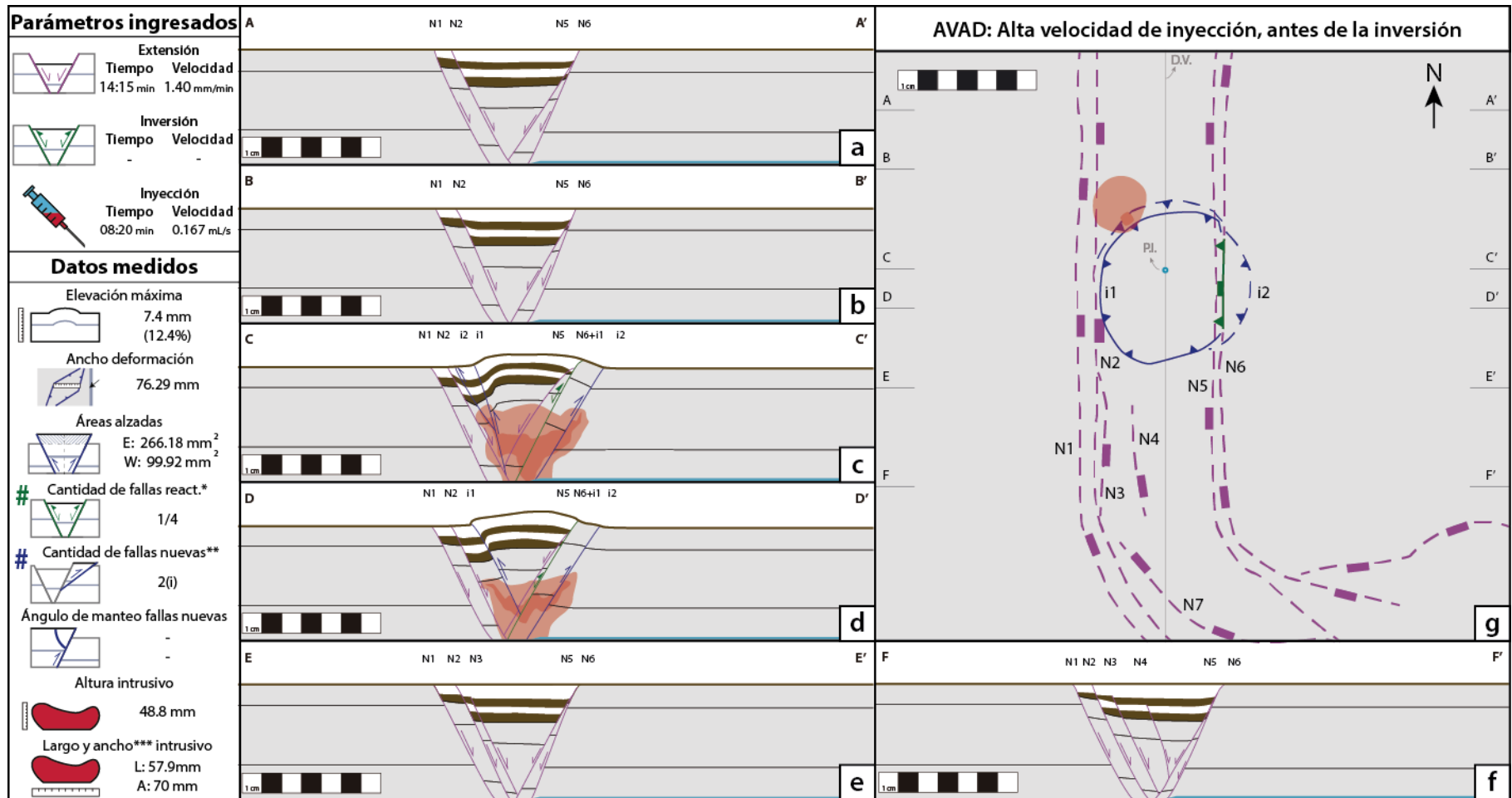


Figura 4.12 Esquemas del modelo AVAD: Serie de alta velocidad de inyección anterior a la inversión tectónica. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Esquemas de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift; el intrusivo se muestra en rojo oscuro y el halo en rojo claro (c y d). g) Esquema en planta del resultado final del modelo; se marca la ubicación de los cortes a-f; el punto rojo representa el lugar donde el fluido que alcanzó la superficie. Las líneas rosadas ("N") son fallas normales no reactivadas; las líneas verdes ("R") son fallas normales reactivadas como inversas; las líneas azules ("i") son fallas nuevas producidas por la inyección. *Solo hubo reactivación local de fallas por el intrusivo. **Fallas nuevas producidas tanto por la inversión tectónica como por la inyección, en este caso solo hay producidas por inyección ("i"). *** El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

4.3.2. AVPD

El modelo AVPD corresponde al experimento de inyección de fluido posterior a la inversión tectónica. La extensión inicial se realizó a 1.45 mm/min, mientras que la compresión tuvo una velocidad de convergencia de 2.47 mm/min. La extensión demoró 13:50 minutos, mientras que la inversión demoró 16:11 minutos. Luego de haber invertido el modelo, se comenzó la inyección del fluido a 0.173 mL/s durante 10:10 minutos.

Durante la extensión, se generaron 5 fallas normales principales: 3 en el lado W, y 2 en el lado E. Las primeras se desarrollaron al comienzo del modelo, mientras que las últimas se desarrollaron aproximadamente a los 10 mm de extensión. Se sedimentó en 4 ocasiones: 4 mm (4 minutos); 10 mm (7:40 minutos); 10:20 minutos (14 mm), y 20 mm (13:50 minutos) de extensión. Las fallas se mantuvieron activas durante toda la fase extensional, a excepción de la más occidental, la que se solo actuó hasta antes de la tercera sedimentación. Luego de la última sedimentación dentro del graben, se cubrió todo el modelo con una capa de 1 mm de espesor.

Ya en la fase de inversión del experimento, se reactivaron notoriamente tres de las fallas normales: las dos fallas externas W, y la falla exterior E (R1, R2 y R3, respectivamente, Figura 4.13 y Figura 4.14). Aparentemente las otras fallas normales no presentaron reactivación. En cuanto a las fallas nuevas, se formaron tres principales (disposición y nombres de las fallas en Figura 4.14): I1 e I2 son las primeras en aflorar (11 mm de acortamiento ortogonal, fallas inversas con componente de rumbo), seguidas por S1 (19 mm de acortamiento ortogonal, falla de rumbo de gran envergadura). Además, de una falla de rumbo de menor orden en el borde del modelo (S2, Figura 4.13.g y Figura 4.14.g). La falla I1 manteó con 35°E, mientras que I2 manteó con 43°W; S1 tuvo un cambio en su dirección del manteo, pasando de 78°E en el sur a 68°W en el centro del modelo.

Finalmente, se realizó la inyección de fluido en el modelo ya invertido. El domo comenzó a notarse a los 5 minutos de comenzada la inyección ("i1" en Figura 4.14), desarrollándose luego (6 minutos) una falla inversa bien marcada en el extremo sur del domo ("i2" en Figura 4.14). Posteriormente, a los 8 minutos, la deformación migró hacia el costado SE, por el que se mantuvo ascendiendo el fluido hasta el término del experimento, cuando el fluido llegó a superficie a los 10:10 minutos (Figura 4.13.g y Figura 4.14.g). Además, las fallas N1, N2 y S1 se reactivaron localmente debido al ascenso del fluido (Figura 4.13.c y Figura 4.14.c).

La elevación de la superficie medida en este modelo fue de 11.6 mm (19.4% de la altura inicial), ubicadas en la zona donde intruyó el fluido; el ancho promedio de la deformación fue de 131.76 mm. El borde oriental de la cuenca alzó un área promedio de 574.12 mm²; el borde occidental, 344.05 mm²; es decir, una diferencia de 230.07 mm² que alzó el E más que el W (razón E/W de 1.67). Las dimensiones del halo fueron de 56.8 mm de altura (altura del intrusivo: 50.9 mm), 74.7 mm de HOB (55.0 mm de IOB), y 80±10 mm de HPB.

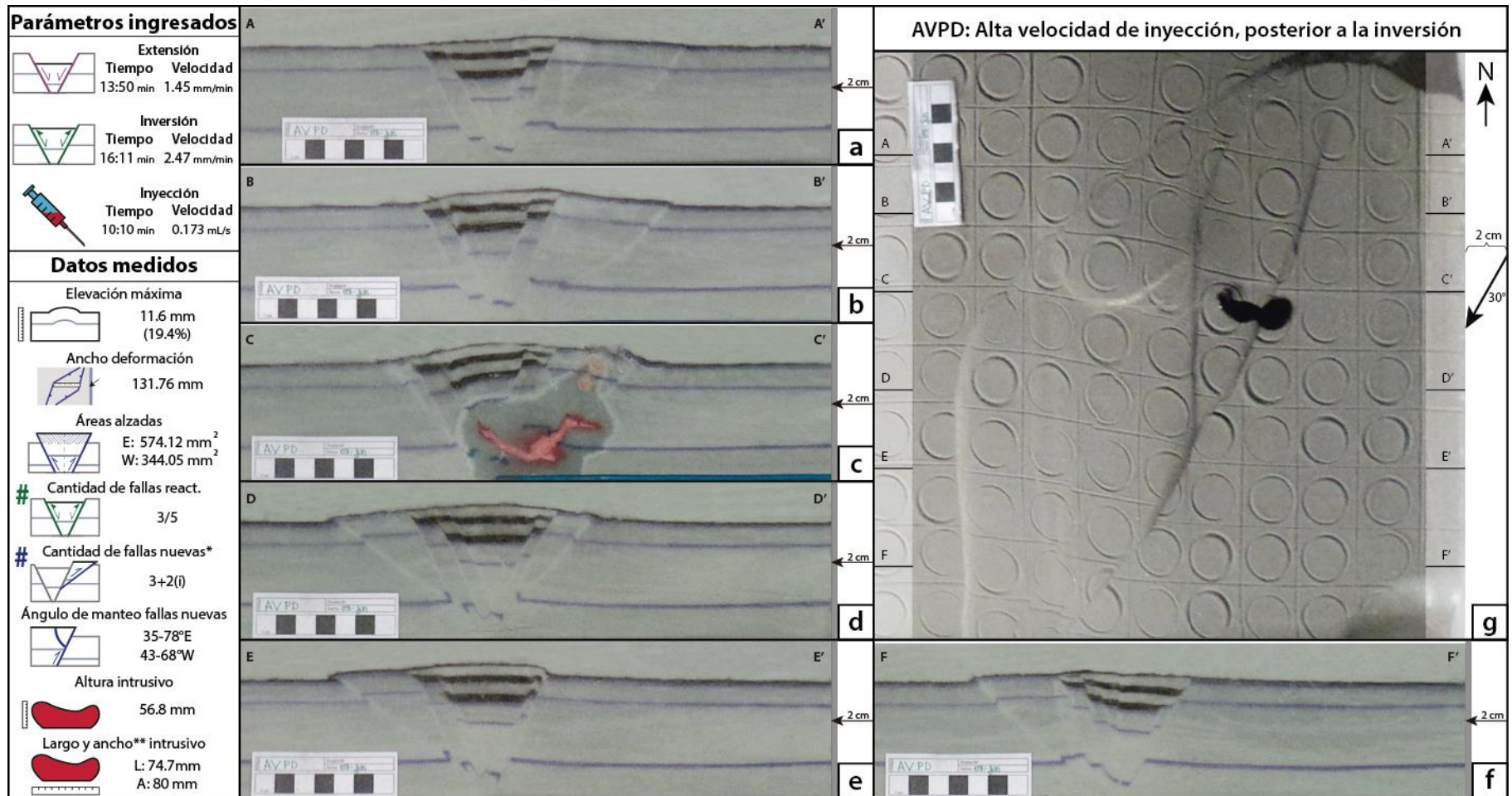


Figura 4.13 Fotos del modelo AVPD: Serie de alta velocidad de inyección posterior a la inversión tectónica. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Fotos de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift; el intrusivo se muestra en rojo (c). g) Foto en planta del resultado final del modelo; cada cuadrado marcado en la superficie mide 30x30 mm²; se marca la ubicación de los cortes a-f; la zona oscura representa el lugar donde el fluido llegó a superficie y fluyó al E. *Fallas nuevas producidas tanto por la inversión tectónica como por la inyección, en este caso hay tres de la fase de inversión + 2 de la etapa de inyección. **El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

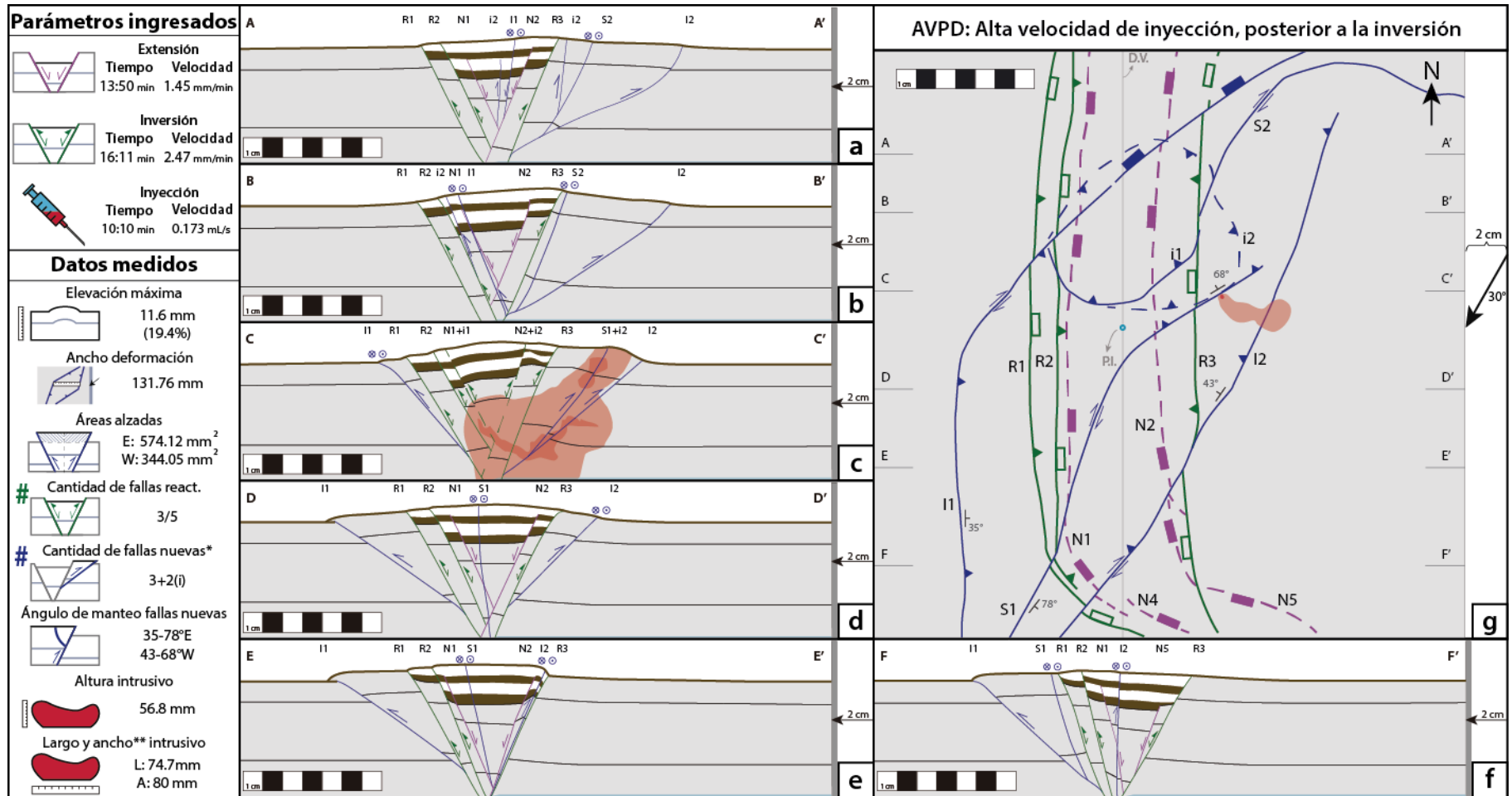


Figura 4.14 Esquemas del modelo AVPD: Serie de alta velocidad de inyección posterior a la inversión tectónica. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Esquemas de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift; el intrusivo se muestra en rojo oscuro y el halo en rojo claro (c). g) Esquema en planta del resultado final del modelo; se marca la ubicación de los cortes a-f; la zona roja representa el lugar donde el fluido llegó a superficie y fluyó al E. Las líneas rosadas ("N") son fallas normales no reactivadas; las líneas verdes ("R") son fallas normales reactivadas como inversas; las líneas azules ("i", "I" o "S") son fallas nuevas producidas durante la inversión e inyección. *Fallas nuevas producidas tanto por la inversión tectónica como por la inyección, en este caso hay tres de la fase de inversión + 2 de la etapa de inyección ("i"). **El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

4.3.3. AVSD

En este modelo, la inyección se realizó durante la inversión tectónica. La fase extensional se realizó a 1.7 mm/min durante 11:45 minutos, y la inversión se realizó a 2.25 mm/min durante 17:45 minutos. Se comenzó a inyectar luego de 7 minutos de empezada la inversión a 0.180 mL/s, y se prolongó por 10:45 minutos más.

Se formaron 6 fallas normales: 4 en el lado W, y 2 en el lado E. Las fallas más externas se notaron desde el comienzo, mientras que la última apareció a los 19 mm de extensión. Se sedimentó totalmente el graben a los 5 mm (4 minutos), a los 11 mm (7:20 minutos), a los 16 mm (10:10 minutos), y a los 20 mm (11:45 minutos) de extensión. Finalmente, se cubrió todo el modelo con una capa de 1 mm de espesor.

En la etapa de inversión del modelo, se reactivaron tres fallas normales: las dos más externas del graben, una a cada lado, y otra más en el borde opuesto al pistón (R1, R2 y R3, Figura 4.15 y Figura 4.16); siendo el lado W del graben el que mostró más actividad. Las otras fallas no presentaron reactivación visible. Se formaron numerosas fallas nuevas en esta fase de inversión (disposición y nombres de las fallas en Figura 4.16). La primera en aparecer fue I4 (9 mm de acortamiento ortogonal, inversa con componente de rumbo), luego aparecen I3 e I8 (10 mm de acortamiento ortogonal, inversas con leve componente de rumbo), luego aparecen I2 e I7 (14 mm de acortamiento ortogonal, inversa e inversa con componente de rumbo, respectivamente), I5 (15 mm de acortamiento ortogonal, inversa con componente de rumbo), un segmento de I4 con manteo opuesto (16 mm de acortamiento ortogonal, normal con componente de rumbo), I6 e I9 (17 mm de acortamiento ortogonal, inversa con componente de rumbo e inversa, respectivamente), I1 e I10 (19 mm de acortamiento ortogonal, inversas). Adicionalmente, se produjeron algunas fallas de rumbo en los bordes (S1, S2 y S3, Figura 4.15.g y Figura 4.16.g). Las fallas I1 e I2 tuvieron manteos muy similares, 36°E y 35°E, respectivamente; I3 fue subvertical (87°E) e I4 manteó con 52°E. Las fallas del centro I5 e I6 mantearon con 60°W y 70°W, respectivamente. Por otro lado, las fallas del sector oriental del sistema tuvieron manteos de 59°W para I7, 36°W para I8, 59°W para I9 y 43°W para I10.

Al igual que en el modelo BVSD, no se pudo aislar certeramente la temporalidad de la deformación producida por el intrusivo. Se infiere que podría estar manifestada mediante las fallas I2 e I8 en los extremos W y E, respectivamente; junto con I5, I6 y el segmento de I4 que actúa como falla normal, las que generaron un bajo topográfico en el centro del modelo (Figura 4.15.g y Figura 4.16.g). El fluido no alcanzó la superficie.

La elevación de la superficie fue de 10.9 mm (18.2% de la altura inicial), ubicada en la zona donde está la mayor parte del intrusivo; el ancho de la deformación fue de 163.78 mm. El borde oriental de la cuenca alzó un área promedio de 743.29 mm²; el borde occidental, 366.47 mm²; es decir, el primero alzó más del doble del segundo (diferencia de 376.82 mm², y razón E/W de 2.03). El halo generado tuvo 61.2 mm de altura (intrusivo de 56.1 mm de altura), 98.9 mm de HOB (86.9 mm de IOB), y 90±10 mm de HPB.

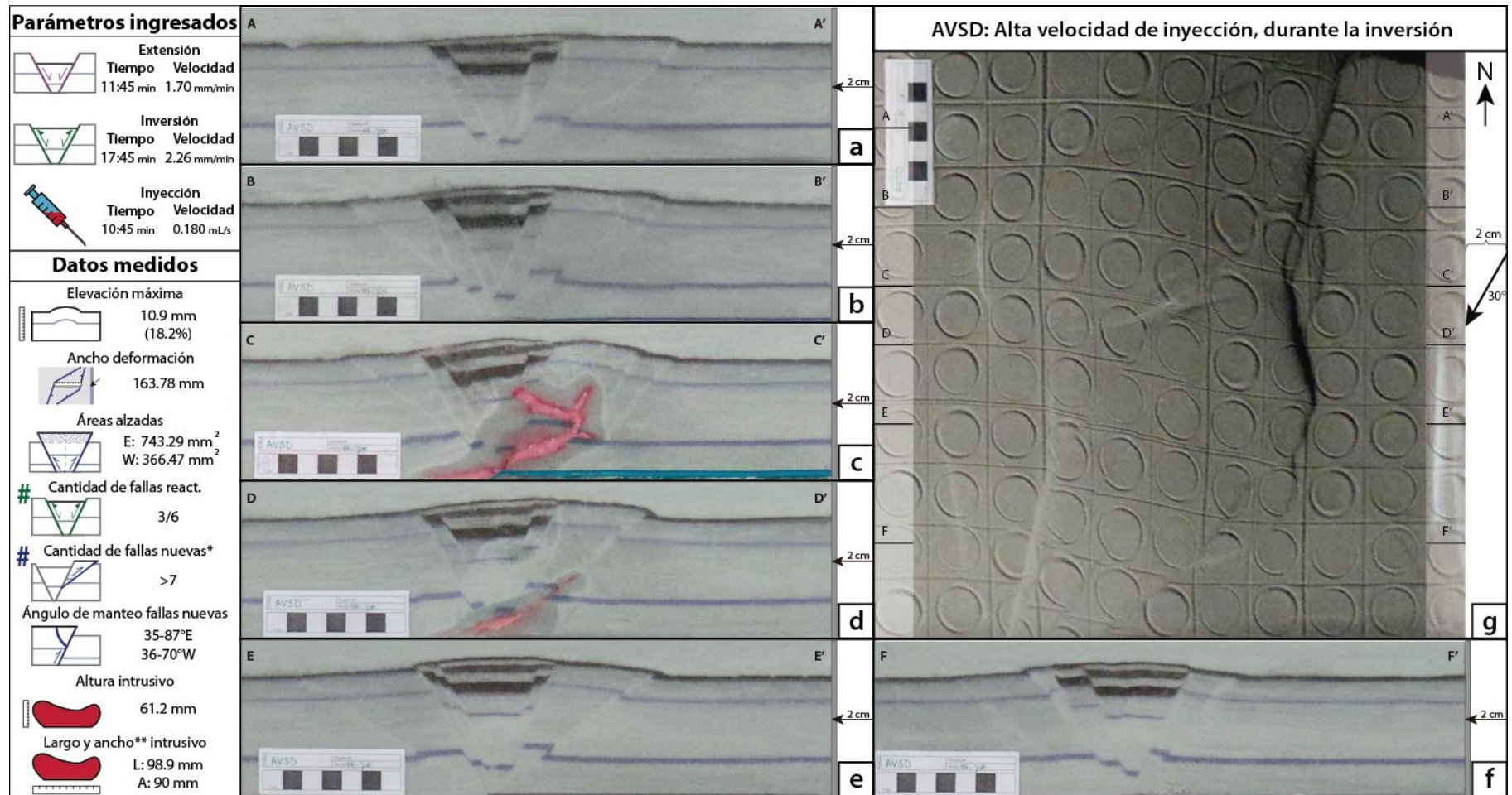


Figura 4.15 Fotos del modelo AVSD: Serie de alta velocidad de inyección durante la inversión tectónica. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Fotos de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift; el intrusivo se muestra en rojo (c). g) Foto en planta del resultado final del modelo; cada cuadrado marcado en la superficie mide 30x30 mm²; se marca la ubicación de los cortes a-f; el fluido no alcanzó la superficie. *Fallas nuevas producidas tanto por la inversión tectónica como por la inyección, en este caso no se pudieron diferenciar directamente. **El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

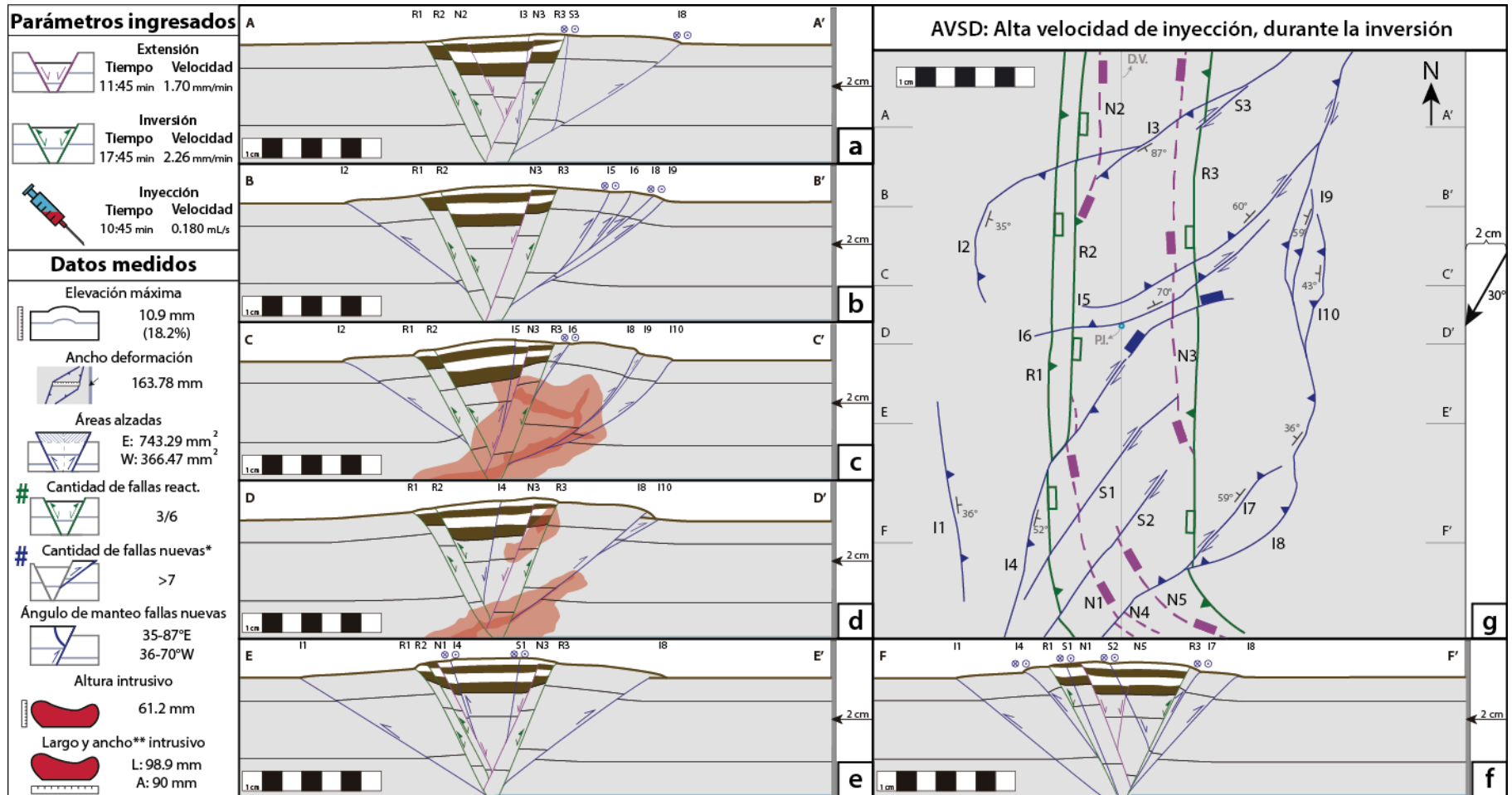


Figura 4.16 Esquemas del modelo AVSD: Serie de alta velocidad de inyección durante la inversión tectónica. Se muestran los parámetros ingresados y los datos medidos. a-f) Esquemas de cortes en perfil W-E del modelo, la ubicación de cada uno se muestra en (g); las capas gruesas color marrón intercaladas con capas blancas son depósitos syn-rift; el intrusivo se muestra en rojo oscuro y el halo en rojo claro (c y d). g) Esquema en planta del resultado final del modelo; se marca la ubicación de los cortes a-f; el fluido no alcanzó la superficie. Las líneas rosadas (“N”) son fallas normales no reactivadas; las líneas verdes (“R”) son fallas normales reactivadas como inversas; las líneas azules (“I” o “S”) son fallas nuevas producidas durante la inversión e inyección. *Fallas nuevas producidas tanto por la inversión tectónica como por la inyección, en este caso no se pudieron diferenciar directamente. **El ancho se midió aproximándolo según los cortes en perfil en los que apareció.

4.4. Análisis y discusión de los modelos inversión tectónica e inyección de fluidos.

A continuación, se presenta un análisis de los resultados obtenidos en los modelos según la combinación de los factores primarios. Este análisis consiste en la comparación de las características morfológicas tanto de las estructuras generadas como del intrusivo, ya sean observadas en superficie o en secciones verticales de los modelos.

Los datos medidos en los modelos corresponden a: elevación de la superficie; área alzada de la superficie tanto al E como al W de la cuenca; cantidad de fallas reactivadas; cantidad y manteo de las fallas nuevas; y las dimensiones del halo (altura, largo y ancho aproximado). Estos datos se resumen en la Tabla 4.2 y en la Figura 4.17.

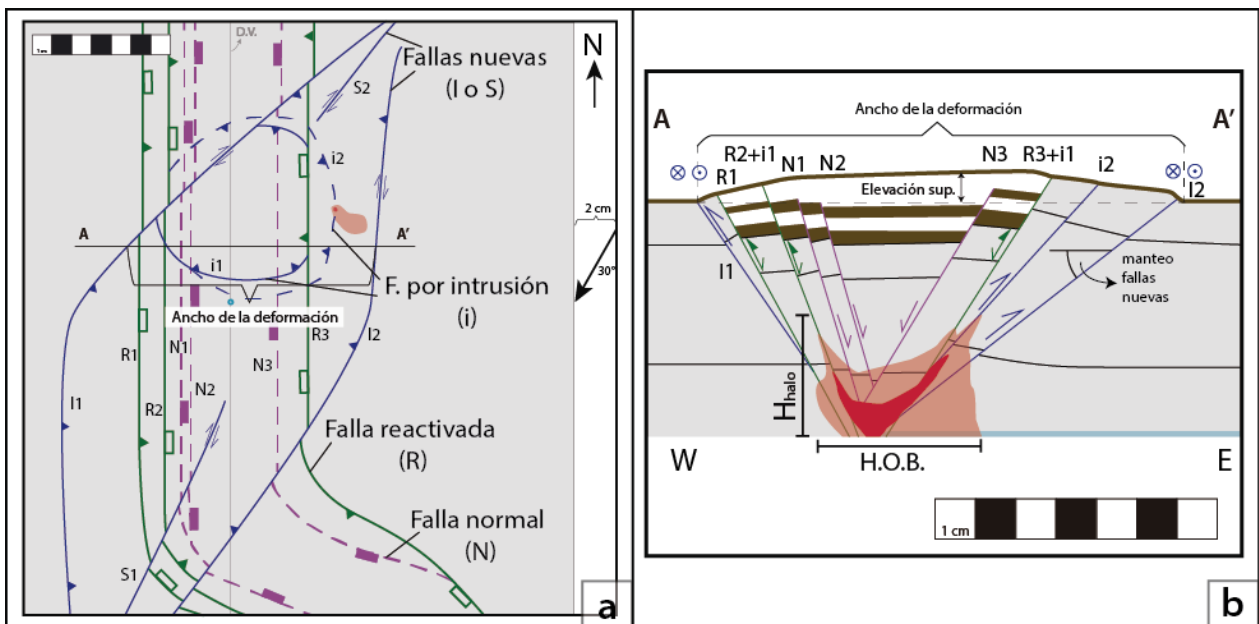


Figura 4.17 Esquema resumen de las estructuras y del intrusivo en un modelo con inyección posterior a la inversión tectónica en planta (a) y en perfil (b). Se señalan las fallas normales (N, líneas rosadas), las reactivadas (R, líneas verdes) y las fallas nuevas (inversas, "I"; de rumbo, "S"; o generadas por el intrusivo "i"; líneas azules). Las dimensiones del halo del intrusivo se definen de la misma forma que en el Ítem 3.2. Se midió el ancho de la deformación, la elevación de la superficie, el área alzada al E y al W de la cuenca (explicación en Figura 3.29) y se promediaron entre los perfiles. Para los manteos de las fallas nuevas, se calculó el manteo aparente en diferentes perfiles para cada falla nueva principal, y luego se corrigió al manteo real según el rumbo de estas; se presenta un dato promedio de cada falla nueva.

Tabla 4.2 Resumen de los resultados de los modelos que combinan inyección de fluido e inversión tectónica.

Datos medidos \ Modelos		Base	BV				AV			
		NICD	ND	AD	PD	SD	ND	AD	PD	SD
Superficie	Elevación de la sup. (mm)	11.0	3.3	4.1	11.2	9.9	5.0	7.4	11.6	10.9
	Ancho de la deformación (mm)	135.75	83.24	27.42	125.46	155.95	61.59	76.29	131.76	163.78
	Área alz. promedio E (mm ²)	625.18	–	36.21	622.66	618.12	–	266.18	574.12	743.29
	Área alz. promedio W (mm ²)	549.13	–	1.26	424.66	463.64	–	99.92	344.05	366.47
	Diferencia áreas alz. (mm ²)	76.04	–	34.95	197.99	154.47	–	166.26	230.07	376.82
	Razón áreas alz. (E/W)	1.18	–	28.73	1.56	1.36	–	2.67	1.83	2.03
Fallas reactivadas	Cantidad (% de las normales)	40%	–	40%^ *	50%	33%	–	25%^ *	60%	50%
Fallas principales nuevas	Cantidad	4	–	1(i)	3 + 1(i)	> 5	–	2(i)	3 + 2(i)	> 7
	Rango de ángulos de manteo	34-67°E 25-47°W	–	–	37°E 28-57°W	39-40°E 45-70°W	–	–	35-78°E 43-68°W	35-87°E 36-70°W
Halo del intrusivo**	Altura del halo (mm)	–	42.93	50.8	39.7	28.4	52.98	48.8	56.8	61.2
	Largo o “HOB” (mm)	–	73.5	41.8	69.5	86.0	40.1	57.9	74.7	98.9
	Ancho o “HPB” (mm)***	–	80	40	70	90	40	70	80	90

Códigos según la velocidad de inyección: baja (BV); alta (AV). Códigos según la temporalidad de la inyección respecto a la inversión: anterior (AD); posterior (PD); durante ella (SD).

* Reactivadas localmente por el intrusivo

** Se midieron valores del halo del intrusivo por si forma más regular. Sin embargo, esto no afectó el análisis, pues su relación con el intrusivo se mantiene para todos los modelos.

*** Valor aproximado ± 10 mm según la explicación al inicio del capítulo.

4.4.1. Características generales

Tal como se vio en los resultados de este capítulo, la inversión tectónica de modelos con estructuras extensionales se reflejó en una reactivación de algunas fallas normales, seguida de la formación de nuevas fallas que ayudan a alzar el sistema cuando la reactivación no es suficiente (Figura 4.17). Estas fallas nuevas, que pueden ser inversas, de rumbo o una mezcla de ambas, atravesaron gran parte del modelo con una orientación oblicua a la cuenca inicial (Figura 4.17.a), y presentaron variación en el manteo, llegando a ser subverticales en zonas donde su rumbo es más oblicuo al graben. Los sistemas en los que la inyección fue durante la inversión presentaron patrones de deformación más complejos que los demás.

Por otro lado, el intrusivo varía su forma con respecto a los casos base sin inversión tectónica (Ítem 3.1 y 4.1.2-3), aprovechando en ocasiones estas fallas como zonas de debilidad por las que le resulta más sencillo subir a superficie (Figura 4.17.b). La morfología que obtiene el intrusivo depende tanto de la velocidad de inyección como de la temporalidad con la que se inyectó. De manera recíproca, el fluido produce reactivación de fallas durante su ascenso en los modelos donde la inyección no fue simultánea. Con esto, la zona donde se produjo la intrusión, en general el borde oriental de la cuenca, tuvo un mayor alzamiento, lo que se manifestó en un basculamiento del sistema hacia el W.

4.4.2. Influencia de la combinación de inyección e inversión tectónica

Dentro de las temporalidades de la inyección del fluido, los casos donde se inyectó después de haber invertido el sistema no siempre fueron directamente comparables entre sí mismos o respecto al caso base sin inyección (NICD). Esto se debe a que al momento de inyectar el fluido, la mayoría de las estructuras ya se habían generado (fallas “R”, “I” y/o “S” en Figura 4.1 y posteriores). Además, esas estructuras se generaron bajo las mismas condiciones que para el caso base, es decir, sin la influencia del intrusivo antes o durante su formación. Es por esto que, para algunos parámetros, se consideraron los modelos con inyección posterior a la inversión (PD) como “casos base” para la comparación; mientras que en otros estos modelos sí se pudieron comparar directamente.

4.4.2.1. Influencia sobre la deformación en superficie

Lo primero que se puede notar es que la combinación de ambos factores, inversión tectónica e inyección del fluido, favorece la elevación de la superficie, ya sea como factores por separado o simultáneos. Al comparar los modelos con inyección sin extensión ni inversión tectónica (serie “ND”, es decir, BVND3 y AVND) con respecto a los modelos con inyección posterior a la extensión y sin inversión (serie “AD”, es decir, BVAD y AVAD), ambos con la misma altura inicial al momento de inyectar, los modelos AD sí resultaron más altos que los modelos ND (Figura 4.18.a): la presencia de estructuras favorecería la elevación de la superficie. Esta mayor altura en los casos AD podría ser producida por una mejor canalización del fluido en zonas de falla, lo que permitiría un aumento de la altura de la superficie en casos donde hay estructuras. Además, es importante considerar que en estos casos no hay compresión del modelo,

por lo que las estructuras previas serían netamente extensionales, y con una menor cohesión y ángulo de fricción que la roca circundante (Anderson, 1951), por lo que sería una zona de debilidad considerable.

En cuanto a los modelos con inversión tectónica, los casos donde la inyección fue posterior (serie "PD", es decir, BVPD y AVPD) tuvieron puntos de máxima elevación mayores que el caso base sin inyección ("NICD"), pues corresponden a la suma de ambos factores por separado (Figura 4.18.a): la inyección en PD produce una elevación sobre una superficie que ya había sido alzada durante la inversión tectónica. Por otro lado, los modelos con inyección durante la inversión (serie "SD", es decir BVSD y AVSD) tuvieron una elevación máxima menor a los casos anteriores PD y NICD (Figura 4.18.a), lo que se asocia a una compensación de ambos factores al actuar simultáneamente, además de una mejor canalización dentro de las fallas activas, las que al estar en movimiento distribuyeron el ascenso del intrusivo.

Al comparar cada par de modelos según la velocidad de inyección, se observa que los modelos de alta velocidad de inyección (serie "AV") generaron más elevación que los de baja velocidad (serie "BV") (Figura 4.18.a), principalmente porque inyectaron más volumen. Este claro aumento de altura de la superficie por el volumen inyectado correspondería a una limitación de la modelación que no puede compensar isostáticamente el mayor volumen del intrusivo en los casos AV. Esta diferencia entre BV y AV fue más notoria para los casos ND y AD (Figura 4.18.a), donde AV fue mucho más alta. En la serie ND, para el caso BV el fluido subió de manera lenta y hacia los lados (Figura 4.3.a y Figura 4.4.a); mientras que para AV lo hizo verticalmente (Figura 4.3.b y Figura 4.4.b). Por otra parte, en la serie AD el fluido para BV se canalizó en una única falla en el lado E de la cuenca, que al tener menor cohesión, permite el ascenso del intrusivo (Figura 4.5.c y Figura 4.6.c); en cambio, para AV una falla no es suficiente para que ascienda el intrusivo, por lo que la cuenca se alzó como un todo (Figura 4.11.c-d y Figura 4.12.c-d).

Además de la elevación máxima de la superficie, se midió la deformación en planta que tuvieron los modelos. Para el caso ND y AD, se midió el ancho perpendicular a la cuenca que produjo el intrusivo, que está representado por las fallas que generaron el alzamiento del domo. En ellos, se ve un efecto causado por lo dicho anteriormente, es decir, en los modelos ND la serie BV generó un domo mucho más ancho que los de la serie AV (Figura 4.18.b). De manera opuesta, los modelos AD mostraron un domo más angosto para la serie BV y más ancho para la serie AV (Figura 4.18.b).

Por otro lado, en los modelos SD y PD, se midió el ancho perpendicular a la cuenca que abarcó la inversión, incluyendo tanto fallas nuevas como reactivadas. La tendencia para este parámetro fue que los modelos de la serie AV tuvieran un ancho levemente mayor a los de la serie BV (Figura 4.18.b), lo que, similar a la elevación máxima de la superficie, estaría relacionado con la cantidad de volumen inyectado. Además, se nota un claro aumento del ancho de la deformación de los modelos SD sobre los modelos PD (Figura 4.18.b). Esto se relaciona con el efecto que produce el intrusivo en la deformación de los casos SD, en los que se generaron patrones más complejos en superficie mediante más fallas nuevas que permitieron un mejor acomodo del cuerpo intrusivo dentro de la roca de caja.

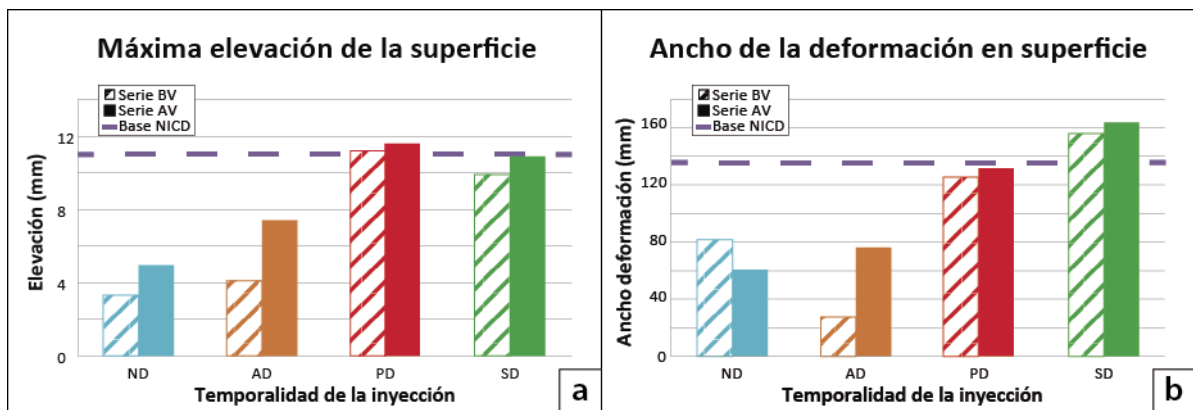


Figura 4.18 Gráficos de la deformación en superficie para cada modelo (ambos en mm): (a) la elevación máxima de la superficie; y (b) el ancho máximo de la deformación en superficie. Cada color representa una temporalidad de la inyección (celeste para ND, anaranjado para AD, verde para SD y rojo para PD), mientras que el relleno (tachado para BV y sólido para AV) representa una velocidad de inyección; el caso base sin inyección se muestra como una línea punteada morada. Para detalles del análisis, ver el texto.

Si se compara el alzamiento producido en el oriente y occidente de la cuenca, se puede encontrar una diferencia de las áreas alzadas en cada uno, tanto en cada perfil (Figura 4.19.a) como en el promedio por modelo (Figura 4.19.b). En el caso de la comparación entre los perfiles B, C y D de cada caso, hubo un claro contraste de las áreas alzadas, donde la tendencia fue que haya mayor alzamiento hacia el E de la cuenca (Figura 4.19.a). Esta diferencia es más notoria en el perfil C, donde se ven tres grupos: uno de baja diferencia (modelos NICD y BVAD); uno de diferencia media (modelos BVSD y AVAD); y uno de alta diferencia (modelos AVSD, AVPD y BVPD) (Figura 4.19.a).

El grupo de baja diferencia está compuesto por modelos cuyo alzamiento fue relativamente simétrico (NICD), al menos para el perfil C y D, o que el alzamiento no fue suficiente como para generar un mayor contraste (BVAD), el que solo tiene alzamiento en el perfil C, pero que aun así tiende a ser mayor al E. Sin embargo, es el primer caso el que se compara con los demás grupos pues corresponde justamente al caso base.

En el segundo grupo se encuentra uno de los modelos AD, el de alta velocidad, donde la gran parte del intrusivo se ubicó en el lado E de la cuenca (Figura 4.11.c-d y Figura 4.12.c-d), por lo que a pesar de alzar la cuenca casi simétricamente, generó un mayor aumento del área alzada hacia el oriente. El otro modelo de este grupo es BVSD, cuyo intrusivo se encontró preferentemente en los perfiles B y C, y la deformación abarcó en menor medida al perfil D. La diferencia entre E y W para este caso no fue tan marcada como en otros modelos, lo que se debería principalmente a la baja tasa de inyección que tiende a distribuir más simétricamente el intrusivo, pero que, de todas formas, alzó más el borde oriental del modelo (Figura 4.9.b-c y Figura 4.10.b-c).

Dentro del último grupo, que tiene mucho más área alzada al E que al W, están los tres modelos con mayor altura máxima. A diferencia de la simetría presentada en el modelo base NICD, este grupo tuvo un alzamiento totalmente asimétrico, presentando un valores mucho mayores en el borde oriental. Tal como se comentó anteriormente, los modelos PD (ambos dentro de este grupo) generaron un alzamiento extra posterior al generado durante la inversión, pero esa altura extra se enfocó mayormente en el E de la cuenca (Figuras 4.7.b-c, 4.8.b-c, 4.13.c y 4.14.c), lo que aumentó la diferencia del

alzamiento entre ambos bordes. El tercer modelo que compone este grupo es el AVSD, cuyo alzamiento fue aun más asimétrico que los dos casos anteriores. En este modelo, el intrusivo se canalizó por fallas al este de la cuenca, inclinando el sistema a medida que se inyectaba e invertía, lo que provocó un basculamiento del sistema hacia el W (Figura 4.15.c-d y Figura 4.16.c-d).

Es importante notar que la diferencia de áreas alzadas en los modelos PD cae rápidamente del perfil C al D (Figura 4.19.a), es decir, se vuelven simétricos drásticamente en perfiles donde no se encuentra el intrusivo. Esto es una buena comparación del efecto del intrusivo en los modelos PD con respecto al caso base.

La diferencia promedio entre las áreas alzadas (Figura 4.19.b) responde al mismo análisis, donde los mayores contrastes se ubicaron en los modelos PD y el SD de alta velocidad; mientras que los más bajos son del BVAD y del caso base; y los casos intermedios mantuvieron valores muy similares.

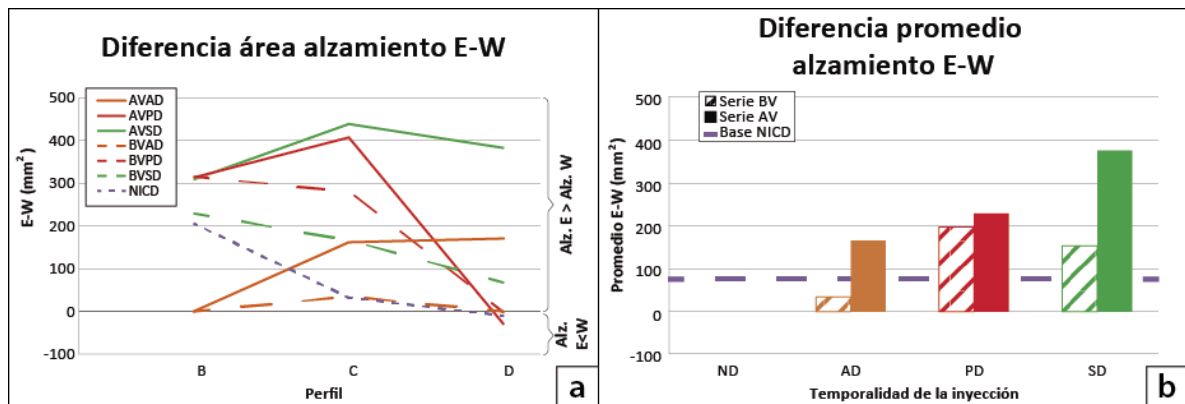


Figura 4.19 Gráficos de la diferencia entre las áreas alzadas en el borde oriental y occidental de la cuenca (ambas en mm²): (a) para cada perfil y (b) promedio de los perfiles B, C y D en cada modelo. Cada color representa una temporalidad de la inyección (celeste para ND, anaranjado para AD, verde para SD y rojo para PD), mientras que el relleno (segmentado/tachado para BV y sólido para AV) representa una velocidad de inyección; el caso base sin inyección se muestra como una línea punteada morada. Para detalles del análisis, ver el texto.

También se realizaron mapas que grafican la deformación en superficie. En ellos, se muestra el desplazamiento total, el desplazamiento en dirección EW, el acortamiento y la rotación de cada marca en superficie (Figura 4.20 a 4.23, respectivamente). Se puede asociar la deformación que indican los parámetros con las fallas y/o los intrusivos presentes en cada modelo.

El desplazamiento total de las marcas en superficie trae asociado todos los otros parámetros, pues abarca el desplazamiento dirección E-W, la rotación y el acortamiento. En todos los modelos presentados, este parámetro tiene una leve tendencia a seguir el rumbo de las fallas nuevas: su orientación NNE es similar a la de las estructuras, aunque no tan ajustada (Figura 4.20). Al ser un desplazamiento total de cada punto, no solo varía según las estructuras, sino que también según el cizalle interno que tienen los bloques que ellas delimitan, por lo que el cambio de un rango de desplazamiento a otro (representados como cambios de color en las figuras) no se ajustó tanto a las fallas como es de esperar, por lo que no es suficiente por sí mismo para el análisis. Es por esto que se realizaron los otros mapas, para poder aislar de mejor manera la influencia de las estructuras en la deformación en superficie.

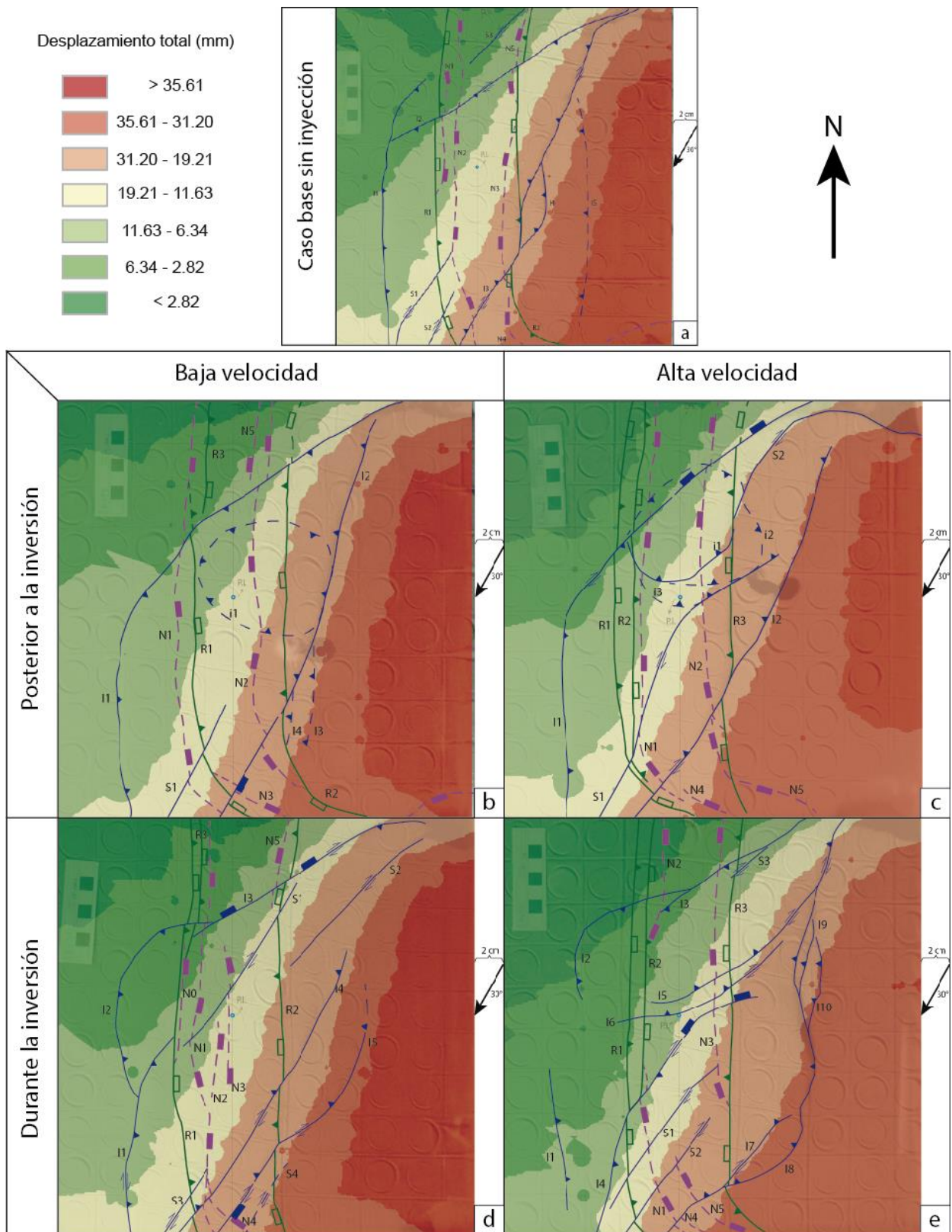


Figura 4.20 Mapas del desplazamiento total. a) NICD: Caso base sin inyección. b) BVPD: Serie de baja velocidad de inyección, posterior a la inversión. c) AVPD: Serie de alta velocidad de inyección, posterior a la inversión. d) BVSD: Serie de baja velocidad de inyección, durante la inversión. e) AVSD: Serie de alta velocidad, durante la inversión. La simbología se muestra en la esquina superior izquierda, los valores más altos de desplazamiento se representan en rojo, mientras que los más bajos están en verde. Se consideró como positivos los desplazamientos en la misma dirección y sentido que el movimiento del pistón (hacia el SW).

En el caso del desplazamiento en dirección E-W, efectivamente los rangos están más ajustados a las estructuras, lo que se hace más notorio con las fallas inversas (Figura 4.21). Este parámetro considera solo el movimiento ortogonal al borde de cada punto, por lo que no se ve afectado por el movimiento NS que pudiese ser producido por cizalle simple en el sistema. Con esto, el efecto de las fallas sobre la deformación en planta se aísla mejor que en el caso del desplazamiento total.

En los modelos con inyección posterior a la inversión (serie PD), el alzamiento del domo generado por el intrusivo produjo una leve inflexión en la cantidad de desplazamiento E-W, en especial para la de 6.32 mm de desplazamiento, representando un acortamiento en los bordes del domo, y un alargamiento en su centro (Figura 4.21.b-c). Por otra parte, los modelos con inyección durante la inversión (serie SD), presentan la línea de 6.32 mm de desplazamiento más al W, y con una orientación más NS que en los otros modelos (Figura 4.21.d-e); en el caso de alta velocidad (modelo AVSD), la línea de 4.21 mm no pasa más allá de las fallas reactivadas. Esto se debería a un mayor desarrollo de las estructuras al E del sistema para esta serie, o a una mayor actividad de las fallas reactivadas durante la inversión.

El acortamiento ortogonal al borde está muy ligado al desplazamiento E-W, pero evidencia la importancia de las estructuras de manera más gráfica aun. En general, todos los modelos presentan mayor absorción de acortamiento en la zona E del sistema y, en menor grado, en la zona W (Figura 4.22), ambas muy asociadas a las estructuras presentes en el sistema. Esto muestra un mayor desarrollo de las fallas orientales por sobre las occidentales.

El caso base (NICD) tiene bien definidas las zonas de mayor acortamiento según las fallas nuevas, tanto inversas como de rumbo, las que se encuentran separadas por una zona de bajo a nulo acortamiento delimitada por las fallas reactivadas que bordean la cuenca. En la serie PD, la presencia del intrusivo generó una inflexión en la cantidad de acortamiento, haciendo que este aumente hacia los bordes del domo (Figura 4.22.b-c); este efecto es más notorio para el caso de alta velocidad, AVPD, donde se generó una zona de acortamiento medio-alto (>4.97 mm) en la parte NW del sistema (Figura 4.22.c), lo que no se encuentra en los otros modelos.

Por otro lado, la serie SD tiene las zonas de mayor acortamiento acotadas en el segmento sur del modelo, tanto en la zona de la cuenca como en el extremo SW de ella (Figura 4.22.d-e), lo que está relacionado con el mayor fallamiento al sur del sistema, que hizo que esta zona del modelo sea más amplia y concentre más acortamiento que en los otros casos. La concentración del acortamiento en el extremo SW, en lugar de abarcar más hacia el norte como en los otros casos, está ligado a la presencia del intrusivo durante la deformación. Este actuó como un elemento que no permite la transferencia del acortamiento hacia el otro lado, concentrando todo en el lado E del sistema.

El modelo AVSD presenta una zona de acortamiento muy bajo (<2.76 mm) en la zona centro-norte del modelo (Figura 4.22.e); en los otros casos esta zona es de mucho menor tamaño o de mayores acortamientos. Esto estaría ligado a la ampliación y migración de la deformación hacia el sur, que es producida por el movimiento del

intrusivo inyectado a alta velocidad durante la inversión. Así, se generaron mayores acortamientos en la parte sur del modelo, y una zona de fallas con rumbo ENE que generaron una pequeña subsidencia en el centro del sistema. En el caso BVSD, esto no se produjo por la menor tasa de inyección, lo que se tradujo en un intrusivo de menor tamaño que no generó una deformación tan importante como la del modelo AVSD.

Este parámetro también muestra la mayor absorción de la deformación por parte de las fallas inversas en comparación con las reactivadas. La reactivación de fallas normales, a pesar de ser notorias en superficie, no es tan gravitante en el acortamiento E-W, ya que no absorben más de 3.61 mm, mientras que las fallas inversas llegan a absorber hasta 5.82 mm (Figura 4.22). El factor principal que produce esta diferencia es el ángulo de manteo de las fallas normales. Al tener un alto ángulo, las fallas normales resultan ser difíciles de reactivar como inversas (Brun y Nalpas, 1996); y, aunque exista reactivación, el movimiento del bloque es más vertical que horizontal, lo que le da paso a las fallas nuevas de menor manteo para absorber el acortamiento producido por el pistón sobre el sistema.

La rotación calculada considera tanto la componente de rumbo de las fallas como la rotación de los bloques entre ellas, por lo que sirve para entender la deformación producida por el cizalle, ya sea frágil (manifestado en fallas con componente de rumbo) o dúctil (manifestado como cizalle simple del bloque).

En general, la mayor rotación está ubicada en la mitad oriente del sistema, entre las fallas reactivadas que bordean la cuenca por el E y las fallas nuevas del mismo lado, siguiendo el rumbo de estas últimas (Figura 4.23). Esto es acorde a la componente de rumbo en fallas con orientación NNE a NE, y también al cizalle interno que se produjo en los bloques.

El intrusivo no afectó mayormente la rotación en los modelos, solo generó un leve aumento de la rotación de las marcas en superficie. Esto se ve reflejado en una ampliación de las zonas de mayor rotación hacia el W, en comparación con el modelo base: para los casos con intrusivo, la rotación mayor ($<-12.69^\circ$) tuvo su límite W más allá del punto de inyección (Figura 4.23.b-e); mientras que en el caso base este límite se mantuvo al oriente de ese punto (Figura 4.23.a). Además, se puede notar que en la serie "SD" las estructuras asociadas al intrusivo (I2 e I5 en BVSD, e I2 e I8 en AVSD) no absorbieron mucha rotación (Figura 4.23.d-e).

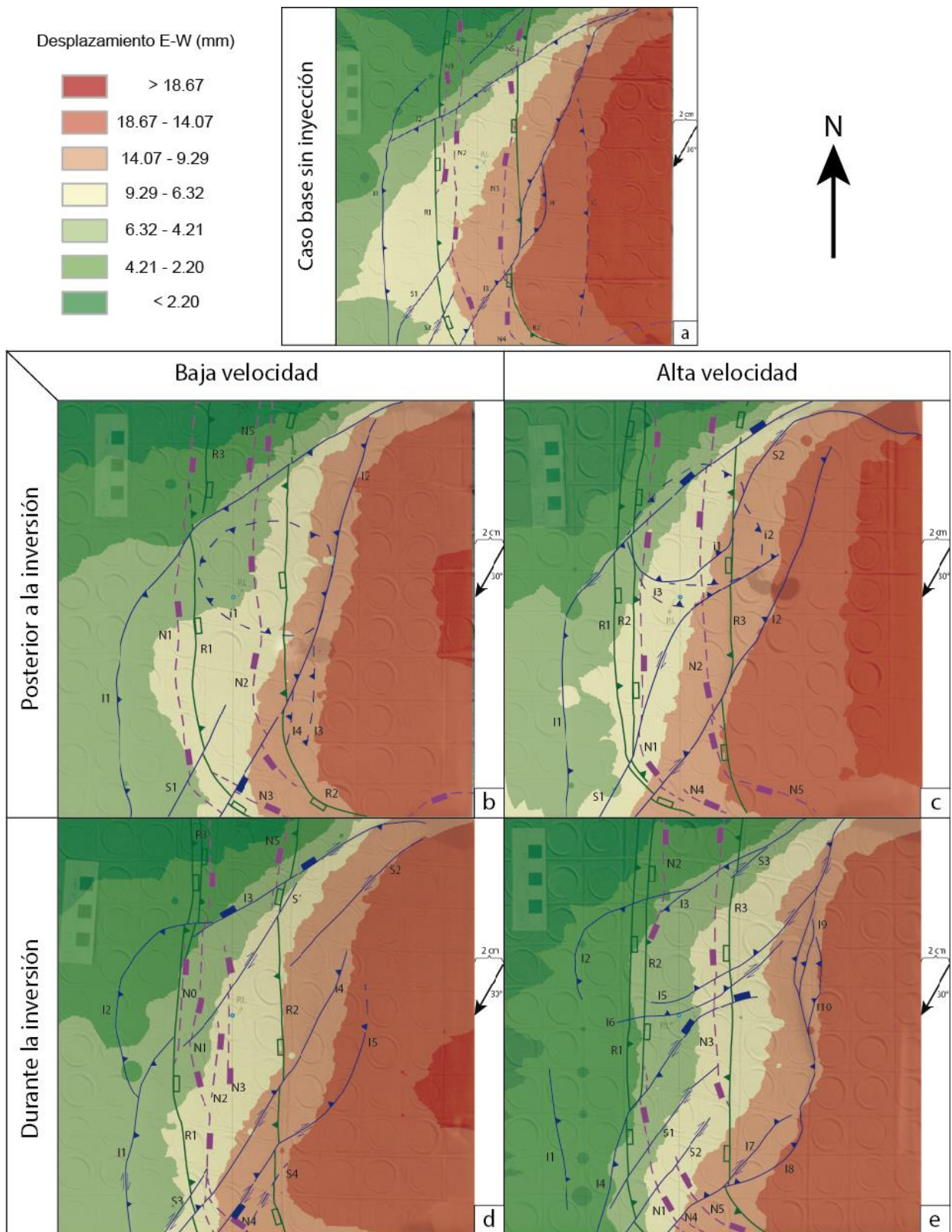


Figura 4.21 Mapas del desplazamiento dirección E-W. a) NICD: Caso base sin inyección. b) BVPD: Serie de baja velocidad de inyección, posterior a la inversión. c) AVPD: Serie de alta velocidad de inyección, posterior a la inversión. d) BVSD: Serie de baja velocidad de inyección, durante la inversión. e) AVSD: Serie de alta velocidad, durante la inversión. La simbología se muestra en la esquina superior izquierda, los valores más altos de desplazamiento se representan en rojo, mientras que los más bajos están en verde. Se consideró como positivos los desplazamientos desde E a W.

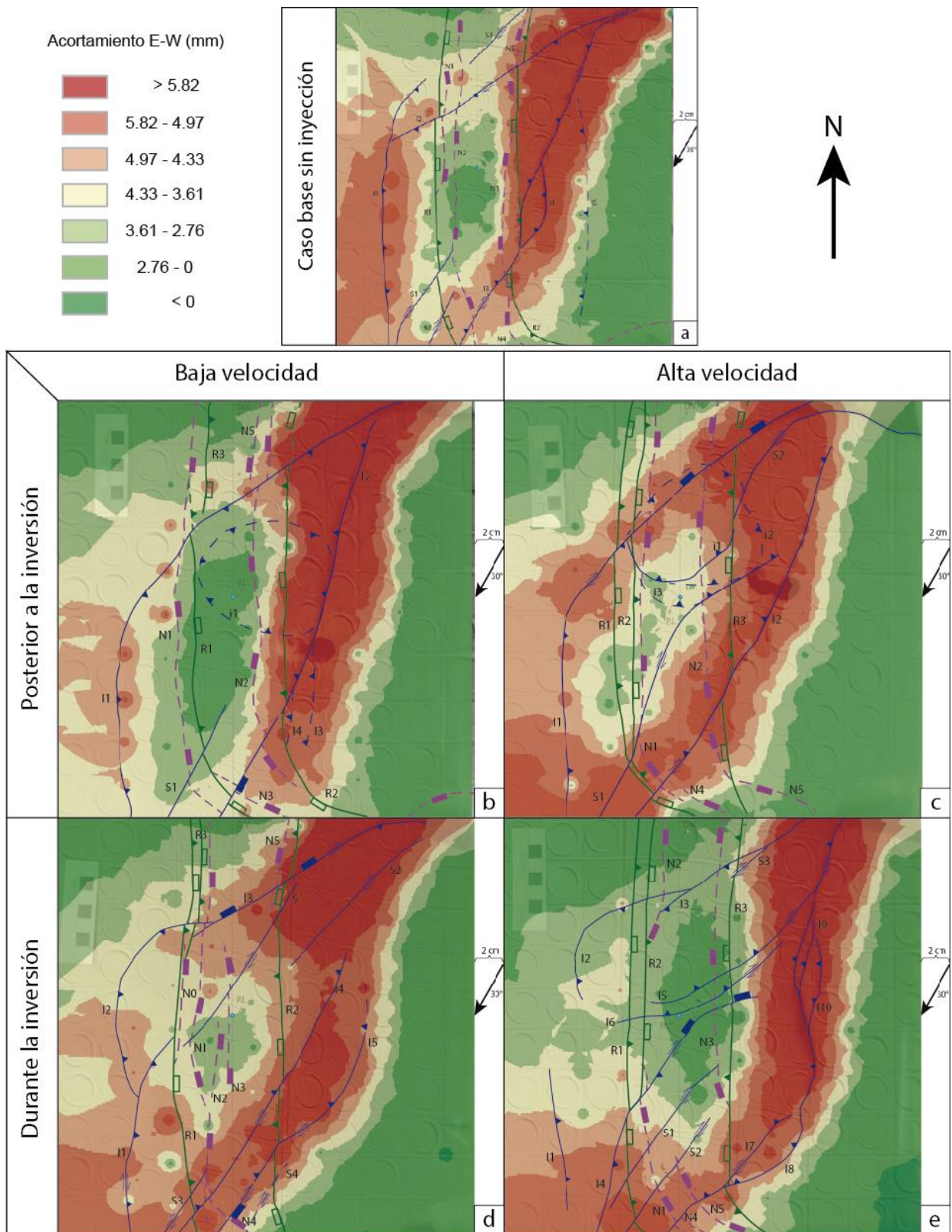


Figura 4.22 Mapas del acortamiento en dirección E-W. a) NICD: Caso base sin inyección. b) BVPD: Serie de baja velocidad de inyección, posterior a la inversión. c) AVPD: Serie de alta velocidad de inyección, posterior a la inversión. d) BVSD: Serie de baja velocidad de inyección, durante la inversión. e) AVSD: Serie de alta velocidad, durante la inversión. La simbología se muestra en la esquina superior izquierda, los valores más altos de acortamiento se representan en rojo, mientras que los más bajos están en verde. Se consideró como positivos los valores de acortamiento; mientras que los de alargamiento fueron negativos.

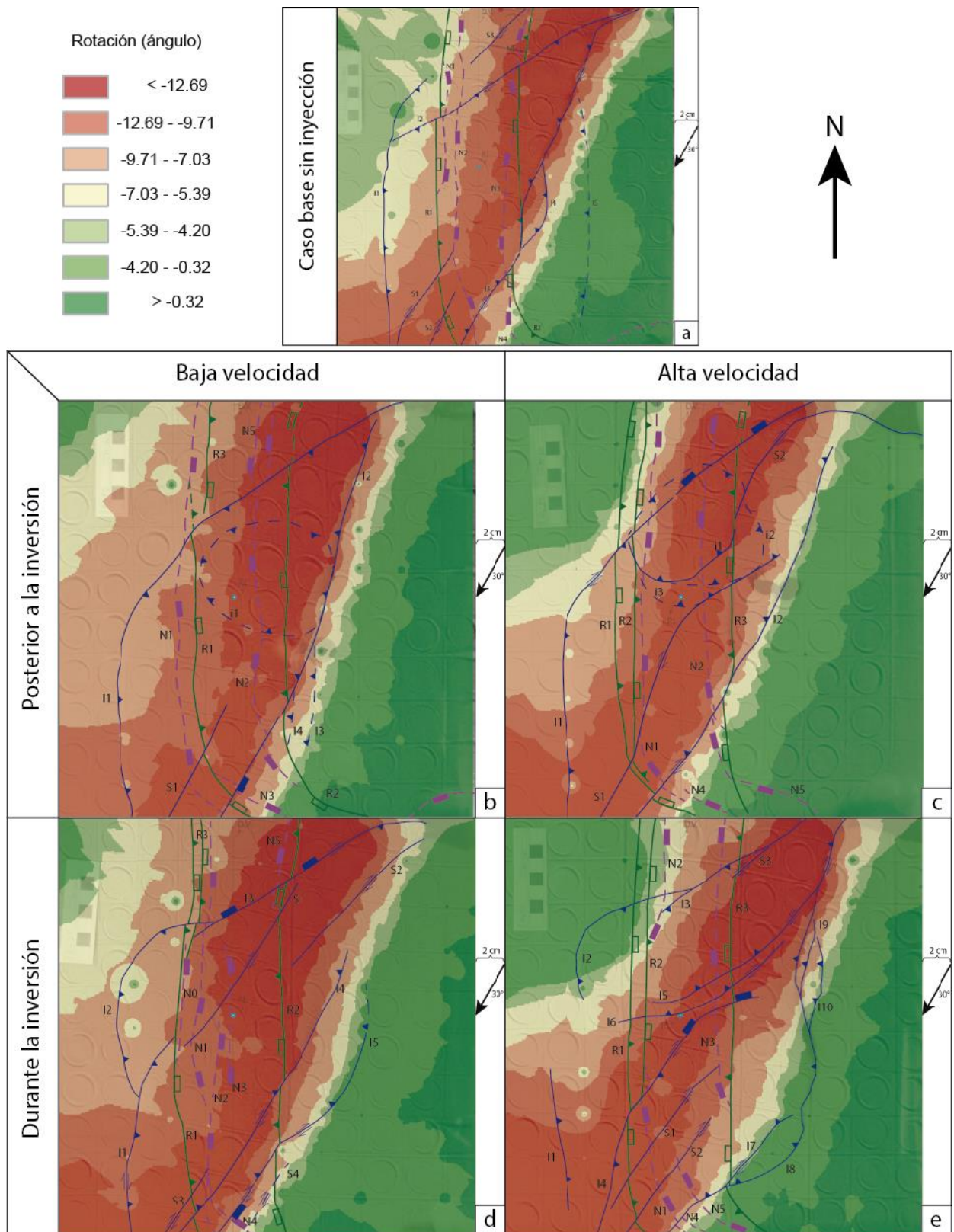


Figura 4.23 Mapas de la rotación de los marcadores. a) NICD: Caso base sin inyección. b) BVPD: Serie de baja velocidad de inyección, posterior a la inversión. c) AVPD: Serie de alta velocidad de inyección, posterior a la inversión. d) BVSD: Serie de baja velocidad de inyección, durante la inversión. e) AVSD: Serie de alta velocidad, durante la inversión. La simbología se muestra en la esquina superior izquierda, los valores más altos de desplazamiento se representan en rojo, mientras que los más bajos están en verde. Se consideró como positiva la rotación en sentido antihorario.

4.4.2.2. Influencia sobre el desarrollo de estructuras

En este ítem, los modelos PD no son directamente comparables con respecto al caso base sin inyección. Como se explicó anteriormente, en la serie PD se realizó la inyección del fluido después de haber invertido el modelo, por lo que la mayoría de las estructuras (fallas “R”, “I” y/o “S” en Figura 4.1 y posteriores) se generaron sin la influencia del intrusivo, bajo las mismas condiciones que el caso base NICD. Sin embargo, sí se consideraron las fallas producidas por el intrusivo (fallas “i” en Figura 4.1 y posteriores).

La cantidad de fallas normales reactivadas como inversas durante la inversión del sistema tiene un amplio rango: entre 40% y 60% de las fallas normales se reactiva en los casos base (NICD y las ocurridas antes de la inyección para los dos casos PD) (Figura 4.24.a). En los modelos SD sí se considera el efecto del intrusivo en la reactivación, tanto entre ellos como con respecto a los casos base: hay una diferencia levemente mayor de cantidad de fallas reactivadas entre los casos AV y BV para los modelos SD que para los otros casos (Figura 4.24.a).

En cuanto a las fallas nuevas producidas durante la inversión, los modelos PD tampoco son directamente comparables, pero sí se compararon entre ellos en cuanto a las fallas producidas por el intrusivo (fallas “i” en las Figuras 4.7, 4.8, 4.13 y 4.14) para el caso AV y BV (Figura 4.24.b). En el modelo de baja velocidad, el domo formado tiene una morfología regular y redondeada, delimitada por una sola falla inversa de forma ovalada que no llegó a superficie (Figura 4.7.g y Figura 4.8.g). Por otro lado, el modelo de alta velocidad generó un domo más irregular, con un alzamiento mayor dentro de la cuenca, y con fallas inversas que sí llegaron a superficie. Además, el domo se propagó hacia el costado SE, formando alzamientos secundarios externos al alzamiento principal (Figura 4.13.g y Figura 4.14.g).

Como se puede ver en los casos base sin extensión ni inversión (serie ND), el intrusivo creó nuevas estructuras para ascender a superficie cuando no encontró planos de debilidad ya existentes por donde subir (Figura 4.3 y Figura 4.4). En todos los otros casos donde sí se realizó inversión, ocurrió algo similar: el área que abarcaban las raíces de las fallas extensionales es angosta (20 mm antes de la inversión), y no permite un acomodo del intrusivo dentro de la cuenca en un comienzo de la inyección, pues el menor ancho del intrusivo en profundidad es de 25 mm (Figura 4.26.b). Es por esto que, para estos modelos, el intrusivo comenzó a desplazarse fuera de la cuenca en la base del modelo, y luego el ascenso ocurrió dentro de ella. Es precisamente dentro de la cuenca donde se ubicaron los puntos más altos del intrusivo en los modelos SD (Figuras 4.9.b-c, 4.10.b-c, 4.15.c-d y 4.16.c-d).

Al comparar los modelos SD con respecto a los casos base, sí se nota una diferencia en las fallas nuevas por inversión (Figura 4.24.b), la que sería producida por el efecto del intrusivo durante el movimiento. La presencia del intrusivo dentro del modelo durante la inversión sí afectó la deformación, pues actuó como un cuerpo rígido de gran área que empujó la roca caja y produjo patrones más complejos en superficie en comparación con los casos PD (Figuras 4.9, 4.10, 4.15 y 4.16, Figuras 4.7, 4.8, 4.13 y 4.14, respectivamente para los casos SD y PD).

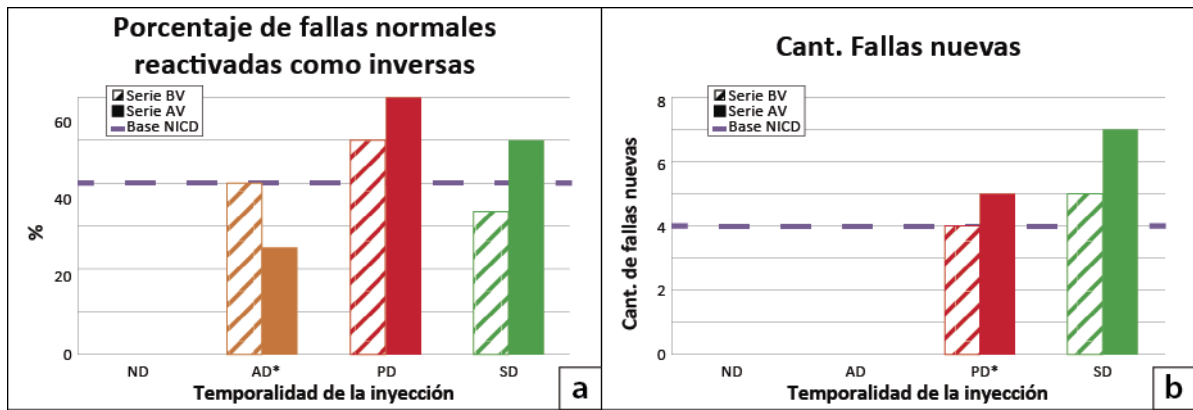


Figura 4.24 Gráficos de las fallas (a) reactivadas y (b) nuevas para cada modelo. Cada color representa una temporalidad de la inyección (anaranjado para AD, verde para SD y rojo para PD), mientras que el relleno representa una velocidad de inyección (tachado para BV y sólido para AV); el caso base sin inyección se muestra como una línea punteada morada. En (a) las fallas reactivadas para AD son reactivadas localmente por el intrusivo; en (b) las fallas nuevas para PD consideran tanto las producto de la inversión como de la inyección. Para detalles del análisis, ver el texto.

El manto de las fallas nuevas producidas por la inversión tectónica (no se consideraron las producidas por el intrusivo en los modelos PD debido a la forma circular que tienen) manifestó una leve tendencia a generar un mayor número de estructuras con manto W. Nuevamente, los casos PD no fueron directamente evaluables entre sí ni respecto al caso base (NICD). Sin embargo, los casos base (NICD y ambos modelos PD) presentaron una distribución similar de manteos de estructuras principales: una estructura inversa con manto moderado al E (35°E); y una falla inversa con manto moderado al W (25°-45°W); además de una falla, principalmente de rumbo, con alto manto (>50°, tanto E como W), y algunas fallas menores con manto leve (25°W) (Tabla 4.3). Sin embargo, la longitud de las trazas de cada falla no siempre fue similar, por lo que la mayor cantidad de fallas en algunos rangos de manteos no se tradujo directamente en un mayor fallamiento (Figura 4.25).

Los casos SD tienen una tendencia a generar mayor fallamiento con manto W (Figura 4.25.d-e). Se mantiene la falla inversa con manto al E (35°E), pero las de manto W tienden a ser de mayor ángulo, tanto la principal (ahora entre 55 y 65°W) como las secundarias (35-45°W), y además son de mayor longitud (Figura 4.25, Tabla 4.3). Para el caso AV, se agregaron también numerosas fallas de alto manto, pero de menor jerarquía. Esto sería un reflejo del efecto del intrusivo mencionado anteriormente: invertir el modelo con un cuerpo intrusivo al interior requiere de un mayor acomodo del entorno, lo que se manifestaría en más estructuras, principalmente de alto ángulo, tanto de rumbo como inversas y oblicuas.

Tabla 4.3 Agrupación de las fallas nuevas según su manteo (leve, moderado o alto), tipo (I: inversa; R: rumbo) y longitud en mm.

Rango de Manteo		NICD			BVPD		BVSD		AVPD		AVSD			
35°E (mod.)	Nombre	I1			I1		I1	I2	I1		I1	I2		
	Tipo	I			I		I	I	I		I	I		
	Manteo	34			37		40	39	35		36	35		
	Largo (mm)	78			126		47	54	120		32	42		
25-45°W (leve a mod)	Nombre	I3	I4	I5	I2	I3	I5		I2		I8	I10		
	Tipo	I	I	I	I	I	I		I		I	I		
	Manteo	47	45	25	48	28	45		43		36	43		
	Largo (mm)	111	26	64	96	24	68		96		97	23		
>50°E (alto)	Nombre	I2			—		—		S1		I3	I4		
	Tipo	R/I			—		—		R/I		R/I	R/I		
	Manteo	67			—		—		78		87	52		
	Largo (mm)	76			—		—		37		39	69		
>50°W (alto)	Nombre	—			I4		I3		I4	S1'	I6	I5	I7	I9
	Tipo	—			I		R/I		R/I	R	R	R	R	I
	Manteo	—			57		70		63	68	70	60	59	59
	Largo (mm)	—			13		60		75	37	43	47	40	19

Distribución de manteos de las fallas nuevas

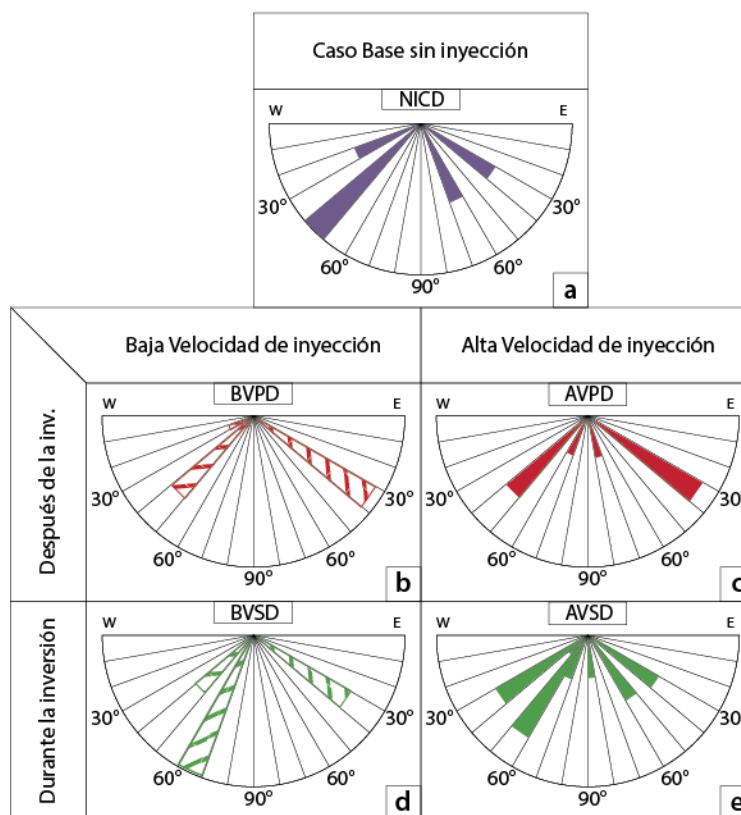


Figura 4.25 Gráfico de la distribución de manteos para los modelos finales. Los datos de manteo se agruparon cada 10°. El largo del brazo representa la longitud de la(s) falla(s) dentro de ese rango de manteo. Los colores son los mismos que para los demás gráficos de este capítulo. Para detalles del análisis, ver el texto.

Siguiendo la misma línea anterior, se puede notar una diferencia en cuanto al patrón de deformación en planta que tuvieron las fallas nuevas en los modelos. En el caso NICD y los dos PD, se produjeron dos estructuras inversas externas principales: una al W de la cuenca (I1 e I2 en NICD, Figura 4.2; I1 en BVPD, Figura 4.8; I1 en AVPD, Figura 4.14), la que cambió su rumbo en la mitad del modelo de NS al sur a NE en el norte; y una al E de la cuenca (I3 en NICD, Figura 4.2; I2 en BVPD, Figura 4.8; I2 en AVPD, Figura 4.14), que mantuvo su rumbo NNE a lo largo de todo el modelo. Por otro lado, los modelos SD crearon dos conjuntos de estructuras: uno interno, con fallas inversas y de rumbo NNE (S1, S2 e I4 en BVSD, Figura 4.10; I4, I5, I6, S1 y S2 en AVSD, Figura 4.16); y uno externo, con fallas inversas NS a NE, que tenían zonas de mayor curvatura de rumbo ubicadas en la parte central del modelo, precisamente donde está el intrusivo (I1, I2, I3 e I5 en BVSD, Figura 4.10; I1, I2, I3, I7, I8; I9 e I10 en AVSD, Figura 4.16).

Sin embargo, en estos gráficos solo se evalúa la cantidad de fallas y su longitud, mas no el desplazamiento que puedan tener estas estructuras. Es por eso que solo son complementarios a los análisis de acortamiento realizados anteriormente (Ítem 4.4.2.1). Analizando ambos parámetros en conjunto, se puede ver que a pesar de que en algunos casos predominen las estructuras con manteo E (Figura 4.25.b-c), estas no serían las que absorben la mayor cantidad de acortamiento (Figura 4.22.b-c). Al contrario, las fallas de manteo W, aunque de menor longitud y jerarquía en estos modelos, son las que finalmente, al igual que en las otras series, absorbieron el mayor acortamiento (Figura 4.22).

4.4.2.3. Influencia sobre la morfología del intrusivo

La morfología del intrusivo está muy ligada a las mediciones anteriores, principalmente a las estructuras desarrolladas, pues ambos parámetros se influyen mutuamente.

Partiendo por los casos base sin extensión ni inversión, como ya se mencionó antes (Ítem 3.1), el caso BV produjo un intrusivo con forma de bowl (Figura 4.3.b y Figura 4.4.b); mientras que el caso AV produjo un cuerpo alargado verticalmente (Figura 4.3.d y Figura 4.4.d). De la misma manera, el corto tiempo que demoró el intrusivo de AV en llegar a superficie hace que sea más alto, pero muy delgado en planta: tan solo 40 mm de diámetro (promedio aproximado entre el ancho y largo del halo, Figura 4.26.a-d). Por otro lado, el modelo BV tuvo una altura un poco menor, pero fue mucho más amplio en planta, tanto en ancho como en largo (según las dimensiones del halo, Figura 4.26.a-d).

En los modelos con estructuras (series AD, SD y PD), los modelos de alta velocidad (AV) tuvieron mayores dimensiones en planta que los de baja (BV) (Figura 4.26.b-d), a causa del mayor volumen inyectado y de la mayor velocidad, esto sería causado nuevamente por la limitación del dispositivo de compensar isostáticamente los volúmenes inyectados.

En los casos con inyección posterior a la extensión y sin inversión (serie AD), la diferencia entre las alturas para BV y AV fue más leve que para los demás casos (Figura 4.26.a): el intrusivo del modelo BV llegó más alto que el de AV, lo que, contrario a lo ocurrido en los modelos ND, se produciría por la canalización del intrusivo por las fallas normales generadas en extensión (Figura 4.5.c y Figura 4.6.c), que al no estar comprimidas presentaron una menor cohesión que la roca caja, y facilitaron el paso del fluido por el plano de debilidad definido por la estructura. Por la misma canalización del fluido en la estructura, el modelo BV cubrió poca área en planta (Figura 4.26.b-d). En cambio, para AV, al alzar gran parte de la cuenca (Figura 4.11.c-d y Figura 4.12.c-d), es más difícil que el intrusivo pueda subir debido a la mayor carga sobre él (aunque se genera mayor altura en la superficie), por lo que logró una altura levemente menor que la de BV. Sin embargo, ocurrió lo contrario para las dimensiones en planta, es decir, caso AV presentó mayor superficie que BV (Figura 4.11.c-d y Figura 4.12.c-d), debido a la dificultad de subir por una única falla normal, teniendo que abarcar una mayor parte de la cuenca.

En los casos SD, el intrusivo de la serie BV se mantuvo siempre en profundidad, de hecho, la altura de su halo no superó los 30 mm, siendo la menor entre todos los modelos (Figura 4.26.a). La misma canalización del fluido en las estructuras, en este caso comprimidas, junto con la migración del intrusivo, serían las causas principales de esta menor altura. Como los planos de falla en este caso estaban más compactados, fue más difícil que el fluido pudiera ascender por una sola estructura, por lo que tuvo que distribuirse entre las numerosas fallas presentes en el modelo (Figura 4.9.b-c y Figura 4.10.b-c). En la serie AV, se produjo el mismo efecto, pero en una menor cantidad de fallas, por lo que ascendió más en cada una; posteriormente, el intrusivo se propagó hacia la cuenca, por donde llegó a superficie y alcanzó su mayor altura (Figura 4.15.c-d y Figura 4.16.c-d).

En los modelos PD, el intrusivo también se ayudó de las estructuras para subir, aunque no fue tan notorio como en la serie SD; el intrusivo se alzó en el borde oriental de la cuenca. Cuando este se inyectaba después de la inversión, reactivó localmente fallas nuevas ("I" o "S"), invertidas ("R") y normales ("N"), además de crear fallas menores ("i") en su ascenso (Figuras 4.7, 4.8, 4.13 y 4.14). La mayor altura del intrusivo para el caso AV se relaciona con el volumen inyectado y la mayor velocidad, pero también se debe a que el domo tenía una forma más irregular que se dirigía por fallas, que a su vez se reactivaban y permitían un mayor ascenso del fluido. En BV este efecto de reactivación no fue tan importante, por lo que el fluido no se guió por las estructuras y generó un domo más redondeado (Ítem 4.4.2.2).

Los valores de largo y ancho fueron mayores para la serie SD que para la PD (Figura 4.26.b-d). Si bien esto no está tan asociado a la altura como en la serie AD, podría estar producido por una causa similar. La distribución simétrica en los casos SD generó una mayor extensión superficial; mientras que en los casos PD el intrusivo se mantuvo solo en el borde oriente de la cuenca.

Finalmente, el contraste entre las alturas de las series BV y AV fue mucho más notorio en los casos con inversión (SD y PD), en especial para el caso de inyección durante la inversión (Figura 4.26.a). De manera opuesta, la diferencia entre los valores del largo del intrusivo para BV y AV fue menor para los casos con inversión (Figura 4.26.b), lo mismo ocurrió con los valores del ancho aproximado (Figura 4.26.c). Esto quiere decir que si se compara cada par de modelos con inversión tectónica (e.g., BV vs. AV para SD), cuando se inyecta el intrusivo a mayor velocidad, este tiende a ascender más que a desplazarse lateralmente, lo que se produciría por la mayor fuerza del intrusivo inyectado a alta velocidad para poder mover el material sobre él.

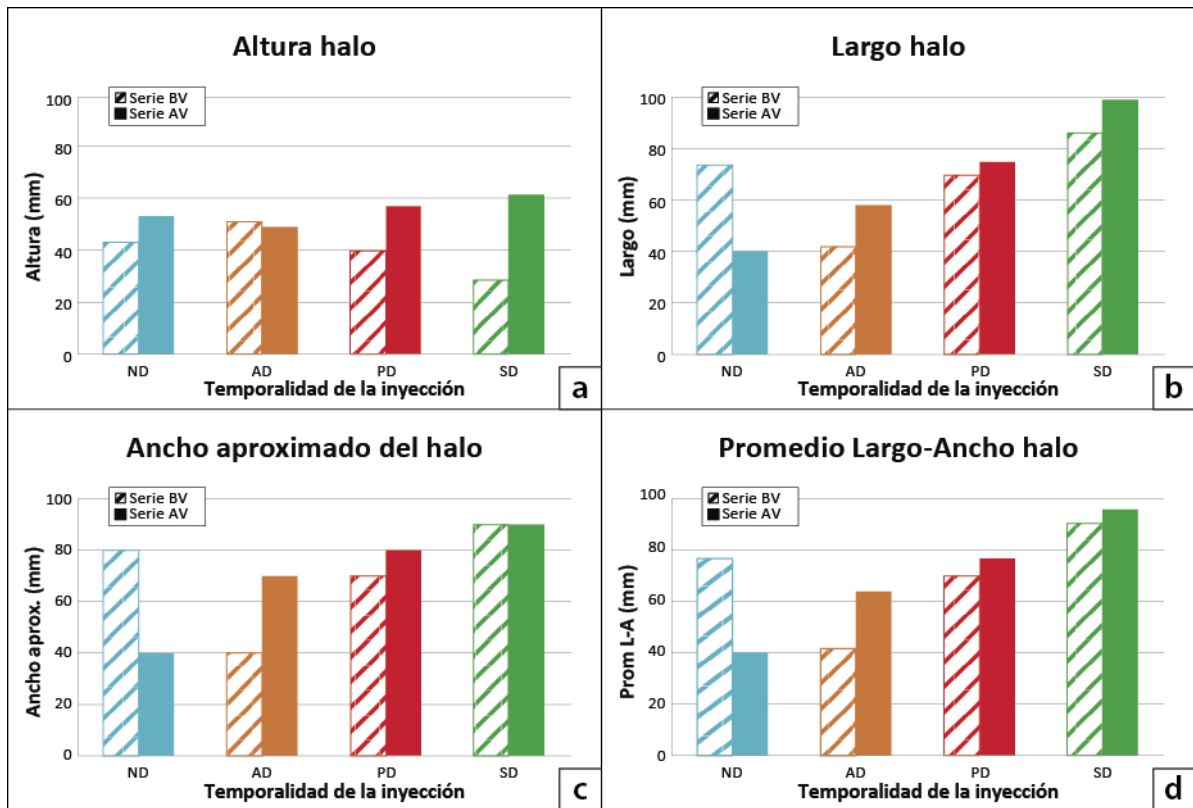


Figura 4.26 Gráficos de (a) la altura, (b) el largo, (c) el ancho aproximado y (d) el promedio de las dimensiones en planta del halo del intrusivo. Cada color representa una temporalidad de la inyección (celeste para ND, anaranjado para AD, verde para SD y rojo para PD), mientras que el relleno representa una velocidad de inyección (tachado para BV y sólido para AV). (c) El ancho se aproximó según las secciones verticales en las que apareció. Para detalles del análisis, ver el texto.

CAPÍTULO 5. IMPORTANCIA DE LA MODELACIÓN ANALÓGICA DE INVERSIÓN TECTÓNICA CON INYECCIÓN DE FLUIDOS DE BAJA VISCOSIDAD EN LA TECTÓNICA ANDINA DE CHILE CENTRAL

5.1. Recopilación bibliográfica

5.1.1. Antecedentes generales

La formación de la Cordillera de los Andes es el resultado de acortamiento y engrosamiento cortical, y de actividad magmática, los que serían efectos de una subducción casi ininterrumpida desde el Jurásico inferior (Coira *et al.*, 1982; Malumán y Ramos, 1984; Ramos, 1988; Mpodozis y Ramos, 1989; Jordan *et al.*, 1997; Charrier *et al.*, 2007; entre otros). Cambios en la tasa y en el ángulo de convergencia de las placas Nazca y Sudamericana coincidieron con una alternación de pequeños episodios de pulsos compresivos, seguidos de largos períodos extensionales, por lo que se ha propuesto que podría haber una relación entre ambos (e.g., Godoy y Lara, 1994; Charrier *et al.*, 2002, 2007, 2009). Esta alternancia entre los ambientes tectónicos habría dado paso a la formación de cuencas durante períodos extensionales y a la inversión de ellas en fases compresivas (Charrier *et al.*, 2002).

El último evento ocurrió durante el Cenozoico, donde se produjo la formación e inversión parcial de la cuenca de Abanico en los Andes centrales de Chile (33°S-36°S) (Charrier *et al.*, 1994, 1996, 2000, 2002, 2005; Godoy y Lara, 1994; Kay y Kurtz, 1995; Godoy *et al.*, 1999; Jordan *et al.*, 2001; Giambiagi *et al.*, 2003a, 2003b; Fock, 2005; Muñoz-Sáez *et al.*, 2014). Además, se ha encontrado que plutones cenozoicos en esta cuenca se ubican paralelos a las fallas que la controlan, por lo que podría haber un control en la ubicación de la actividad magmática por parte de los sistemas estructurales durante la inversión parcial (Farías *et al.*, 2008; Muñoz-Sáez *et al.*, 2014).

5.1.2. Marco geológico regional

El caso de la Cuenca de Abanico se utiliza solo como referencia para comparar algunas características que presenten los modelos realizados en este trabajo. Es así como en este capítulo solo se consideraron las unidades que se vean afectadas por la deformación producida desde el Eoceno Medio. Las unidades mesozoicas no se encuentran en la cuenca, sino que afloran fuera de ella, en la Cordillera de la Costa y en la Cordillera Principal (Figura 5.1).

5.1.2.1. Rocas estratificadas (cenozoicas)

Durante el desarrollo extensional de la Cuenca de Abanico, se fueron depositando unidades cenozoicas volcánicas y volcanosedimentarias, que corresponderían a la Formación Abanico; por otro lado, durante la inversión de la cuenca, también se depositaron secuencias volcánicas y volcanosedimentarias, pero en este caso serían las que componen la Formación Farellones (Thiele, 1980).

a) Formación Abanico (Aguirre, 1960)

Esta formación es de carácter continental con un espesor estimado de 3000 m, aunque este podría estar sobreestimado por algunas intrusiones que la afectaron (Thiele, 1980; Charrier *et al.*, 2002; Nystrom *et al.*, 2003). Está compuesta por lavas ácidas a intermedias, brechas volcánicas, rocas piroclásticas y volcanoclásticas, además presenta intercalaciones sedimentarias fluviales, aluviales y lacustres, formando lentes de hasta 500 m de espesor (Charrier *et al.*, 2002; Nystrom *et al.*, 2003). Esta formación presenta una notoria deformación, con pliegues y un metamorfismo pervasivo de muy bajo grado (Aguirre, 1960; Levi *et al.*, 1989; Vergara *et al.*, 1993).

Su distribución es continua en la Cordillera Principal de Chile Central, aunque aflora en dos franjas de orientación NS, las que están separadas por la Formación Farellones (Figura 5.1) (Fock, 2005). Por otro lado, en la Depresión Central, se encuentra en afloramientos discontinuos (Muñoz, 2007).

A partir del contenido fósil y algunas dataciones radiométricas, se le ha asignado una edad entre Eoceno Superior y Mioceno Inferior (Drake *et al.*, 1976; Vergara y Drake, 1978; Wyss *et al.*, 1994; Charrier *et al.*, 1996, 2002; Gana y Wall, 1997; Baeza, 1999; Sellés, 1999, 2000; Vergara *et al.*, 1999; Fuentes *et al.*, 2000, 2002, 2004; Sellés y Gana, 2001; Nystrom *et al.*, 2003).

b) Formación Farellones (Klohn, 1960)

La Formación Farellones también corresponde a una unidad continental. Tiene un espesor estimado de hasta 2500 m, aunque al igual que en la Formación Abanico estaría aumentado por la presencia de intrusivos del Mioceno Superior y Plioceno (Thiele, 1980; Rivano *et al.*, 1990). Su composición es principalmente de lavas con niveles de tobas, ignimbritas e intercalaciones de brechas; además, presenta una marcada estratificación en las rocas volcanoclásticas finas (Thiele, 1980).

Su distribución se presenta como una franja continua de orientación NS en la Cordillera Principal de Chile Central, precisamente entre las dos franjas que afloran de la Formación Abanico (Figura 5.1) (Muñoz, 2007).

El contacto entre la Formación Abanico y la Formación Farellones ha sido descrito de distintas maneras según su ubicación: concordante o transicional con fuertes variaciones entre los 32° y 35°S (Aguirre, 1999; Medina, 2001); discordante (Klohn, 1960; Thiele, 1980; Jaros y Zelman, 1967; Charrier, 1973, 1981; Moscoso *et al.*, 1982; Rivano *et al.*, 1990); pseudoconcordante (Godoy y Lara, 1994); o de carácter tectónico (Godoy *et al.*, 1996, 1999; Navarro, 2001). El techo de la Formación Farellones es la actual superficie de erosión (Thiele, 1980; Rivano *et al.*, 1990).

Mediante dataciones radiométricas, a la Formación Farellones se le ha asignado una edad de Mioceno Inferior a Medio (Drake *et al.*, 1976; Vergara y Drake, 1978; Beccar *et al.*, 1986; Sellés, 1999; Aguirre *et al.*, 2000; Fuentes *et al.*, 2004; Fock, 2005).

5.1.2.2. Rocas intrusivas

En las cercanías de la Cuenca de Abanico se encuentran rocas intrusivas con edades que van desde el Cretácico Inferior al Mioceno Superior, las que afectan a la Formación Abanico y, en algunos casos, a la Formación Farellones (Thiele, 1980; Fock, 2005). Existe una polaridad relativa de las edades de enfriamiento de estos intrusivos, siendo en general cada vez más jóvenes hacia el oriente (Thiele, 1980).

a) Intrusivos Cretácicos

Corresponden a plutones y stocks dioríticos, granodioríticos y tonalitas. Intruyen a las formaciones Lo Prado, Las Chilcas y Veta Negra (Wall *et al.*, 1999; Sellés y Gana, 2001). Se encuentran en el borde oriental de la Cordillera de la Costa (Fock, 2005), por lo que no afecta a la Cuenca de Abanico (Figura 5.1).

b) Intrusivos del Paleoceno-Mioceno Inferior

Se componen por una serie de stocks basálticos que intruyen a los intrusivos cretácicos y a las formaciones Las Chilcas, Lo Valle y a los Estratos del Cordón de los Ratones (Fock, 2005). Se encuentran al oeste de la cuenca, entre la Cordillera de la Costa y la Depresión Central (Muñoz, 2007). Según dataciones K/Ar en roca total y en biotita, se obtuvo un rango de edad entre 64 y 32 Ma, que correspondería a una edad Paleocena-Eocena (Wall, 1997; Wall *et al.*, 1999; Sellés y Gana, 2001).

Dentro de este grupo de intrusivos, también se encuentran stocks, filones manto, cuellos volcánicos y diques, con edades del Eoceno Superior a Mioceno Inferior, cuya composición va desde gabros a andesitas, y su tamaño es inferior a 8 km² (Fock, 2005). Se ha encontrado que estos cuerpos intruyen a las formaciones Las Chilcas, Lo Valle y Abanico (Kurtz *et al.*, 1997; Fock, 2005); con esta última comparten edades y geoquímicas similares, por lo que se ha postulado que serían sus conductos alimentadores (Wall *et al.*, 1999).

c) Intrusivos del Mioceno Inferior-Medio

Son plutones principalmente granodioríticos, se encuentran en la Cordillera Principal, e intruyen a la Formación Abanico (Figura 5.1) (Fock, 2005). Entre los 33°30'S y 34°30'S, las edades van desde los 20 a los 18 Ma (Vergara y Drake, 1979; Thiele, 1980; Vergara y López, 1980; Munizaga y Vicente, 1982; Kurtz *et al.*, 1997; Gana y Wall, 1997; Sellés, 1999; Sellés y Gana, 2001; Fuentes *et al.*, 2002; Sernageomin, 2003; Fock, 2005). En este grupo de intrusivos, se encuentran los plutones La Obra (con edades en diferentes minerales entre 21.6 ± 4.9 Ma y 16.2 ± 0.3 Ma; Kurtz *et al.*, 1997), Salto del Soldado (edad K-Ar en roca total 19.5 ± 0.5 Ma; Vergara y Drake, 1978) y Santa Rosa de Rengo (16.2 Ma ± 1.2 Ma ⁴⁰Ar-³⁹Ar en hornblenda; Kurtz *et al.*, 1997). Dada su similar edad y geoquímica, se ha sugerido una relación genética entre estos plutones y la franja oriental de la Formación Abanico.

Más al sur de los 34°30'S, la edad de estos intrusivos es más variable, pues se han obtenido edades K-Ar en roca total entre 14.1 Ma y 23.8 Ma (Malbran, 1986 y Drake *et al.*, 1982, respectivamente).

d) Intrusivos del Mioceno Superior-Plioceno

Este grupo lo componen intrusivos granodioríticos, monzograníticos y monzoníticos cuarcíferos (Thiele, 1980; Cornejo y Mahood, 1997; Kurtz *et al.*, 1997). Entre los 33°30'S y 34°30'S están ubicados al este de la franja del Mioceno Inferior-Medio (Figura 5.1). Su edad varía entre 13 y 8 Ma (Drake *et al.*, 1976; Vergara y Drake, 1978; Cornejo y Mahood, 1997; Gana y Wall, 1997; Kurtz *et al.*, 1997; Sellés, 1999; Sellés y Gana, 2001; Fock, 2005). Dentro de este grupo, se encuentran los plutones San Gabriel (de edad $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ en hornblenda entre 11.4 ± 0.2 Ma y 11.3 ± 0.3 Ma, Kurtz *et al.*, 1997), San Francisco (de edades U-Pb en circón entre 14.7 ± 0.1 Ma y 11.2 ± 0.1 Ma; Jerez, 2007; Charrier *et al.*, 2009) y La Gloria (edad U-Pb en circón de 10.3 ± 0.2 Ma y K-Ar en biotita de 9.8 Ma; Deckart y Godoy, 2006, y Cornejo y Mahood, 1997, respectivamente), además del Plutón de las nacientes del río Cortaderal (edades $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ de 8.4 ± 0.3 Ma en hornblenda y 7.7 ± 0.1 Ma en biotita, Kurtz *et al.*, 1997). De acuerdo a la geoquímica, edades y relaciones de contacto, estos intrusivos se relacionarían genéticamente con la Formación Farellones (Thiele, 1980; Kurtz *et al.*, 1997).

En la franja oriental de la cuenca, se han encontrado intrusivos más jóvenes (Figura 5.1). Entre ellos, está el intrusivo Colina, de edad K-Ar de 3.4 ± 0.5 (Ramos *et al.*, 1997) y el pórfido Los Lunes, de edad entre 1.1 ± 0.4 Ma (K-Ar en biotita, Godoy y Lara, 1994), 1.20 ± 0.19 Ma y 1.05 ± 0.02 Ma ($^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ en hornblenda y en biotita, respectivamente; Baeza, 1999).

5.1.2.3. Estructuras

Las estructuras relacionadas con la Cuenca de Abanico tienen, en general, un rumbo NS, aunque presentan variaciones en el estilo de la deformación y en la vergencia (Muñoz, 2007). Estas estructuras son principalmente pliegues asimétricos y fallas inversas, ambos con orientaciones NS a NE y con vergencias tanto al E como al W (González, 1963; Thiele, 1980; Thiele *et al.*, 1991; Charrier *et al.*, 2002, 2005; Fuentes *et al.*, 2002; Rauld, 2002).

Se han definido tres sistemas de fallas principales (Charrier *et al.*, 2005; Fock, 2005), los que de oeste a este son: Sistema de Falla Infiernillo (SFI); Sistema de Falla San Ramón (SFSR); y Sistema de Falla El Diablo (SFED) (Figura 5.1).

La Falla Infiernillo tiene un manteo hacia el E, estuvo activa desde el Eoceno Superior (37 a 30 Ma, aproximadamente, Fock, 2005), se ubica en el borde oriental de la Cordillera de la Costa, y se prolonga hacia el sur como la Falla Cerro Renca (Sellés, 1999) y la Falla Portezuelo de Chada (Fock, 2005).

La Falla San Ramón, en cambio, habría estado activa desde el Oligoceno Inferior (30 Ma, Fock, 2005), está ubicada en el límite W de la Cordillera Principal, presenta un manteo hacia el E, y su equivalente hacia el norte ($31^{\circ}45'$) corresponde a la Falla Pocuro (Carter y Aguirre, 1965; Rivano *et al.*, 1993; Rivano y Sepúlveda, 1986; Campbell, 2005); algunos autores proponen que esta falla sería el borde occidental de la cuenca de Abanico (Charrier *et al.*, 2002, 2005; Campbell, 2005).

Finalmente, la Falla El Diablo se ubica a unos 10 km al occidente del Volcán San José (Figura 5.1) (Fock, 2005), activa desde el Eoceno Superior (37 a 30 Ma, aproximadamente, Fock, 2005), tiene un manteo subvertical hacia el W, y tendría una

prolongación hacia el sur mediante la falla Espinoza (Charrier *et al.*, 2002; Fock, 2005; Fock *et al.*, 2006; Farías *et al.*, 2008), de manto al W.

Al oriente de la cuenca, existe una secuencia de fallas, pliegues anticlinales y sinclinales, apretados y volcados, de orientación N a NW y con vergencia E, los que constituyen la Faja Plegada y Corrida de Aconcagua (FPCA) que afectó principalmente a las rocas mesozoicas del lugar (Figura 5.1) (Thiele, 1980; Ramos *et al.*, 1991; Giambiagi y Ramos, 2002; Giambiagi *et al.*, 2002, 2003b; Giambiagi, 2003).

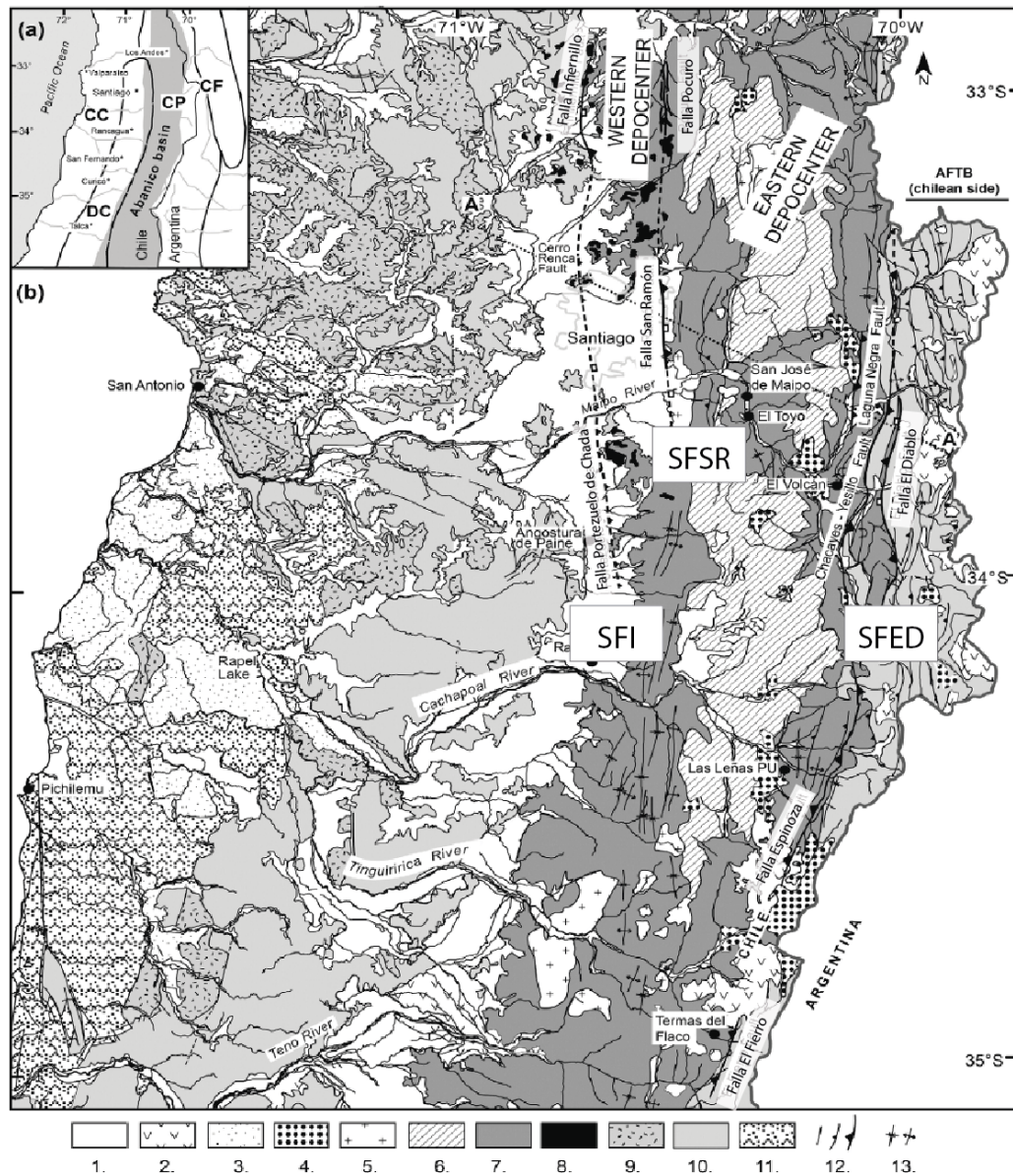


Figura 5.1 Mapa geológico de la zona de la Cuenca de Abanico (modificado de Muñoz *et al.*, 2014). a) Mapa simplificado con las unidades morfoestructurales principales, de W a E: Cordillera de la Costa; Depresión Central; Cordillera Principal. En gris se marca la ubicación de la Cuenca de Abanico. b) Mapa con las unidades y estructuras principales de la zona: **1.** Depósitos aluviales recientes; **2.** Volcanismo reciente; **3.** Depósitos sedimentarios del Mioceno al presente; **4.** Intrusivos del Mioceno Superior; **5.** Intrusivos del Mioceno Medio a Superior; **6.** Formación Farellones; **7.** Formación Abanico; **8.** Intrusivos hipoabisales del Eoceno-Oligoceno; **9.** Intrusivos Mesozoicos; **10.** Rocas sedimentarias y volcánicas mesozoicas; **11.** Rocas metamórficas e intrusivas del paleozoico; **12.** Lineamientos, fallas inversas mayores y menores; **13.** Pliegues anticlinales y sinclinales. Sistema de Falla Infiernillo (SFI); Sistema de Falla San Ramón (SFSR); y Sistema de Falla El Diablo (SFED).

5.1.3. Descripción de la cuenca extensional de Abanico

La cuenca de Abanico corresponde a una cuenca intraarco de rumbo NNE, paralela al margen continental. Está ubicada entre los 28° y 39°S en territorio chileno (Charrier *et al.*, 2005, 2007; Flynn *et al.*, 2008). De oeste a este, según algunos autores, abarca desde el oriente de la Cordillera de la Costa hasta el centro de la Cordillera Principal (Muñoz-Sáez *et al.*, 2014), mientras que otros la definen entre el eje de la Depresión Central hasta la zona chilena de la Cordillera Principal Este (Farías *et al.*, 2008). El ancho que tendría la cuenca es de unos 70 a 80 km (Fock, 2005). Se le asigna un espesor de unos 3000 m según la Formación Abanico (Thiele, 1980; Charrier *et al.*, 2002; Nyström *et al.*, 2003; Muñoz, 2005).

Esta cuenca comenzó su formación a los 37-36 Ma (edad de los depósitos inferiores de la Formación Abanico según Wyss *et al.* (1994) y Charrier *et al.* (1996, 2002)), durante el Eoceno Superior-Oligoceno inferior. El término de esta etapa ocurrió en el Mioceno Inferior (23 Ma), momento en el que comenzó su inversión tectónica (Charrier *et al.*, 2002, 2005, 2007), es decir, esta fase extensional duró unos 14 Ma. Esto coincidió con un período de baja tasa de convergencia (de unos 5 cm/año, Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza, 1998).

El desarrollo extensional de la cuenca estuvo controlado por fallas normales de orientación NS (Charrier *et al.*, 2002, 2005; Fock, 2005), y se concentró principalmente en tres sistemas de fallas de orientación NS entre 32° y 36°S (Fock *et al.*, 2006; Farías *et al.*, 2008; Charrier *et al.*, 2009). En el borde oriental, se ubicaría el Sistema de Falla El Diablo (SFED), mientras que, por el occidente se encontraría el Sistema de Falla Infiernillo (SFI), ambos activos desde el Eoceno Superior (37 a 30 Ma, aproximadamente, Fock, 2005); el Sistema de Falla San Ramón (SFSR) también se encuentra en el lado W de la cuenca, y habría estado activo desde el Oligoceno Inferior (30 Ma, Fock, 2005).

Durante la fase extensional de la cuenca, se produjo un adelgazamiento cortical, con un flujo calórico alto y un consecuente magmatismo toleítico que se vio reflejado en los depósitos volcánicos dentro de ella (Charrier *et al.*, 2002, 2009; Fuentes *et al.*, 2002; Nyström *et al.*, 2003; Fuentes, 2004; Muñoz *et al.*, 2006). El arco, ubicado dentro de la cuenca en este periodo, era ancho (Muñoz, 2005) y con un relieve no tan importante (Charrier *et al.*, 2009). Además, a lo largo de este período Eoceno-Oligoceno ocurrió la intrusión de cuerpos hipoabisales de composición básica (41 Ma-20 Ma), cuya edad y geoquímica son comparables con las lavas de la Formación Abanico (Wall *et al.*, 1999; Fock, 2005).

5.1.4. Inversión tectónica de la cuenca

La inversión de la cuenca de Abanico empezó durante el Oligoceno Superior a Mioceno Inferior temprano (Fock, 2005; Charrier *et al.*, 2009), y estaría relacionado con el aumento en la tasa de convergencia, de hasta 15 cm/año, producido en este período (Oligoceno superior-Mioceno inferior a Mioceno superior temprano) (Somoza, 1998; Charrier *et al.*, 2002). Este sería el primero de tres eventos de deformación principales durante el Cenozoico (los otros dos se producirían durante el Mioceno Inferior a Medio

con el desarrollo la FPCA, y durante el Mioceno Superior al presente con el alzamiento de la Cordillera Principal) (Fock, 2005), y coincide con la orogenia Pehuenche (Yrigoyen, 1993): el inicio de la segunda subetapa de la tercera etapa del Ciclo Andino (Charrier *et al.*, 2007). Algunos autores han propuesto que la transición entre la Formación Abanico y la Formación Farellones, y por ende el cambio de la etapa extensional a la de inversión, habría ocurrido antes de los 21 Ma (Zurita *et al.*, 2000; Fock, 2005; Fock *et al.*, 2006), proponiendo una edad de 23 Ma para la compresión (Charrier *et al.*, 2002, 2005, 2007; Fock *et al.*, 2006). El fin de la inversión está asociado a la incisión del relieve por el alzamiento y basculamiento producido al W durante el Mioceno Superior temprano (Mpodozis y Ramos, 1989; Lamb *et al.*, 1997; Giambiagi *et al.*, 2003; Pinto *et al.*, 2004; Farías *et al.*, 2005, 2006, 2008; Fock *et al.*, 2006; Riquelme *et al.*, 2007). El término de esta última etapa habría sido anterior a los 16 Ma (Flynn *et al.*, 1995; Kay y Kurtz, 1995; Muñoz-Sáez *et al.*, 2014), inferida a partir del contraste entre la parte inferior de la Formación Farellones, que presenta estructuras de crecimiento, y su parte superior, de 16 Ma de edad, que no presenta deformación (Fock, 2005).

En esta etapa de inversión, algunas fallas normales se habrían reactivado como fallas inversas de alto ángulo, por lo que el acortamiento en la Cordillera Principal chilena habría sido de solo unos 16 km (Farías, 2007; Farías *et al.*, 2010). Se ha propuesto que los tres sistemas (SFI, SFSR y SFED) habrían presentado inversión, pero no todas las fallas normales se reactivaron al mismo tiempo, algunas incluso quizás nunca lo hicieron (Charrier *et al.*, 2009). El lado W es más frágil, se presentan solo fallas inversas de alto ángulo, sin pliegues, que absorben un bajo acortamiento (Muñoz-Sáez *et al.*, 2014). Por otro lado, el bloque E tiene capas sedimentarias y de yeso oxfordiano, que presentan pliegues asociados a fallas inversas de alto y bajo ángulo, que absorben una mayor cantidad de acortamiento (Muñoz-Sáez *et al.*, 2014).

La inversión de la cuenca y la reactivación de fallas normales se relacionan con un engrosamiento cortical durante el Mioceno Inferior (Charrier *et al.*, 2009). Durante esta etapa también disminuye el volcanismo (Vergara *et al.*, 2004; Kay *et al.*, 2005; Fock, 2005), pero no se interrumpe, sino que cambia su signature de toleítico a calcoalcalino (Nyström *et al.*, 1993, 2003; Carrasco, 2000; Charrier *et al.*, 2002; Fuentes, 2004; Kay *et al.*, 2005). Esto se refleja tanto en las lavas de la Formación Farellones como en los plutones de estas edades (Kurtz *et al.*, 1997; Charrier *et al.*, 2002; Nyström *et al.*, 2003; Kay *et al.*, 2005).

Como se mencionó anteriormente (Ítem 5.1.2.2.c), existen plutones cenozoicos que se alinean paralelos a las fallas que controlan la formación e inversión de la cuenca. Una de estas franjas se produjo durante esta etapa de inversión, en el Mioceno Inferior. Esta corresponde a una serie de plutones granodioríticos, de 20 a 18 Ma de edad, que intruyeron a la Formación Abanico por la zona de la Falla San Ramón (Vergara y Drake, 1978; Munizaga y Vicente, 1982; Kurtz *et al.*, 1997; Gana y Wall, 1997; Cornejo y Mahood, 1997; Sellés y Gana, 2001; Fock, 2005; Muñoz *et al.*, 2009); entre ellos, se encuentran los plutones La Obra (Kurtz *et al.*, 1997), Salto del Soldado (Vergara y Drake, 1978) y San Francisco (Jerez, 2007), por lo que habría existido una mayor actividad magmática en el lado W de la cuenca (Muñoz-Sáez *et al.*, 2014). Fuera de esta franja, hay otros plutones de edad similar en el E de la cuenca, como el Plutón

Juncal de 16 Ma (Montecinos, 2008; Montecinos *et al.*, 2008) cerca de la Falla El Diablo, y algunas rocas volcánicas de 18-16 Ma (Aguirre *et al.*, 2009).

5.1.5. Etapas posteriores a la inversión

La etapa de inversión de la cuenca terminó en el Mioceno Superior temprano (Lamb *et al.*, 1997; Pinto *et al.*, 2004; Riquelme *et al.*, 2007; Farías *et al.*, 2005, 2008). Sin embargo, a partir del Mioceno inferior a medio (16 Ma), la compresión siguió como pequeños pulsos, haciendo que la inversión y el engrosamiento cortical se mantuvieran hasta el Plioceno Inferior (Fock, 2005; Charrier *et al.*, 2009). Esta transición se reconoce por el desarrollo de fajas plegadas y corridas (FPC) y cuencas de antepaís de retroarco (Charrier *et al.*, 2009). La deformación migró hacia el E, donde se concentró en el límite oriental de la cuenca de Abanico; el arco también migró hacia el oriente (Stern y Skewes, 1995; Kay *et al.*, 2005; Fock, 2005). A los 15 Ma, esta migración de la deformación desarrolló la Faja Plegada y Corrida de Aconcagua (FPCA), como un sistema de piel delgada con completo despegue de la cobertura sedimentaria que aprovechó niveles evaporíticos, y que afectó las sucesiones sedimentarias mesozoicas del este de la cuenca de Abanico (Giambiagi y Ramos, 2002; Fock *et al.* 2006; Farías 2007; Charrier *et al.*, 2009). Por otra parte, también se ha propuesto que en el mismo lado E de la cuenca, los movimientos inversos de la Falla El Diablo habrían inducido el desarrollo de la Faja Plegada y Corrida de Aconcagua (FPCA) durante el Mioceno Inferior (16 Ma) (Muñoz-Sáez *et al.*, 2014). En cambio, en el lado W, la ausencia de capas débiles habría prevenido el desarrollo de FPC con vergencia occidental (Muñoz-Sáez *et al.*, 2014). El desarrollo de la FPCA, durante el Mioceno Inferior a medio, se considera el segundo evento de deformación mayor definido por Fock (2005).

Ya durante el Mioceno Superior, la concentración de la deformación se ubicó en el borde oriental, en la Cordillera Principal Este (hasta 8.5 Ma), donde el acortamiento principalmente se agrupó en la FPCA y en la FPC Malargüe (FPCM) (Giambiagi y Ramos, 2002; Giambiagi *et al.*, 2003; Fock, 2005). Sin embargo, este acortamiento habría sido de solo unos 32 km en la latitud de Santiago (Giambiagi y Ramos, 2002). Durante este período, se produce el principal alzamiento de la superficie simultáneo con la deformación de la Cordillera Principal (Farías *et al.*, 2008), que correspondería al tercer evento de deformación mayor según Fock (2005).

El magmatismo continuó en etapas posteriores a la inversión, pero quedó acotado a una franja más estrecha, ubicada en el compartimiento oriente de la cuenca de Abanico (Charrier *et al.*, 2009). Es por esto que la edad de los plutones disminuye hacia el E, de los 20-18 Ma de los plutones ubicados en la Falla San Ramón, se pasan a intrusivos de 13-8 Ma ubicados en la Falla El Diablo (Vergara y Drake, 1978; Munizaga y Vicente, 1982; Kurtz *et al.*, 1997; Gana y Wall, 1997; Cornejo y Mahood, 1997; Sellés y Gana, 2001; Fock, 2005; Farías *et al.*, 2008 Muñoz *et al.*, 2009). En esta franja de intrusivos miocenos (Ítem 5.1.2.2.d), se encontrarían los plutones San Gabriel (Kurtz *et al.*, 1997) y La Gloria (Cornejo y Mahood, 1997; Deckart y Godoy, 2006), además del Plutón de las nacientes del río Cortaderal (Kurtz *et al.*, 1997). Durante el Plioceno y Pleistoceno, en la franja E se ubicó el Intrusivo Colina (Ramos *et al.*, 1997) y el Intrusivo Los Lunes (Baeza, 1999).

5.2. Discusión sobre la aplicación de la modelación analógica al caso de la cuenca de Abanico

Lo primero que se debe tener en consideración es que los resultados obtenidos mediante modelos análogos no son directamente aplicables a los casos reales que se encuentran en la naturaleza. Esto se debe a que, para poder entender cómo influye el parámetro a estudiar, se debe aislar de todos los otros factores que puedan afectar la deformación. Es por esto que los resultados obtenidos en las modelaciones del presente trabajo solo son aplicados a grandes rasgos para poder generar una idea de cómo afecta la intrusión de magmas en el desarrollo de estructuras de la cuenca de Abanico, y viceversa.

5.2.1. Aplicación a la cuenca extensional

En los modelos realizados en el presente trabajo, la fase extensional se realizó para todos los modelos por igual, por lo que no se realizó un análisis profundo con respecto a la formación de la cuenca. Todos los modelos a los que se le realizó extensión presentaron una cuenca delimitada por dos sistemas de fallas: una con manteo hacia el E; y otra hacia el W (Capítulo 3 y 4). En general, este último sistema tenía una mayor cantidad de fallas normales, lo que podría relacionarse con los dos sistemas que se encuentran en la zona occidental de la cuenca de Abanico (Sistema de Falla Infiernillo y Sistema de Falla San Ramón), en comparación con el sistema que se encuentra en la zona oriental de ella (Sistema de Falla El Diablo). Sin embargo, este arreglo también podría ser reflejo de la modelación y de la ubicación del pistón, que aumentaría la cantidad de estructuras con vergencia opuesta a su movimiento durante la extensión. Según la interpretación en estudios anteriores (Fock (2005), y las referencias ahí citadas), durante la extensión se habría formado un sistema tipo graben, que en su borde occidental habría estado delimitado por el SFI (Eoceno Superior), y más al oriente estaría el SFJR (Oligoceno Inferior); por otro lado, el SFED (Eoceno Superior) representa el límite oriental de la cuenca (Figura 5.2.a y Figura 5.2.c). Algo similar a esto ocurre en la etapa extensional de los modelos aquí presentados, donde las primeras estructuras en aparecer son las fallas normales más externas, para posteriormente dar paso a estructuras dentro de la cuenca que formarían un graben interior y continuarían con la extensión y subsidencia del sistema (Figura 5.2.b y Figura 5.2.d).

A diferencia de trabajos anteriores (Muñoz-Sáez *et al.*, 2014), la representación de la asimetría de la cuenca no se tomó en consideración para este trabajo. Sin embargo, sí se consideró la sedimentación durante la extensión: se depositaron secuencias syn-rift dentro de la cuenca que podrían ser las representantes de la Formación Abanico, con un espesor de alrededor de 30 mm para los 3000 m estimados para el caso real (Charrier *et al.*, 1996; Vergara *et al.*, 1999; Zurita, 1999).

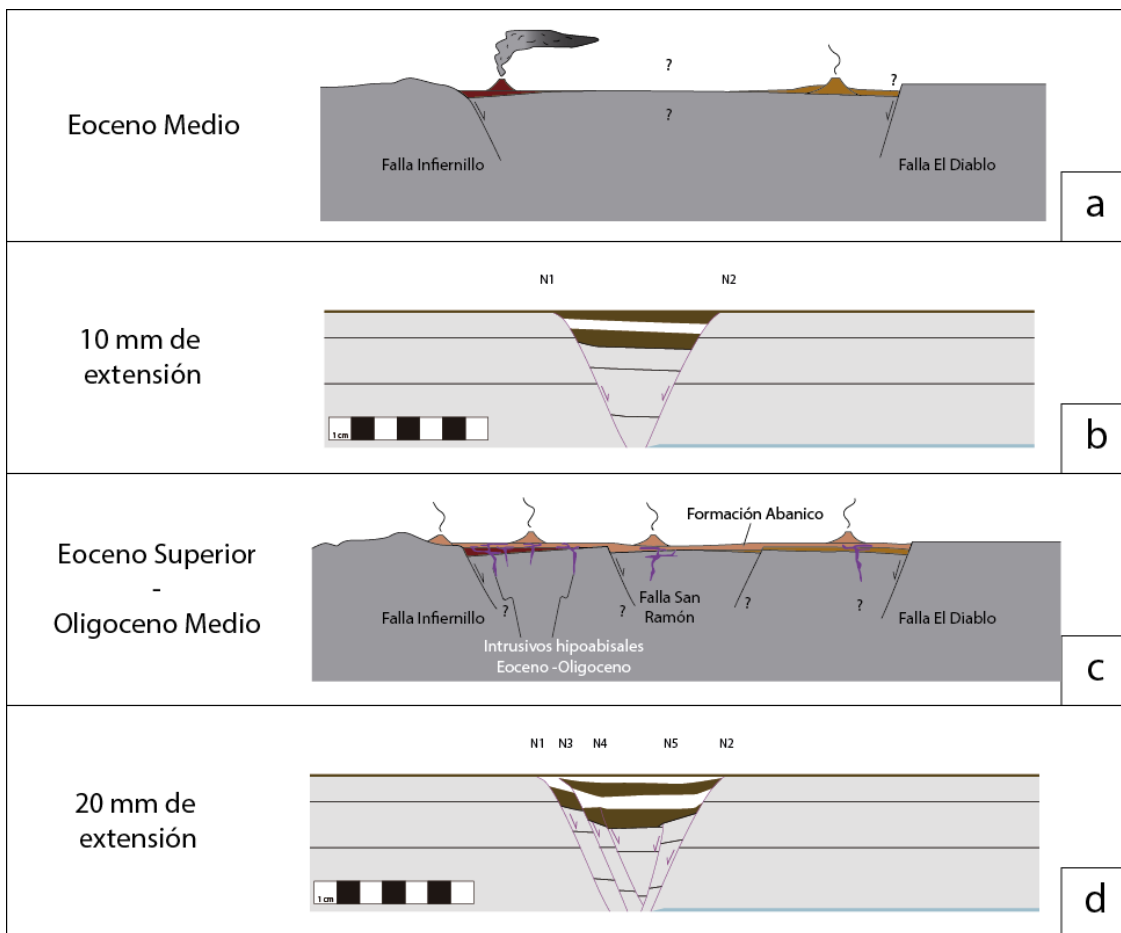


Figura 5.2 Esquema E-W comparativo entre el modelo de evolución propuesto por Fock (2005, Modificado) y los modelos análogos de extensión obtenidos en este trabajo. a) Fase extensional en el Eoceno Medio, con el desarrollo de las fallas Infiernillo y El Diablo, y la sedimentación syn-rift (Fock, 2005). b) Perfil del modelo análogo de extensión parcial (10 mm) del presente trabajo, se desarrolla una falla normal a cada lado de la cuenca, se realiza sedimentación durante la extensión. c) Fase extensional en el Eoceno Superior-Oligoceno Medio, aparece la Falla San Ramón y continúa la sedimentación de la Formación Abanico. d) Perfil del modelo análogo de extensión total (20 mm) del presente trabajo, dentro de la cuenca se desarrollan más fallas normales que ayudan a la subsidencia de ella, se realizó sedimentación durante toda la fase de extensión. Los modelos de evolución de Fock (2005) (a y b) no presentan escala, pero el ancho de la cuenca es de unos 70 a 80 km; la escala que aparece en los perfiles de los modelos análogos de extensión mide 7 cm.

5.2.2. Aplicación de los resultados de la modelación a la inversión tectónica cenozoica en Chile Central

Si bien para el caso de la cuenca de Abanico la sedimentación se mantuvo durante la fase de inversión (depositación de las secuencias volcánicas de la Formación Farellones; Klohn, 1960; Thiele, 1980; Rivano *et al.*, 1990), en la modelación analógica presente esto no fue contemplado, pues se priorizó mantener las marcas en superficie para un mejor análisis de la deformación posterior. Sin embargo, esto no representa una mayor limitación, pues la influencia de la carga es más notoria en el caso que la sedimentación ocurra en extensión (Muñoz, 2007).

Durante las etapas de inversión en los modelos análogos de este trabajo, se observa una reactivación de algunas fallas normales como fallas inversas de alto ángulo (Capítulo 3 y 4), mas no todas mostraron claramente un movimiento en esta segunda fase, por lo que se piensa que no necesariamente fueron reactivadas. Dentro de las

fallas reactivadas, hay al menos una a cada lado de la cuenca. Esto coincidiría con lo mencionado anteriormente (Ítem 5.1.4), donde los tres sistemas de fallas principales que controlaron el desarrollo de la cuenca (Sistema de Falla Infiernillo, Sistema de Falla San Ramón y Sistema de Falla El Diablo) habrían sido reactivados como fallas inversas de alto ángulo en la etapa de compresión (Charrier *et al.*, 2002, 2005; Fock, 2005).

La carga producida dentro de la cuenca por los depósitos syn-rift dificultaría el desarrollo de inversión tectónica (Pinto *et al.*, 2010; Muñoz-Sáez *et al.*, 2014). En el caso de la cuenca de Abanico, sería la misma Formación Abanico y la Formación Farellones las que inhibirían un mayor desarrollo de las estructuras reactivadas (Muñoz-Sáez *et al.*, 2014). Esto se vería también en la modelación, donde, a pesar de no tener un representante de la Formación Farellones, se produce un efecto similar donde la inversión de las estructuras no fue total, sino que solo se produjo una inversión parcial.

La formación de nuevas estructuras está ligada a la detención de la reactivación de las fallas normales. Al tener una mayor carga, las estructuras normales de alto ángulo no pueden alzar toda la cuenca, por lo que se detiene su reactivación, y dan paso a fallas inversas nuevas de menor ángulo. Estas fallas también son las que absorben mayor acortamiento dentro del sistema (Figura 4.22). Se ha sugerido que estas estructuras nuevas se habrían generado debido a la carga sedimentaria dentro del graben que inhibiría la reactivación de estructuras (Muñoz-Sáez *et al.*, 2014). En el caso de la cuenca de Abanico, el traspaso de la deformación hacia estructuras de menor manteo se manifestaría como la Faja Plegada y Corrida de Aconcagua, que precisamente acomodó a más de 80% del acortamiento cenozoico entre 32°30' y 34°S (Farías *et al.* 2008). Otra de las causas que habrían incidido en el desarrollo de la FPC es la reología de las rocas ubicadas en el borde oriental de la cuenca, que corresponden a rocas mesozoicas con niveles de yeso que actuarían como nivel de despegue para las fallas inversas que forman la FPC (Giambiagi *et al.*, 2002; Muñoz, 2007).

En los modelos análogos presentados en este trabajo, las fallas nuevas tienen una forma sigmoidal en planta, con estructuras inversas a ambos lados de la cuenca. Sin embargo, para el caso de la Cuenca de Abanico no existen datos que avalen la presencia de estructuras similares al W de ella. Además, algunas de las fallas nuevas que cruzan la cuenca (falla S1 en la Figura 4.10.g y similares) no tendrían un representante en el caso real, sino que serían producidas por el dispositivo y el movimiento oblicuo del pistón. El modelo de inyección a alta velocidad durante la inversión (AVSD, Ítem 4.3.3), muestra un desarrollo de estructuras mucho más asimétrico que los demás, con mayor cantidad de estructuras y mayor fallamiento con vergencia E que W (Figuras 4.15, 4.16, 4.25 y 4.22) además de un mayor alzamiento que los otros modelos (Figura 4.19), lo que se asocia a la presencia del intrusivo ascendiendo por el sistema durante la etapa compresiva que absorbería parte del acortamiento y ayudaría a alzar la superficie de este. Esta asimetría entre oriente y occidente puede ser comparada con la que ocurre en el caso real de la cuenca cenozoica y la ausencia de estructuras nuevas en el lado oeste.

Como ya se ha mencionado, se ha propuesto un control de la ubicación de los intrusivos por los sistemas estructurales durante la inversión de la Cuenca de Abanico (Muñoz-Sáez *et al.*, 2014). En efecto, se han reconocido dos franjas de plutones dentro de ella (Farías *et al.*, 2008): una franja del Mioceno Inferior (aproximadamente 20 a 18

Ma) en el occidente, posiblemente relacionado con el SFSR; y otro del Mioceno Medio a Superior (aproximadamente 10 Ma) más al E de esta primera franja, cercano al SFED. Para efectos de la comparación con la modelación analógica, se considera que los plutones del Mioceno Inferior, es decir, durante el período de inversión de la cuenca, serían representados por la serie SD de modelos (inyección durante la inversión); por otro lado, la franja del Mioceno Medio a Superior, es decir, durante el término de la inversión y en etapas posteriores a ella, serían representados por la serie PD de modelos (inyección posterior a la inversión).

Los intrusivos de los modelos de la serie SD (Ítem 4.2.3 e Ítem 4.3.3) tienen una tendencia a ser controlados por las estructuras, mostrando una morfología que representa la distribución de ellos entre las fallas presentes durante su inyección, tanto fallas reactivadas como nuevas (Figuras 4.9, 4.10, 4.15, 4.16, 5.4.b-c). Si bien esta distribución no siempre presenta una preferencia del intrusivo a ascender por fallas reactivadas, su máxima altura sí se encuentra en ellas, tanto para la serie de alta velocidad como para la de baja. Al comparar esto con el caso de la Cuenca de Abanico, se puede ver que los plutones del Mioceno Inferior siguen la traza del SFSR (Figura 5.4.a y Figura 5.3), por lo que realmente existiría un control estructural que permitió que esta franja de intrusivos ascendiera por las estructuras del SFSR.

Por otra parte, los modelos de la serie PD (Ítem 4.2.2 e Ítem 4.3.2) no muestran un control estructural notorio, sino que comenzaron a generar estructuras propias para ascender, y solo en lugares puntuales, se ayudaron de las fallas preexistentes (Figuras 4.7, 4.8, 4.13, 4.14, 5.4.e-f). Comparando esta serie con la franja de plutones del Mioceno Medio a Superior, puede verse que también presentan un menor control estructural que la franja anterior: se encuentran cercanos al SFED, pero no es tan claro como los del Mioceno Inferior, pues presentan una mayor distribución espacial (Figura 5.4.a y Figura 5.3).

Se ha encontrado una relación entre el tiempo de formación de un intrusivo con la influencia que la deformación tectónica pueda tener en él: el contraste entre la tasa de transferencia del magma en la corteza (del orden de cm/s) y las tasas tectónicas (del orden de cm/año) sugiere que la formación de algunos plutones no está directamente relacionada con la deformación que esta última pueda producir, pero tampoco sería insensible a la tectónica (de Saint Blanquat *et al.*, 2011). Es por esto que los plutones de mayor tamaño, que corresponden a eventos magmáticos de mayor duración, reflejan una interacción entre la deformación regional y el crecimiento del intrusivo; por otra parte, los de menor tamaño (<0.1 Ma) no presentan esta evidencia por su menor tiempo de formación (de Saint Blanquat *et al.*, 2011).

Según lo anterior, la influencia de la deformación tectónica que muestran los intrusivos en los modelos SD podría, además, estar relacionada con la duración de la inyección, que se mantuvo por el mismo tiempo que duró la inversión. Esto también se reflejaría en el caso de los intrusivos del Mioceno Inferior, que en general son de mayor tamaño que los del Mioceno Medio a Superior (Figura 5.3). Sin embargo, esta diferencia de tamaño que presentan en superficie podría ser un efecto de los distintos niveles de exhumación que tengan los intrusivos, que no reflejarían necesariamente el tamaño real que tengan en profundidad.

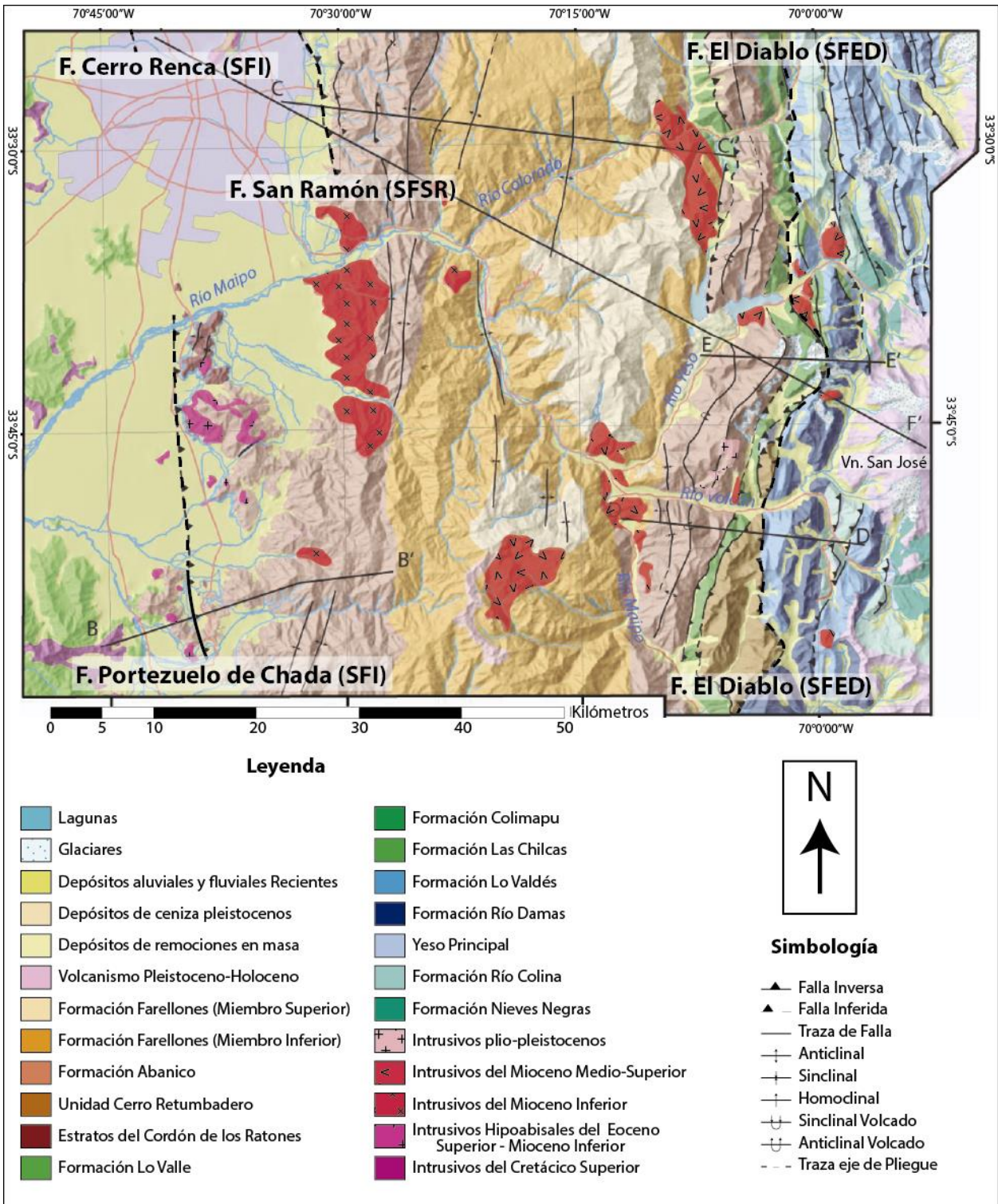


Figura 5.3 Mapa geológico del área de la cuenca de Abanico (Fock, 2005; Modificado). Se resaltan las estructuras mencionadas en el texto (de oeste a este: Sistema de Falla Infiernillo, Sistema de Falla San Ramón y Sistema de Falla El Diablo), las franjas de intrusivos del Mioceno Inferior (franja roja occidental) y del Mioceno Medio-Superior (franja roja oriental), además de algunos intrusivos hipoabisales del Eoceno Superior – Mioceno Inferior (franja rosada en el oeste del mapa).

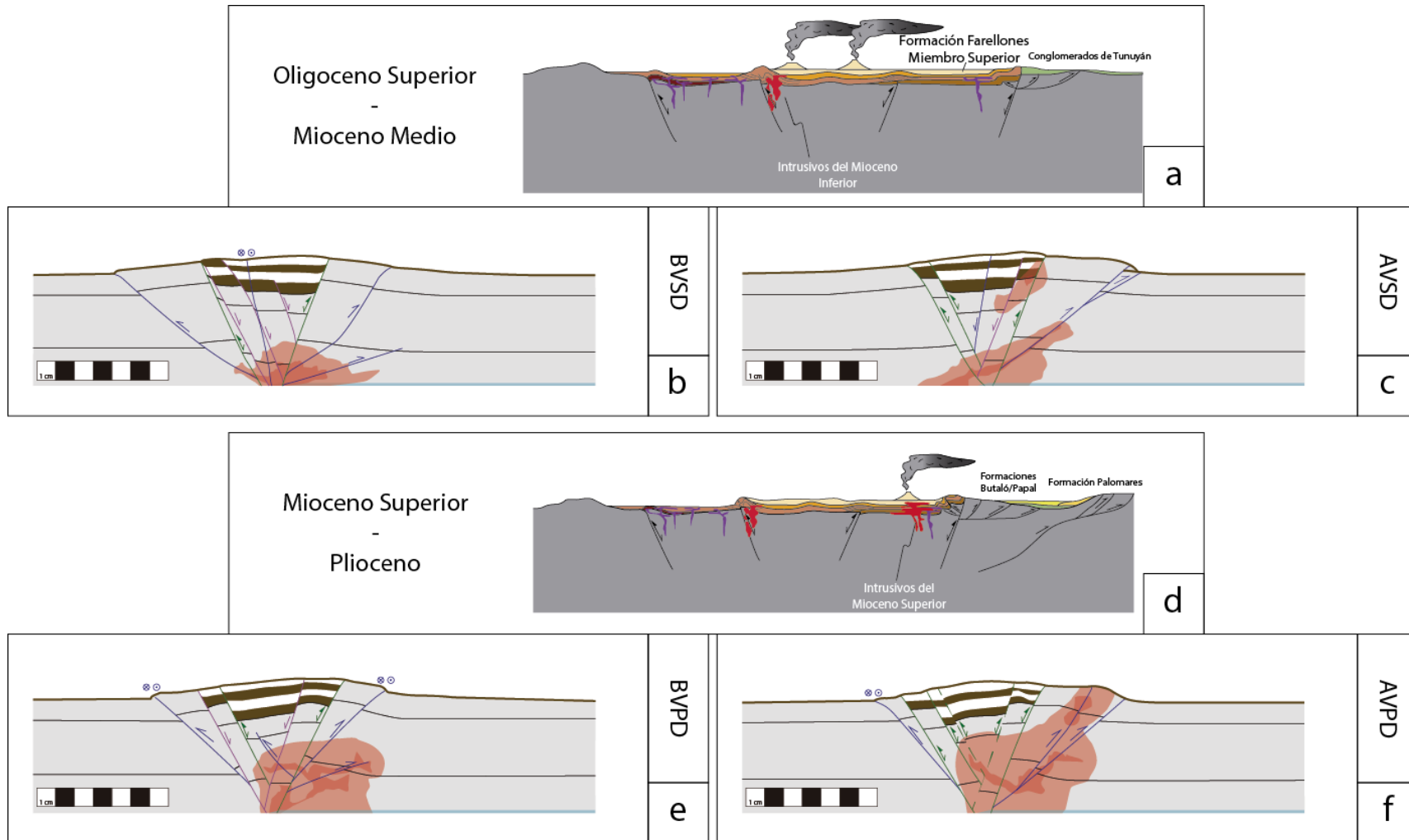


Figura 5.4 Esquema E-W comparativo entre el modelo de evolución de la etapa compresiva propuesto por Fock (2005, Modificado) y los modelos análogos de inversión tectónica obtenidos en este trabajo. a) Fase de inversión durante el Oligoceno Superior – Mioceno Medio (Fock, 2005). b) Perfil del resultado final del modelo análogo de inyección a baja velocidad durante la inversión (BVSD) del presente trabajo. c) Perfil del resultado final del modelo análogo de inyección a alta velocidad durante la inversión (AVSD) del presente trabajo. d) Fase de inversión, con menor compresión, Mioceno Superior – Plioceno (Fock, 2005). e) Perfil del resultado final del modelo análogo de inyección a baja velocidad posterior a la inversión (BVPD) del presente trabajo. f) Perfil del resultado final del modelo análogo de inyección a alta velocidad posterior a la inversión (AVPD) del presente trabajo. Los modelos de evolución de Fock (2005) (a y d) no presentan escala, pero el ancho de la cuenca es de unos 70 a 80 km; la escala que aparece en los perfiles de los modelos análogos de extensión mide 7 cm.

5.3. Limitaciones en la aplicación de los modelos

Lo primero que se considera dentro de las limitaciones en este tipo de estudios es el escalamiento. Si bien los factores de escala fueron calculados de forma apropiada según la teoría (Hubbert, 1937 y Ramberg, 1981), se tuvo que variar levemente uno de ellos para que las magnitudes sean fácilmente reproducibles en el laboratorio, tratando de ajustarse lo más posible a sus respectivos valores reales. Estas magnitudes reales, tanto de tiempo como de longitud, que debería tener el experimento son inaplicables de forma simultánea: si se escala correctamente el tiempo, la longitud sería demasiado alta para un modelo análogo; y viceversa. Es por esto que se decidió mantener la escala de tiempo fija, y variar levemente la escala de longitud, de modo que no afecte mayormente los resultados del estudio. Además, la escala de velocidad del magma y la de convergencia tuvo que ser diferente para permitir la sincronización de ambos eventos. Sin embargo, estas variaciones no perjudicaron el desarrollo de los modelos ni el análisis del trabajo.

Como se mencionó anteriormente, el procedimiento estándar en modelación analógica es aislar factores para analizar su influencia en la deformación. La naturaleza es más compleja que los modelos y no se pueden analizar tantos factores a la vez, por lo que solo se debe escoger un par de ellos. En la modelación no se consideraron factores como la erosión o la sedimentación durante la inversión, puesto que habría afectado los marcadores en superficie, con lo que se hubiese limitado el análisis de la deformación en planta.

El material utilizado para representar la corteza frágil fue una mezcla de harina de cuarzo con microesferas de vidrio. Esta mezcla se utilizó homogéneamente en todo el modelo, por lo que no se consideraron variaciones de reología entre las capas que lo conformaron. Por el mismo motivo, no se consideraron las variaciones entre lo que representa el basamento y lo que representa el relleno de la cuenca, que se diferenciarían en, por ejemplo, la densidad de roca o sedimento que compone cada uno. Según los resultados vistos en los capítulos anteriores, la composición del relleno de la cuenca no afectó mayormente el ascenso del intrusivo, el cual se propagó en general bajo el nivel de estos depósitos. Para el caso de la Cuenca de Abanico, el basamento es rocas mesozoicas sedimentarias y volcanosedimentarias; mientras que el relleno son depósitos cenozoicos volcánicos y volcanosedimentarios, por lo que el contraste entre las densidades sería leve.

Por otra parte, el dispositivo también generó algunas limitaciones. El borde del pistón indujo una discontinuidad de velocidad (VD) en donde se localizó la deformación (Malavielle, 1984; Balé, 1986; Allemand *et al.*, 1989; Ballard, 1989). Es por esto que se generaron más fallas normales a un lado de la cuenca, lo que no necesariamente se ve reflejado en los casos reales de la naturaleza. Así también, la orientación NNE a NE y la componente de rumbo de las fallas inversas formadas en la etapa de inversión fueron producto de la VD y del movimiento oblicuo del pistón. Resulta complejo poder aislar el efecto que es producido por el dispositivo de la real influencia de los parámetros analizados.

En cuanto a la evolución de la deformación en el tiempo, solo se pudo observar en planta, lo que limitaba el análisis del desplazamiento y variación de forma del intrusivo en profundidad. La opción de contar con tomografía, imágenes termográficas o algún otro medio no destructivo para poder visualizar internamente el sistema durante el experimento escapa de las posibilidades del trabajo.

El objetivo principal de este trabajo no es reproducir fielmente la Cuenca de Abanico de Chile Central, sino que es evaluar la influencia de la inyección de magmas en el desarrollo de estructuras, ya sean reactivadas o nuevas, para un caso general en una cuenca genérica. Es por esto que los resultados obtenidos no necesariamente se ajustan a la geometría o evolución de la Cuenca de Abanico, pues el desarrollo de esta cuenca es mucho más complejo y tiene asociado más factores que los aquí evaluados. El análisis es referencial, por lo que debe ser comparado a grandes rasgos, y no de manera detallada, entre el caso real y los modelos presentados.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en las experiencias de modelación analógica que modelaron procesos de extensión e inversión, con inyección de magmas durante distintas etapas y a distintas velocidades, permitieron establecer que esta inyección de fluidos es un factor relevante en la formación y desarrollo de estructuras de inversión, tanto fallas reactivadas como nuevas. Estos resultados fueron localmente comparados y aplicados a la distribución de las franjas de plutones que se encuentran en la Cuenca de Abanico en la Cordillera Principal de Chile Central, la que posterior a su extensión, experimentó de inversión tectónica.

6.1. Sobre los modelos con variación individual de inversión e inyección

1. En los modelos análogos que consideraron solo inyección de fluidos, se puede concluir que esta inyección afecta la deformación de la superficie y la forma del intrusivo de modo que:

- a. La inyección del fluido en el sistema genera en superficie una deformación tipo domo, con estructuras generadas por el intrusivo, las que le ayudarían a ascender.
- b. Una mayor proporción de microesferas sobre harina de cuarzo, es decir, una mezcla menos cohesiva, genera un aumento en la altura del intrusivo, junto con una mejor canalización en las estructuras que genera, pero también se relaciona con una mayor permeabilidad que da paso a un halo más grueso.
- c. Una mayor duración de la inyección se refleja en dimensiones del halo en planta más amplias, así como también en un mayor desarrollo de estas dimensiones sobre la altura de domo generado. Por lo tanto, se podría hablar de un leve desarrollo del intrusivo verticalmente en un inicio, para luego propagarse lateralmente.
- d. La velocidad con la que este fluido se inyecta afecta principalmente a la localización del intrusivo en las fallas, las que son directamente proporcionales. Esta mayor velocidad también se traduce en un halo más delgado en comparación con los casos de menor velocidad. Además, en los casos de velocidad de inyección baja (<100 mL/s) y muy alta (>200 mL/s), se produjo una migración del ascenso del intrusivo hacia fallas inversas secundarias del domo; mientras que en casos de valores medios se produjo un sistema de fallas más simple y definido.
- e. Las velocidades de inyección recomendadas serían entre 0.105 mL/s y 0.175 mL/s para baja y alta velocidad, respectivamente. Pues esto permite una inyección de duración adecuada, evita la solidificación del fluido durante el proceso, y genera resultados afines a los esperados según trabajos anteriores similares.

2. Los modelos con solo inversión tectónica (sin inyección de fluidos) a baja o a media velocidad de convergencia presentan algunas diferencias, pero en general resultan ser similares entre ellos:

- a. Durante la etapa de extensión se genera un sistema de graben, dentro del cual se generan más fallas normales que forman más grábenes al interior del primero. Posteriormente, durante la inversión, algunas de estas fallas normales se reactivan como fallas inversas de alto ángulo, además de formarse nuevas fallas inversas y de rumbo.
- b. Los modelos con convergencia a velocidad baja presentan una mayor elevación de la superficie según lo visto en las secciones verticales, lo que se debería a que esta velocidad menor permite un mayor desplazamiento en los planos de falla.
- c. Ambos modelos, a pesar de sus diferentes velocidades de convergencia (0.8 mm/min y 2.1 mm/min para baja y alta, respectivamente), presentan un ancho E-W de la deformación similar, con estructuras nuevas de rumbo NS a NE que generan en planta una forma sigmoidal.
- d. Para las dos velocidades de compresión, según las secciones verticales, se produce un mayor alzamiento del área en el lado este del sistema: las fallas orientales son de menor ángulo, y su traza se encuentra más distante del eje de la cuenca. En el modelo de baja velocidad de convergencia, este alzamiento es mayor tanto al este como al oeste del modelo que en el caso de alta velocidad, lo que estaría relacionado con el mayor desplazamiento en estos planos de falla.
- e. El fallamiento en ambos casos es similar, tanto en cantidad de fallas reactivadas y producidas como en longitud y distribución de ellas. Las diferencias que puedan presentar son leves, por lo que no afectaron en análisis de los modelos, y permiten ajustar la duración de la inversión con la de inyección para una sincronía de ambos factores.

6.2. Sobre los modelos con variación combinada de inversión e inyección

- a. La inyección de fluidos, independiente del momento en el que ocurra, afecta la deformación. Recíprocamente, las estructuras que existan al momento de la inyección también afectan el desarrollo del intrusivo.
- b. Los modelos con inyección posterior a la inversión tectónica (serie "PD") tienden a lograr una mayor elevación de la superficie, pues tiene un "doble período de alzamiento" con respecto al modelo de inversión sin inyección (modelo "NICD"). Por otro lado, los modelos con inyección durante la inversión (serie "SD") logran una menor elevación que los dos casos anteriores (serie PD y modelo NICD), lo que estaría asociado a una compensación entre ambos factores al actuar simultáneamente, junto con una mejor canalización dentro de las fallas.
- c. El ancho de los modelos de la serie SD es mayor que el de la serie PD, pues la primera crea patrones más complejos por la presencia del intrusivo al interior del sistema. Esto genera estructuras con una distribución más ancha que los de la serie PD, cuyo ancho se da principalmente por la inversión tectónica, y no tanto por la inyección.

d. Al comparar el alzamiento de las áreas en cada lado de la cuenca (tanto dentro como fuera de ella en cada caso), se encuentran tres grupos según la diferencia entre el lado este y el oeste: uno de diferencia leve (modelo NICD y BVAD); uno de diferencia media (modelo BVSD y AVAD); y uno de una diferencia alta (modelos AVSD, AVPD y BVPD). Los modelos del último grupo precisamente son los dos casos de inyección a alta velocidad y los dos casos con inyección posterior a la inversión. Estos casos presentan un basculamiento hacia el oeste del sistema, que sería producido por un mayor desarrollo de las estructuras en el borde oriental y/o por un ascenso preferencial del intrusivo por el este del modelo.

e. En todos los modelos, el acortamiento es principalmente absorbido por las estructuras al este del sistema, y secundariamente por las del oeste. Sin embargo, en la serie SD, el acortamiento que se absorbe mediante las estructuras occidentales es sustancialmente menor, lo que podría ser producido por una amortiguación de este por el intrusivo, que generaría un menor desplazamiento sobre las fallas oeste.

f. El acortamiento es principalmente absorbido por estructuras nuevas, cuyo menor ángulo permite un mayor desplazamiento en comparación con las fallas reactivadas de alto ángulo.

g. En general, para todos los modelos se producen agrupaciones similares de estructuras. Sin embargo, para el caso de la serie SD, existe un mayor fallamiento con manteo al oeste que en los otros casos. Además, esta serie presenta un doble conjunto de estructuras: uno interno, con fallas inversas y de rumbo NNE; y uno externo, con fallas inversas NS a NE.

h. En cuanto al intrusivo generado, se nota una tendencia a que este se canalice mejor en los modelos de la serie SD. En los casos de baja velocidad se distribuye entre varias fallas; mientras que en los de alta velocidad se canaliza en menos fallas, pero es más notorio. Los modelos de la serie PD no presentan una canalización notoria del intrusivo en las fallas, sino que solo puntualmente se ayuda de las estructuras existentes para ascender.

6.3. Sobre la aplicación de los modelos a la Cuenca de Abanico

a. En la fase extensional de los modelos, se generaron dos sistemas de fallas normales: uno con manteo al oeste; y otro con manteo al este. Se ve un arreglo de estructuras que forman un graben dentro de otro, similar a lo que ocurre en la Cuenca de Abanico, donde las fallas más exteriores, Sistema de Falla Infiernillo (“SFI”) y Sistema de Falla El Diablo (“SFED”), forman un graben, y dentro de él se genera otro graben que es controlado por el Sistema de Falla San Ramón en el borde occidental y el SFED en el oriental.

b. Durante la etapa de inversión, la reactivación de las fallas normales como inversas de alto ángulo ocurre tanto en los modelos como en el caso real. En este último se ha descrito reactivación en los tres sistemas de fallas principales (SFI, SFSR y SFED).

c. En el modelo de inyección a alta velocidad durante la inversión (“AVSD”), se produce un mayor fallamiento con vergencia este. Esto estaría generado por la presencia del intrusivo que asciende por el sistema, absorbe parte del acortamiento, y requiere más estructuras para su acomodo dentro del modelo. La asimetría que se encuentra en este modelo puede ser comparable con la que se presenta en el caso real de la Cuenca de Abanico, donde existe una ausencia de estructuras nuevas en el lado oeste, versus un desarrollo de FPC en el lado este de ella.

d. Los intrusivos de la Cuenca de Abanico se disponen principalmente en dos franjas paralelas entre ellas: una franja del Mioceno Inferior, temporalmente similar a la inversión; y una franja del Mioceno Medio a Superior, durante las últimas etapas de la inversión y posterior ella. En los modelos análogos, la serie SD sería la representante de la franja del Mioceno Inferior, donde se ve un control estructural de la ubicación del intrusivo, acorde a lo que se ve en esta franja, que está alineada con la traza del SFSR. Por otra parte, los modelos de la serie PD representarían a la franja del Mioceno Medio a Superior, que se encuentra cerca del SFED, pero no es tan notorio como la otra franja, por lo que en este caso habría un control estructural mucho menor.

6.4. Recomendaciones

Como se mencionó en un inicio, el dispositivo creado para este estudio se realizó basándose en dos trabajos anteriores, por lo que corresponde a una primera versión funcional de ambos aparatos. Si bien los dos objetivos del dispositivo fueron cumplidos, tanto individualmente como en conjunto, se derivan recomendaciones principalmente para poder realizar una versión mejorada del dispositivo de modelación.

El dispositivo no cuenta con un registro detallado de la presión del fluido inyectado ni de la velocidad discreta de este, sino que solo se calculó el caudal promedio que inyectó durante toda la prueba. Se podría implementar algún caudalímetro o algún registro de la presión que lleva el fluido dentro de la manguera.

No se pudo obtener registro de la evolución del intrusivo dentro del sistema, sino que solo se logró ver la forma final de este mediante cortes, los que tampoco permitían visualizar su forma en tres dimensiones. Es por esto que podría agregarse algún método no destructivo, ya sea con tomografías o cámaras termográficas, para poder comprender la deformación durante el experimento.

En cuanto a los materiales utilizados, estos cumplieron con los objetivos del trabajo. Sin embargo, la mezcla de microesferas de vidrio y harina de cuarzo no tuvieron un tamaño lo suficientemente fino para evitar la percolación del fluido en sus poros, creando un halo más grueso de lo que se esperaba según trabajos anteriores. Además, el comportamiento del material generó pequeñas diferencias entre modelos, principalmente en la fase de extensión, donde varió la cantidad de fallas normales y el ángulo y la traza de ellas; a pesar de esto, en general todos los modelos presentaron resultados similares, por lo que no se considera un factor relevante en el presente análisis, pero sí uno a tomar en consideración para próximas versiones de estos modelos.

Bibliografía

- Aguirre, L. 1960. Geología de los Andes de Chile Central, provincia de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas Boletín N°9 p. 1-70.
- Aguirre, L. Calderón, S. Vergara, M. Oliveros, V. Morata, D. Belmar, M. 2009. Edades isotópicas de rocas de los valles Volcán y Tinguiririca, Chile central. Congreso Geológico Chileno N°12 p. 1-4.
- Aguirre, L. Robinson, D. Bevins, R.E. Morata, D. Vergara, M. Fonseca, E. Carrasco, J. 2000. A low-grade metamorphic model for the Miocene volcanic sequences in the Andes of central Chile. New Zealand Journal of Geology & Geophysics Vol. 43 p. 83-93.
- Aguirre, R. 1999. Depositación y deformación de la secuencia volcánica terciaria en el sector cordillerano de Pata del Diablo, Cajón del Maipo. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile p. 1-60.
- Allemand, P. Brun, J.P. Davy, P. Van Den Driessche, J. 1989. Symétrie et asymétrie des rifts et mécanismes d'amincissement de la lithosphère. Bulletin de la Société Géologique de France 3 p. 445-451.
- Anderson, E.M. 1951. The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain. Olivier, Boyd (Eds.), Edinburgh.
- Baeza, O. 1999. Análisis de litofacies, evolución depositacional y análisis estructural de la Formación Abanico en el área comprendida entre los ríos Yeso y Volcán, Región Metropolitana. Andean Geology 37 N°1 p. 54-77.
- Balé, P. 1986. Tectonique caddomienne en Bretagne nord. Interaction décrochement chevauchement: champs de déformation et modélisations expérimentales. Ph.D. Thesis (Unpublished), Université de Rennes 1 p. 1-361.
- Ballard, J.F. 1989. Approche géologique et mécanique des décollements dans la croûte supérieure. Ph.D. Thesis (Unpublished), Université de Rennes 1 p. 1-302.
- Battaglia, J. Bachelery, P. 2003. Dynamic dyke propagation deduced from tilt variations preceding the March 9, 1998, eruption of the Piton de la Fournaise volcano. Journal of Volcanology and Geothermal Research 120 p. 289-310.
- Beccar, I. Vergara, M. Munizaga, F. 1986. Edades K-Ar de la Formación Farellones, en el cordón del cerro La Parva, Cordillera de los Andes de Santiago, Chile. Revista Geológica de Chile N°28-29 p. 109-113.
- Brun, J.P. 1999. Narrow rifts versus wide rifts: inferences for the mechanics of rifting from laboratory experiments. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A 357 p. 695-712.

- Brun, J.P. Nalpas, T. 1996. Graben inversion in nature and experiments. *Tectonics* 12 N°2 p. 677-687.
- Byerlee, J.D. 1978. Friction of rocks. *Pure and Applied Geophysics* 116 p. 615-626.
- Campbell, D. 2005. Termocronología del sector comprendido entre los ríos Rocín y Aconcagua: Implicancias en la evolución Meso- Cenozoica de la Zona. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile p. 1-113.
- Carrasco, J. 2000. La secuencia estratificada Valle Nevado de la Formación Farellones (Mioceno): química y metamorfismo de muy bajo grado. Tesis de Magíster, Departamento de Geología, Universidad de Chile p. 1-93.
- Carter, W. Aguirre, L. 1965. Structural Geology of Aconcagua province and its relationship to the central Valley Graben, Chile. . *Geological Society of America Bulletin* 76, N°6 p. 651-664.
- Charrier, R. 1973. Geología de las Provincias O'Higgins y Colchagua. Instituto de Investigación de Recursos Naturales (IREN), Santiago Publicación N°7 p. 1-69.
- Charrier, R. 1981. Geologie der chilenischen Hauptkordillere zwischen 34°30' südlicher Breite und ihre tektonische, magmatische und paleogeographische Entwicklung. *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen* 36 p. 1-270.
- Charrier, R. Baeza, O. Elgueta, S. Flynn, J.J. Gans, P. Kay, S.M. Muñoz, N. Wyss, A.R. Zurita, E. 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36° S.L.). *Journal of South American Earth Sciences* 15 p. 117-139.
- Charrier, R. Bustamante, M. Comte, D. Elgueta, S. Flynn, J.J. Iturra, N. Muñoz, N. Pardo, M. Thiele, R. Wyss, A.R. 2005. The Abanico Extensional Basin: Regional extension, chronology of tectonic inversion, and relation to shallow seismic activity and Andean uplift. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abh* 236 N° 1-2 p. 43-47.
- Charrier, R. Farías, M. Maksaev, V. 2009. Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el cenozoico en los Andes de Chile Norte y Central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 p. 5-35.
- Charrier, R. Flynn, J.J. Wyss, A. R. Zapatta, F. Swisher, C.C. 1997. Antecedentes bio y cronoestratigráficos de la Formación Coya - Machalí - Abanico, entre los ríos Maipo y Teno (33°55' y 35°10' L.S.), Cordillera Principal, Chile Central. *Congreso Geológico Chileno N°8, Actas Vol. 1* p. 465-469.
- Charrier, R. Hérail, G. Flynn, J.J. Riquelme, R. García, M. Croft, D. Wyss, A.R. 2000. El Cordón Chapiquiña-Belén en el borde occidental del Altiplano chileno:

significado paleogeográfico y contexto tectónico regional. Congreso Geológico Chileno N°9, Actas Vol. 1 p. 763-767.

Charrier, R. Pinto, L. Rodríguez, M.P. 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. Moreno, T. y Gibbons, W. (eds.) The Geology of Chile, The Geological Society: p. 21-114.

Charrier, R. Wyss, A.R. Flynn, J.J. Swisher, C.C. III. Norell, M.A. Zapatta, F. McKenna, M.C. Novaceck, M.J. 1996. New evidence for late Mesozoic - early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the upper Tinguiririca valley (35° S), Central Chile. Journal of South American Earth Sciences N°2, Vol. 9 p. 393-422.

Charrier, R. Wyss, A.R. Flynn, J.J. Swisher, C.C. III. Spichiger, S. Zapatta, F. 1994. Nuevos antecedentes estratigráficos y estructurales para las Formaciones Coya-Machalí y 111 Abanico, entre 33° 50' y 35° S, Cordillera Principal Chilena. Congreso Geológico Chileno, Concepción N°10 p. 1316-1319.

Cobbold, P.R. Jackson, M.P.A. 1992. Gum rosin (colophony); a suitable material for thermomechanical modelling of the lithosphere. Tectonophysics 210 p. 255-271.

Coira, B. Davidson, J. Mpodozis, C. Ramos, V.A. 1982. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. Earth-Science Reviews, Special Issue 18 p. 303-332.

Cornejo, P. Mahood, G. 1997. Seeing past the effects of re-equilibration to reconstruct magmatic gradients in plutons: La Gloria Pluton, central Chilean Andes. Contributions to Mineralogy and Petrology 127 p. 159-175.

Corti, G. Moratti, G. Sani, F. 2005. Relations between surface faulting and granite intrusions in analogue models of strike-slip deformation. Journal of Structural Geology 27 p. 1547-1562.

Daly, R.A. Manger, G.E. Clark, S.P. Jr. 1966. Density of rocks. En: Clark, S.P.Jr. (ed). Handbook of physical constants: Geological Society of America Memoir 97 p. 18-26.

Davy, P. 1986. Modélisation thermo-mécanique de la collision continentale. Sciences de la Terre. Université Rennes 1 p. 1-233.

Davy, P. Cobbold, P.R. 1991. Experiments on shortening of a 4-layer model of the continental lithosphere. Tectonophysics 188 p. 1-25.

de Saint Blanquat, M. Horsman, E. Habert, G. Morgan, S. Vanderhaeghe, O. Law, R. Tikoff, B. 2011. Multiscale magmatic cyclicity, duration of pluton construction, and the paradoxical relationship between tectonism and plutonism in continental arcs. Tectonophysics 500 p. 20-33.

- Deckart, K. Godoy, E. 2006. Barren igneous intrusives in the Central Andes: U/Pb geochemistry and Nd-Hf isotope geochemistry. South American Symposium on Isotopic Geology (Montevideo) N°5 Resúmenes p. 349-351.
- Del Ventisette Ch. Montarani, D. Sani, F. Bonini, M. 2006. Basin inversion and fault reactivation in laboratory experiments. *Journal of Structural Geology* 28 p. 2067-2083.
- Dingwell, D.B. Bagdassarov, N.S. Bussov, G.Y. Webb, S.L. 1993. Magma rheology. En: Luth, R.W. (Ed.), *Experiments at high pressure and applications to the Earth's mantle*. Mineralogists Association of Canada Short Course Handbook 21 p. 131-196.
- Dixon, J.M. Simpson, D.G. 1987. Centrifuge modelling of laccolith intrusion. *Journal of Structural Geology* N°1, Vol. 9 p. 87-103.
- Dixon, J.M. Summers, J.M. 1985. Recent developments in centrifuge modelling of tectonic processes: equipment, model construction techniques and rheology of model materials. *Journal of Structural Geology* N°1, Vol. 7 p. 83-102.
- Dixon, J.M. Summers, J.M. 1986. Another word on the rheology of silicone putty. *Journal of Structural Geology* N°5, Vol. 8 p. 593-595.
- Drake, R. Charrier, R. Thiele, R. Munizaga, F. Padilla, H. Vergara, M. 1982. Distribución y edades K-Ar de volcánitas post-Neocomianas en la Cordillera Principal entre 32° y 36° L. S. Implicaciones estratigráficas y tectónicas para el Meso-Cenozoico de Chile Central. *Congreso Geológico Chileno* N°3, Vol. 1 p. D42-D78.
- Drake, R. Curtiss, G. Vergara, M. 1976. Potassium-argon dating of igneous activity in the central Chilean Andes – latitude 33°S. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* Vol. 1 p. 285-295.
- Dubois, A. Odonne, F. Massonnat G. Lebourg T. Fabre, R. 2002. Analogue modeling of fault reactivation: tectonic inversion and oblique remobilisation of grabens. *Journal of Structural Geology* 24 p. 1741-1752.
- Farías, M. 2007. Tectónica y erosión en la evolución del relieve de los Andes de Chile Central durante el Neógeno. Tesis Doctoral, Universidad de Chile y Université de Toulouse III, (inédito), Santiago y Toulouse p. 1-194.
- Farías, M. Charrier, R. Carretier, S. Martinod, J. Fock, A. Campbell, D. Cáceres, J. Comte, D. 2008. Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33°-35°S). *Tectonics* 27 p. 1-22.
- Farías, M. Charrier, R. Comte, D. Martinod, J. Hérial, G. 2005. Late Cenozoic deformation and uplift of the western flank of the Altiplano: Evidence from the

depositional, tectonic, and geomorphologic evolution and shallow seismic activity (northern Chile at 19° 30'S). *Tectonics* 24 N°4.

- Farías, M. Comte, D. Charrier, R. 2006. Sismicidad superficial en Chile central: Implicancias para el estado cortical y crecimiento de los Andes Centrales Australes. Congreso Geológico Chileno, Univ. Católica del Norte, Antofagasta, Chile, 7 – 11 Aug N°9.
- Farías, M. Comte, D. Charrier, R. Martinod, J. David, C. Tassara, A. Tapia, F. Fock, A. 2010. Crustal-scale structural architecture in Central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building. *Tectonics* 29 p. 1-22.
- Faugère, E. Brun, J.-P. 1984. Modélisation expérimentale de la distension continentale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 299 p. 365-370.
- Flynn, J.J. Charrier, R. Croft, D.A. Gans, P.B. Herriott, T.M. Wertheim, J.A. Wyss, A.R. 2008. Chronologic implications of new Miocene mammals from the Cura-Mallín and Trapa- Trapa Formations, Laguna del Laja area, south Central Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 26 p. 412-423.
- Flynn, J.J. Wyss, A.R. Charrier, R. Swisher, C.C. III. 1995. An early Miocene anthropoid skull from the Chilean Andes. *Nature* 373 p. 603- 607.
- Fock, A. 2005. Cronología y Tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34° S. Tesis de Magíster, Departamento de Geología, Universidad de Chile p. 1-179.
- Fock, A. Charrier, R. Farías, M. Muñoz, M. 2006. Fallas de vergencia oeste en la Cordillera Principal de Chile Central: Inversión de la cuenca de Abanico (33°–34°S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina, Serie Publicación Especial* 6 p. 48-55.
- Fuentes, F. 2004. Petrología y metamorfismo de muy bajo grado de unidades volcánicas oligoceno-miocenas en la ladera occidental de los Andes de Chile central (33°S). Tesis de Magíster, Departamento de Geología, Universidad de Chile p. 1-401.
- Fuentes, F. Aguirre, L. Vergara, M. Valdebenito, L. Fonseca, E. 2004. Miocene Fossil hydrothermal system associated with a volcanic complex in the Andes of Central Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* N°1-2, Vol. 138 p. 139-161.
- Fuentes, F. Vergara, M. Aguirre, L. Féraud, G. 2002. Relaciones de contacto de unidades volcánicas terciarias de los Andes de Chile central (33°S): una reinterpretación sobre la base de dataciones 40Ar/39Ar. *Revista Geológica de Chile* N°2, Vol. 29 p. 207-225.

- Fuentes, F. Vergara, M. Nyström, J.O. Levi, B. Aguirre, L. 2000. Geology and geochemistry of Tertiary volcanic rocks from the Cuesta de Chacabuco area. Congreso Geológico Chileno N°9, Actas Vol. 2 p. 656-659.
- Galland, O. Cobbold, P.R. de Bremond d'Ars, J. Hallot, E. 2003. Physical models of magmatic intrusion during thrusting. *Terra Nova* 15 p. 405-409.
- Galland, O. Cobbold, P.R. Hallot, E. de Bremond d'Ars, J. Delavaud, G. 2006. Use of vegetable oil and silica powder for scale modelling of magmatic intrusion in a deforming brittle crust. *Earth and Planetary Science Letters* 243 p. 786-804.
- Galland, O. de Bremond d'Ars, J. Cobbold, P.R. Hallot, E. 2007. Rise and emplacement of magma during horizontal shortening of the brittle crust: insights from experimental modelling. *Journal of Geophysical Research* Vol. 112.
- Galland, O. Planke, S. Neumann, E. Malthe-Sorensen, A. 2009. Experimental modelling of shallow magma emplacement: Application to saucer-shaped intrusions. *Earth and Planetary Science Letters* 277 p. 373-383.
- Gana, P. Wall, R. 1997. Evidencias geocronológicas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y K-Ar de un hiatus Cretácico Superior- Eoceno en Chile central (33° - $33^\circ 30' \text{S}$). *Revista Geológica de Chile* N°2, Vol. 24 p. 145-163.
- Gartrell, A. Hudson, C. Evans, B. 2005. The influence of basement faults during extension and oblique inversion of the Makassar Straits rift system: insights from analog models. *AAPG Bulletin* 89, N°4 p. 495-506.
- Giambiagi, L.B. 2003. Deformación cenozoica de la faja plegada y corrida del Aconcagua y la Cordillera Frontal, entre los $33^\circ 30'$ y $33^\circ 45' \text{S}$. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* N°1, Vol. 58 p. 85-96.
- Giambiagi, L.B. Álvarez, P.P. Godoy, E. Ramos, V.A. 2003. The Control of pre-existing extensional structures on the evolution of the southern sector of the Aconcagua Fold and Thrust Belt, southern Andes. *Tectonophysics* 369 p. 1-19.
- Giambiagi, L.B. Ramos, V.A. 2002. Structural evolution of the Andes in a transitional zone between flat and normal subduction ($33^\circ 30'$ - $33^\circ 45' \text{S}$), Argentina and Chile. *Journal of South American Earth Sciences* Vol. 15 p. 101-116.
- Giambiagi, L.B. Ramos, V.A. Godoy, E. Álvarez, P.P. 2002. Deformational History of the Andes, between 33° and 34° South Latitude, Chile and Argentina. *Proceedings Fifth ISAG*, Toulouse, 16-18 September 2002 p. 247-250.
- Giambiagi, L.B. Ramos, V.A. Godoy, E. Álvarez, P.P. Orts, S. 2003. Cenozoic deformation and tectonic style of the Andes, between 33° and 34° south latitude. *Tectonics* N°4, Vol. 22 p. 1041-1059.

- Godoy, E. Lara, L. 1994. Segmentación estructural andina a los 33°-34°: nuevos datos en la Cordillera Principal. Congreso Geológico Chileno, Concepción N°7, Actas Vol. 2 p. 1344-1348.
- Godoy, E. Navarro, M. Rivera, O. 1996. Zonas triangulares en el borde occidental de la Cordillera Principal (32°30'-34°30'), Chile: una solución a la paradoja Abanico-Farellones. Congreso Geológico Argentino, No. 13, y Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Buenos Aires N°3, Actas Vol. 2 p. 373-381.
- Godoy, E. Yañez, G. Vera, E. 1999. Inversion of an Oligocene volcano-tectonic basin and uplifting of its superimposed Miocene magmatic arc in the Chilean Central Andes: first seismic and gravity evidences. *Tectonophysics* Vol. 306 p. 217-236.
- González, O. 1963. Observaciones geológicas en el valle del Río Volcán. *Revista Minerale*s, Santiago N°81, Vol. 17 p. 20-61.
- Hoek, E. Marinos, P. Benissi, M. 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 57 p. 151-160.
- Hubbert, M.K. 1937. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Geological Society of America Bulletin* Vol. 48 p. 1459-1520.
- Jaros, J. Zelman, J. 1967. La relación estructural entre las formaciones Abanico y Farellones en la Cordillera del Mesón, Provincia de Aconcagua, Chile. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago Publication N°34 p. 1-8.
- Jerez, D. 2007. Contribución a la geocronología y geoquímica de los intrusitos Estero Yerba Loca y Batolito San Francisco, Cordillera de Chile central. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile p. 1-58.
- Johnson, G.R. Olhoeft, G.R. 1984. Density of rocks and minerals. Carmichael, R.S. (ed) CRC. *Handbook of physical properties of rock* Vol. 3 p. 1-38.
- Jordan, T.E. Burns, W.M. Veiga, R. Pángaro, F. Copeland, P. Kelley, S. Mpodozis, C. 2001. Extension and basin formation in the Southern Andes caused by increased convergence rate: A mid-Cenozoic trigger for the Andes. *Tectonics* N°3, Vol. 20 p. 308-324.
- Jordan, T.E. Reynolds III, J.H. Ericsson, J.P. 1997. Variability in age of initial shortening and uplift in the central Andes, 16°-33°30'S. En: *Tectonic Uplift and Climate Change*, (Ruddiman, W.; editor) Plenum p. 41-61.
- Kay, S.M. Godoy, E. Kurtz, A. 2005. Episodic arc migration, crustal thickening, subduction erosion, and magmatism in the south-central Andes. *Geological Society of America Bulletin* 117 p. 67-88.

- Kay, S.M. Kurtz, A. 1995. Magmatic and tectonic characterization of the El Teniente region. Informe Inédito para CODELCO Chile p. 1-180.
- Klohn, C. 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas Boletín N° 8 p. 1-95.
- Krantz, R.W. 1991. Measurements of friction coefficient and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sand mixture. Tectonophysics Vol. 188. p 203-207.
- Kurtz, A. Kay, S.M. Charrier, R. Farrar, E. 1997. Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region, Central Chile (34°-35°S). Revista Geológica de Chile N°1, Vol. 24 p. 75-90.
- Lamb, S. Hoke, L. Kennan, L. Dewey, J. 1997. Cenozoic evolution of the Central Andes in Bolivia and northern Chile. En Burg, J. y Ford, M. (eds.) Orogeny through time. Journal Geological Society. Special Publication 121 p. 237-264.
- Lamplugh, G.W. 1920. The structure of the Weald and analogous tracts. Quarterly Journal of the Geological Society of London 15 p. 73-95.
- Letouzey, J. 1990. Fault reactivation, inversion and fold-thrust belt. En: Letouzey, J. (Ed.), Petroleum and Tectonic in Mobile Belts. Technip, Paris p. 101-128.
- Levi, B. Aguirre, L. Nyström, J. Padilla, H. Vergara, M. 1989. Low-grade regional metamorphism in the Mesozoic-Cenozoic volcanic sequences of the Central Andes. Journal of Metamorphic Petrology Vol. 7 p. 487-495.
- Malavielle, J. 1984. Modélisation expérimentale des chevauchements imbriqués: application aux chaînes de montagnes. Bulletin de la Société Géologique de France N°1, Vol. 7 p. 129-138.
- Malbrán, F. 1986. Geología del Cuadrángulo Río Clarillo y de la parte norte del Cuadrángulo Sierras de Bellavista, hoya del río Tinguiririca. Tesis de Magíster, Departamento de Geología, Universidad de Chile p. 1-221.
- Malumián, N. Ramos, V.A. 1984. Magmatic intervals, transgression-regression cycles and oceanic events in the Cretaceous-Tertiary of southern South America. Earth and Planetary Science Letters 67 p. 228-237.
- Martinez, F. Bonini, M. Montanari, D. Corti, G. 2016. Tectonic inversion and magmatism in the Lautaro Basin, northern Chile: A comparative approach from field data and analog models. Journal of Geodynamics N° 94-95 p. 68-83.
- Martinod, J. 1991. Instabilités périodiques de la lithosphère (Flambage, Boudinage) en compression et en extension. . Thèse de l'Université de Rennes 1.

- McClay, K.R. White, M.J. 1995. Analogue modelling of orthogonal and oblique rifting. *Marine and Petroleum Geology* 12 p.137-151.
- Medina, C.R. 2001. Condiciones de depositación y deformación de la secuencia miocénica en el sector cordillerano de San Alfonso, Cajón del Maipo, Región Metropolitana, Chile. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile p. 1-62.
- Merle, O. Vendeville, B. 1992. Modélisation analogique de chevauchements induits par des intrusions magmatiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 315 p. 1541-1547.
- Merle, O. Vendeville, B. 1995. Experimental modelling of thin-skinned shortening around magmatic intrusions. *Bulletin of Volcanology* 57 p. 33-43.
- Montecinos, P. Chärer, U. Vergara, M. Aguirre, L. 2008. Lithospheric origin of Oligocene-Miocene magmatism in central Chile: U-Pb ages and Sr- Pb-Hf isotope composition of minerals. *Journal of Petrology* 49 N°1 p. 555-580.
- Montecinos, P.R. 2008. Edad y petrogénesis del magmatismo Oligoceno-Mioceno de los Andes de Chile central a los 33°S: implicación geodinámica para el margen de América del Sur. . Tesis de Doctorado, Departamento de Geología, Universidad de Chile p. 1-159.
- Moscoso, R. Padilla, H. Rivano, S. 1982. Hoja Los Andes, Región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile Carta Geológica de Chile N°52, 1:250.000 p. 1-67.
- Mpodozis, C. Ramos, V.A. 1989. The Andes of Chile and Argentina. *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and energy resources. Circum-Pacific Council for Energy and Hydrothermal Resources, Earth Sciences Series, Houston, Texas Vol. 11 p. 59-90.*
- Munizaga, F. Vicente, J.-C. 1982. Acerca de la zonación plutónica y del volcanismo mioceno en los Andes del Aconcagua (La. 32-33°S): datos radiométricos K-Ar. *Revista Geológica de Chile* 16 p. 3-21.
- Muñoz, C. 2007. Modelación analógica de la influencia de la sedimentación en la inversión tectónica. Aplicación a las formaciones cenozoicas Abanico y Farellones (33°-36°S), Chile Central. Tesis de Magíster, Departamento de Geología, Universidad de Chile p. 1-121.
- Muñoz, M. 2005. Geoquímica, metamorfismo y petrogénesis de la franja oriental de la Formación Abanico en Chile central, área de El Volcán, Cajón del Maipo (33°50'S, 70°12'-70° 05'W). Tesis de Magíster, Departamento de Geología, Universidad de Chile p. 1-173.

- Muñoz, M. Deckart, K. Charrier, R. Fanning, M. 2009. New geochronological data on Neogene intrusive rocks from the high Andes of central Chile (33°15'-34°00'S). Congreso Geológico Chileno N°12, Actas p. 1-4.
- Muñoz, M. Fuentes, F. Vergara, M. Aguirre, L. Nyström, J.O. Féraud, G. Demant, A. 2006. Abanico East Formation: Petrology and geochemistry of volcanic rocks behind the Cenozoic arc front in the Andean Cordillera, central Chile (33°50'S). *Revista Geológica de Chile* 33 p. 109-140.
- Muñoz-Sáez, C. Pinto, L. Charrier, R. Nalpas, T. 2014. Influence of depositional load on the development of a shortcut fault system during the inversion of an extensional basin: The Eocene-Oligocene Abanico Basic case, central Chile Andes (33°-35°S). *Andean Geology* 41 p. 1-28.
- Nalpas, T. 1996. Inversion des grabens du Sud de la Mer du Nord. Données de subsurface et modélisation analogique. *Mémoires de Géosciences Rennes* p. 71-246.
- Nalpas, T. Brun, J.P. 1993. Salt flow and diapirism related to extension at crustal scale. *Tectonophysics* 228 p. 349-362.
- Nalpas, T. Le Douaran, S. Brun, J.P. Unternehr, P. Richert, J.P. 1995. Inversion of the Broad Fourteens Basin (offshore Netherlands), a small scale model investigation. *Sedimentary Geology* 95 p. 237-250.
- Navarro, M. 2001. Estratigrafía y estilo estructural de las formaciones del margen occidental de la Cordillera Principal, en el norte de la VI región. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile p. 1-77.
- Nyström, J.O. Parada, M.A. Vergara, M. 1993. Sr- Nd isotope compositions of Cretaceous to Miocene volcanic rocks in central Chile: a trend towards a MORB signature and a reversal with time. *Proceedings of the Second International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG)*, Oxford, England, Editions ORSTOM p. 21-23.
- Nyström, J.O. Vergara, M. Morata, D. Levi, B. 2003. Tertiary volcanism during extension in the Andean foothills of central Chile (33°15'-33°45'S). *Geological Society of America Bulletin* 115 N°12 p. 1523-1537.
- Panien, M. Schreurs, G. Pfiffner, A. 2005. Sandbox experiments on basin inversion: testing the influence of basin orientation and basin fill. *Journal of Structural Geology* 27 p. 433-445.
- Pardo-Casas, F. Molnar, P. 1987. Relative motion of the Nazca (Farallón) and South American Plates since late Cretaceous time. *Tectonics* N°3, Vol. 6 p. 233-284.
- Petford, N. Kerr, R.C. Lister, J.R. 1993. Dike transport of granitoid magmas. *Geology* 21 p. 845-848.

- Pinto, L. Hérail, G. Charrier, R. 2004. Sedimentación sintectónica asociada a las estructuras neógenas en el borde occidental del plateau andino en la zona de Moquella (19°15'S, Norte de Chile). *Revista Geológica de Chile* 31 N°1 p. 19-44.
- Pinto, L. Muñoz, C. Nalpas, T. Charrier, R. 2010. Role of sedimentation during basin inversion in analogue modelling. *Journal of Structural Geology* 32 p. 554-565.
- Polacci, M. Papale, P. Del Seppia, D. Giordano, D. Romano, C. 2004. Dynamics of magma ascent and fragmentation in trachytic versus rhyolitic eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 131 p. 93-108.
- Puvost, P. 1930. Sedimentation et subsidence. Centenaire de la Societe Geologique de France, Livre Jubilaire 1830-1930 Tome II, Paris p. 1-443.
- Ramberg, H. 1967. Gravity, Deformation and the Earth's Crust in Theory, Experiments and Geologic Application, 1st ed. Academic Press, London p. 1-214.
- Ramberg, H. 1981. Gravity, Deformation and the Earth's Crust in Theory, Experiments and Geologic Application, 2nd ed. Academic Press, London p. 1-452.
- Ramos, V.A. 1988. Late Proterozoic-early Paleozoic of South America: A collisional history. *Episodes* 11 p. 168-174.
- Ramos, V.A. Alvarez, P.P. Aguirre Urreta, M.B. Godoy, E. 1997. La Cordillera Principal a la latitud del paso Nieves Negras (33°50'S), Chile-Argentina. *Congreso Geológico Chileno N°8, Actas* p. 1704-1708.
- Ramos, V.A. Munizaga, F. Kay, S.M. 1991. El magmatismo cenozoico a los 33°S de latitud: geocronología y relaciones tectónicas. *Congreso Geológico Chileno, Viña del Mar N°6* p. 892-896.
- Rauld, R. 2002. Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago Oriente, entre el río Mapocho y la quebrada de Macul. *Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile* p. 1-57.
- Richard, P. 1991. Experiments on faulting in a two-layered cover sequence overlying a reactivated basement fault with oblique-slip. *Journal of Structural Geology* Vol 13, N°4 p. 459-469.
- Riquelme, R. Hérail, G. Martinod, J. Charrier, R. Darrozes, J. 2007. Late Cenozoic geomorphologic signal of Andean forearc and tilting associated with the uplift and climate changes of the Southern Atacama Desert. *Geomorphology* 86, N°3-4 p. 283-306.
- Rivano, S. Godoy, E. Vergara, M. Villarroel, R. 1990. Redefinición de la Formación Farellones en la Cordillera de los Andes de Chile Central (32°-34° S). *Revista Geológica de Chile* N°2, Vol. 17 p. 205-214.

- Rivano, S. Sepúlveda, P. 1986. Hoja Illapel, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile 69. 132 p. 1 mapa escala 1:250.000.
- Rivano, S. Sepúlveda, P. Boric, R. Espiñeira, D. 1993. Hojas Quillota y Portillo, V Región. Servicio Nacional de Geología y Minería Carta Geológica de Chile N°73.
- Roman, D.C. Power, J.A. Moran, S.C. Cashman, K.V. Doukas, M.P. Neal, C.A. Gerlach, T.M. 2004. Evidence for dike emplacement beneath Iliamna Volcano, Alaska in 1996. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 130 p. 265-284.
- Román-Berdiel, T. Gapais, D. Brun, J.P. 1997. Granite intrusion along strike-slip zones in experiment and nature. *American Journal of Science* 297 p. 651-678.
- Romano, C. Giordano, D. Papale, P. Mincione, V. Dingwell, D.B. Rosi, M. 2003. The dry and hydrous viscosities of alkaline melts from Vesuvius and Phlegrean Fields. *Chemical Geology* 202 p. 23-38.
- Schellart, W.P. 2000. Shear test results for cohesion and friction coefficient for different granular material: scaling implication for their usage for analogue modelling. *Tectonophysics* 324 p. 1-16.
- Sellés, D. 1999. La Formación Abanico en el Cuadrángulo Santiago (33°15'- 33°30'S, 70°30'- 70°45'O), Chile Central. *Estratigrafía y Geoquímica. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile* p. 1-154.
- Sellés, D. 2000. La relación discordante entre las Formaciones Abanico y Las Chilcas en la localidad de Angostura: implicancias regionales. *Congreso Geológico Chileno N°9, Actas Vol. 1* p. 555-558.
- Sellés, D. Gana, P. 2001. Geología del Area Talagante-San Francisco de Mostazal, Regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica, 1 mapa escala 1:100.000, Santiago N°74 p. 1-30.
- SERNAGEOMIN. 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería. *Publicación Geológica Digital N°4*. (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.
- Shemenda, A.I. 1983. Similarity criteria in mechanical modeling of tectonic processes. *Soviet Geology and Geophysics* 10 p. 10-19.
- Somoza, R. 1998. Updated Nazca (Farallón)–South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences* N°3, Vol. 11 p. 211-215.

- Spence, D.A. Turcotte, D.L. 1985. Magma-driven propagation of cracks. *Journal of Geophysical Research* 90 p. 575-580.
- Spera, F.J. 1980. Aspects of magma transport. En: R.B. Hargraves (Ed.), *Physics of Magmatic Processes*, Princeton University Press, Princeton, NJ p. 265-323.
- Stern, C.R. Skewes, M.A. 1995. Miocene to present magmatic evolution at the northern end of the Andean Southern Volcanic Zone, Central Chile. *Revista Geológica de Chile* 22 N°2 p. 261-272.
- Stille, H. 1924. *Grundfragen der vergleichenden Tektonik*. Gebriider Borntraeger, Berlin p. 1-443.
- Thiele, R. 1980. Hoja Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería Carta Geológica de Chile N°29 p. 1-21.
- Thiele, R. Beccar, I. Levi, B. Nyström, J.O. Vergara, M. 1991. Tertiary Andean volcanism in a caldera-graben setting. *Geologische Rundschau* Vol. 80 p. 179-186.
- Tondji Biyo, J.J. 1995. Chevauchements et bassins compressifs, influence de l'érosion et de la sédimentation. *Géosciences Rennes* N° 59 p. 1-426.
- Vergara, M. Drake, R. 1978. Edades potasio-argón y su implicancia en la geología regional de Chile. Universidad de Chile, Departamento de Geología, Comunicaciones N°23 p. 1-11.
- Vergara, M. Drake, R. 1979. Edades K/Ar en secuencias volcánicas continentales postneocomianas de Chile Central; su depositación en cuencas intermontanas restringidas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* Vol. 34 p. 42-52.
- Vergara, M. Levi, B. Villarroel, R. 1993. Geothermal-type alteration in a burial metamorphosed volcanic pile, central Chile. *Journal of Metamorphic Geology* Vol. 11 p. 449-454.
- Vergara, M. López, L. 1980. Geología y Petrología de los intrusivos subvolcánicos de la Pre-Cordillera Andina, ente Santiago y Colina. *Comunicaciones* 29 p. 1-21.
- Vergara, M. López-Escobar, L. Palma, J.L. Hickey-Vargas, R. Roeschmann, C. 2004. Late Tertiary episodes in the area of the city of Santiago de Chile: new geochronological and geochemical data. *Journal of South American Earth Sciences* 17 p. 227-238.
- Vergara, M. Morata, D. Villarroel, R. Nyström, J.O. Aguirre, L. 1999. ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages, very low-grade metamorphism and geochemistry of the volcanic rocks from "Cerro El Abanico", Santiago Andean Cordillera (33°30'S-70°30'-70°25'W). *Fourth International Symposium on Andean Geodynamics, Extended Abstracts Volume*. Georg August Universität, Göttingen p. 785-788.

- Voigt, E. 1963. Uber Randtrogge vor Scholtenrandern und ihre Bedeutung im Gebiet mit der Mitteleuropaischen Senke und angrenzender Gebiete. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 114 p. 378-418.
- Wall, R. Sellés, D. Gana, P. 1999. Area Tiltit-Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería Mapas Geológicos N°11.
- Weijermars, R. Jackson, M.P.A. Vendeville, B. 1993. Rheological and tectonics modeling of salt provinces. Tectonophysics 217 p. 143-174.
- Weijermars, R. Schmeling, H. 1986. Scaling of Newtonian and non-Newtonian fluid dynamics without inertia for quantitative modelling of rock flow due to gravity (including the concept of rheological similarity). Physics of the Earth and Planetary Interiors 43 p. 316-330.
- Wyss, A.R. Flynn, J.J. Norell, M.A. Swisher, C.C. III. Novacek, M.J. McKenna, M.C. Charrier, R. 1994. Paleogene Mammals from the Andes of Central Chile: A preliminary taxonomic, biostratigraphic, and geochronologic assesment. American Museum Novitates N° 3098 p. 1-31.
- Yrigoyen, M. 1993. Los depósitos sinorogénicos terciarios. En: Ramos, V.A. (ed.) Geología y Recursos Naturales de Mendoza, 12º Congreso Geológico Argentino y 2º congreso de Exploración de Exploración de Hidrocarburos (Mendoza) Relatorio 1 p. 123-148.
- Zurita, E. 1999. Historia de enterramiento y exhumación de la Formación Abanico Coya-Machalí, Cordillera Principal, Chile Central. Tesis de Magíster, Departamento de Geología, Universidad de Chile p. 1-156.
- Zurita, E. Muñoz, N. Charrier, R. Harambour, S. Elgueta, S. 2000. Madurez termal de la materia orgánica de la Formación Abanico = Coya-Machalí, Cordillera Principal, Chile Central: resultados e interpretación. Congreso Geológico Chileno N° 9, Actas Vol. 1 p. 726-730.

ANEXOS

ANEXO 1: DETALLE DE LOS MODELOS REALIZADOS

Previo a los modelos considerados en los resultados del presente trabajo, se realizó una serie de pruebas para fijar algunos parámetros utilizados en los modelos finales. A continuación, en la Tabla A.1 se muestra el detalle de los parámetros, y más adelante se presentan algunas fotografías, además de algunos comentarios sobre cada experiencia.

Tabla A.1: Detalle de todos los modelos realizados en el presente trabajo. Se muestran tanto los descartados como los considerados válidos para los resultados preliminares, ya sean modelación de la inyección sin inversión (S/M) como modelación de la inversión sin inyección (S/I). Ver más detalles del modelo en el texto.

Código	Amperaje motor (Å)	% Bomba	Tiempo para aflorar (min)	mE:HC	Altura (cm)	Sedim.	Extensión (cm)	Compr. (cm)	Áng. Oblic.	Modelo Válido
T01M2	-	S/I	S/I	0:01	-	-	2	0	-	
T02I	S/M	10%	7:38	20:02	6	-	-	-	-	
T03I	S/M	10%-20%	16:54	20:03	6	-	-	-	-	
T03I2	S/M	10%	No inyectó	20:03	6	-	-	-	-	
T03I3	S/M	20%	4:29	20:03	6	-	-	-	-	
T03I4	S/M	15%	45:31	20:03	6	-	-	-	-	
T04I	S/M	15%	13:41	0:01	6	-	-	-	-	
T03M2	4,5	S/I	S/I	20:03	6	Sí	2	2	30	Sí
T03ME	4,5	S/I	S/I	20:03	6	Sí	2	0	-	Sí
T03IK	S/M	15%	9:17	20:03	6	-	-	-	-	
T05IA	S/M	10%	18:37	24:04	6	-	-	-	-	
T05I	S/M	15%	9:12	24:04	6	-	-	-	-	Sí
T06I	S/M	15%	26:00 s/afl	20:03	8	-	-	-	-	
T06I2	S/M	10%	20:00 s/afl	20:03	6	-	-	-	-	Sí
T07I	S/M	20%	10:12	20:04	6	-	-	-	-	Sí
BNI1	4,5 E; 6,0 C	-	-	20:03	6	Sí	2	2	30	Sí
BNM1	S/M	15% (6,4 mL/min)	20:00 s/afl	20:03	6	-	-	-	-	Sí
BNM2	S/M	30% (15 mL/min)	20:00 s/afl	20:03	6	-	-	-	-	Sí
NDFB	S/M	15% (7,8 mL/min)	21:40	20:04	6	-	-	-	-	Sí
NDFB2	S/M	20% (10 mL/min)	20:00 s/afl	20:03	6	-	-	-	-	
MI1	S/M	15%	20:00 s/afl	20:05	6	-	-	-	-	
MI2	S/M	15% (8,4 mL/min)	20:00 s/afl	20:05	6	-	-	-	-	Sí
MI3	S/M	10%	4:32	20:03	6	-	-	-	-	Sí
BVND	S/M	10% (9 mL/min)	1:38	20:05	6	-	-	-	-	
BVND2	S/M	10% (8,4 mL/min)	2:32	20:03	6	-	-	-	-	

A1.1. Serie T01

a. T01M2

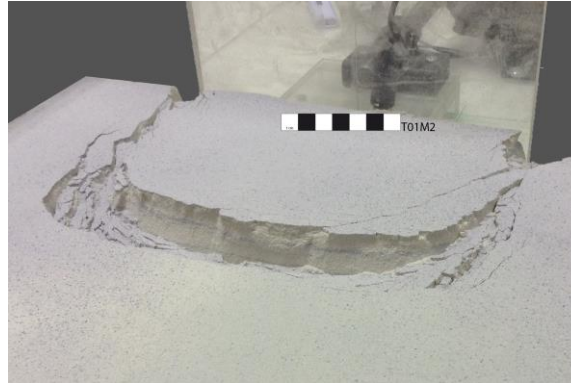


Figura A1 Modelo T01M2: Solo extensión (2 cm). Vista en perspectiva. La mezcla utilizada (mE:HC=0:1) produjo fracturas verticales abiertas en lugar de fallas normales durante la extensión. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1.

A1.2. Serie T02

a. T02I

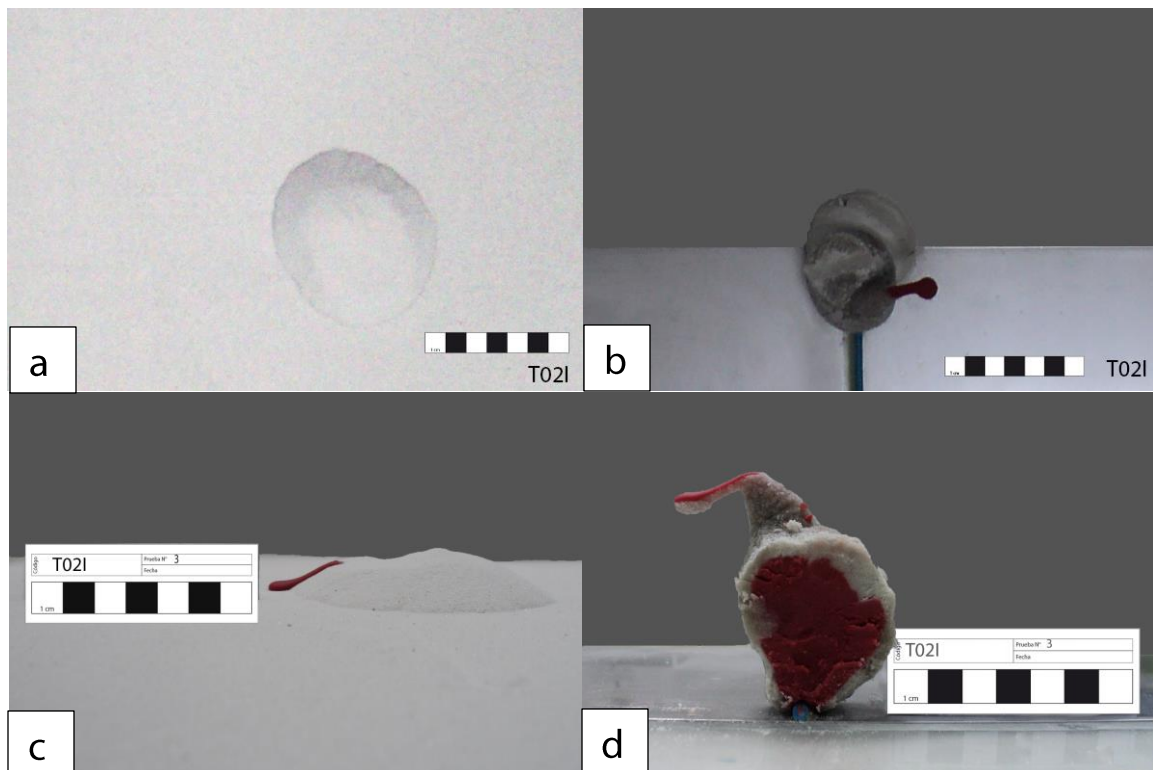


Figura A2 Modelo T02I (Solo inyección al 10% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en planta del intrusivo sin arena. c) Vista en perfil del resultado final. d) Vista en perfil del intrusivo sin arena. El tiempo de duración de la prueba no fue el suficiente. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1.

A1.3. Serie T03

a. T03I

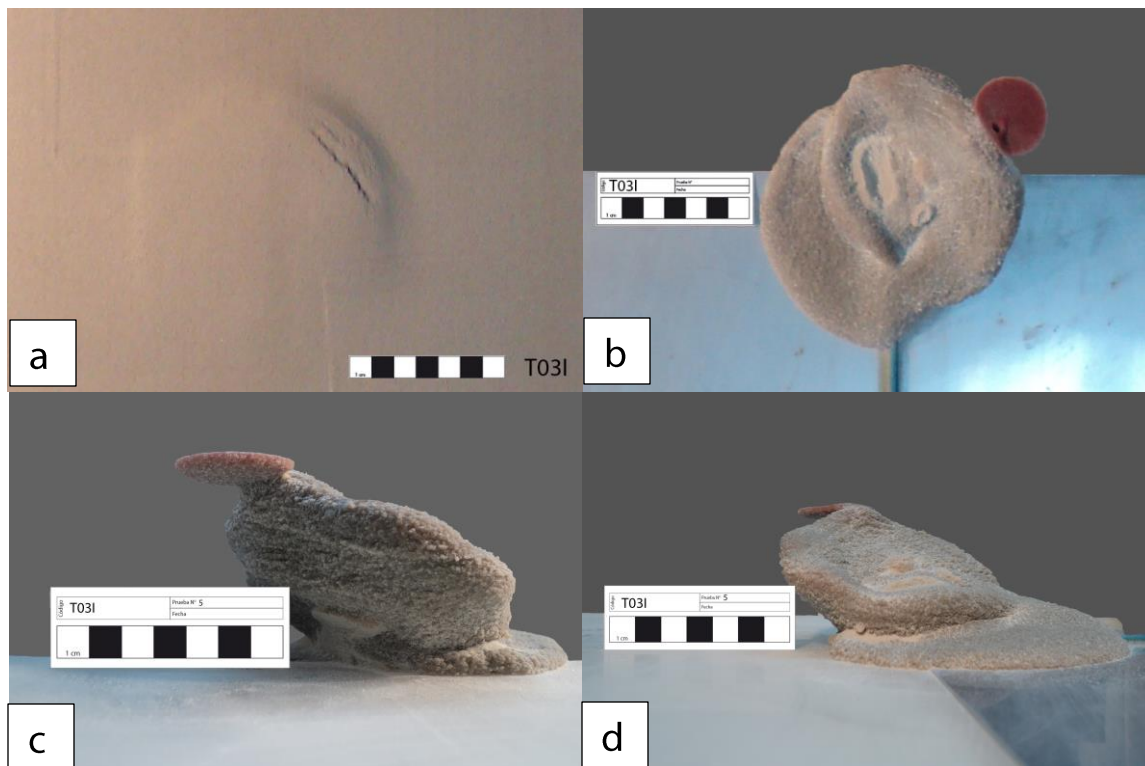


Figura A3 Modelo T03I (Solo inyección al 10% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en planta del intrusivo sin arena. c) Vista en perfil del intrusivo sin arena a lo largo del borde del pistón. d) Vista en perfil del intrusivo sin arena perpendicular al borde del pistón. La forma y tamaño del intrusivo eran similares a los resultados de estudios anteriores, pero se intentó disminuir el grosor de la percolación. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1.

b. T03I2

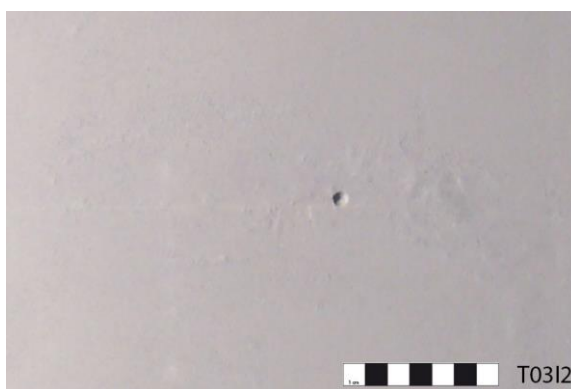


Figura A4 Modelo T03I2 (Solo inyección al 10% de la bomba): Vista en planta del resultado final. No se logró inyectar aceite en el modelo. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1.

c. T0313

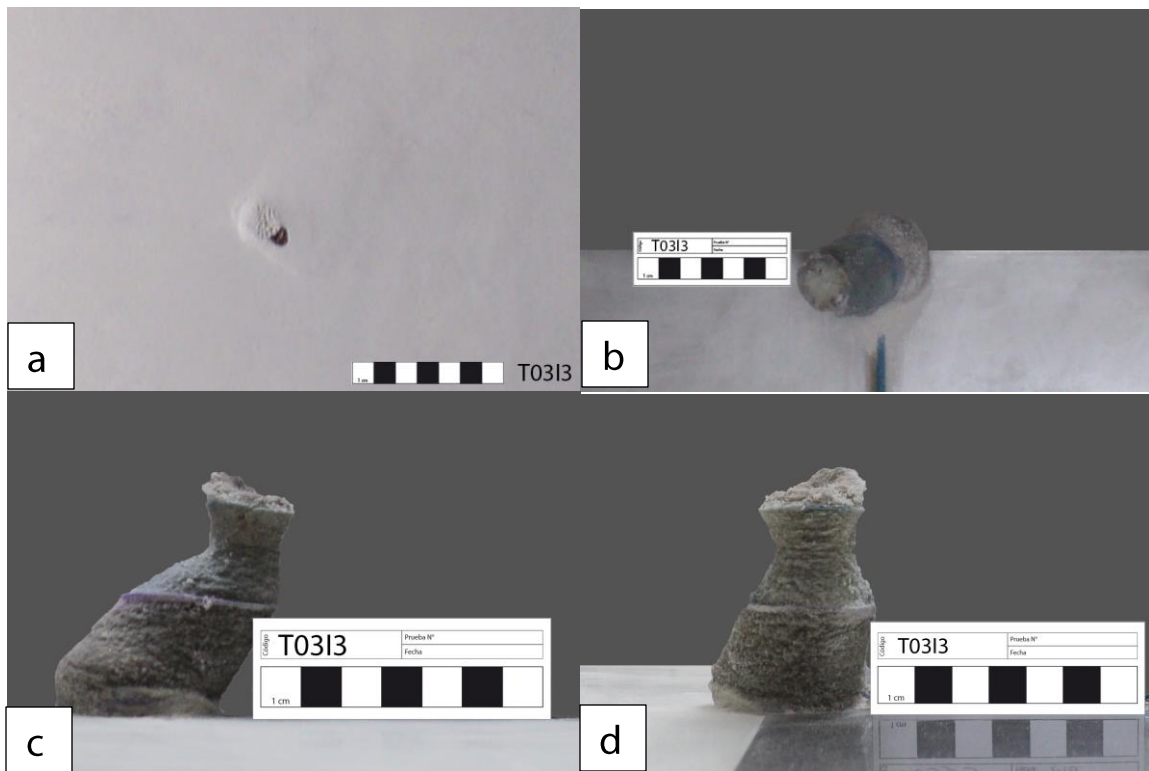


Figura A5 Modelo T0313 (Solo inyección al 20% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en planta del intrusivo sin arena. c) Vista en perfil del intrusivo sin arena a lo largo del borde del pistón. d) Vista en perfil del intrusivo sin arena perpendicular al borde del pistón. La forma del intrusivo resultó ser alargada. Además, el tiempo de duración de la prueba no fue el suficiente. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1.

d. T0314

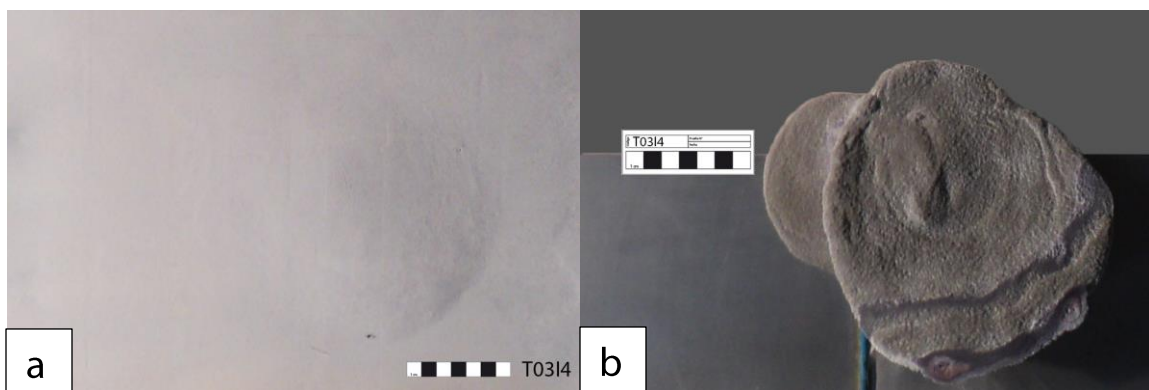


Figura A6 Modelo T0314 (Solo inyección al 15% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en planta del intrusivo sin arena. c) Vista en perfil del intrusivo sin arena a lo largo del borde del pistón. d) Vista en perfil del intrusivo sin arena perpendicular al borde del pistón. La forma y tamaño del intrusivo eran similares a los resultados de estudios anteriores, pero se intentó disminuir el tiempo de duración del modelo. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1. (Continúa en la siguiente página)

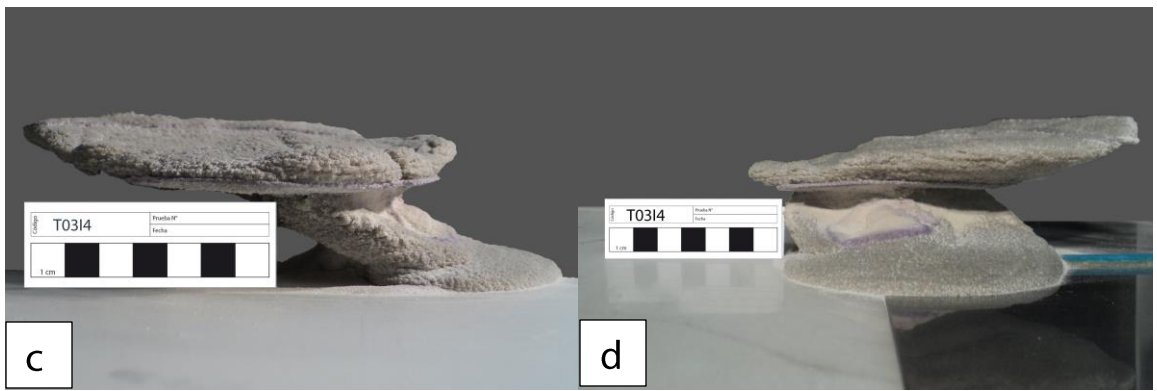


Figura A6 (Continuación)

e. T03M2

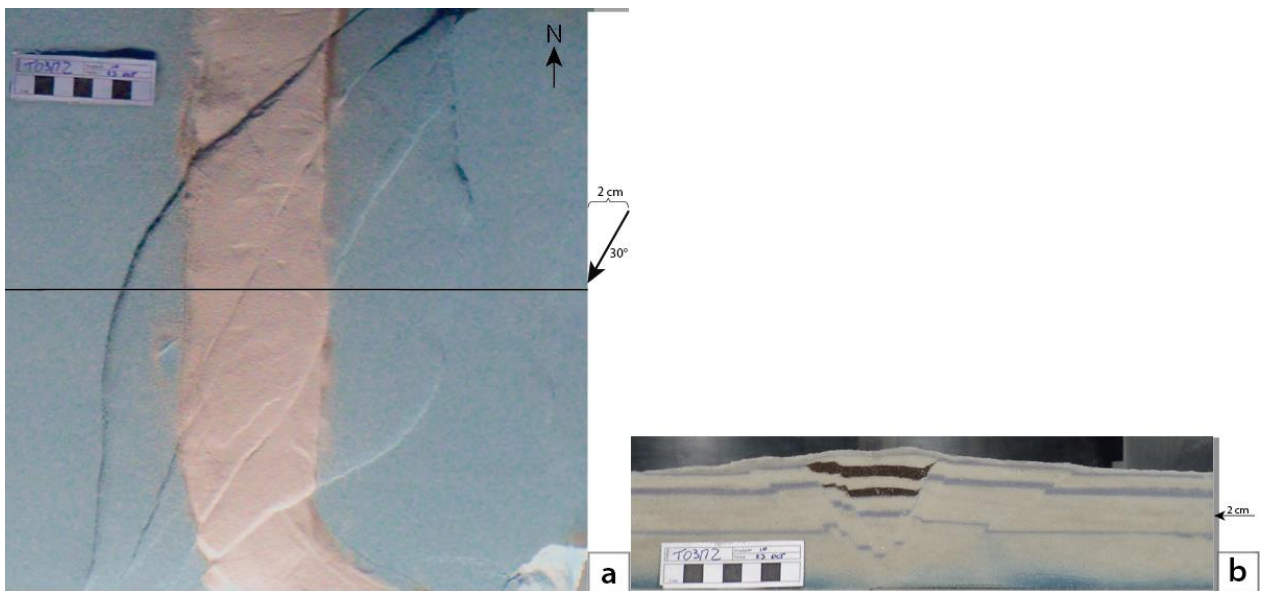


Figura A7 Modelo T03M2 (Solo inversión tectónica): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. Se consideró como un modelo válido de inversión a baja velocidad. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1 y en el Ítem 3.3.2.

f. T03ME

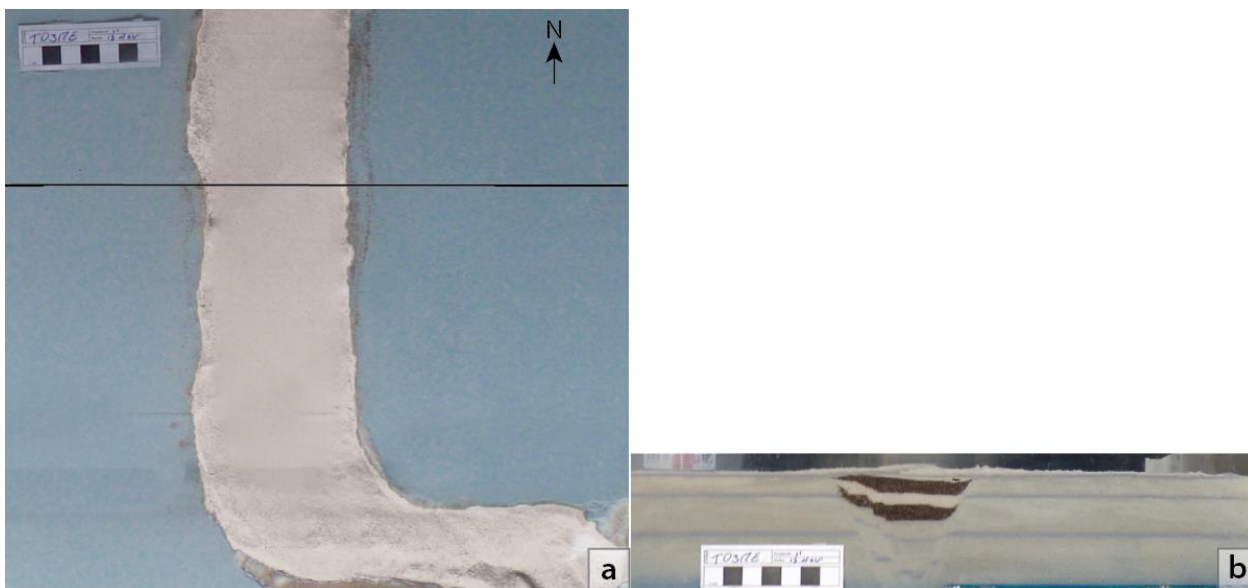


Figura A8 Modelo T03ME (Solo extensión): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. Se consideró como un modelo válido de extensión para comparar las estructuras previas a la inversión. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1 y en el Ítem 3.3.1.

g. T03IK

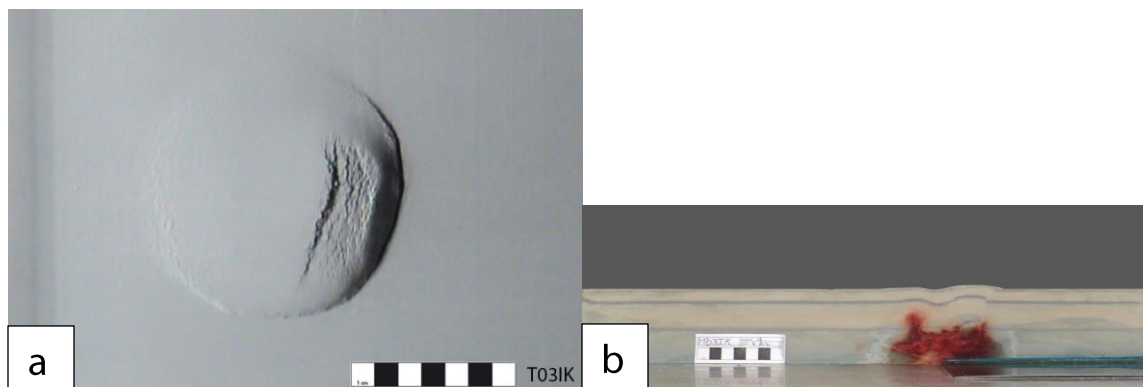


Figura A9 Modelo T03IK (Inyección de un aceite sustituto 1): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. La percolación del intrusivo era mayor que con el aceite original. Además, la tintura se diluyó al humedecer el modelo. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1.

A1.4. Serie T04

a. T04I

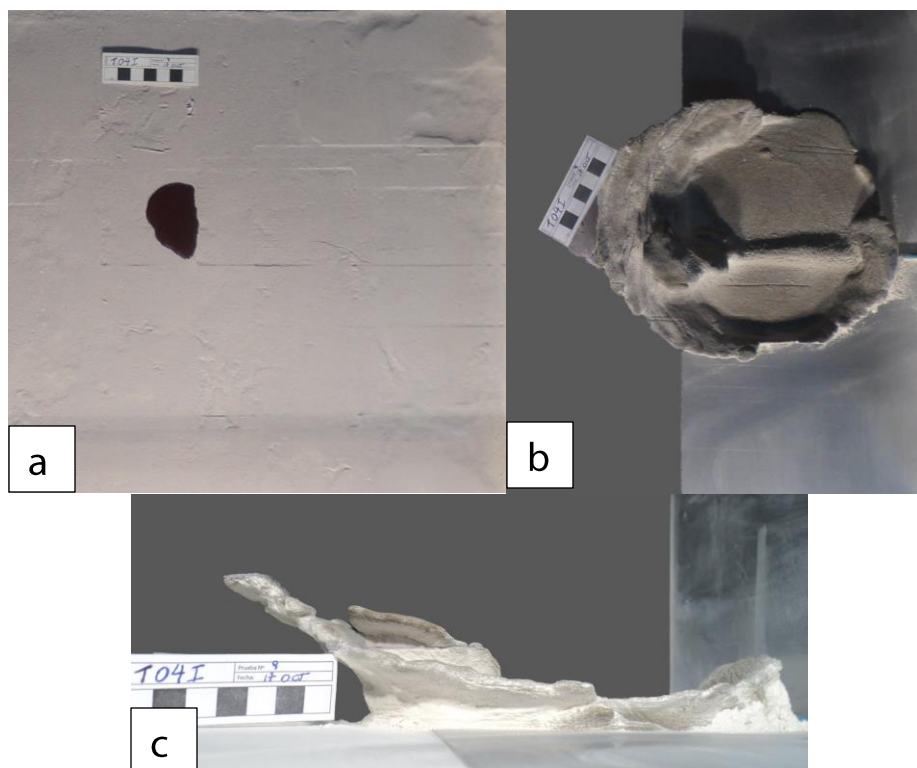


Figura A10 Modelo T04I (Inyección en un modelo de solo harina de cuarzo): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en planta del intrusivo sin arena. c) Vista en perfil del intrusivo sin arena perpendicular al borde del pistón. Se utilizó como comparación con estudios anteriores de inyección de fluidos de baja viscosidad en ambiente estáticos (Galland *et al.*, 2006). La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1.

A1.5. Serie T05

a. T05IA

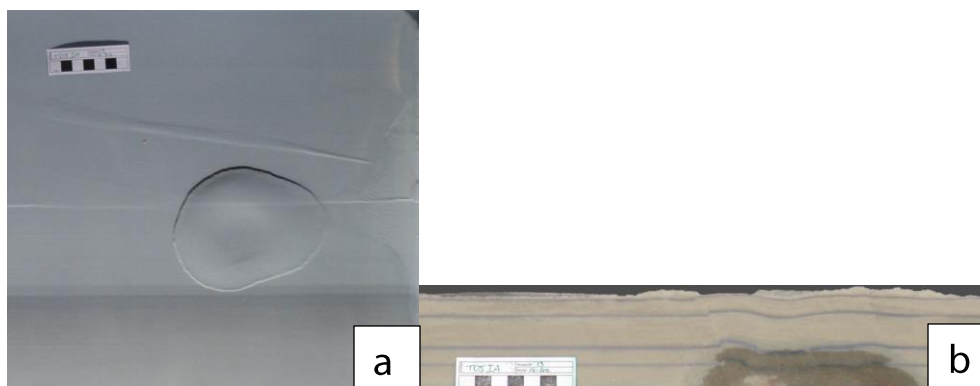


Figura A11 Modelo T05IA (Inyección de un aceite sustituto 2): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. El ascenso del domo fue bajo, y posteriormente se produjo una subsidencia por la percolación del aceite en el modelo. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1.

b. T05I

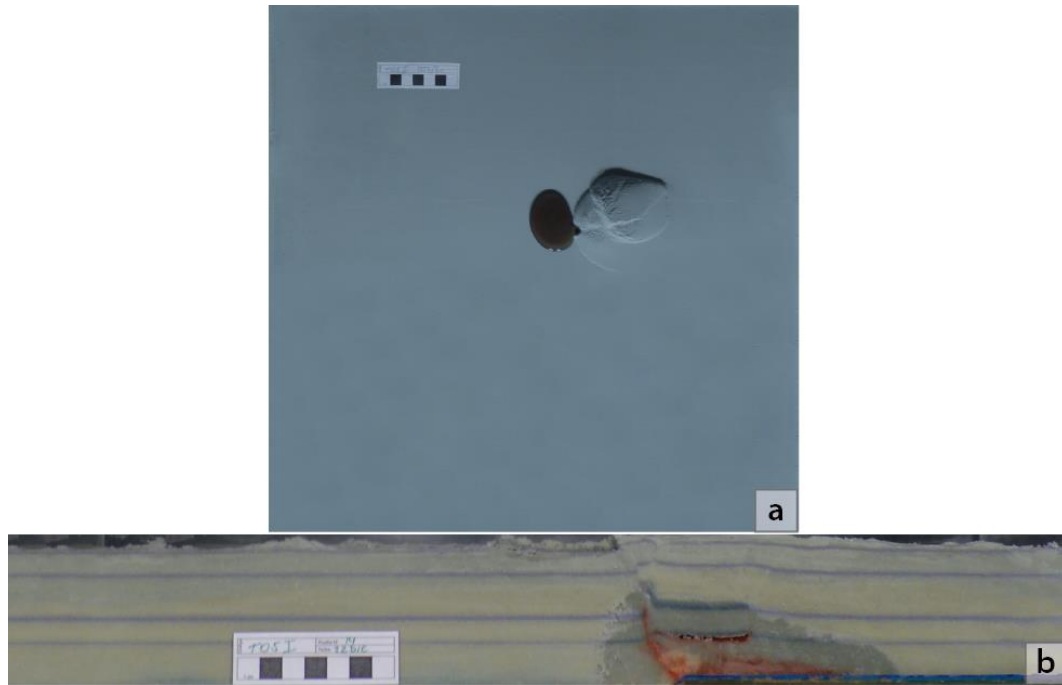


Figura A12 Modelo T05I (Solo inyección al 15% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. Se consideró como un modelo válido de inyección de fluido de baja viscosidad. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1 y en el Ítem 3.1.1.

A1.6. Serie T06

a. T06I

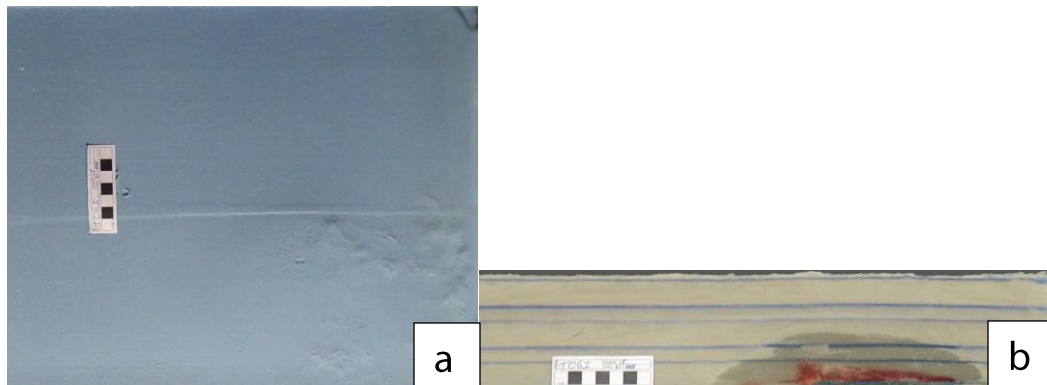


Figura A13 Modelo T06I (Solo inyección al 15% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. El intrusivo no generó un domo en superficie, sino que percoló en la arena y se mantuvo en profundidad. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1.

b. T06I2

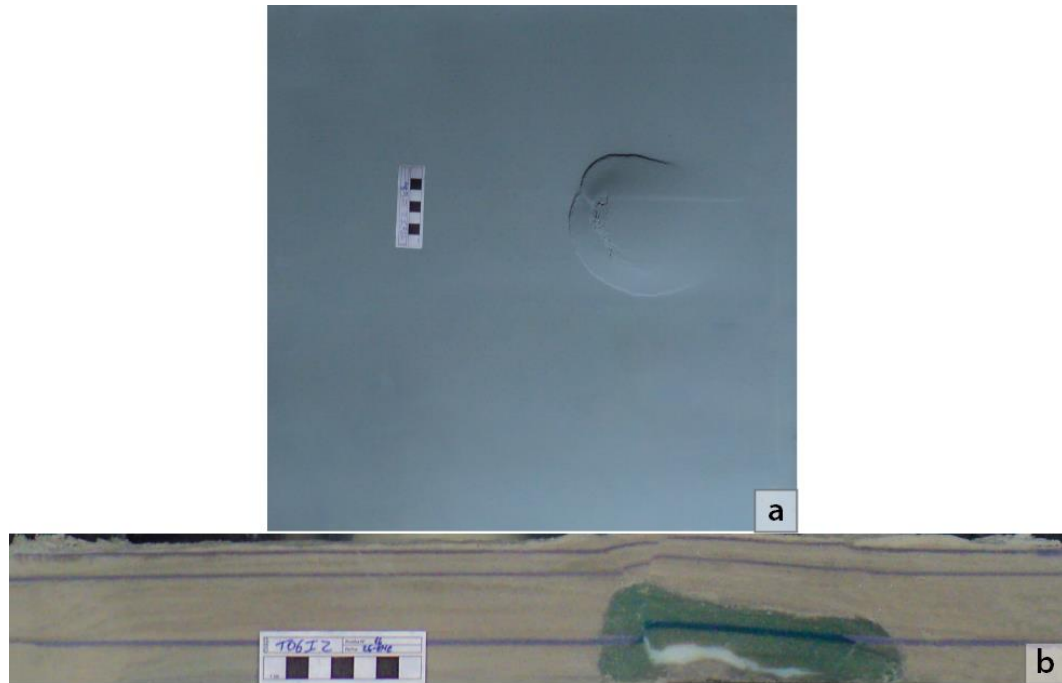


Figura A14 Modelo T06I2 (Solo inyección al 10% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. Se consideró como un modelo válido de inyección de fluido de baja viscosidad. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1 y en el Ítem 3.1.2.

A1.7. Serie T07

a. T07I

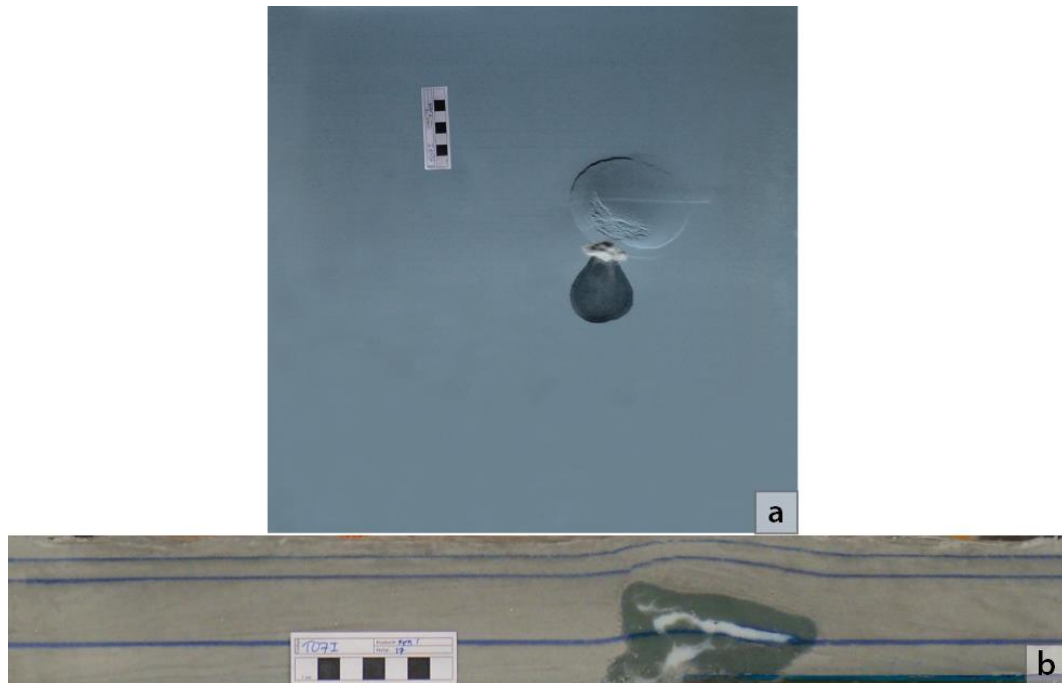


Figura A15 Modelo T07I (Solo inyección al 20% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. Se consideró como un modelo válido de inyección de fluido de baja viscosidad. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1 y en el Ítem 3.1.3.

A1.8. Serie BN

a. BNI1

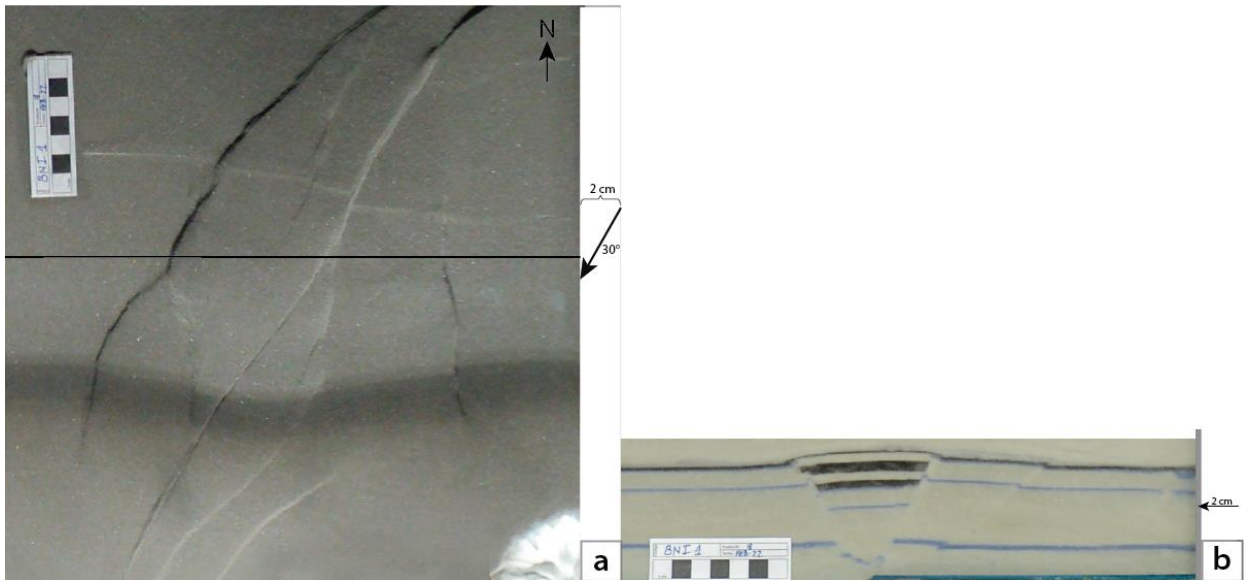


Figura A16 Modelo BNI1 (Solo inversión tectónica): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. Se consideró como un modelo válido de inversión a velocidad media. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1 y en el Ítem 3.3.3.

b. BNM1

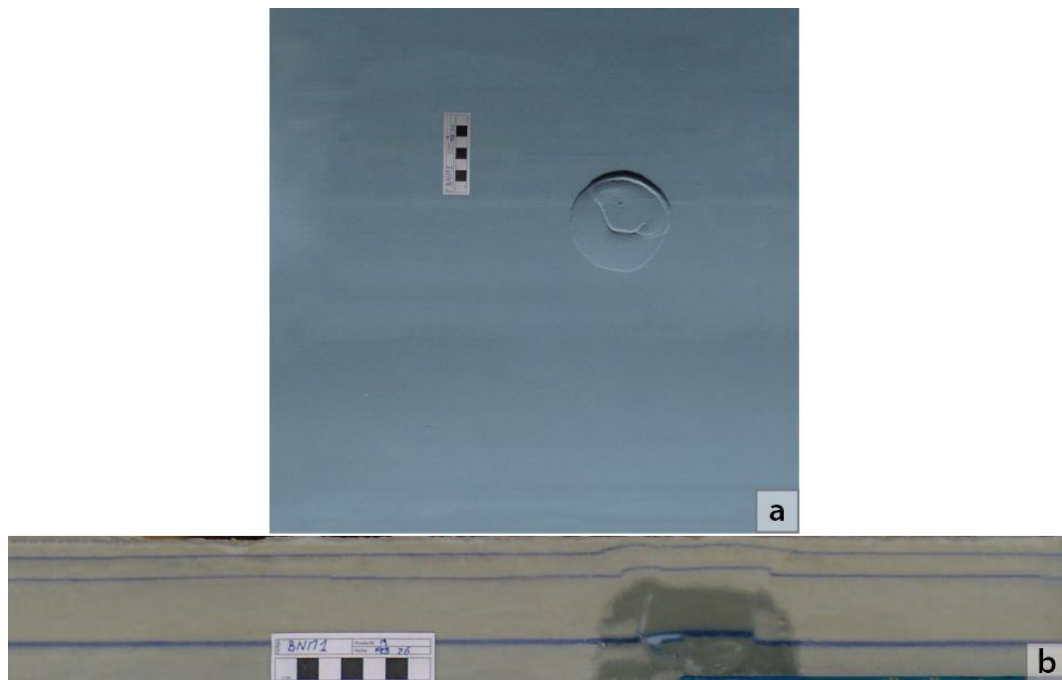


Figura A17 Modelo BNM1 (Solo inyección al 15% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. Se consideró como un modelo válido de inyección de fluido de baja viscosidad. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1 y en el Ítem 3.1.4.

c. BNM2

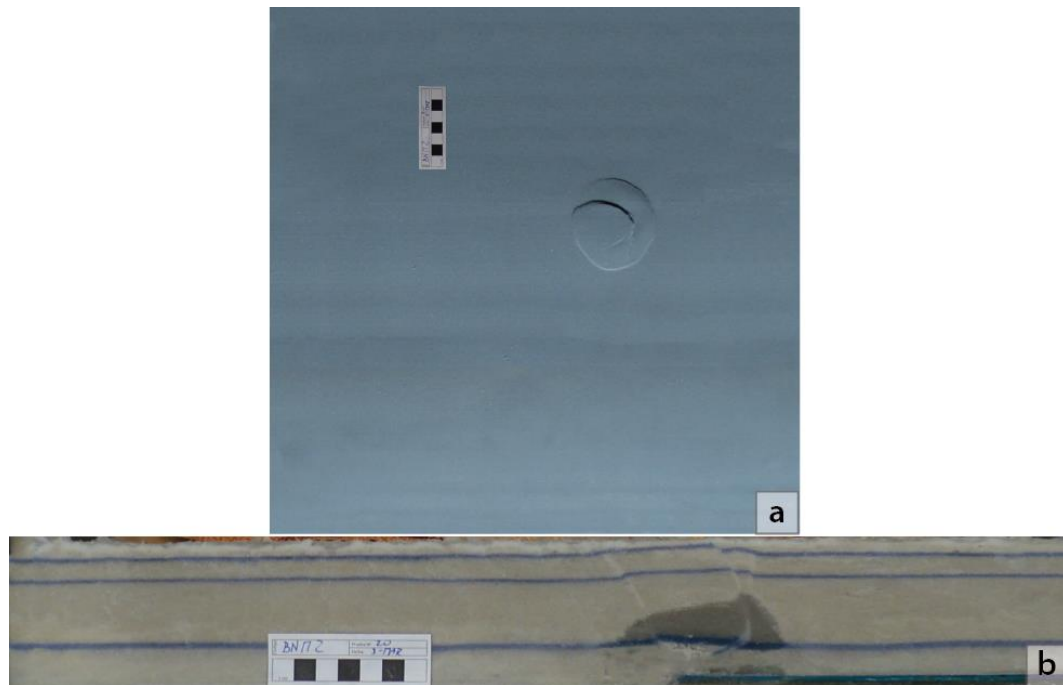


Figura A18 Modelo BNM2 (Solo inyección al 30% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. Se consideró como un modelo válido de inyección de fluido de baja viscosidad. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1 y en el Ítem 3.1.5.

A1.9. Serie NDFB

a. NDFB

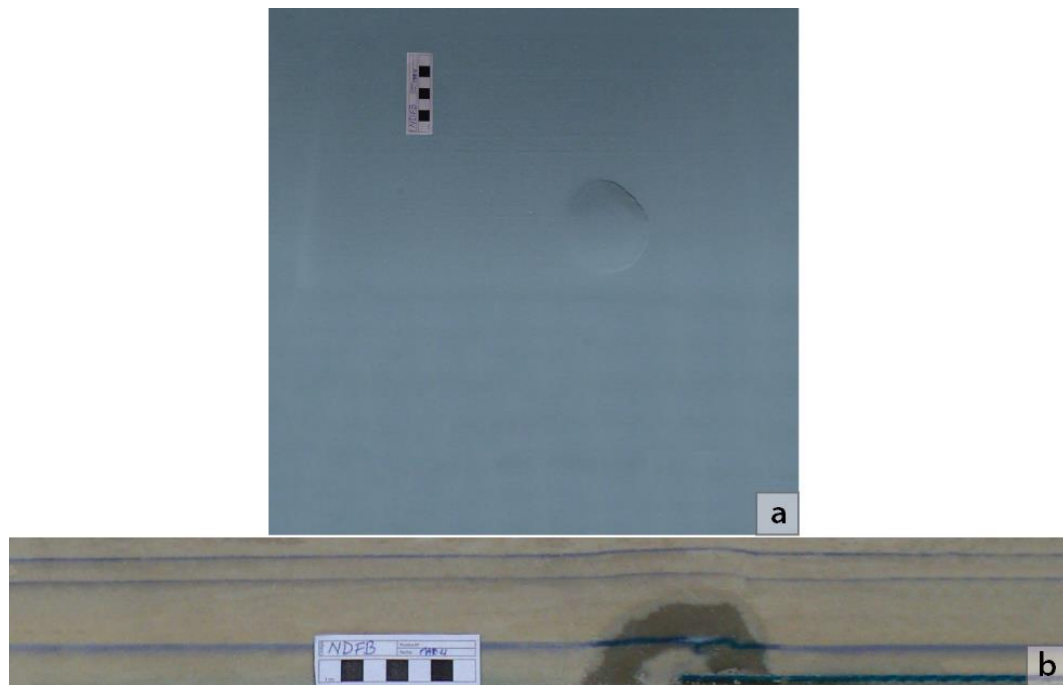


Figura A19 Modelo NDFB (Solo inyección al 15% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. Se consideró como un modelo válido de inyección de fluido de baja viscosidad. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1 y en el Ítem 3.1.6.

b. NDFB2

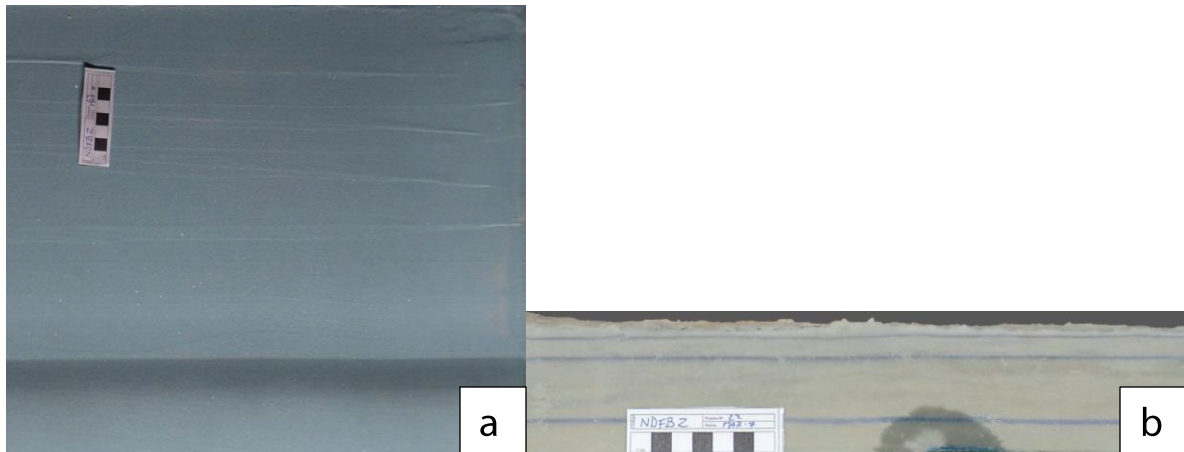


Figura A20 Modelo NDFB2 (Solo inyección al 20% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. El intrusivo no generó un domo en superficie, sino que percoló en la arena y se mantuvo en profundidad. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1.

A1.10. Serie MI

a. MI1

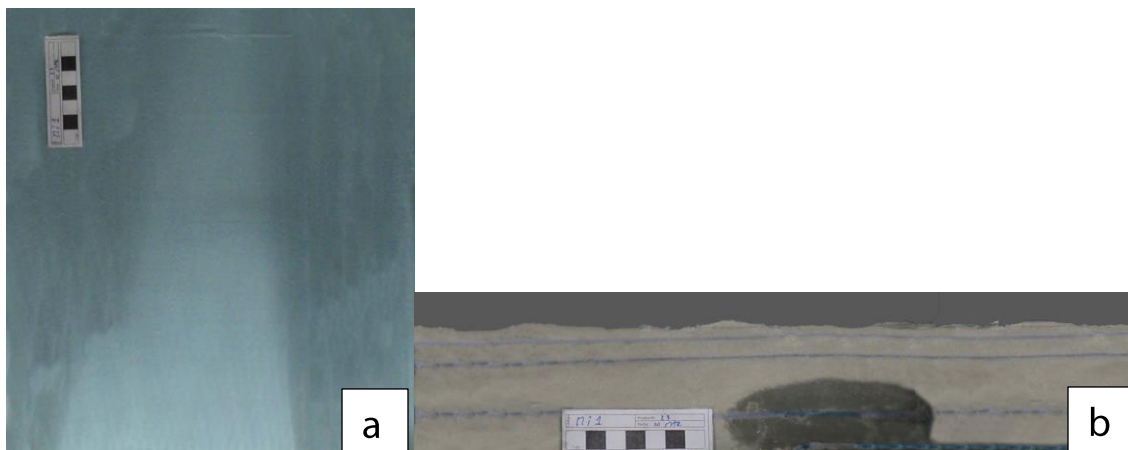


Figura A21 Modelo MI1 (Solo inyección al 15% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. El intrusivo solo generó un pequeño domo en superficie, pues percoló en la arena y se mantuvo en profundidad. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1.

b. MI2

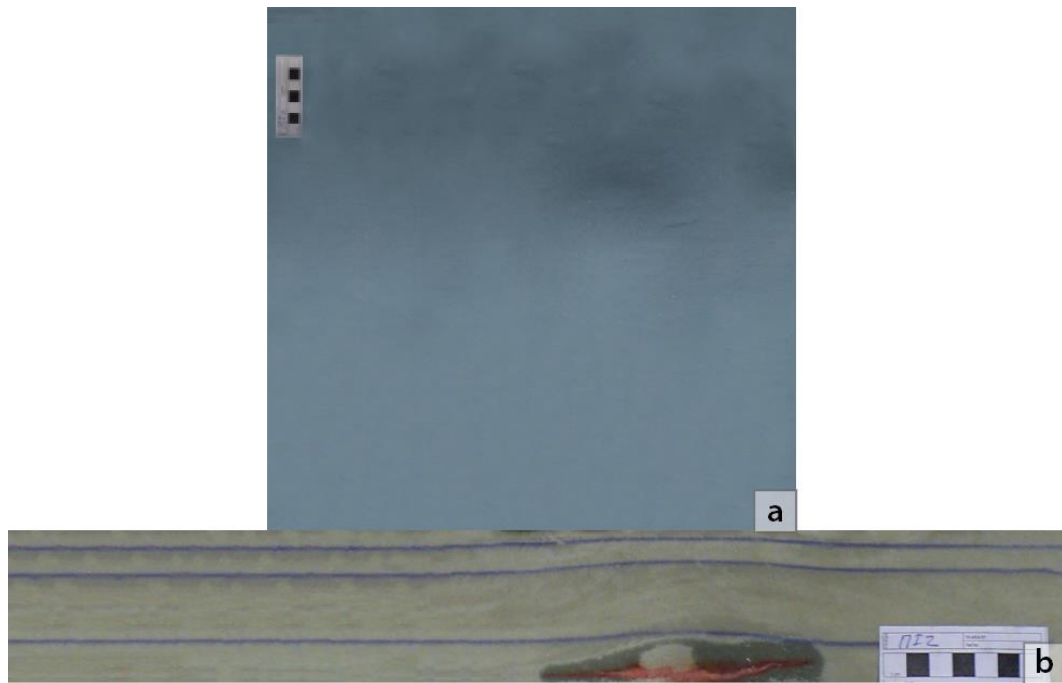


Figura A22 Modelo MI2 (Solo inyección al 15% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. Se consideró como un modelo válido de inyección de fluido de baja viscosidad. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1 y en el Ítem 3.1.7.

c. MI3

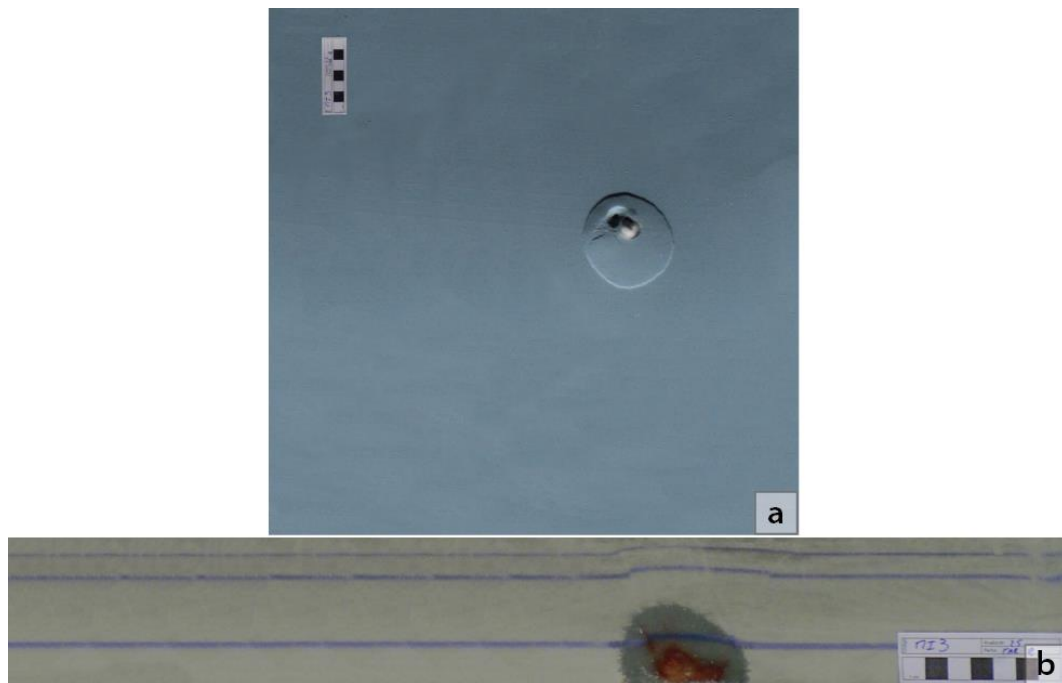


Figura A23 Modelo NDFB (Solo inyección al 10% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. Se consideró como un modelo válido de inyección de fluido de baja viscosidad. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1 y en el Ítem 3.1.8.

A1.11. Serie BV

a. BVND

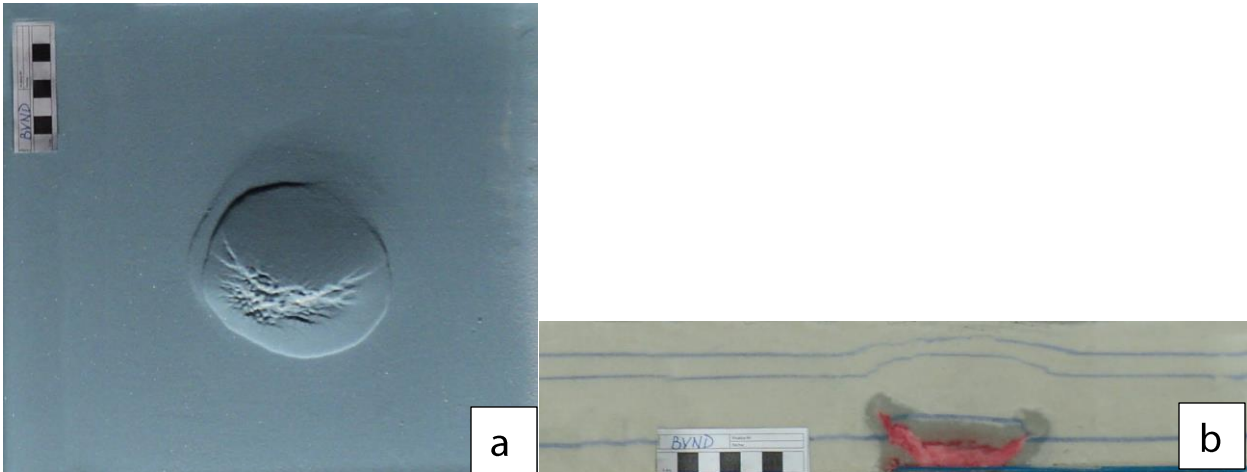


Figura A24 Modelo BVND (Solo inyección al 10% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. La temperatura a la que se inyectó el fluido generó que el este haya sido de un grosor más grande que en los otros casos, por lo que el alzamiento fue mayor a los modelos hechos anteriormente. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1.

b. BVND2

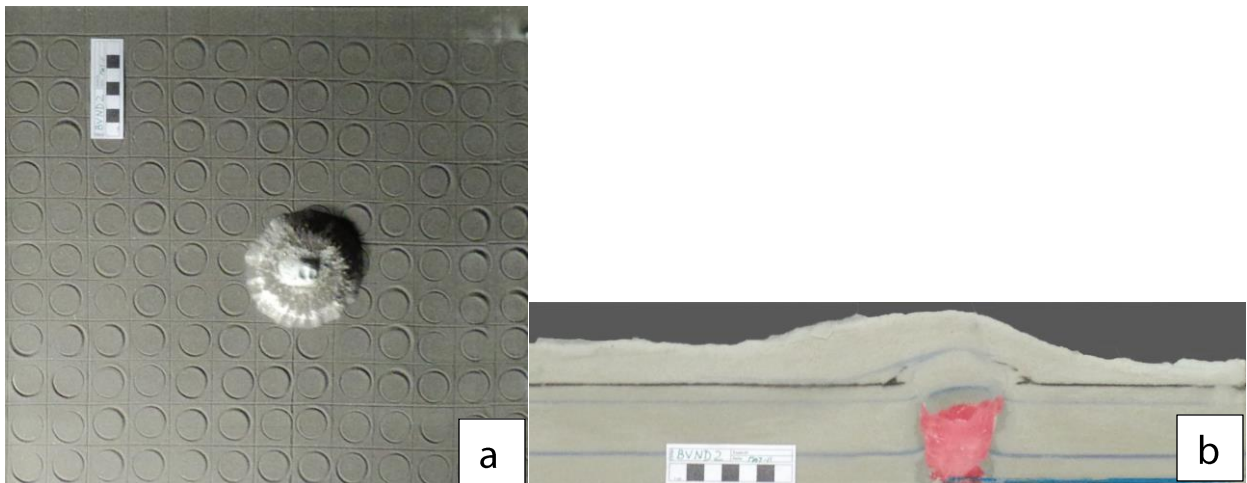


Figura A25 Modelo BVND2 (Solo inyección al 10% de la bomba): a) Vista en planta del resultado final. b) Vista en perfil del resultado final. La temperatura a la que se inyectó el fluido fue baja, por lo que el grosor de este fue mayor que en los otros casos, y el alzamiento fue mucho mayor a los modelos hechos anteriormente. La escala es de 7 cm. Detalles del modelo en la Tabla A.1.