

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

Estudio del contacto interplaca del proceso de subducción y su relación con los sismos
(modelo análogo)

Liley Andrea Bueno Silva

Trabajo de grado para optar el título de geóloga

Director:

Giovanny Jiménez Díaz.

Ph.D. en geodinámica

Codirector:

Yesid Paul Goyes Peñafiel.

Geólogo.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Químicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

Dedicado a mi madre que con paciencia, sudor y lágrimas logró sacarnos adelante, formándonos como personas educadas y de bien. A mi padre, que aunque se fue al cielo pensando que sería reina de belleza, siempre me acompañó en mi camino para ser una geóloga. A mis hermanos por protegerme, enseñarme y soportarme en todos estos años de vida juntos.

A la fundación Doctor Chocolate y a los proyectos Ayúdame a Ayudar Km y Un Abuelo Feliz, quienes me formaron como persona. A cada paciente del HUS, HIC e IC, a los niños de los asentamientos de Bucaramanga, y a los abuelitos de los asilos y veredas, que con sus miradas y sonrisas de esperanza me acompañaron en mis momentos más difíciles y me enseñaron a ser mejor cada día.

A Camilo Ríos que siempre le sonrió al cáncer y que desde el cielo nos recarga de buena energía. A Doña Oliva y Don Alfonso Ríos, la representación más clara de fortaleza.

A las del 504 que nunca desistieron en despertarme cada mañana. A mis tantos amigos y amigas que me ayudaron y acompañaron en los diferentes momentos de mi vida. A mis mejores Amigos por soportarme en mis días insostenibles, por resaltar las virtudes que nunca noté, por llenarme de alimento, por brindarme una cama, por incluirme en sus familias e incluirse en la mía, por corregirme y por las múltiples acciones más que realizaron para hacerme feliz.

A las familias Velandia Jaimes y Grimaldos Martínez por ayudarme cuando más lo necesité.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por sus instalaciones en las que fue desarrollado este proyecto, a la Escuela de Geología por sus grandes docentes que nos acompañaron en el camino de aprendizaje de las geociencias y a los empleados de ésta que con paciencia atendieron cada solicitud.

Al profesor Giovanni Jiménez por idear este proyecto, que además junto con el profesor Javier Jerez me encaminaron al maravilloso mundo de la investigación y a la Profesora Georgina Guzmán, la representación de la mujer en la geología. A los Ingenieros Felix Arenas y Mario Torres de los laboratorios de la escuela de Ingeniería de Petróleos por su paciencia y disposición.

Al geólogo Yesid Goyes por el acompañamiento al inicio del proyecto, al estudiante Juan Sebastián González y Geólogo Juandavid Acevedo por el apoyo económico y préstamo de herramientas necesarias para el inicio y fin del proyecto, y a los geólogos Johan Sierra y Julian De Bedout, por sus comentarios y correcciones.

Finalmente agradezco a los integrantes del programa de apoyo a las revistas institucionales de la VIE, quienes me acogieron y acompañaron durante más de dos años.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

“Si bien hasta el presente se ha visto el texto con la apariencia de un fruto con semilla (un durazno, por ejemplo) cuya pulpa sería la forma y la almendra sería el fondo, hoy conviene verlo más bien con la apariencia de una cebolla, organización a base de pieles (niveles, sistemas), cuyo volumen no conlleva finalmente ningún corazón, ningún centro, ningún secreto, ningún principio irreductible, sino la misma infinitud de sus envolturas, que no envuelven otra cosa que el mismo conjunto de sus superficies.”

Roland Barthes

Contenido

Introducción	17
1 Planteamiento del problema	19
2 Objetivos	22
2.1 Objetivo general	22
2.2 Objetivos específicos	22
3 Marco teórico	23
3.1 Proceso de subducción	23
3.1.1 Estilos de subducción	25
3.2 Sismicidad	26
3.2.1 Tipos de sismos	28
3.2.2 Ciclo sísmico	31
3.3 Modelos análogos	32
3.3.1 Limitaciones en la representación del ciclo sísmico	33
3.3.2 Ejemplos	34
3.4 Velocimetría de imágenes de partículas (PIV)	37
3.4.1 PIVlab	38
4 Metodología	42
4.1 Etapa I: Recopilación bibliográfica	42
4.2 Etapa II: Montaje experimental	43
4.2.1 Preparación de la gelatina	43
4.2.2 Calculo de la densidad de la gelatina	44
4.2.3 Calculo de la Viscosidad	47
4.2.4 Construcción del mecanismo	51

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.	8
4.2.5 Escalado	52
4.2.6 Ejecución del Modelo	58
4.3 Etapa III: Procesamiento e interpretación de la información.	60
4.3.1 Funcionamiento de PIVlab	60
5 Resultados	67
5.1 Montaje experimental	67
5.1.1 Características de la gelatina	68
5.1.2 Selección del material para la rampa	70
5.1.3 Estilo de gelatina	72
5.2 Procesamiento de los marcos: PIVlab	77
5.2.1 Correlación Cruzada	77
5.2.2 Zonas del contacto interplaca	83
5.2.3 Datos Cuantitativos de PIVlab	86
5.2.4 Variaciones en el ángulo de subducción	90
5.2.5 Errores de montaje	92
6 Discusión	93
7 Conclusiones	97
8 Recomendaciones	99
Referencias bibliográficas	100

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de la interfaz sísmica de subducción y segmentación de la trinchera.	20
Figura 2. Esquema del proceso de subducción donde se resalta la zona sismogénica, siendo U el intervalo de profundidad específico que menciona Corbi et al. (2011) entre 11 ± 9 Km y 51 ± 9 Km, respectivamente, para el contacto interplaca en que es sismogénico, θ el ángulo de subducción, W la longitud de la zona sismogénica. Tomado de Heuret et al. (2011).....	21
Figura 3. Posibles fuerzas que actúan en las placas.....	24
Figura 4. Dos Tipos de subducción, tipo Chile caracterizada por un bajo ángulo de subducción y grandes sismos, contrario a la tipo Mariana. Adaptado de Uyeda & Kanamori (1979).....	26
Figura 5. Perfil esquemático con la sismicidad del catálogo NEIC, registrada entre 1973 y 2007 de la zona en la latitud $33,5^{\circ}$ S, considerando $0,5^{\circ}$ en dirección norte y sur, cada punto representa un sismo, independiente de su magnitud o fecha de ocurrencia.	30
Figura 6. Representación gráfica de las etapas del ciclo sísmico de subducción. Tomado de: Quezada et al. (2012).	32
Figura 7 Esquema experimental realizado por Rosenau et al. 2009. Tomado de Rosenau et al. (2009).....	36
Figura 8 Esquema experimental realizado por Corbi et al. (2013)	37
Figura 9. Cálculo de la matriz de correlación utilizando DCC realizada en MATLAB. Área Interrogación A (tamaño 4 x 4 píxeles) se correlaciona con la zona de interrogación B (tamaño 8 x 8 píxeles) y se obtiene la matriz de correlación (tamaño 9 x 9 píxeles). Tomado de Thielicke (2014).	41
Figura 10. Bloque de gelatina de 8,5 x 4,5 x 11 y masa de 441 g	45

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
 BUENO-SILVA, L.

Figura 11. Hidrómetro (1-1,1) dentro de una probeta de 250 mL con muestra líquida de gelatina.....	46
Figura 12. Le Chatelier y balanza analítica.....	47
Figura 13. Figura de fluidez, resaltando la relación de la pendiente con la viscosidad dinámica y aparente. Tomado de Catriel (2008)	48
Figura 14 Medida de viscosidad.	49
Figura 15. Reómetro Koehler modelo K21410.....	50
Figura 16. Esquema del mecanismo del experimento.	52
Figura 17. Esquema representativo de fuerzas y comparación del proceso natural y el modelo de laboratorio a escala y la corteza continental por gelatina.	56
Figura 18. Montaje experimental.....	59
Figura 19. Pasos para el procesamiento de imágenes en PIVlab	61
Figura 20. Proceso para habilitar la carpeta PIVlab en MatLab R2017a de uso académico ..	61
Figura 21. Inicio de la plataforma PIVlab.....	62
Figura 22. Calibración de los marcos.....	63
Figura 23. Gráfica para la validación de los vectores (Velocidad V vs U [px/marco]) donde se consideran válidos los puntos dentro de la zona blanca.	64
Figura 24. Vectores resultantes de los marcos. Dominio: recuadro de líneas discontinuas verdes	65
Figura 25. Herramienta EXTRACTIONS-> parameters from área, las áreas se resaltan con negro.	66
Figura 26. . Herramienta EXTRACTIONS-> parameters from poly-line.	67

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
 BUENO-SILVA, L.

Figura 27 Muestras de gelatina con diferentes solventes que contribuyen al aumento o disminución de la viscosidad.	69
Figura 28. 8 experimentos realizados con 4 materiales (Acrílico, Gelatina, Acero, Madera y Vidrio) económicamente asequible y bajo coeficiente de fricción.	71
Figura 29. Estilo de gelatina.	73
Figura 30. Primer criterio para la selección del estilo de gelatina Velocidad V vs Velocidad U.	74
Figura 31. Segundo criterio para la selección del estilo de gelatina: Vectores (centro) y gráfica Magnitud velocidad vs Distancia (a la derecha.	75
Figura 32. Estilo de “Gelatina pura con adición de colorante para crear capas + alfileres comunes” más favorable para que el análisis en el software PIVlab. Zona sismogénica resaltada con color negro, diámetro de los alfileres 2mm.	76
Figura 33. Algoritmo CCD 64px-step:32px. Vectores resultantes del procesamiento.	78
Figura 34. Algoritmo CCD 128px-step: 64px. Vectores resultantes del procesamiento.	79
Figura 35. Comparación del marco 24/54 con el algoritmo CCD con tamaños de pixel 64px-step 32px (superior) y 128px/ 64px (inferior).....	80
Figura 36. Algoritmo FFC 64px-step: 32px. Vectores resultantes del procesamiento.	81
Figura 37. Algoritmo FFC 64px-step: 32px. Vectores resultantes del procesamiento.	82
Figura 38. Comparación del marco 27/54 con el algoritmo FFC con tamaños de pixel 64px-step 32px (superior) y 128px/ 64px (inferior). Las flechas blancas muestran la dirección general de los vectores en el algoritmo inferior y las negras en el superior, zona sismogénica resaltada con color negro equivalente a 7cm, diámetro de los alfileres 2mm.	83

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
 BUENO-SILVA, L.

Figura 39. Vectores generados por el deslizamiento de la gelatina sobre la superficie de vidrio, marco 9/9. Se toma como escala los 2mm de diámetro de los alfileres, $\theta=22^\circ$	84
Figura 40. Zonas del contacto interplaca, transición lija-Vidrio = zona Sísmica-asísmica. Algoritmo FFT.	85
Figura 41. Zona de transición sísmica-asísmica, representada con dos tendencias de vectores. Zona sismogénica resaltada con color negro equivalente a 7cm, $\theta=22^\circ$	86
Figura 42. Relación entre el valor de la magnitud de la velocidad y la dirección de los vectores, Color amarillo magnitudes de velocidad mayores, color verde magnitudes de velocidad más bajas.	88
Figura 43. Relación de los datos cuantitativos del modelo.	88
Figura 44. Experimento a 11° de inclinación.	91
Figura 45. Experimento a 31° de inclinación.	92
Figura 46. Error por trazo del bisturí.	93
Figura 47. Resultados de la investigación de Rosenau et al (2009).	95

Lista de tablas

Tabla 1. Valores de densidad por el cálculo del volumen por dimensiones, solución Gelatina+agua	45
Tabla 2. Datos tomados con el viscosímetro Fann modelo 35 ^a , de acuerdo a la velocidad y temperatura	49
Tabla 3. Determinación de los datos obtenidos en el reómetro a SSU	51
Tabla 4. Descripción del comportamiento de las soluciones después de la gelificación.	68
Tabla 5. Valor de Viscosidad aparente a partir de los datos del viscosímetro FANN modelo 35 ^a (Tabla 2) y la ecuación 3.....	69
Tabla 6 Valores viscosidad cinemática a partir del tiempo en SSU del reómetro Koeller	70
Tabla 7. Factor de escala de las propiedades de la gelatina	70
Tabla 8. Descripción y selección de los materiales involucrados en los experimentos.	72
Tabla 9. Valores promedios de Magnitud de la velocidad, razón de la deformación y razón del esfuerzo cortante.	87
Tabla 10. Similaridad geométrica y cinemática de los parámetros del experimento, junto con el factor de escala.....	89
Tabla 11. Similaridad dinámica a partir de la relación de números adimensionales con respecto a la gravedad, inercia, elasticidad, fricción y viscosidad.....	90
Tabla 12. Longitud zonas de subducción	91

Apéndices

(Los apéndices se encuentran en una carpeta anexa en el CD)

Apéndice A: Valores para determinar el Modulo de Young, realizado por Martinez (2017)

Apéndice B: Parámetros de zona sismogénica de las zonas de subducción en todo el mundo, Tomado de Heuret et al. (2011)

Apéndice C: Valores cuantitativos extraídos del software PIVlab con las herramientas para el post-procesamiento de las imágenes del experimento.

Apéndice D: Fotografías del experimento a un ángulo de inclinación de 22°

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DEL CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN Y SU RELACIÓN CON LOS SISMOS (Modelo análogo)¹

AUTOR: BUENO SILVA, LILEY ANDREA ²

PALABRAS CLAVE: SUBDUCCIÓN, CORTEZA, ANÁLOGO, ESFUERZO, INTERPLACA, SISMICIDAD.

DESCRIPCIÓN:

Los sismos son producto de la ruptura y posterior evolución del esfuerzo y la deformación, clasificándose en dos tipos, los intraplaca por fallamiento y los interplaca que ocurren en el proceso de subducción. Estos últimos son los causantes de tsunamis, alzamientos o hundimientos costeros, como también altos niveles de daño en obras civiles, siendo el 90% del total de energía liberada en el mundo. Los modelos análogos son representaciones claras y prácticas del desarrollo progresivo de deformaciones, siempre y cuando estén escalados y representados con buenos materiales, además de la recopilación y procesamiento de la información. Un bloque de gelatina deslizando sobre una rampa de ángulo fijo es el modelo análogo del proceso de subducción que se quiere representar, siendo económico y sencillo. El papel de lija sobre dicha rampa hace que la zona sismogénica sea bien representada ya que determina los cambios de velocidad y/o fricción que propician los deslizamientos discontinuos del proceso de subducción. La visco-elasticidad en la gelatina, material a deslizarse, permite que los esfuerzos se transfieran al paso por la zona de fricción y se asemejen a los transferidos en la corteza continental, y la toma y procesamiento de imágenes en un software como PIVlab que registra la posición en el tiempo de las pequeñas partículas, es una herramienta útil para evidenciar en el modelo los cambios en la velocidad y los esfuerzos. En este trabajo se pretende representar un modelo del contacto interplaca que permita relacionar los esfuerzos causados en el experimento con las etapas del ciclo sísmico de subducción.

¹ Trabajo de grado, modalidad investigación.

² Escuela de Geología. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Director: Giovanni Jiménez Díaz, PhD.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE INTERPLATE CONTACT OF THE SUBDUCTION PROCESS AND ITS RELATIONSHIP WITH EARTHQUAKES (Analog model) ¹

AUTHOR: BUENO SILVA, LILEY ANDREA²

KEYWORDS: SUBDUCTION, CRUST, ANALOG, STRESS, INTERPLACA SEISMICITY.

DESCRIPCIÓN:

Earthquakes are products of rupture and subsequent evolution of stress and strain, classified into two types, the intraplate by failure and the interplate that occur in the subduction process. Subduction earthquakes are the cause of tsunamis, coastal upheavals or sinking, as well as high levels of damage of civil structures, been the 90% of the total energy released in the world. Analogue models are clear and practical representations of the progressive development of deformations, as long as they are scaled and represented with good materials, in addition to the information collection and processing. A gelatin block sliding on a fixed-angle ramp is the analog model that is desired to be represented, been cheap and simple. The sandpaper on that ramp causes the seismogenic zone to be well represented as it determines the velocity and/or friction changes that lead to the discontinuous slides of the subduction process. The visco-elasticity in the gelatine, material to be slid, allows the stresses to be transferred to the passage through the friction zone and resemble those transferred in the continental crust, and the taking and processing of images in a software like PIVlab that registers the position in time of the small particles, is a useful tool to evidence the speed and stress changes in the model. In this work, we intend to represent an interplate contact model that allows to relate the stress caused in the experiment with the stages of the subduction seismic cycle.

¹Bachelor Thesis

²School of Geology. Faculty of Physical-Chemical Engineering. Director: Giovanni Jiménez Díaz, PhD.

Introducción

De acuerdo a la teoría de tectónica de placas, el proceso de subducción se define como el descenso e incorporación de la litosfera dentro de la Astenosfera (Pennington, 1981), en aquellas zonas donde interactúan las placas oceánica y continental la primera es la que se desliza (subduce) bajo la segunda (Forsyth & Uyeda 1975), configurándose así como un tipo de límite cortical, propiciando el desarrollo de algunos de los sismos más grandes en el mundo. De forma general las zonas de subducción se pueden clasificar dentro de dos estilos según su ángulo de inclinación: 1) normal o inclinada (alto ángulo) y 2) plana (bajo ángulo) (Li *et al.*, 2011) o mayor a 35° para el estilo normal según Pennington (1981). Configuración que puede estar controlada por las diferentes densidades y espesores corticales, que a la vez determinan en gran medida si la zona de subducción funciona normalmente o se acreciona (Stern, 2002).

Estudios llevados a cabo en Chile por Ruiz y Madariaga (2012) mencionan los sismos interplaca como los más frecuentes en comparación con los intraplaca. En diferentes zonas han mostrado una imagen unificada en el que la deformación se controla a corto (años) y largo plazo (décadas y siglos), por ejemplo un fallamiento de la zona de subducción que puede quedar "bloqueada" durante siglos y luego deslizarse repentinamente, siendo éste proceso el ciclo sísmico de subducción (SEC) (Wang *et al.*, 2012). Se compone principalmente de tres etapas: Cosísmica, Intersísmica y postsísmica, caracterizándose por deslizamientos rápidos, cortos y acomodación de las placas, respectivamente (Quezada *et al.*, 2012).

Zonas como la interfaz de fricción en el contacto interplaca del proceso de subducción son difíciles de estudiar y comprender sin el uso de los modelos análogos (van Dinther *et al.*, 2013),

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

siendo éstos una herramienta importante para el entendimiento de diferentes procesos geológicos, ya que permiten la representación más simplificada del desarrollo progresivo de las deformaciones, (Crespo y Pérez, 2002). La representación de los diversos comportamientos de las rocas, según el proceso geológico que ocurre, requiere el involucrar distintos materiales dentro del modelado análogo. Por ejemplo el uso de arena, permite buenas representaciones del comportamiento reológico frágil en sistemas de cabalgamiento, extensivos o de rumbo (p.e Davy & Cobbold, 1991; Schreurs & Colletta, 1998; Crespo, 2008; Anaya, 2014; Burberry & Swiatlowski, 2016; Schreurs *et al.*, 2016; Zwaan *et al.*, 2016). Por otro lado, la gelatina a diferentes densidades, permiten reproducir procesos reológicos dúctiles como durante el emplazamiento de diques (p.e., Takada, 1990; Lister, 1991; Muller *et al.*, 2001; Watanabe *et al.*, 2002), el procesos de subducción y el ciclo sísmico (p.e Buttles & Olson, 1998; Espurt *et al.*, 2008; Rosenau *et al.*, 2009; Corbi *et al.*, 2013; Schellart & Strak, 2016).

Así, el objetivo de este proyecto es realizar una buena representación del contacto interplaca, aprovechando las propiedades de la gelatina, el papel de lija y PIVlab, pudiendo entender la sismicidad durante el proceso de subducción, por medio de un mecanismo sencillo, apoyado principalmente de los estudios anteriores del ciclo sísmico de subducción realizados por Rosenau *et al.* (2009) y Corbi *et al.* (2013).

1 Planteamiento del problema

Las zonas de subducción teniendo en cuenta el ángulo de inclinación se pueden clasificar dentro de dos estilos: 1) normal o inclinada ($>30^\circ$) y 2) plana ($< 30^\circ$) (Li *et al.*, 2011). Pero ¿Qué condiciones del contacto interplaca del proceso subducción determinan la sismicidad? Al modelar el proceso de subducción hay que tener en cuenta que los límites en los que al menos una de las placas es continental y la zona de subducción de bajo ángulo, normalmente albergan los sismos más grandes (Doglioni *et al.*, 1999). Estudios de Lay & Kanamori (1981) resaltan la importancia del ángulo de subducción, mencionando que los eventos sísmicos más característicos son aquellos que ocurren en zonas de subducción tipo Chilena (bajo ángulo) y ausencia de los mismos en subducción tipo Mariana (alto ángulo) (ver Figura 1).

Si bien la mayor parte de la sismicidad global se debe a la liberación de energía producto del deslizamiento discontinuo a lo largo de la interfaz de fricción entre la placa que subduce y la superior (Corbi *et al.*, 2011), ¿Dónde se acumulan las deformaciones resultantes? (Figura 2), según Corbi *et al.* (2011) una falla a poca profundidad en la interfaz no produce actividad sísmica debido a la baja presión litostática presente en dicha zona, por lo tanto el momento sísmico no se distribuye de manera homogénea en la subducción, dividiéndose en zonas. Ruff & Tichelaar (1996) delimitan la cuña del manto como posible zona asísmica, además de la ya mencionada por Corbi *et al.* (2011). Aunque hay terremotos a profundidad intermedia (70-350 km según Houston (2007) y terremotos muy profundos (hasta ~ 650 km), la gran mayoría de focos son superficiales ($h < 50$ km) (Buforn y Udías, 2007), resaltando para el contacto interplaca en que es sismogénico un intervalo de profundidad específico, globalmente comprendido entre 11 ± 9 Km y 51 ± 9 Km (Corbi *et al.*, 2011) (Figura 2).

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

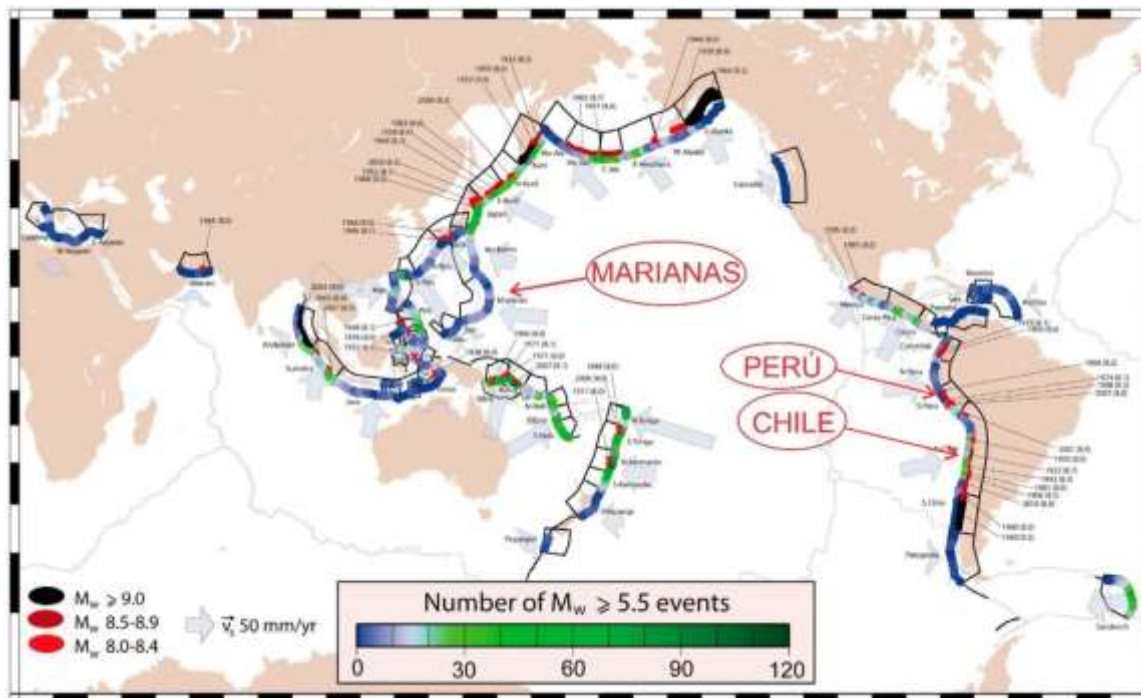


Figura 1. Mapa de la interfaz sísmica de subducción y segmentación de la trinchera. Los segmentos de la trinchera son delimitados por líneas negras. El área de ruptura de los eventos de interfaz de subducción de $M_w > 8.0$ es representada por elipses rojas y negras. Las cruces rojas $M_w > 8.0$ indican los eventos sísmicos que no han sido validados los datos del área de ruptura. Los puntos coloreados, por cada 1° en la trinchera indican eventos $M_w > 5.5$ en la interfaz de subducción (1976-2007). Las flechas azules indican velocidades de subducción. Tomado de Heuret *et al.* (2011)

En la sismicidad, para Wang *et al.* (2012) el proceso de generación de sismos se describe de forma general como un fallamiento inactivo o "bloqueo" en la zona de subducción que luego se desliza repentinamente. La ruptura y posterior evolución del esfuerzo y la deformación que conllevan a continuos sismos se llama vagamente un ciclo sísmico de subducción (*SEC*), siendo los modelos análogos las únicas representaciones simplificadas de la naturaleza donde el comportamiento de dicho bloqueo o interfaz de fricción se puede comprender (van Dinther *et al.*, 2013), ¿Cómo representarlo? Si bien los esfuerzos conllevan a deformaciones y los cambios de

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

fricción aumentan los esfuerzos, el objetivo es visualizarlo en un modelo de laboratorio a medida que aumenta el desplazamiento del material sobre el plano con dos condiciones diferentes (Ver Figura 16). Por ende, el desarrollo de este trabajo es clave para mostrar de manera práctica, clara y básica la relación del contacto interplaca del proceso de subducción y la generación de sismos (Ver Figura 17).

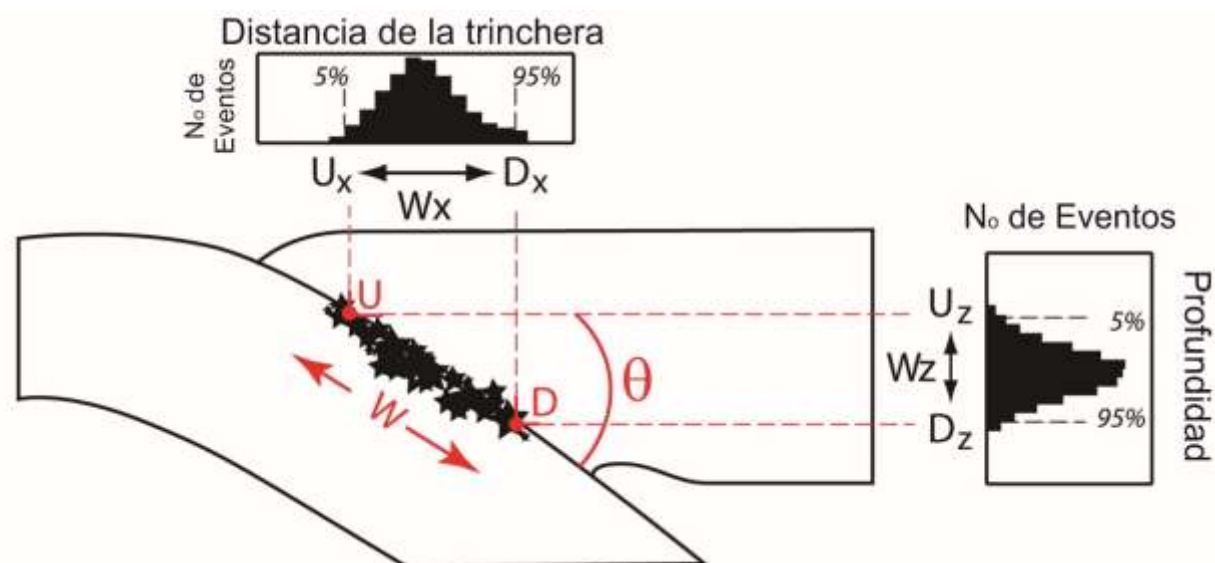


Figura 2. Esquema del proceso de subducción donde se resalta la zona sísmica, siendo U-D el intervalo de profundidad específico que menciona Corbi *et al.* (2011) entre 11 ± 9 Km y 51 ± 9 Km, respectivamente, para el contacto interplaca en que es sísmica, θ el ángulo de subducción, W la longitud de la zona sísmica.

Tomado de Heuret *et al.* (2011)

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Estudiar la relación de los esfuerzos que se generan en el contacto interplaca con el avance del proceso de subducción

2.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades reológicas de la gelatina que permitan escalarse con las condiciones de la corteza continental en la naturaleza.
- Construir una estructura sencilla que permita simular el contacto interplaca del proceso de subducción.
- Determinar a partir de PIVlab la velocidad y parámetros que representen la liberación de esfuerzos en el contacto interplaca análogo.
- Relacionar los resultados del procesamiento de PIVlab con el ciclo sísmico de subducción (SEC).

3 Marco teórico

Según Tarbuck *et al.* (2005) en el capítulo 2 a finales de los 60s , inició una nueva teoría para entender el funcionamiento de la tierra, teoría que muestra la corteza externa como móvil, y donde Wilson plantea placas que se separan en las dorsales a lo largo de grandes fallas transformantes, mientras convergen en las fosas submarinas, llamada Teoría de la tectónica de placas.

3.1 Proceso de subducción

Al mencionar la tectónica de placas se debe hablar del proceso de subducción ya que es clave en dicha teoría. Los primeros estudios enfocados al proceso de subducción se realizaron en la zona de trincheras (Worzel & Shurbet, 1955; Scholl *et al.*, 1968) que con una mejor interpretación de los mismos (Holmes *et al.*, 1972; Grow, 1973a), más la implementación de nuevos datos provenientes de perforaciones en el fondo marino (Kulm *et al.*, 1973) fueron dando una mejor y/o acertada forma a lo que en su momento era el inicio de la teoría de la tectónica de placas. Karig & Sharman (1975) recopilaron información de perfiles barimétricos, perfiles de reflexión sísmica disponible y otros perfiles geofísicos, desarrollando un enfoque más amplio para el entendimiento al problema de acreción en las zonas de subducción, partiendo con la idea que las variaciones morfológicas entre los sistemas de arco se pueden interpretar en términos de tendencias evolutivas.

El auge de una nueva teoría hizo necesario el uso de diferentes técnicas, entre las que resaltan el modelado numérico (p.e Solomon & Sleep, 1974; Forsyth & Uyenda, 1975; Solomon *et al.*, 1975, Chapple & Tullis, 1977; Richardson *et al.*, 1979; Jarrard, 1986) en el que asumiendo un

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

estado de equilibrio y elementos finitos, fueron una herramienta importante para el estudio de las fuerzas que controlan el proceso de subducción.

Forsyth & Uyenda (1975) derivaron un sistema de fuerzas que actúan sobre la litosfera que es consistente con los movimientos de las placas (Ver Figura 3), definiendo fuerzas independientes de la velocidad relativa, contrario a lo formulado por Chapple & Tullis (1977) pero que al fin y al cabo llegan a conclusiones similares respecto a cuáles son los parámetros importantes y sus valores relativos, ya que la velocidad relativa es demasiado limitada para mostrar diferencias en ambas formulaciones. Estudios posteriores realizados por Richardson *et al.* (1979) demuestran que las direcciones de esfuerzos intraplaca que observaron, pueden explicarse en términos de las fuerzas que actúan en la cuña y a lo largo de la base de las placas litosféricas (Ver Figura 3).

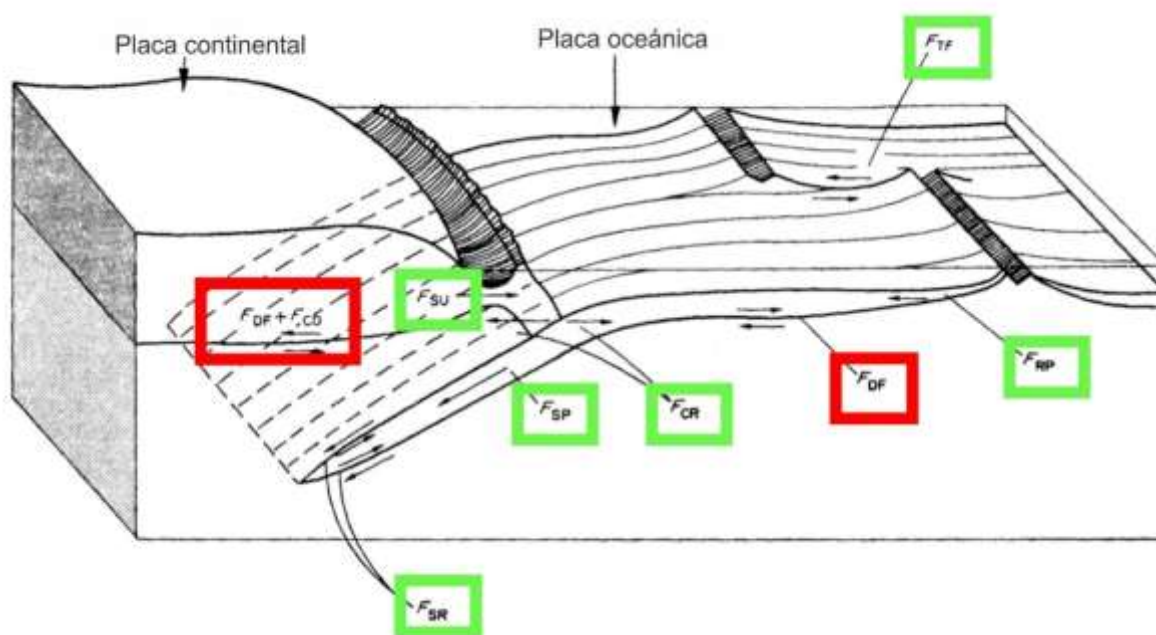


Figura 3. Posibles fuerzas que actúan en las placas. Dos tipo: En la Superficie inferior (por el Acoplamiento viscoso de la placa y la astenosfera **(Rojo: $F_{DF}+F_{CD}$, F_{DF} (Mantle drag force))** Y en los límites de placas **(Verde: F_{SR} (slab resistance), F_{SU} (suction), F_{SP} (slab pull), F_{CR} (colliding resistance), F_{RP} (ridge push), F_{FF} (transform fault resistance))**. Tomado de Forsyth & Uyenda, (1975)

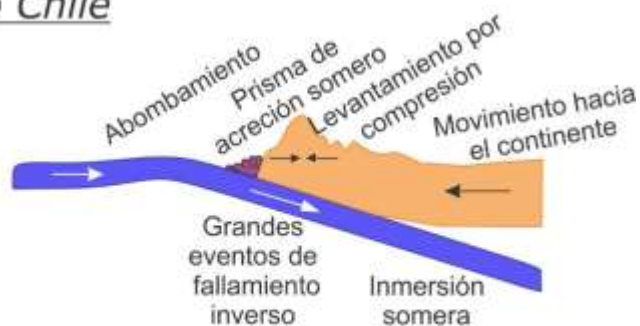
3.1.1 Estilos de subducción

La placa superior del proceso de subducción afecta las zonas de subducción de varias maneras, una es su densidad y grosor, ya que determina en gran medida si la zona de subducción funciona normalmente o se acreciona ([Stern 2002](#)).

Jarrard ([1986](#)) subdividió las zonas de subducción en siete clases de deformación, siendo la clase 1 fuertemente extensional y la clase 7 fuertemente compresional, donde el régimen de deformación en la placa superpuesta está altamente correlacionado con la edad de la que subduce. Se distinguen las subducciones de litosfera antigua (tipo Mariana) de las subducciones de la litosfera nueva (tipo Chile); las zonas de subducción tipo Mariana son fuertemente extensional (clase de deformación 1) y con acoplamiento débil entre las dos placas, mientras que las zonas de subducción de tipo Chile son fuertemente compresivas (clase de deformación 7) y con fuerte acoplamiento entre las dos placas (Ver Figura 4) ([Uyeda & Kanamori, 1979](#); [Jarrard, 1986](#)).

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

Tipo Chile



Tipo Mariana



Figura 4. Dos Tipos de subducción, tipo Chile caracterizada por un bajo ángulo de subducción y grandes sismos, contrario a la tipo Mariana. Adaptado de Uyeda & Kanamori (1979)

3.2 Sismicidad

Gutenberg & Richter (1956) enfocaron sus estudios en determinar la magnitud y energía de los sismos, resultado de investigaciones desde 1942, usando gran cantidad de datos para realizar estadísticas que no siempre tienen una relación 1:1 entre energía-magnitud, derivación de datos a partir de ondas superficiales y de ondas del cuerpo por separado, tan solo para sismos con una profundidad no superior a la normal (25 Km, según Gutenberg & Richter, 1956).

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

Kanamori (1977a) resalta la precisa estimación del trabajo de Gutenberg & Richter (1956), pero cuestiona dicho trabajo para grandes sismos, puesto que éstos son aquellos que la longitud de ruptura es de 100 km o incluso más, que en periodos de 20 s (como establecen para profundidades normales Gutenberg & Richter (1956)) no se logra representar toda la zona de ruptura, por lo tanto el valor de la energía para dicha magnitud sería poco acertado e incluso no se podría estimar. Por lo tanto Kanamori (1977a) estudia de los grandes sismos en el área del plano de falla y el momento sísmico ya que la energía significativa para grandes terremotos puede ser mejor estimada a partir de parámetros de fuente estática.

Entre los resultados de Kanamori (1977a) se evidencia los límites de la subducción tipo Chilena con registro de los más grandes sismos del año 1904 a 1976, y la asismicidad de la tipo Mariana, para lo que Uyeda & Kanamori (1979) interpretan como una resistencia de la placa por ingresar al manto o un acoplamiento mecánico fuerte en la primera, y débil en la segunda. Por otro lado, para Richardson *et al.* (1979) los sismos son una técnica para medir los esfuerzos, ya que un sismo (mediano a grande) responde al estado promedio de esfuerzo de la zona, sismo que probablemente ocurrirá en el plano de las direcciones de esfuerzo principal.

Así, un modelo evolutivo para Uyeda & Kanamori (1979) se enmarca en la amplia zona de contacto entre las dos placas, interfaz donde se generan grandes sismos, a medida que avanza el proceso, la placa oceánica subduce a una mayor profundidad en el manto y la superficie de contacto se fractura generando fallas y movimiento por discontinuos desacoplamientos, permitiendo más adelante el paso al desacoplamiento total.

Para Funicello *et al.* (2003) el equilibrio dinámico de la fuerza, evaluado a partir de una revisión analítica, se describe para cuatro fases diferentes: (1) la inestabilidad por el inicio de la subducción, (2) la fase de aceleración de caída dinámica libre de la placa, (3) la interacción

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

dinámica con la discontinuidad de 660 km (Disc de Repetti, Mantos sup / Manto Inf), y (4) una fase final de retroceso de la trinchera. Por otro lado, de acuerdo a Wortel & Vlaar (1988) la ocurrencia de sismos es debido a la variación de la constitución de la placa con la profundidad, que según ellos se limita a las partes de la litosfera oceánica donde la deformación anelástica aumenta respecto al núcleo elástico.

Según Jarrard (1986) se delimitan 3 tipos de inclinación de acuerdo a la profundidad: *Dip S* desde la trinchera hasta 60 Km, *Dip I* a 100 km y *Dip D* de 100 a 400 km, siendo *Dip I* la zona donde comúnmente las placas están en contacto y *Dip S* un intervalo en el que no se diferencian los sismos intraplaca de los interplaca, entre lo que concluye que posiblemente la subducción de bajo ángulo facilita en gran medida la transferencia de compresiones a la placa superior, a través de un mayor área de contacto entre estas.

Para una zona mucho más profunda a la propuesta por Jarrard (1986), de acuerdo a los aspectos termo-mecánicos en los cuales se enfocaron Wortel & Vlaar (1988) y a que no se pueden justificar por la presencia de una “barrera”, éstos esfuerzos son consecuencias del recalentamiento de la placa subductante, indicando que la sismicidad profunda (hasta 700 Km) sea consistente con la asimilación térmica.

3.2.1 Tipos de sismos

Los límites y características propuestas por distintos autores ya mencionados (p.e Uyeda & Kanamori, 1979; Jarrard, 1986; Wortel & Vlaar, 1988 y Funiciello *et al.*, 2003), determinan la presencia de diferentes tipos de sismos. Ruiz y Madariaga (2012) en su estudio incluyeron las características sismotectónicas de los terremotos chilenos, mencionando cuatro tipos de

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

terremotos, siendo los más importantes y de mayor interés para la ingeniería sísmica: Interplaca de mecanismo inverso o tipo *thrust*, intraplaca de profundidad intermedia, intraplaca superficial de la placa continental o corticales e intraplaca superficiales en la placa oceánica o superficiales detrás de la fosa (*outer rise*) (Ver Figura 5).

3.2.1.1 Intraplaca

Este tipo de sismos como su nombre lo indican, son los ocurridos por el fallamiento dentro de una placa. De acuerdo a Leyton *et al.* (2010) los de profundidad intermedia ocurre en la placa que subduce (Figura 5 (b)), en el caso de Chile no superan los 200 km (en el Nido sísmicos de Bucaramanga un rango de 145-165 km (Schneider *et al.*, 1987) y 160-200 km de la placa Nazca en Colombia (Penintong, 1981)). Los *Outer-rise* por la flexión de la placa previa a la subducción (Figura 5 (d)) y los corticales o de profundidad superficial son los que ocurren en la placa continental a profundidades no mayores de 30 Km (Figura 5 (c)).

La ocurrencia de sismos a profundidad mayor de 70 Km (70-350 km intermedios, 350-700 km-profundos) es representativamente menor que en sismos no tan profundos (Houston, 2007), pero han sido los sismos intraplaca de profundidad intermedia (Figura 5 (b)) los más destructivos en Chile, desarrollando las más altas caídas de esfuerzo y las máximas aceleraciones (Leyton *et al.*, 2009). Entre una de las hipótesis de generación de dichos sismos es que a profundidades entre 160 y 220 km los mecanismos suelen ser de fallamiento normal por la acción del peso y posterior flexión de la placa, atribuido al cambio de pendiente y desarrollo de una rasgadura en la placa (Monsalve y Mora, 2005). Finalmente cabe mencionar que la concentración de sismos de profundidad intermedia forman un Nido

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

sísmico, caracterizado por la alta tasa de actividad sísmica que persisten durante (al menos) décadas (Prieto *et al.*, 2012)

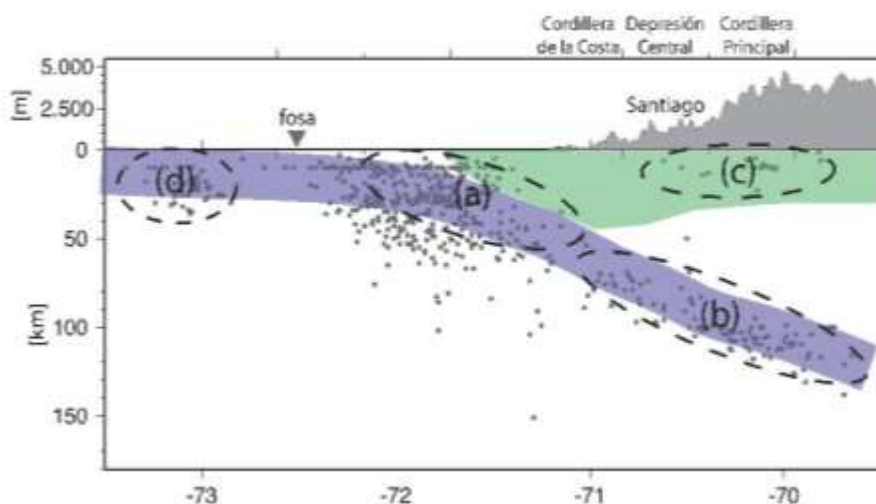


Figura 5. Perfil esquemático con la sismicidad del catálogo NEIC, registrada entre 1973 y 2007 de la zona en la latitud 33,5°S, considerando 0,5° en dirección norte y sur, cada punto representa un sismo, independiente de su magnitud o fecha de ocurrencia. Siendo el color azul la placa Nazca y verde la placa suramericana. Las líneas punteadas indican la posición de las principales fuentes sismogénicas: (a) Interplaca tipo 'thrust', (b) intraplaca de profundidad intermedia (c) corticales y (d) 'outer-rise' Tomado de: Leyton *et al.* (2010).

3.2.1.2 Interplaca

Son producto de la interacción entre la placa que subduce y la superior, Belmonte y Comte (1997) definen la zona de contacto sismogénico interplaca como el rango de profundidades de la interfaz que es capaz de producir grandes eventos de fallamientos inversos a lo largo de la zona acoplada (Ver Figura5 a). Por ejemplo en la subducción chilena existe una fuerte resistencia mecánica, por el contrario en la Mariana la placa ingresa al manto relativamente

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

libre, añadiendo que el acoplamiento puede variar con el tiempo a medida que cambia la configuración y el movimiento de la placa (Froidevaux *et al.*, 1988). Según Belmonte y Comte (1997) la máxima profundidad del contacto sismogénico se encuentra entre 48 y 53 Km, que en estudios más recientes por Corbi *et al.* (2011) mencionan un intervalo de profundidad específico globalmente comprendido entre 11 ± 9 Km y 51 ± 9 Km.

Este tipo de sismos según Froidevaux *et al.* (1988) corresponden al 90% del total de energía liberada en el mundo, siendo los responsables de la generación de tsunamis, alzamientos o hundimientos costeros, como también altos niveles de daño en obras civiles (Ruiz y Madariaga, 2012).

3.2.2 Ciclo sísmico

La periodicidad de un sismo se le llama ciclo sísmico y se compone de tres periodos: Cosísmico + Intersísmico + Post-sísmico.

Quezada *et al.* (2012) definen así las tres etapas del ciclo sísmico:

- Cosísmico (Ver Figura 6) es el periodo en el que ocurre un deslizamiento rápido de la placa, liberando energía en minutos o segundos y que en la Figura 6 se representa como un levantamiento en la trinchera producto del fallamiento inverso (líneas continuas), siendo el momento en el que ocurre el sismo.
- Intersísmico (Ver Figura 6) son los desplazamientos acumulados lentamente a lo largo de las placas acopladas, que puede durar 50 o 100 años, representada por una flexura antiformal producto del fallamiento normal (Ver Figura 6, líneas discontinuas).

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

- Post-sísmico, es el periodo intermedio en el cual ocurre la acomodación de las placas, que va de 6 meses a años.

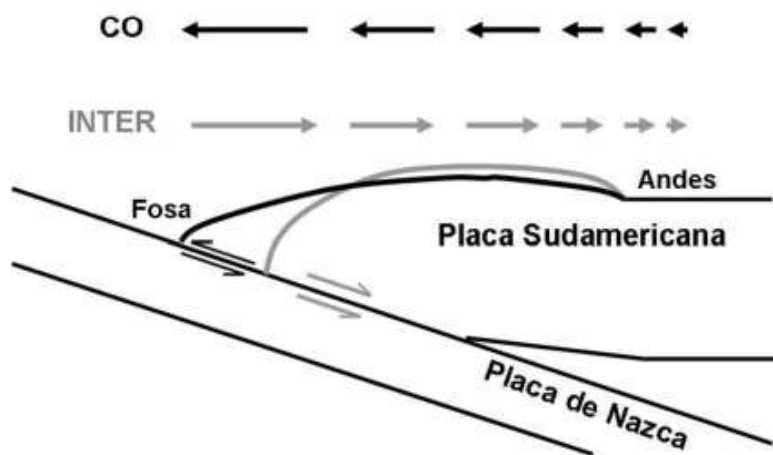


Figura 6. Representación gráfica de las etapas del ciclo sísmico de subducción. Tomado de: Quezada *et al.* (2012).

3.3 Modelos análogos

Los modelos análogos representan herramientas bastante útiles para el estudio progresivo de las deformaciones (a pesar de las limitaciones), debido a la similitud con situaciones geológicas reales que son reproducibles (Crespo y Pérez, 2002). Para mostrar la deformación frágil existen varios experimentos sobre el desarrollo de estructuras y procesos, mostrando un escalado y relación con cortes geológicos y/o líneas sísmicas. La deformación frágil de la corteza ha sido estudiada en sistemas de cabalgamientos (prismas de acreción y cinturones de pliegues y cabalgamientos), fallas extensionales (Crespo y Pérez, 2002; p.e Davy & Cobbold, 1991; Crespo, 2008; Anaya, 2014; Burberry & Swiatlowski, 2016; Schreurs *et al.*, 2016; Zwaan *et al.*, 2016) y en fallamiento de rumbo (p.e Schreurs & Colletta, 1998; Nalpas *et al.*, 2011). Los modelos análogos que involucran

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

materiales de comportamiento dúctil permiten representar procesos geológicos tales como el emplazamiento de diques (p.e., [Takada, 1990](#); [Lister, 1991](#); [Muller et al., 2001](#); [Watanabe et al., 2002](#); [Kavanagh et al., 2013](#)) y procesos de subducción y/o sismicidad (p.e [Buttles & Olson, 1998](#); [Funiciello et al., 2003](#); [Espurt et al., 2008](#); [Rosenau et al., 2009](#); [Corbi et al., 2013](#); [Boutelier & Cruden, 2016](#); [Schellart & Strak, 2016](#)).

3.3.1 Limitaciones en la representación del ciclo sísmico

Según [Corbi et al. \(2013\)](#) el conocimiento de los parámetros que controlan el ciclo de los terremotos de subducción y la liberación máxima de energía sísmica es limitada debido a restricciones como:

- a) El estudio del comportamiento de la zona sismogénica sólo se puede llevar a cabo usando métodos indirectos, ya que el fallamiento ocurre a profundidad y se localiza principalmente *offshore* (costa afuera).
- b) El patrón de acumulación de esfuerzo durante el avance del proceso de subducción puede no ser constante durante todo el ciclo de los terremotos.
- c) Los registros sísmicos instrumentales de las últimas décadas no proporcionan suficiente perspectiva temporal en la recurrencia de los grandes terremotos, no siendo una solución el uso de registros geológicos históricos que carecen de integridad y resolución.
- d) El conocimiento del comportamiento de las fallas de cabalgamiento en zonas de subducción, se basa en un mosaico de observaciones fusionada en diferentes márgenes

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

convergentes que están actualmente en diferentes fases del ciclo sísmico, causando incertidumbres.

Así, a pesar de las limitaciones para ser aplicados, el modelado numérico puede proporcionar pistas importantes a pequeña escala (corto plazo) y los modelos análogos características a gran escala (largo plazo) de la física de los terremotos, siendo considerados los modelos como representaciones simplificadas del comportamiento de fricción de la naturaleza, el cual es difícil de entender y simular ([Corbi *et al.*, 2013](#)).

Parámetros como el gradiente de temperatura con la profundidad, efectos de la presión de poros y la compactación diferencial, también limitan la ejecución de modelos, pero debido a que son características en el prototipo natural desconocidos, inciertos o difíciles de modelar generalmente no se tienen en cuenta en modelos físicos ([Dooley & Schreurs, 2012](#)).

3.3.2 Ejemplos

Son múltiples los modelos análogos de eventos geológicos y a la vez son distintos los materiales que se involucran en cada experimento. Para cumplir los objetivos del presente proyecto, es fundamental el apoyo de investigaciones de otros autores que representan el ciclo sísmico (Ver Figura 7 y 8).

3.3.2.1 Terremotos en una caja: un modelo analógico del ciclo de terremotos de subducción con aplicación a la evolución del forearc sismotectónico - Rosenau et al. (2009)

Rosenau *et al.* (2009), representaron de forma simplificada la geometría del proceso de subducción a un ángulo de 15° , una litosfera continental elasto-plástica (mezcla de arroz, azúcar y pedazos de caucho) y astenosfera visco-elástica (aceite de silicona) y con inmersión de la placa de 60 km de espesor. La inmersión la definieron por la transición de arroz (zona sísmica-debilitamiento de la velocidad) a azúcar (zona asísmica-fortalecimiento) a lo largo de la base del modelo que con una banda transportadora gira a velocidad constante (aprox $0,06 \text{ mm/s}$) equivalente a aproximadamente 77 mm/a en la naturaleza (las propiedades de los materiales se muestran en la Figura 7).

Rosenau *et al.* (2009) mencionan que las superficies de deslizamiento desarrolladas en arroz muestran movimientos inestables durante el experimento, característica que usaron para imitar terremotos dentro de la zona sismogénica de la interfaz de la placa en subducción. La principal deformación cosísmica en el mecanismo es el deslizamiento de las partículas, por otro lado en el periodo intersísmico, a bajas velocidades de deslizamiento, es la resistencia de la zona sismogénica a la inmersión.

Finalmente concluyen, que tal estudio podría proporcionar una respuesta físicamente estimable de cómo los procesos sismogénicos contribuyen a la evolución morfotectónica de las cuencas *forearc* (Roseau *et al.*, 2009).

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

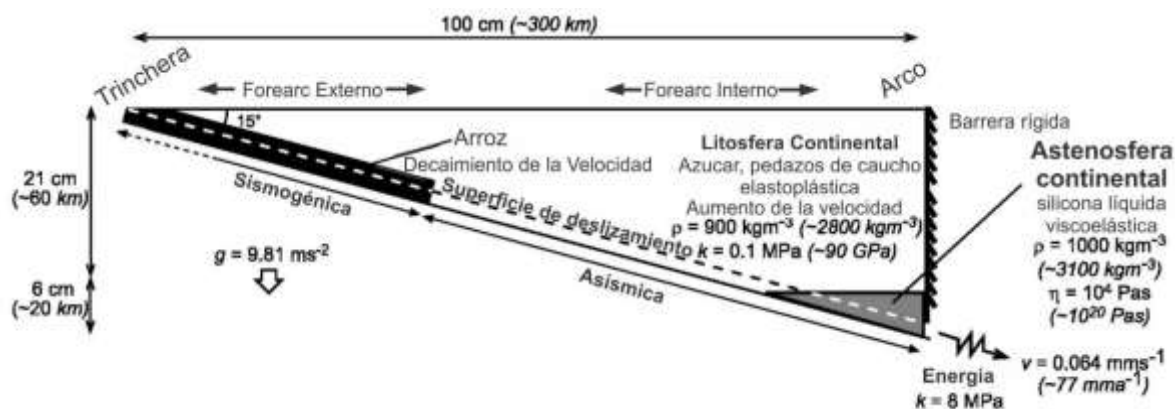


Figura 7 Esquema experimental realizado por Rosenau *et al.* 2009. Tomado de Rosenau *et al.* (2009)

3.3.2.2 Fallamiento inverso en el ciclo sísmico de subducción– Corbi *et al.* (2013)

El montaje experimental (Ver Figura 8) consiste de una caja de acrílico en el que pusieron una cuña de gelatina no deformada, representando la litosfera, e incluyendo la carga tectónica realista. Una placa transportadora de acero rígido en la base, a una inclinación de 10° , es el análogo de la placa en subducción, impulsada con una velocidad de 10^{-4} m/s , mediante un ordenador.

La zona sismogénica (disminución de la velocidad) la simularon con papel de lija y la asísmica (aumento de la velocidad) con láminas plásticas que cubren la placa transportadora, y así representaron la nucleación espontánea de las inestabilidades en la superficie de fricción (es decir, terremotos análogos), y la relajación viscoelástica de la litosfera. Todo a una escala con relación a los eventos naturales, con el objetivo de demostrar que el modelo es capaz de reproducir las características del ciclo sísmico interplaca, comunes a muchos márgenes convergentes. Finalmente concluyen que el modelo analógico que desarrollaron

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

simula la física básica que rige el ciclo sísmico y relaciona los procesos de ruptura de una manera simplificada pero robusta.

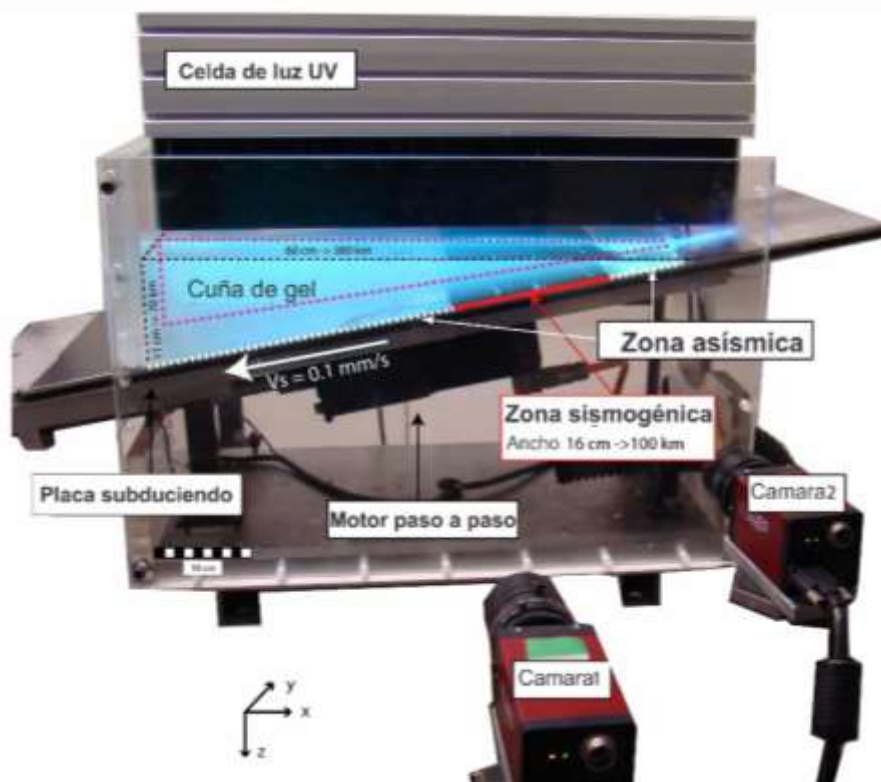


Figura 8 Esquema experimental realizado por Corbi *et al.* (2013)

3.4 Velocimetría de imágenes de partículas (PIV)

Como su nombre indica, el PIV (*Particle Image Velocimetry*) registra la posición en el tiempo de pequeñas partículas trazadoras que son introducidas en un flujo, con el objetivo de extraer la velocidad del fluido local. Así, el PIV representa una extensión cuantitativa de las técnicas de visualización cualitativas del flujo (Prasad, 2000).

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

Los métodos de medición de desplazamientos por medio de imágenes se han estudiado desde los años 80 por diferentes investigadores. Ronald J. Adrian fue de los primeros investigadores que dieron a conocer la metodología de PIV, Adrian (1988) menciona que una buena técnica a la hora de analizar consiste en la toma de varias fotografías en un mismo punto, cada foto se divide en pequeñas zona de igual tamaño (puntos de interrogación) produciendo un adecuado número de muestras. Siendo cada punto una muestra de la velocidad, los desplazamientos de las partículas en cada imagen producen mediciones directas en el plano que generan a su vez los componentes “U” y “V” del vector de flujo. A alta densidad de las imágenes cada punto producirá una muestra de velocidad, por el contrario, a densidades bajas es necesario aumentar el número de fotografías, aumento que puede ser tan grande como para ser imposible llevar a cabo el procesamiento.

El procesamiento de las imágenes cuenta con errores en función de las condiciones experimentales y los algoritmos de detección de desplazamiento de partículas. Las causas de errores o valores atípicos en el procesamiento puede ser por movimiento tridimensional, grandes gradientes de velocidad, partículas inadecuadas, entre otros, en función del nivel de ruido de las imágenes, el número y desplazamiento de las partículas (Huang *et al.*, 1997).

Adrian (1991) dio a conocer el potencial de la técnica en la ingeniería, en particular en el área de los fluidos, para luego ser adaptada en ramas como la geotecnia (p.e Ruiz, 2014), geología estructural (p.e Anaya, 2014), entre otras.

3.4.1 PIVlab

PIVlab - *Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MatLab*, fue desarrollado por PhD. William Thielicke y el Prof. PhD. Eize J. Stamhuis. Su primera versión fue programada en

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

MatLab Versión 7.10 (R2010a). Es un software de distribución libre (GUI) que se puede descargar desde su página web (pivlab.blogspot.com) (Ruiz, 2014).

En la mayoría de los análisis digitales PIV, se capturan dos imágenes en t_0 y $t_0 + \Delta t$, así las velocidades se derivan de Δt y la distancia que las partículas recorren desde la imagen 1 hasta 2 (desplazamiento de partículas). En PIVlab el desplazamiento de partículas se calcula para grupos de partículas mediante la evaluación de la correlación cruzada de muchas pequeñas sub imágenes (áreas de interrogación) donde la correlación mostrará el desplazamiento más probable (Thielicke, 2014). En éste documento se hará mención de la técnica de correlación cruzada ya que es la parte más importante de los análisis PIV. Para mayor información de ésta y otras técnicas de PIVlab, puede consultar el capítulo 2 de la tesis doctoral realizada por PhD. William Thielicke en 2014: “*The flapping flight of birds: Analysis and application*”.

3.4.1.1 Evaluación de la imagen

La correlación es una técnica de coincidencia de patrones estadísticos que trata de encontrar la tendencia más probable de las partículas del área de interrogación, determinando el desplazamiento, según Huang *et al.* (1997) se define en la ecuación (1).

$$C(m, n) = \sum_i \sum_j A(i, j) B(i - m, j - n) \quad (1)$$

Donde A y B son las áreas de interrogación de las imágenes 1 y 2, y $C(m, n)$ el desplazamiento de la partícula. Huang *et al.* (1993) resalta que a medida que aumenta el desplazamiento de la partícula, aumenta el error de la correlación cruzada debido a que

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

disminuye el número de partículas correlacionadas que permanecen en cada área (A y B), lo cual se corrige determinando el tamaño adecuado de B .

Thielicke (2014) menciona tres enfoques comunes para resolver la ecuación 1: uno es calcular la matriz de correlación en el dominio espacial (Ver Figura 9), denominado correlación cruzada directa (DCC), otro es la concordancia de patrones de las partículas en la imágenes (PIPM) y el tercero consiste en calcular la matriz de correlación en el dominio de la frecuencia (transformada discreta de Fourier, DFT) que a la vez se calcula usando una transformada rápida de Fourier (FFT). PIVlab implementa dos enfoques para resolver la ecuación: DCC y DFT

- a) *Correlación cruzada directa (DCC)*: En el cálculo de la matriz de correlación las áreas de interrogación A y B pueden tener dos tamaños diferentes. Cuando B (Área de búsqueda) se elige dos veces mayor que A (Área de interrogación), un desplazamiento de partícula de hasta la mitad del tamaño de A no habrá pérdida de información, proporcionando una matriz de correlación fiable con bajo nivel de ruido de fondo (Thielicke, 2014). Los resultados son más exactos que un procedimiento DFT estándar, pero representa un aumento de coste computacional, especialmente con grandes áreas de interrogación, tanto el error sistemático como el error aleatorio del cálculo disminuyen sustancialmente usando DCC (Huang et al., 1997)
- b) *Transformada discreta de Fourier (DFT)*: Este enfoque utiliza áreas de interrogación de tamaño idéntico; por lo tanto, cada desplazamiento de partículas induce cierta pérdida de información, evidenciado en la cantidad de ruido de fondo en la matriz de correlación

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
 BUENO-SILVA, L.

(Thielicke, 2014). En consecuencia, el desplazamiento de las partículas tiene que ser menor que la mitad del tamaño de la zona de interrogación, se aconseja reducir aún más el desplazamiento a aproximadamente un cuarto del área de interrogación, con el fin de mantener bajo el ruido de fondo en la matriz de correlación (Keane & Adrian, 1992).

DFT tiene la ventaja de no tener el coste computacional que presenta DCC ya que se resuelve con el cálculo de la matriz de correlación en el dominio de la frecuencia utilizando FFT. Las desventajas de DFT se compensa aumentando el tamaño de las ventanas de interrogación, disminuyendo Δt o reduciendo la ampliación de la imagen de la cámara (Thielicke, 2014). Además Westerweel et al. (1997) agregan que mediante la ejecución de varias pasadas de la DFT en el mismo conjunto de datos, la malla de áreas de interrogación puede ser refinada con cada pasada, produciendo una alta resolución espacial en el mapa de vectores final.

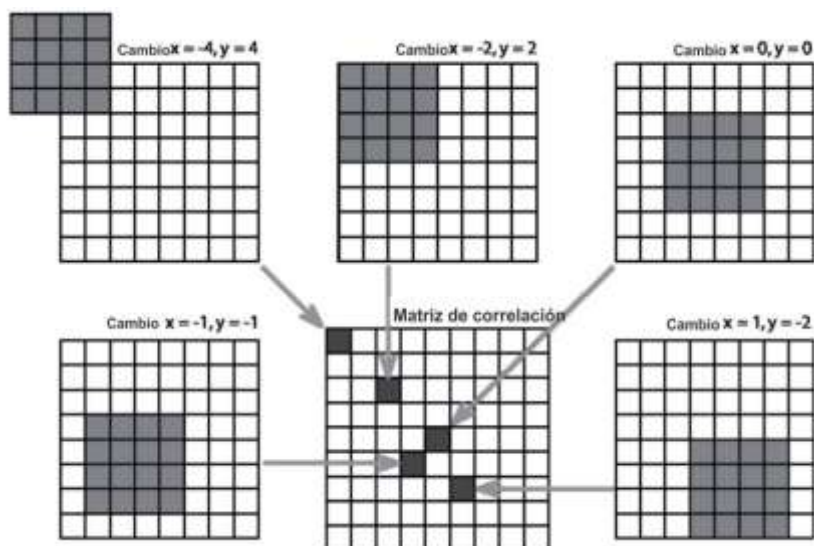


Figura 9. Cálculo de la matriz de correlación utilizando DCC realizada en MATLAB. Área Interrogación A (tamaño 4 x 4 píxeles) se correlaciona con la zona de interrogación B (tamaño 8 x 8 píxeles) y se obtiene la matriz de correlación (tamaño 9 x 9 píxeles). Tomado de Thielicke (2014).

4 Metodología

El presente trabajo se enfoca en el aprovechamiento de los modelos análogos para representar la el contacto interplaca del proceso de subducción y como se relaciona con los sismos. Sabiendo que factores tales como el gradiente de temperatura al aumento de profundidad, efectos de la presión de poros y la compactación diferencial, no se pueden incluir en modelos físicos ya que como mencionan Dooley & Schreurs (2012), son desconocidos, inciertos o simplemente difíciles de modelar. Es importante también dejar claro que el experimento no muestra una recurrencia o número de eventos, tan solo una generación y liberación de esfuerzos. Para el cumplimiento de los objetivos del proyecto se dividió en 3 etapas principales que se describen a continuación

4.1 Etapa I: Recopilación bibliográfica

La consulta y entendimiento de autores con experiencia en temas como sismología, subducción y modelos análogos, es la etapa inicial y entre las más importantes para el desarrollo del trabajo, puesto que es el punto de partida para nuestras hipótesis, coherencia y viabilidad del desarrollo del proyecto. Además de los procesos geológicos como tal, es importante realizar una revisión física-mecánica básica y trabajos en modelos análogos, ya que el buen entendimiento y uso de las herramientas para la ejecución de los modelos determinan buenos resultados para el cumplimiento de los objetivos del proyecto

4.2 Etapa II: Montaje experimental

4.2.1 Preparación de la gelatina

La gelatina es un sistema sencillo, económico, transparente, frágil, visco-elástico sólido, con una rigidez baja que permite que la gravedad sea significativa en los modelos a escala de laboratorio (Takada, 1990; Richards & Mark, 1966). Este material en estado sólido (gel) tiende a comportarse elásticamente, por lo que se considera un análogo útil para la corteza superior de la Tierra (van Otterlo & Cruden, 2016) o procesos tectónicos (Di Giuseppe et al., 2009). Kavanagh *et al.* (2013) resalta el comportamiento visco-elástico de la gelatina, mencionando que a grandes esfuerzos aplicados en un corto tiempo, el comportamiento es elástico, y a periodos amplios de tiempo y pequeños esfuerzos, la respuesta es semejante a la viscosa.

Las proporciones de la solución son: por cada 1.000 mL de agua se adicionan 70 g de gelatina. Partiendo de que la gelatina es relativamente insoluble en agua fría pero se hidrata rápidamente en agua caliente (Pb Gelatin). Se disuelve gelatina en la solución a temperatura ambiente, se mezcla y luego se agrega agua caliente, posteriormente se refrigera ya que la gelificación (pasar a un estado similar al sólido, ver Di Giuseppe et al., 2009) es provocada principalmente en bajas temperaturas, dando como resultado una gelatina relativamente rígida, lo cual facilita el desplazamiento sobre la rampa y extiende el tiempo de vida útil.

Casi todas las rocas son anisotrópicas, no homogéneas y discontinuas, y por lo tanto no son perfectamente elásticas. Las rocas ígneas de grano grueso y sedimentos compactos de grano fino, con baja porosidad y una razonable cohesión, se les denomina rocas semi-elásticas. Para dichas rocas el módulo de Young en condiciones de cargas definidas decrece con el incremento de la tensión (Farmer, 2004). Martinez (2017) determinó a partir de PIVlab el módulo de Young (E)

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

para un bloque de gelatina de idénticas condiciones a las del presente proyecto, expuesta a un esfuerzo en la parte superior con un recipiente al cual aumenta gradualmente su masa (Ver Anexo A), donde el valor promedio de E fue equivalentes a $1,02 \times 10^4$ Pa. Además, el módulo de corte o de rigidez (G), está estrechamente relacionado con el módulo de Young, donde $E=2G$ (Fossen, 2010), es decir $5,1 \times 10^3$ Pa.

4.2.2 Cálculo de la densidad de la gelatina

Para el cálculo de la densidad se realizaron 3 métodos, unos más precisos que otros pero con datos útiles para obtener $1,02 \frac{g}{cm^3}$ como valor promedio de la densidad de la gelatina.

Finalmente, a partir de los resultados en los métodos 4.2.2.1 y 4.2.2.3 y con la ecuación 2, se determina la densidad de las muestras:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Donde m es la masa (g), y V el volumen (cm^3)

4.2.2.1 Volumen del sólido por dimensiones.

Es un método rápido que permite calcular el volumen de la gelatina por la medida de cada uno de sus lados (Ver Tabla 1 y Figura 10). Por su facilidad fue el punto de partida para tener una idea de la densidad a diferentes concentraciones, pero a la vez es un método no tan preciso que hace necesario el apoyo de otros.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

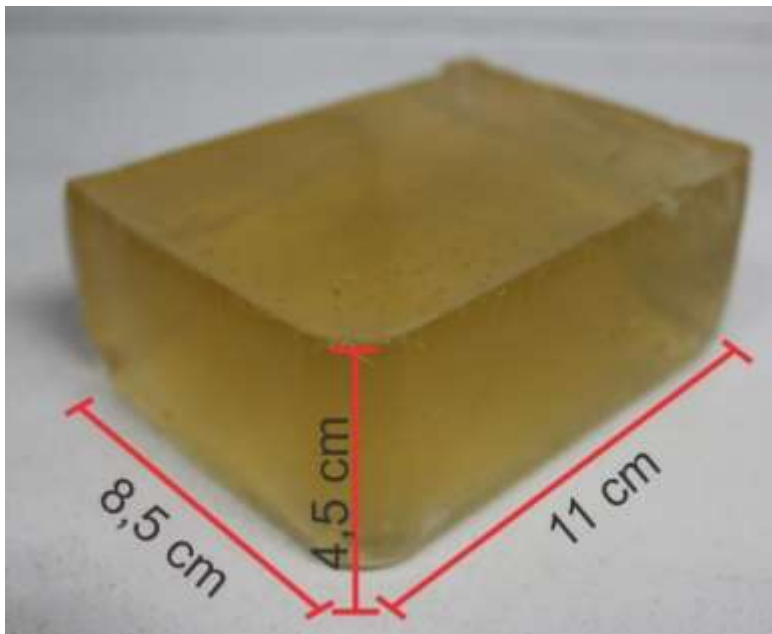


Figura 10. Bloque de gelatina de 8,5 x 4,5 x 11 y masa de 441 g

Tabla 1. Valores de densidad por el cálculo del volumen por dimensiones, solución Gelatina+agua

N° Experimento	Densidad [g/cm ³]
1	1,04
2	1,13
3	1,02
4	1,06
5	1,03
6	1,08
Promedio	1,06

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

4.2.2.2 *Hidrómetro*

En este método, es necesaria la solución en estado líquido, ya que permite conocer la densidad con relación a la del agua ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$). Consiste en adicionar en un recipiente cilíndrico una cantidad suficiente de gelatina, luego introducir el hidrómetro (para densidades entre 1-1,1) y se observa la escala que indica la densidad de la gelatina de $1,02 \text{ g/cm}^3$ (Ver Figura 11).

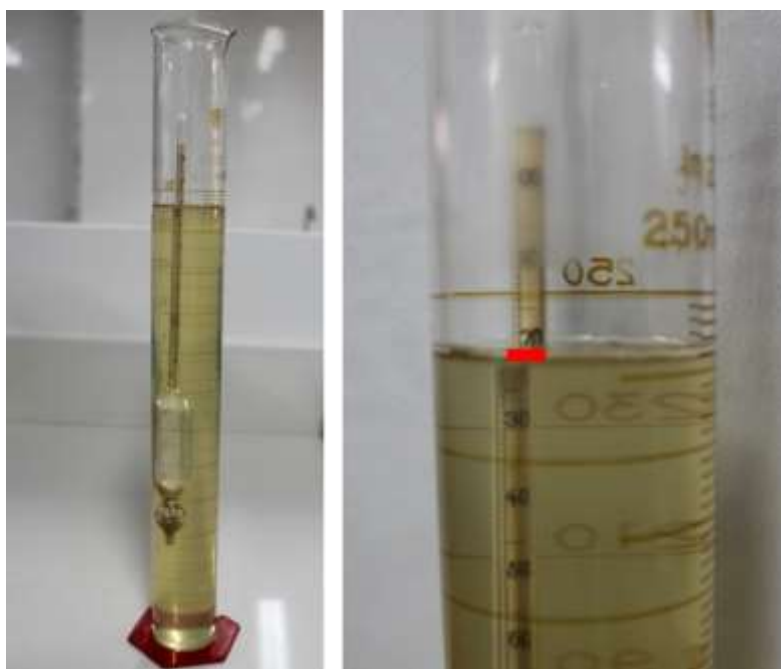


Figura 11. Hidrómetro (1-1,1) dentro de una probeta de 250 mL con muestra líquida de gelatina.

4.2.2.3 *Cambio del volumen en un Le Chatelier*

Inicia adicionando agua hasta la marca guía (0= 100 ml), luego se pesa en la balanza analítica la cantidad de gelatina a adicionar, se divide en pequeñas partes para poder agregarla al recipiente (ver figura 12), el volumen desplazado indica el volumen del sólido, el cual divide la masa que se agregó, dando la densidad (Ecuación 2).



Figura 12. Le Chatelier y balanza analítica

4.2.3 Cálculo de la Viscosidad

En Geología, materiales como magma, sal y quizás lodo sobrepresionado, se consideran medios verdaderamente viscosos. Sin embargo, la viscosidad es una referencia útil cuando se trata de ciertos aspectos de deformación plástica, donde rocas a altas temperaturas presentan un comportamiento viscoso no lineal (Fossen, 2010)

Catriel (2008) menciona que existen 3 tipos de viscosidad: la dinámica, la cinemática y la aparente y las define así:

- Viscosidad dinámica (μ): representando la curva de fluidez (esfuerzo cortante vs velocidad de deformación) se define como la pendiente en cada punto de dicha curva (Ver Figura 13).

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

- Viscosidad cinemática (ν): relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido utilizado.
- Viscosidad aparente (η): se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación y representa la pendiente, desde el origen, de la curva de fluidez. (ver Figura 13, Viscosidad para fluidos no newtonianos).

Para determinar la viscosidad de la gelatina, se usaron el viscosímetro FANN modelo 35A (ver figura 14) y el reómetro Koehler modelo K21410 (Ver figura 15), con temperatura de la solución medida en dos tiempos: aprox. 3 horas de reposo luego de su preparación $\sim 25^{\circ}\text{C}$, y con reposo a no más de 30 minutos $\sim 39^{\circ}\text{C}$.

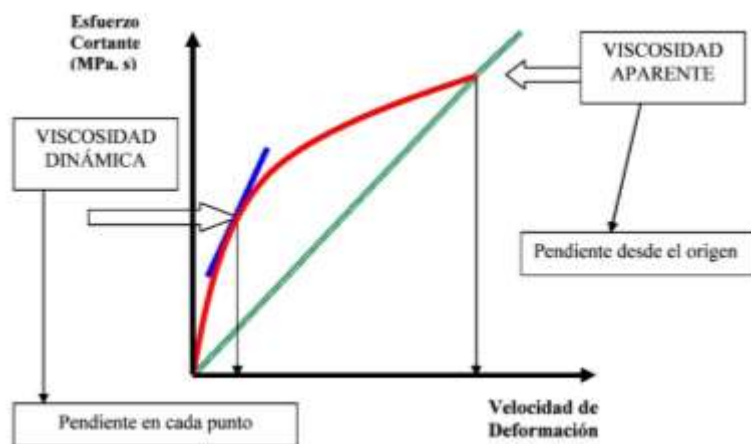


Figura 13. Figura de fluidez, resaltando la relación de la pendiente con la viscosidad dinámica y aparente. Tomado de Catriel (2008)

4.2.3.1 Viscosímetro FANN modelo 35A:

El viscosímetro consiste de 6 diales de los cuales sólo se usaron los de mayor velocidad en cada sección (High / Low) es decir $\theta 600$ y $\theta 300$ respectivamente (Ver figura 14 b, c). Se agrega la

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
 BUENO-SILVA, L.

solución al recipiente, se selecciona la velocidad a trabajar, se deja rotar durante 1 minuto y se toma el rango del esfuerzo que se observa. Con el valor promedio de esfuerzo para cada velocidad (Ver Tabla 2) se calcula la viscosidad aparente a partir de la ecuación 3.

Tabla 2. Datos tomados con el viscosímetro Fann modelo 35^a, de acuerdo a la velocidad y temperatura

	0300		0600	
	39°C	24°C	39°C	24°C
Mínimo	11	197	21,5	273
Máximo	13	198	23	274
Promedio	12	199	22,5	275



Figura 14 Medida viscosidad *a.* viscosímetro FANN modelo 35^a, *b.* Parte superior donde se selecciona el dial de velocidades a trabajar *c.* vista lateral viscosímetro FANN modelo 35^a armado, botón de encendido parte inferior derecha de la imagen.

$$\text{Viscosidad Aparente } (\eta) = \frac{\theta 600}{2} \quad (3)$$

4.2.3.2 Reómetro Koehler modelo K21410

El funcionamiento del reómetro se basa en la facilidad con que fluye la solución a través de un orificio de diámetro pequeño, puesto que esto indica la viscosidad. Se agregan 60 mL de solución de gelatina en la parte superior del reómetro (ver Figura 15b), se prepara el cronómetro y se retira la tapa inferior para que inicie a descender el fluido (Ver Figura 15a) hasta que se vuelvan a coleccionar los 60 mL que se agregaron en la parte superior.

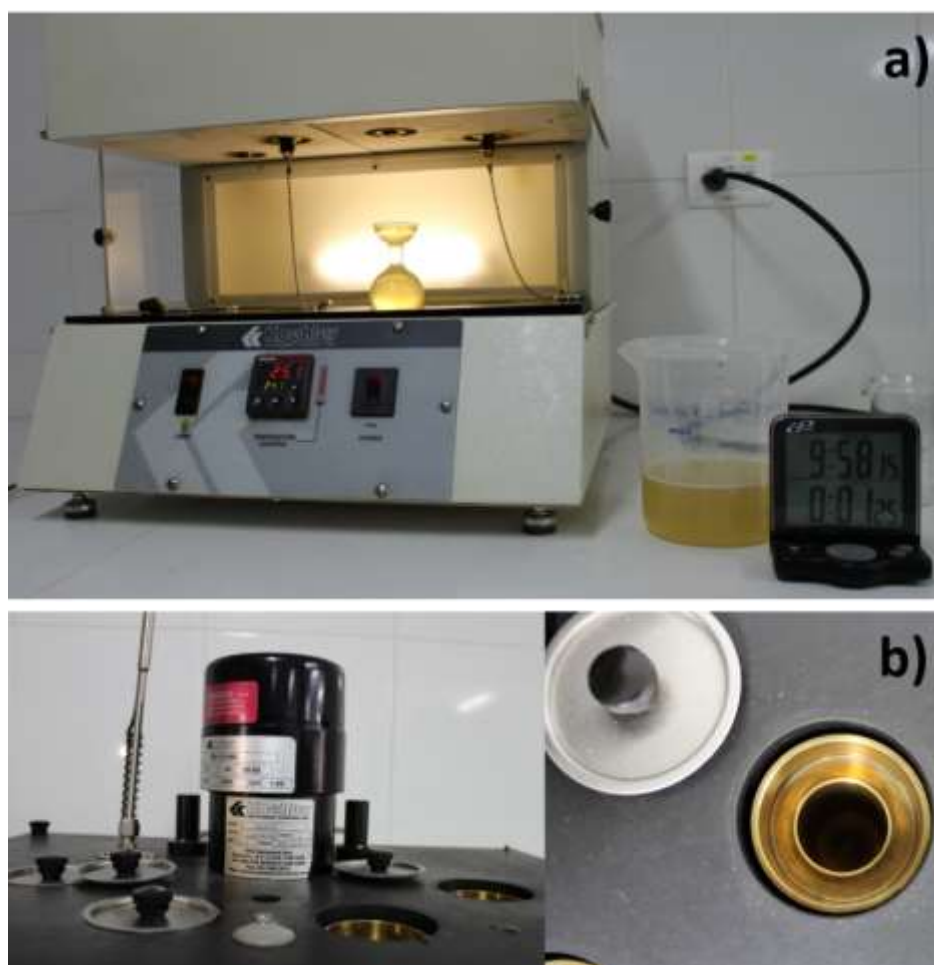


Figura 15. Reómetro Koehler modelo K21410. *a.* Vista frontal más implementos necesarios como cronómetro y recipientes. *b.* Vista superior, orificios donde se agrega el fluido viscoso.

El tiempo resultante se determina como viscosidad del fluido en Segundos Universales Saybolt (SSU), siendo resultados relativos. Finalmente se determina la viscosidad cinemática a partir del valor obtenido (en Segundos) y con las ecuaciones de la Tabla 3.

Tabla 3. Determinación de los datos obtenidos en el reómetro a SSU

Viscosidad Saybolt	Intervalo t(s)	Viscosidad cinemática (St)
	$32 < t < 100$	$0,00225t - 1,95/t$
SSU	$t > 100$	$0,00220t - 1,35/t$

4.2.4 Construcción del mecanismo

Wang *et al.* (2012) define ciclo sísmico de subducción (SEC) como la ruptura y posterior evolución del esfuerzo y la deformación que conllevan a continuos sismos. Se pretende representar dicho evento con el mecanismo del experimento (Ver figura 16) que consiste de una cuñas de madera con plataforma lisa de vidrio y ángulo (θ) fijo. Sobre el vidrio se adhiere papel de lija, ya que según Corbi *et al.* (2013), las propiedades de fricción de la lija son un análogo de la zona sismogénica.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

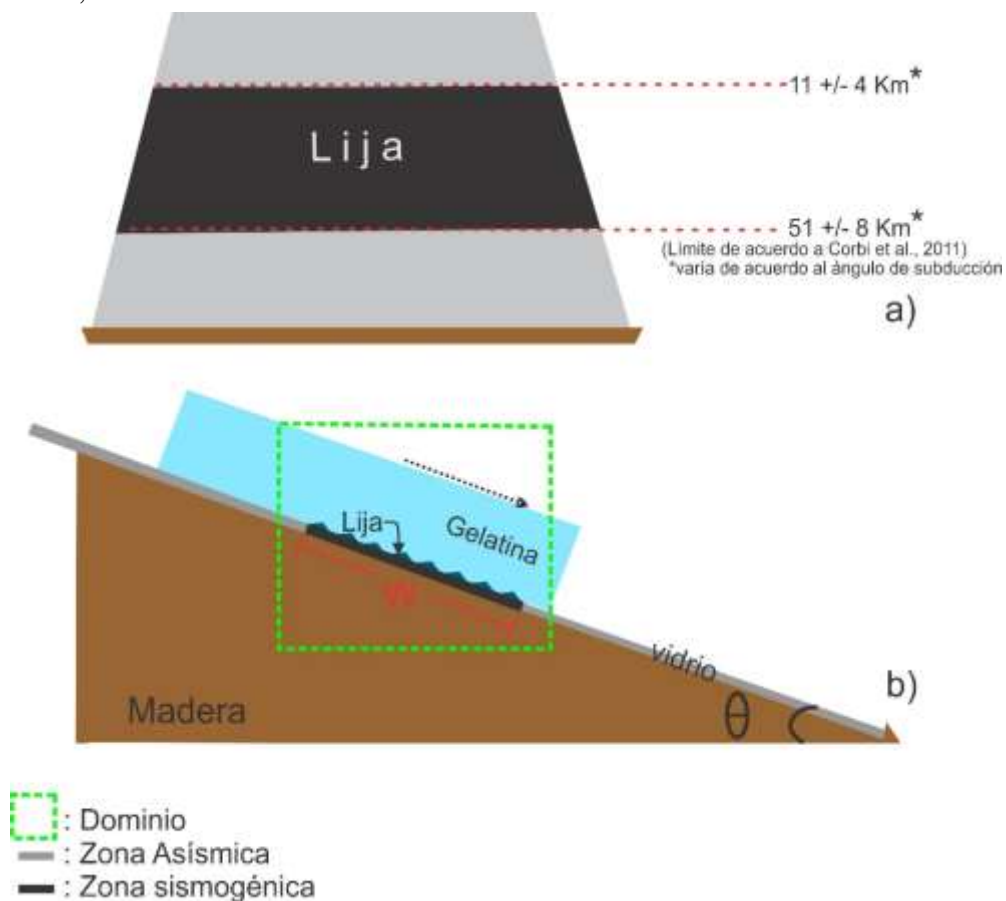


Figura 16. Esquema mecanismo del experimento **a)** Plano Frontal del esquema donde se muestra la variación de papel de lija, siendo la zona sismogénica el intervalo global mencionado por Corbi *et al* (2011) delimitada por las líneas no continuas de color rojo. **b)** Plano lateral donde se resalta el dominio de interés para el proyecto.

4.2.5 Escalado

Las propiedades a tener en cuenta en la gelatina son densidad, módulo de Young y viscosidad, del mecanismo la longitud del papel de lija (W) (ver Figura 16) y durante la ejecución del modelo, la velocidad. Es importante encontrar un factor de escala entre el prototipo natural y el modelo de laboratorio que permita mantener una relación para cada parámetro. Un escalado correcto es aquel en el que el modelo sea geométrica, cinemática y dinámicamente similar al prototipo natural a

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

través de su evolución, y se cumple si las longitudes, las velocidades y las fuerzas entre el modelo y el prototipo natural son proporcionales (Weijermars & Schmeling, 1986).

4.2.5.1 Escala de longitudes

Para garantizar la similitud geométrica, las longitudes del modelo difieren en tamaño pero sus formas son idénticas (Koyi, 1997). De acuerdo al ángulo de subducción (θ), la longitud de la zona sismogénica varía. Estudios como el de Heuret *et al.* (2011) mencionan dicha longitud, entre otros parámetros en diferentes zonas de subducción del mundo (Ver Anexo B). Los datos fueron usados y escalados en el modelo donde:

$$15 \text{ Km en la naturaleza} = 1 \text{ cm en el modelo}$$

$$W(\text{Heuret et al.}, 2011) [\text{km}] * \frac{1 \text{ cm}}{15 \text{ km}} = W \text{ en el modelo} \quad (4)$$

Por ejemplo, según la ecuación 4 y de acuerdo a los datos de Heuret *et al.* (2011), la longitud de la zona sismogénica (W) en el N de Chile sería,

$$105 \text{ Km} = 7 \text{ cm}$$

$$W \text{ en subducción Chile} \quad W \text{ en el Modelo}$$

Siguiendo el procedimiento realizado por Rosenau *et al.* (2009) y Corbi *et al.* (2013) se calcula un número no-dimensional, llamado factor de escala:

$$\text{Factor de escala} = \frac{\text{Valor en el Modelo}}{\text{Valor en la Naturalez}} \quad (5)$$

$$F.E \text{ de longitud} = \frac{7}{10500000}$$

$$F.E \text{ de longitud} = 6,67 \times 10^{-7}$$

4.2.5.2 Escala de Densidad, módulo de Young y Viscosidad

Según Hubbert (1937), Para obtener una representación exacta del prototipo natural es necesario tener un modelo escalado completo y adecuadamente, pero en la práctica, un modelo que se escale correctamente teniendo en cuenta todos los parámetros que influyen es muy poco probable.

Por ejemplo Rosenau *et al.* (2009) modela una corteza continental elasto-plástica donde escala la densidad del material con valores de $2800 \frac{kg}{m^3}$ para la naturaleza. Partiendo de dicho valor y de la densidad de la gelatina se determina el factor de escala a partir de la ecuación 5:

$$F.E \text{ de densidad} = \frac{1020 \frac{kg}{m^3}}{2800 \frac{kg}{m^3}}$$

$$F.E \text{ de densidad} = 0,3643$$

Se realiza el mismo procedimiento que en el caso anterior usando la ecuación 5 con los valores de distintos parámetros correspondientes en la naturaleza (Ver Tabla 10).

4.2.5.3 Escala de Velocidad

En la similitud cinemática Koyi (1997) menciona que se debe tener la escala de longitudes y además una escala de tiempo, para conseguir una escala de velocidades. El tiempo de exposición del experimento no es mayor a un minutos y la longitud del mecanismo a menos de

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
 BUENO-SILVA, L.

30 cm, así, PIVlab muestra un buen cálculo de la escala de velocidad (Ver numeral 4.3.1 Funcionamiento de PIVlab) donde en el pre-procesamiento con la herramienta *CALIBRATION* (Ver Figura 22) se delimita una distancia de referencia en la foto, en este caso la zona sismogénica, y se pone su valor en milímetros en la casilla correspondiente. Sabiendo que las fotografías se tomaron en una ráfaga de 3 fotos por segundo, entonces el tiempo se calibra así:

$$1 \text{ segundo} = 1000 \text{ milisegundos}$$

$$\frac{1 \text{ segundo}}{3 \text{ fotos}} = 0,333 \text{ segundos por foto}$$

$$0,333 \text{ segundos} = 333,33 \text{ milisegundos}$$

Y se agrega en la casilla correspondiente (Ver Figura 19), ya calibradas las fotografías, el software compara dos imágenes (Ver numeral 4.3.1 Funcionamiento de PIVlab) capturadas en instantes de tiempos diferentes (Δt). Comparando las imágenes tomadas en el t_1 y en t_2 se miden los desplazamientos y calcula la velocidad en el modelo y luego el factor de escala (Ver Tabla 10).

4.2.5.4 Escala de Fuerzas

La similitud o factor de escala dinámico según Koyi (1997) se logra si las fuerzas ejercidas en puntos homólogos entre el modelo y el prototipo se relacionan entre sí mediante una escala de fuerzas. En el modelo las fuerzas que participan son la Fricción (F_r), la normal (N) y la gravedad (g) que junto a la masa determinan el peso (P) (Ver Figura 17b). En la naturaleza son varias las fuerzas que diferentes autores han determinado (Ver numeral 3.1 proceso de subducción), las cuales se originan por diversos factores y en distintos lugares durante el proceso de subducción

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

(Ver figura 3). De acuerdo a la Figura 17, la relación entre las fuerzas del modelo (Figura 17b) se podrían comparar con las Fuerzas F_{SP} (*slab pull*) y F_{CR} (*colliding resistance*) en la naturaleza (Figura 17a), siendo P_x (componente del peso en el eje x) equivalente a F_{SP} y F_f (fuerza de fricción) a F_{CR} .

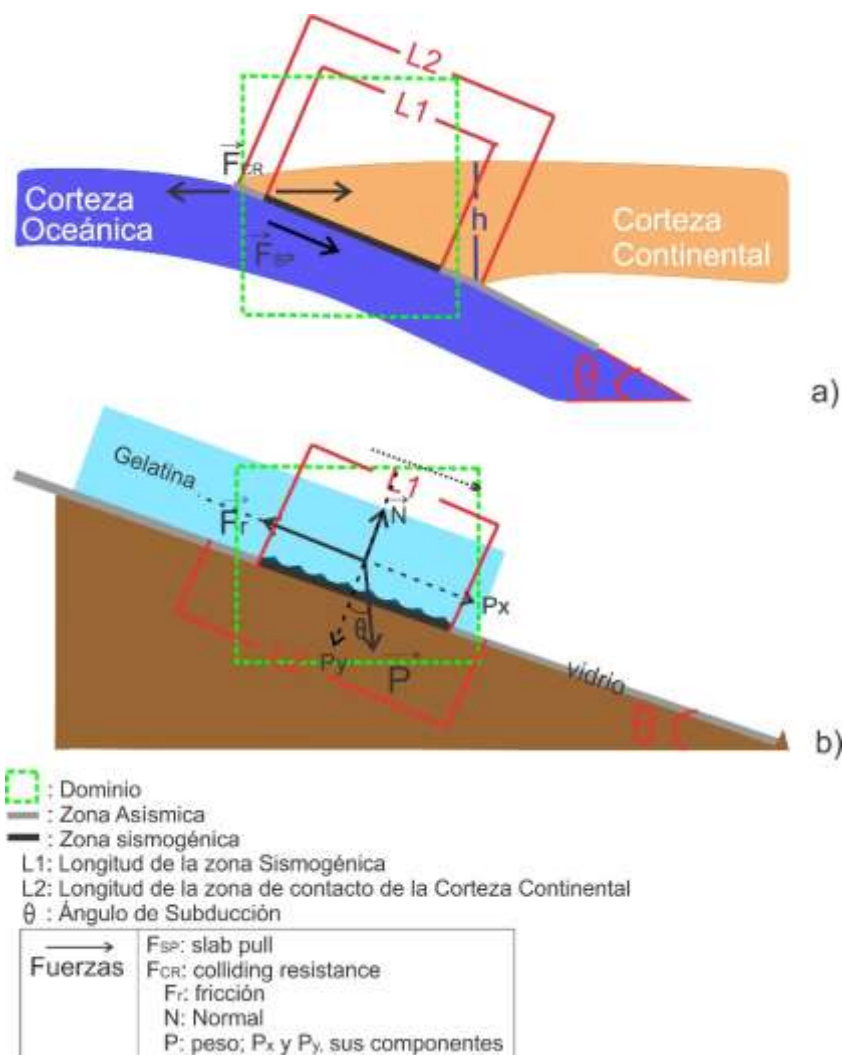


Figura 17. Esquema representativo de fuerzas y comparación del proceso natural y el modelo de laboratorio **a)**. Modelo teórico del proceso de subducción y las fuerzas que actúan en la naturaleza y que se podrían involucrar en el modelo experimental. **b)**. Esquema representativo del modelo experimental donde las zonas asísmicas y sismogénica son análogamente representadas por vidrio y papel de lija, respectivamente y la corteza continental por gelatina. Se define el dominio como la zona de interés para el análisis en el experimento.

De acuerdo al procedimiento realizado por Rosenau *et al.* (2009) y Corbi *et al.* (2013) es necesario usar conjuntos de números adimensionales para asegurar la similitud dinámica con respecto a la gravedad, inercia, elasticidad, fricción y viscosidad:

1) r la relación entre la gravitación y el esfuerzo σ (ya sea por fricción o viscosidad):

$$r = \rho l g / \sigma \quad (6)$$

Donde ρ es la densidad, l la longitud y g la aceleración de la gravedad, que al realizar

la relación F.E = $\frac{r^m}{r}$ (m valores en el modelo) se obtiene:

$$\frac{r^m}{r} = \frac{\rho^m l^m g / \sigma^m}{\rho l g / \sigma}$$

$$\frac{r^m}{r} \times \frac{\sigma^m}{\sigma} = \frac{\rho^m l^m}{\rho l}$$

sabiendo que $\frac{\#no\ dimensional^m}{\#no\ dimensional} = 1$, entonces: $\frac{\sigma^m}{\sigma} = \frac{\rho^m l^m}{\rho l}$

2) El número de Froude (Fr) relaciona la gravitación y la inercia:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times l}} \quad (7)$$

Donde v es la velocidad, la cual es igual a $\frac{l}{t}$, entonces:

$$\frac{Fr^m}{Fr} = \frac{\frac{l^m}{t^m} \times (g \times l^m)^{-0,5}}{\frac{l}{t} \times (g \times l)^{-0,5}}$$

$$\frac{t^m}{t} = \frac{l \times (l^m)^{-0,5}}{l \times (l)^{-0,5}}$$

$$\frac{t^m}{t} = \frac{(l^m)^{0,5}}{(l)^{0,5}}$$

3) Número de Cauchy (Ca) relaciona la inercia y la elasticidad:

$$Ca = \frac{\rho v^2}{k} \quad (8)$$

Donde k es el módulo de Bulk, al hacer la relación modelo/naturaleza:

$$\frac{k^m}{k} = \frac{\rho^m l^m t}{\rho l t^m}$$

4.2.6 Ejecución del Modelo

Ya todo establecido en el mecanismo, se ubica en el trípode una cámara modelo Canon EOS REBEL T5 ISO-3200 en la opción de ráfaga (3 capturas por segundo), el lugar debe estar acondicionado con fondo blanco y control de la luz (ver Figura 18) puesto que como menciona Ruiz (2014) Para que el método funcione con una buena precisión, en la zona donde se capturan las imágenes (dominio) se debe evitar cualquier tipo de reflejo, en este caso, sobre el bloque de gelatina. Finalmente se pone la gelatina para que se deslice en el mecanismo y se inicia la captura de imágenes enfocadas en el dominio (Figura 16 y 17), para ser luego procesadas en PIVlab.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.



Figura 18. Montaje experimental. Se constituye principalmente de una cámara modelo Canon EOS REBEL T5 ISO-3200 con el foco a una distancia de 14,1 cm del modelo (Ver imagen superior izquierda), en el modo ráfaga de 3 fotos por segundo (Ver imagen superior derecha) y acondicionado con fondo blanco (imagen inferior derecha, resaltado con azul).

Es necesario entender que el proceso de subducción en el modelo no ocurre como en la naturaleza, es decir, la placa oceánica no se desliza bajo la continental, por el contrario, la gelatina (análogo de la corteza continental) se desliza sobre el plano inclinado, en el que la fuerza de la gravedad genera el deslizamiento, y la gelatina en la que se transfieren los esfuerzos. Cabe aclarar que para sacar el bloque de gelatina del recipiente es necesario despegarlo primero con un bisturí de las paredes, luego agregarlo en otro recipiente más grande con agua caliente (baño maría) para lograr despegar la base, volver a pasar el bisturí de ser necesario y finalmente extraerlo. Este bloque de gelatina queda en la base con una pátina viscosa equivalente a la determinada para las muestras a 39° (Ver 5.1.1 Características de la gelatina)

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

4.3 Etapa III: Procesamiento e interpretación de la información.

PIVlab es uno de los varios software de interpretación de imágenes, desarrollado por Thielicke & Stamhuis. Ruiz (2014) evaluó tres alternativas de software las cuales fueron PIVsleuth, OpenPIV y PIVlab, de lo que concluyó que PIVlab es un software que a pesar de ser libre presenta una interfaz gráfica sencilla, calcula los vectores correctamente y adicionalmente tiene una herramienta de post-proceso bastante útil.

4.3.1 Funcionamiento de PIVlab

PIVlab es un software con un funcionamiento sencillo, desarrollado a partir de la plataforma MatLab, El análisis PIV realizado en este software consta de tres pasos principales: el pre-procesamiento o adecuación, el análisis o comparación y el post-procesamiento de las imágenes (ver Figura 19).

Para habilitar la carpeta PIVlab que se descarga y ubica dentro de la carpeta de MatLab R2017a de uso académico. Abre la plataforma de Matlab, se busca la carpeta PIVlab -> (click derecho) *selected folders and subfolders* (Ver Figura 20) para iniciar pre-procesamiento.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

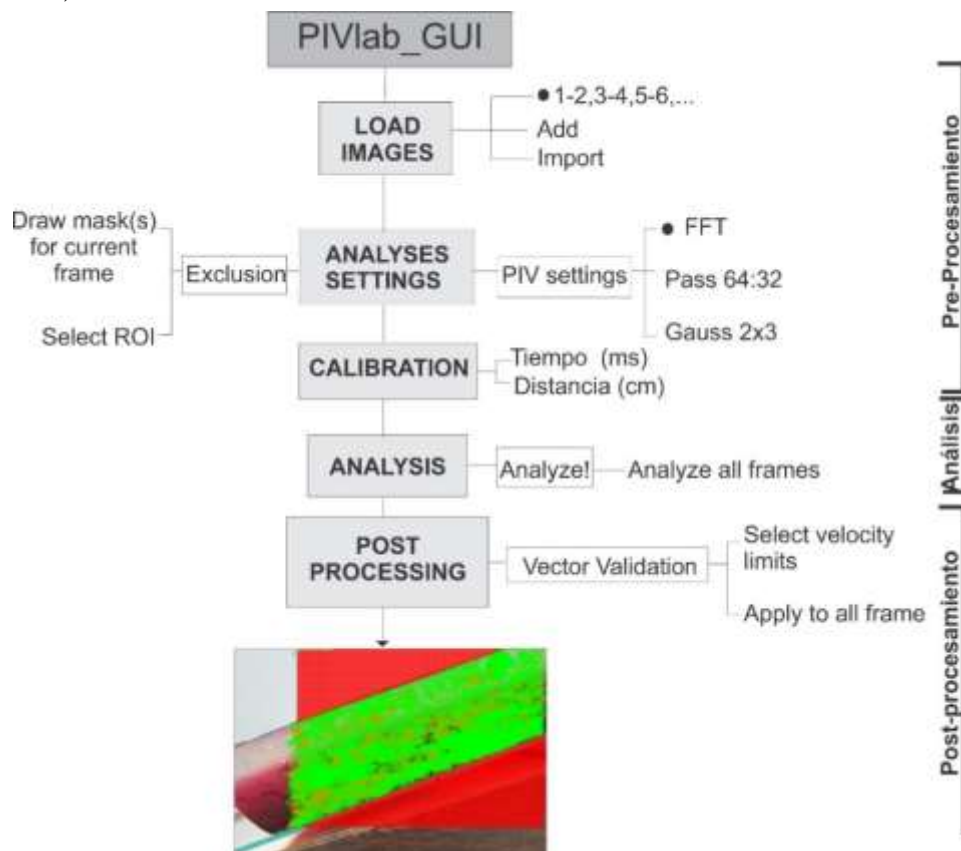


Figura 19. Pasos para el procesamiento de imágenes en PIVlab

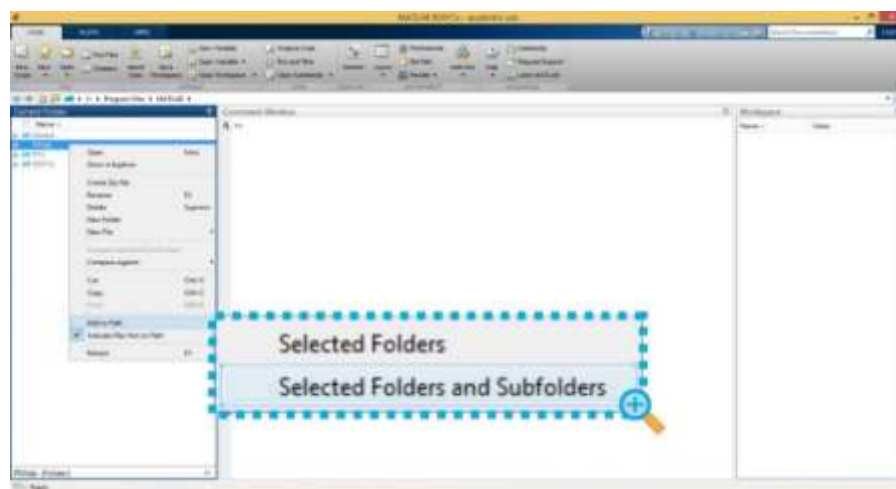


Figura 20. Proceso para habilitar la carpeta PIVlab en MatLab R2017a de uso académico

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

4.3.1.1 Pre-procesamiento

Ya habilitada la carpeta, en la plataforma de MatLab se escribe el comando “PIVlab_GUI” que abrirá la plataforma de PIVlab para iniciar a cargar las imágenes (ver Figura 19 y 21). Se usa el botón LOAD IMAGES que dirige a otra pestaña, luego se busca la carpeta de imágenes, se seleccionan las fotos, se oprime ADD y finalmente IMPORT. En el presente trabajo, se ingresaron diferentes cantidades de imágenes por experimento, de lo cual PIVlab los convierte a marcos (2 fotos = 1 marco).

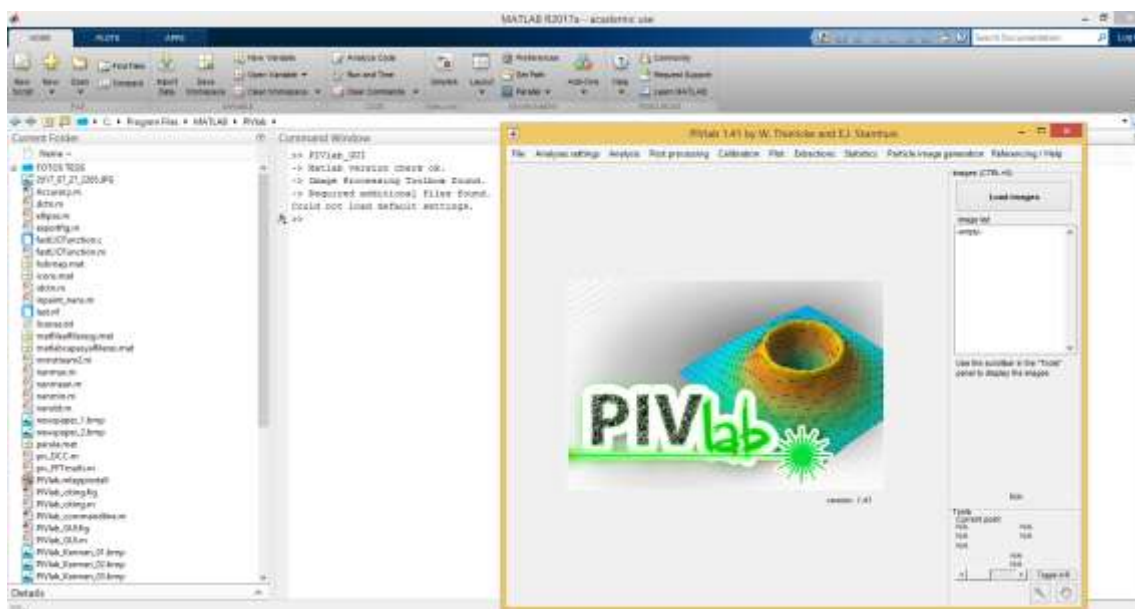


Figura 21. Inicio de la plataforma PIVlab

Ya cargadas las imágenes, continua la selección del dominio (recuadro verde de líneas no continuas, Ver Figura 22), es decir, la zona que se quiere analizar, ANALYSES SETTINGS -> exclusions -> select ROI. Como hay zonas dentro del dominio que no se quieren involucrar en el análisis (zonas color rojo con transparencia, Ver Figura 22) se excluyen con la herramienta Draw mask(s) for current frame y se aplica a todos los marcos con Apply current mask(s) to

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

frames. Para este estudio no se aplicaron los filtros de la herramienta *Imagen pre-processing* (*CLAHE*, *Intensity highpass* e *Intensity capping*) puesto que la textura de la gelatina estaba bien marcada y no hubo diferencias en los experimentos con y sin filtro. Continúa con el área de interrogación que consiste en dividir el dominio en áreas más pequeñas, mejorando su análisis (Ver numeral 3.4.1.1 Evaluación de la imagen), y se determina en *ANALYSES SETTINGS*->*PIV settings*-> *FFT Window deformation*-> *Pass 1: area de interrogación= 64 px y Step= 32 px / Pass 2 / sub-pixel estimator= Gauss 2x3-point*.

Finalizando la primera etapa, se calibran las imágenes en tiempo (ms) y longitud (mm) como se muestra en la Figura 22 (Ver numeral 4.2.5.3 Escala de velocidad).

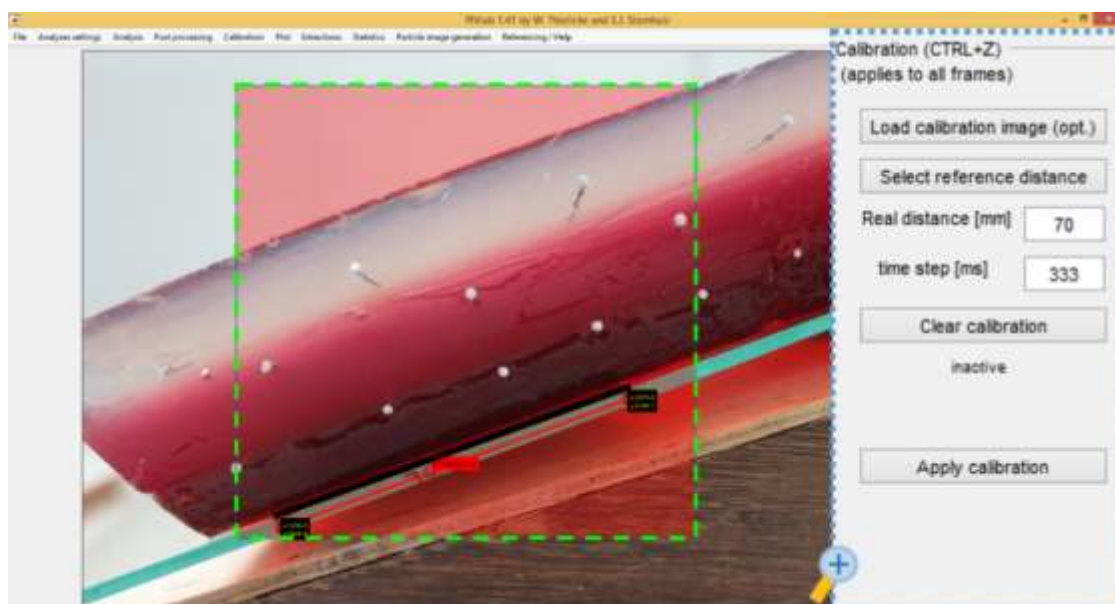


Figura 22. Calibración de los marcos. *Time step*: tiempo en mili-segundos por foto (1s/3fotos), *Real distance*: longitud de referencia en la imagen (zona sísmogénica (W)). Recuadro discontinuo azul indicando un acercamiento, cuadro verde de líneas discontinuas dominio del modelo.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

4.3.1.2 *Análisis de los marcos*

En esta sección los marcos ya adecuados generan los vectores de desplazamiento (Ver Figura 24), resultado de la comparación de dos imágenes capturadas en instantes de tiempo diferentes. En ANALYSES -> Analyze!-> Analyze all frame donde los vectores resultantes se interpretan posteriormente con el uso de las herramientas de post-procesamiento.

4.3.1.3 *Post-Procesamiento*

Una de las herramientas más importante que hace parte del post-procesamiento es la validación de datos, en POST-PROCESSING -> Vector validation -> select velocity limits, se excluyen esos vectores falso o valores atípicos los cuales se determinan por estar fuera de la tendencia normal de puntos (Ver Figura 23). Esto favoreciendo la obtención de resultados más verídicos.

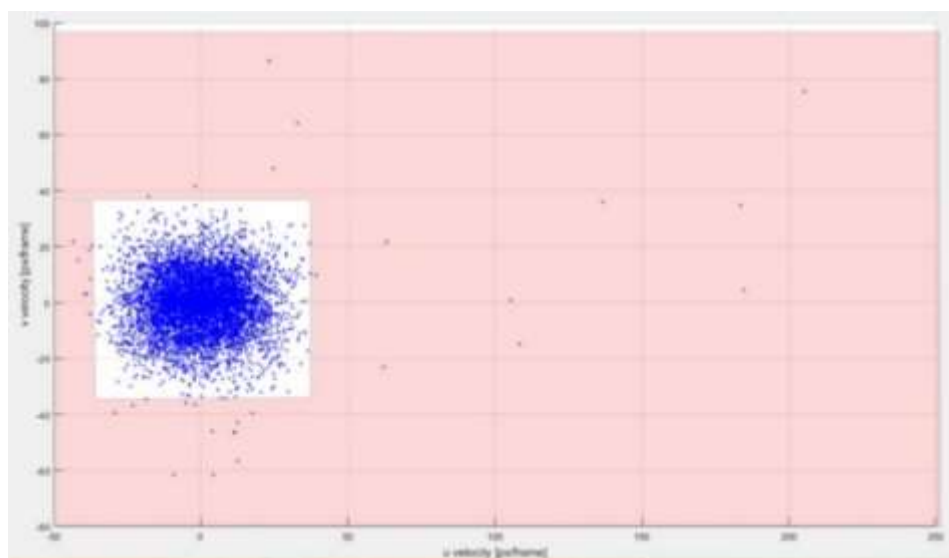


Figura 23. Gráfica para la validación de los vectores (Velocidad V vs U [px/marco]) donde se consideran válidos los puntos dentro de la zona blanca.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

Ya con los falsos vectores excluidos y cada marco con los vectores generados (Ver Figura 24), se saca provecho de las herramientas que muestren de forma cualitativa y cuantitativamente las más claras interpretaciones de los resultados.

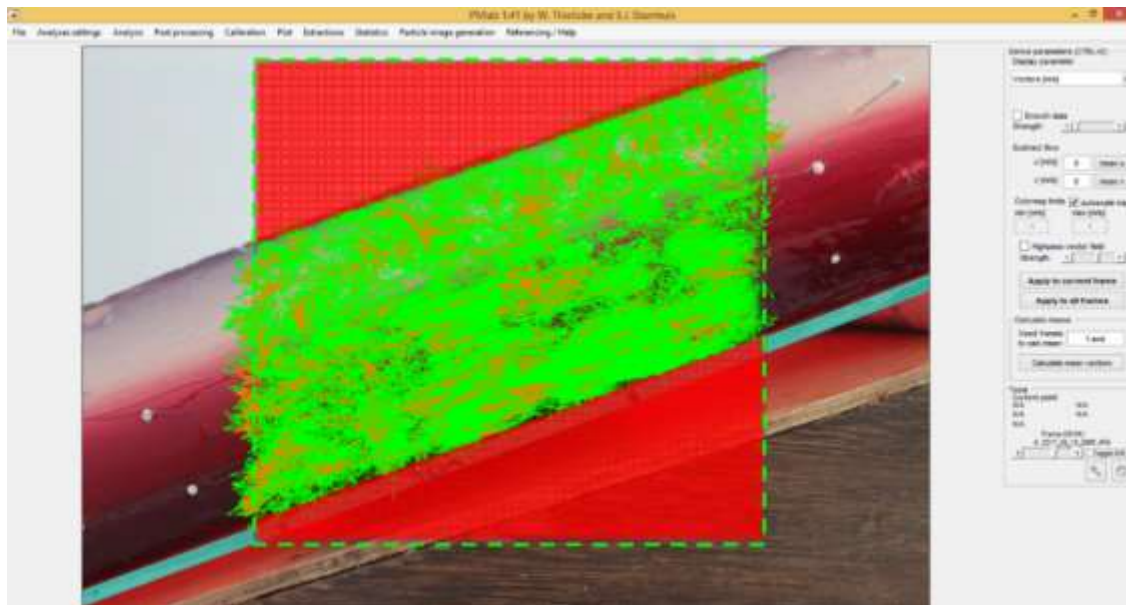


Figura 24. Vectores resultantes de los marcos. Dominio: recuadro de líneas discontinuas verdes

Para el post-procesamiento hay varias herramientas que brindan información importante de los marcos. En la herramienta *EXTRACTIONS-> parameters from área*, se selecciona el tipo de dato que se quiere extraer de un área sobre el dominio, p.e en este trabajo se usaron los tipo: *Area mean flow direction* que genera un vector para determinar la tendencia general en el área seleccionada (Ver Figura 25a), usándose principalmente para aquellas zonas del dominio que no son claras, y *Area mean value* que muestra un valor cuantitativo de un área dentro del dominio (Ver Figura 25b).

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

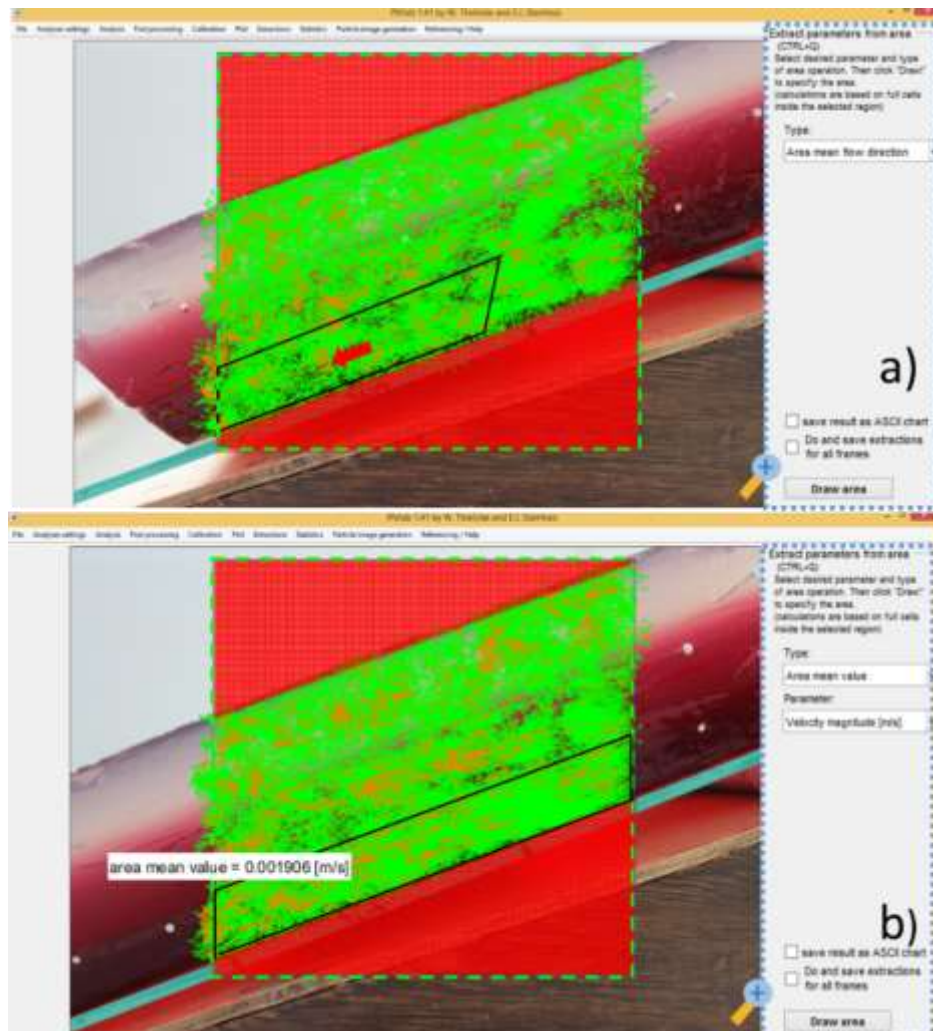


Figura 25. Herramienta *EXTRACTIONS*-> *parameters from área*, las áreas se resaltan con negro. a) tipo: *Area mean flow direction*, dirección del flujo mostrado con la flecha roja. b) tipo: *Area mean values*, parámetro: Magnitud de velocidad, 0,001906 [m/s]. Cuadro verde de líneas discontinuas dominio del modelo, Cuadro discontinuo azul indicando un acercamiento.

Otra de las herramientas involucradas en el proyecto es *parameters from poly-line* también de la sección *EXTRACTIONS*, en esta se marca una línea la cual grafica los datos sobre los que pasa (Ver Figura 26a), graficando de acuerdo al parámetro seleccionado, p.e: [m/s] Vs distancia en la línea [m] (Ver Figura 26 b)

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

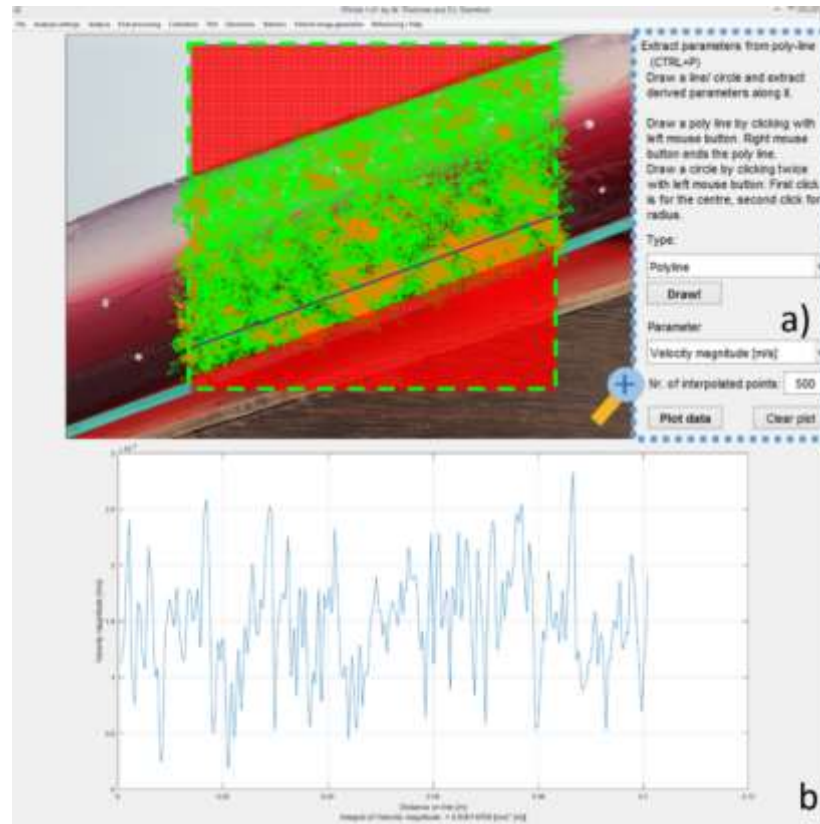


Figura 26. . Herramienta *EXTRACTIONS*-> *parameters from poly-line*. a) Tipo poli-línea marcada de izquierda a derecha con el parámetro magnitud de velocidad [m/s]. b) Gráfica Magnitud de velocidad vs distancia de la línea [m] producto de los datos que atraviesa la poli-línea.

5 Resultados

5.1 Montaje experimental

Un método heurístico como el ensayo y error, consiste en probar una alternativa y verificar si funciona, Si es así, se tiene una solución, en caso contrario —resultado erróneo— se intenta una alternativa diferente (Bransford & Stein, 1984).

5.1.1 Características de la gelatina

A la hora de desarrollar modelos análogos es importante entender que no es posible llevarlos a condiciones idénticas a las reales, tan sólo con un factor de escala en común (Ver ecuación 5). La gelatina se intentó llevar a una densidad alta de manera tal que tuvieses un buen comportamiento frente a los esfuerzos que se puedan evidenciar durante el desarrollo del modelo. Se realizaron 3 soluciones diferentes (Ver Figura 27) las cuales mostraron densidad y comportamiento distinto, descrito en la Tabla 4.

Tabla 4. Descripción del comportamiento de las soluciones después de la gelificación.

Mezcla	Densidad (g/Cm³)	comportamiento	Descripción
1. Gelatina+Glicerina	NA	Viscoso	La mezcla no solidifica, incluso siendo sometida a temperaturas bajas, no conserva una forma ni rigidez. Se oscurece (tiende a quemarse) al subir la temperatura para disolver la gelatina.
2. Gelatina + Agua	1,04	Visco-elástica	Rígida, densa y se deja moldear.
3. Gelatina + Agua + Glicerina	1,09	Visco-elástica	La mezcla de Glicerina 20%, agua 80%, conserva las propiedades de la mezcla 2, con un leve aumento en la densidad.



Figura 27 Muestras de gelatina con diferentes solventes que contribuyen al aumento o disminución de la viscosidad. **a.** Gelatina+Glicerina. **b.** Gelatina+agua. **c.** Gelatina+agua+glicerina.

De acuerdo a la Tabla 4, la solución Gelatina + Agua + Glicerina es la más densa, pero no se encuentra una diferencia significativa en la densidad con respecto a la otra (Gelatina + Agua) que justifique una mayor inversión económica al utilizarla, ya que implica el uso del 20% de la solución en glicerina de la solución, por experimento.

Finalmente se determina que por cada litro de agua se adicionan 70 gramos de gelatina, dando así una densidad de 1020 Kg/m^3 de acuerdo a los distintos cálculos que se mencionan en el numeral 4.2.2 cálculo de la densidad de gelatina, con valores de Viscosidad aparente (η) y cinemática (ν ; ver 4.2.3 Calculo de la viscosidad) que se observan en la tabla 5 y 6 para la gelatina sin refrigerar, y Modulo elástico de $10,2 \times 10^3 \text{ Pa}$.

Tabla 5. Valor de Viscosidad aparente a partir de los datos del viscosímetro FANN modelo 35^a (Tabla 2) y la ecuación 3

	39°C	24°C
Visc. Aparente	$1,1 \times 10^1$	$1,38 \times 10^2$

Tabla 6 Valores viscosidad cinemática a partir del tiempo en SSU del reómetro Koeller

Viscosidad cinemática		
T(°C)	SSU	St
39°	85	0,1683

Abreviaturas: T=temperatura, t=tiempo, SSU=Viscosidad Universal Saybolt.

A partir de la viscosidad cinemática se determina la viscosidad dinámica (μ), sabiendo que:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (9)$$

Donde ρ es la densidad, entonces:

$$\mu = (0,1683) \times (1020) = 1,72 \times 10^2$$

Tabla 7. Factor de escala de las propiedades de la gelatina

Parámetro	Símbolo	Unidades	Modelo	Naturaleza	F.E.
Densidad	P	[Kg/m ³]	1020	2800 (Rosenau <i>et al.</i> , 2009)	0,364
Viscosidad	μ	[Pa s]	1,72 x10 ²	10 ²⁰ (Di Giuseppe <i>et al.</i> , 2013)	1,7x10 ⁻¹⁸
Módulo de Young	E	[Pa]	1,02x10 ⁴	50x10 ⁹ (Fossen, 2010)	2,04x10 ⁻⁷
Módulo de rigidez	G	[Pa]	5,1x10 ³	10 ¹⁰ (Di Giuseppe <i>et al.</i> , 2013)	5,1x10 ⁻⁷

5.1.2 Selección del material para la rampa

Entre las condiciones que son necesarias para un buen desarrollo del experimento es que el material a seleccionar para la zona asísmica a lo largo del proceso de subducción, facilite el deslizamiento

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

de la gelatina y que permanezca el movimiento durante el desarrollo del modelo sin necesidad de aplicar una fuerza externa, además de ser económicamente asequible.

Con 4 materiales se realizaron 2 experimentos por cada uno, el primero a un ángulo de 10° y el segundo a 30° (Ver Figura 28), cabe aclarar que no había una escala de los materiales puesto que la finalidad de los experimentos era observar con cuál de los 4 materiales la gelatina se iba a deslizar fácilmente (Ver Tabla 8).

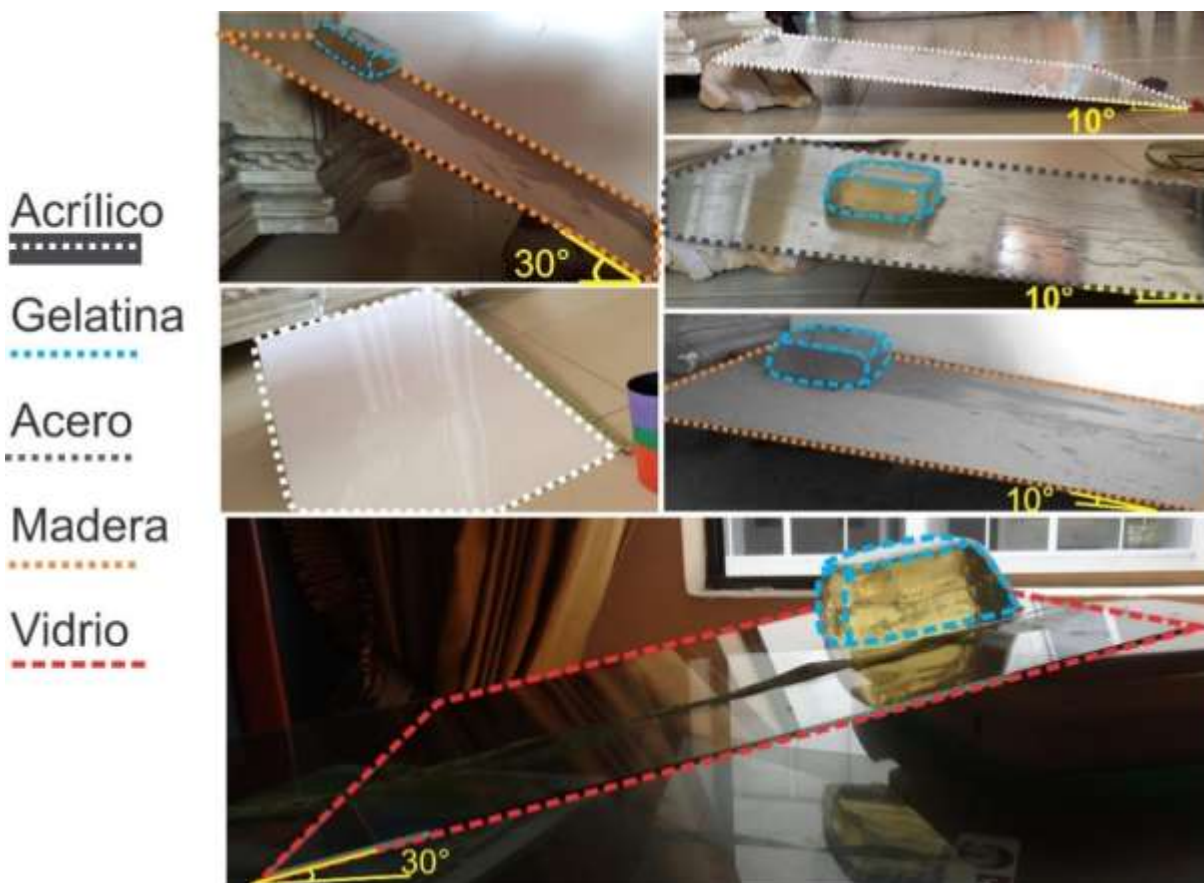


Figura 28. 8 experimentos realizados con 4 materiales (Acrílico, Gelatina, Acero, Madera y Vidrio) económicamente asequible y bajo coeficiente de fricción.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

Tabla 8. Descripción y selección de los materiales involucrados en los experimentos.

Material	Deslizó	Descripción
1.Madera	NO	La gelatina se ubica sobre madera a determinado ángulo, pero al ser un material poroso no permite que se deslice y por el contrario, ésta se adhiere.
2.Hierro Colado	SÍ	Se desliza de forma normal, pero es muy delgada la lámina por lo que no se conserva la superficie continua (forma levemente cóncava) a medida que avanza la gelatina.
3.Acrílico	SÍ	La gelatina se desliza fácilmente a cualquier ángulo
4.Vidrio	SÍ	Al igual que el material 4, se desliza fácilmente pero inicia el deslizamiento más fácilmente

5.1.3 Estilo de gelatina

Inicialmente se definió un estilo o textura de gelatina (Ver Figura 29) para verificar si el programa detecta más fácilmente los cambios al incluir puntos de referencia dentro del bloque de gelatina, los cuales son: gelatina pura (Figura 29a), gelatina pura+ partículas de diferentes diámetros (Figura 29b-c-f), gelatina con capas de colores (Figura 29d) y finalmente la combinación de capas+ alfileres (Figura 29e).

Dos criterios de las imágenes procesadas en PIVlab se determinaron para la selección del mejor estilo a trabajar, sabiendo que los valores de densidad, viscosidad y longitud no cambian. Inicialmente se observó la mayor concentración de puntos en la gráfica velocidad V vs velocidad U que se genera durante el post procesamiento y que evidencia los “falsos vectores” (Ver numeral 4.3.1.3 post-procesamiento y Figura 23). Luego se determinaron los estilos de gelatina con menos errores, sabiendo que para este trabajo se nombra error a aquella ausencia de vectores en ciertas zonas del bloque o cambios que no llevan una coherencia con la técnica PIV.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

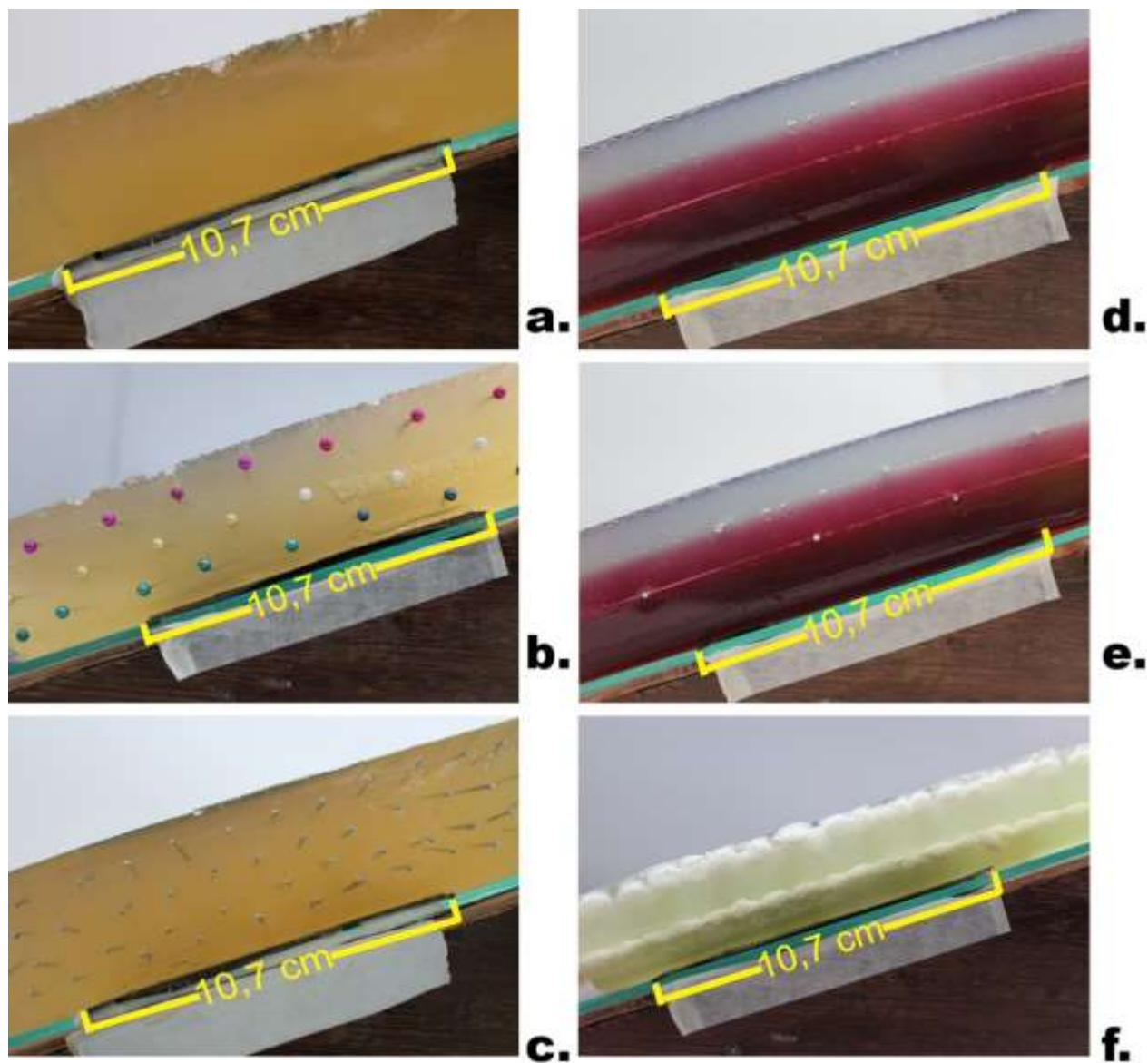


Figura 29. Estilo de gelatina. **a.** Gelatina pura con las condiciones mencionadas en numerales anteriores. **b.** Gelatina pura con alfileres de costura (Diámetro: 4 mm). **c.** Gelatina pura con alfileres comunes (D: 2 mm) **d.** Gelatina pura con adición de colorante para crear capas. **e.** Gelatina pura con adición de colorante para crear capas más alfileres comunes. **f.** Gelatina pura con capas de arroz soplado. Zona sismogénica resaltada con cinta blanca.

De la gráfica Velocidades V vs U (ver Figura 30) resaltan los estilos **a**, **c** y **e** por la concentración de puntos y por ende menor presencia de “falsos vectores”. En cuanto a los resultados del análisis

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

de la imagen procesada (Ver Figura 31), en el estilo **f** no hay coherencia en el número de vectores ya que en la zona que tiene las partículas de arroz soplado son ausentes, contrario a los de la zona sin partículas (Ver Figura 31f) evidenciando intercalaciones de la velocidad (verticales al bloque) que no son coherentes. Los estilos de gelatina faltantes muestra pequeñas áreas con ausencia, por ende se determina que los estilos **a**, **b** y **e**, resaltados en la Figura 31, mostraron menos anomalías en comparación de las otras.

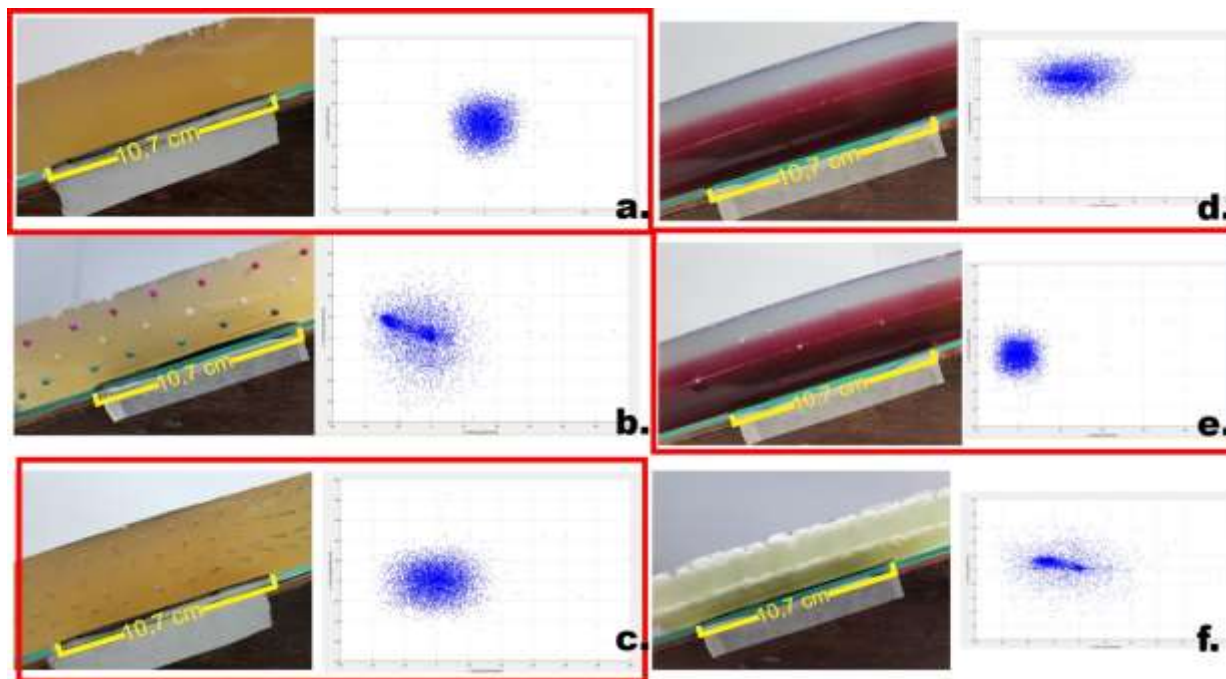


Figura 30. Primer criterio para la selección del estilo de gelatina Velocidad V vs Velocidad U **a.** Gelatina pura con las condiciones mencionadas en numerales anteriores. **b.** Gelatina pura con alfileres de costura (Diametro:5 mm). **c.** Gelatina pura con alfiler común (D: 2 mm) **d.** Gelatina pura con adición de colorante para crear capas. **e.** Gelatina pura con adición de colorante para crear capas más alfileres comunes. **f.** Gelatina pura con capas de arroz soplado. Zona sismogénica resaltada con cinta blanca.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
 BUENO-SILVA, L.

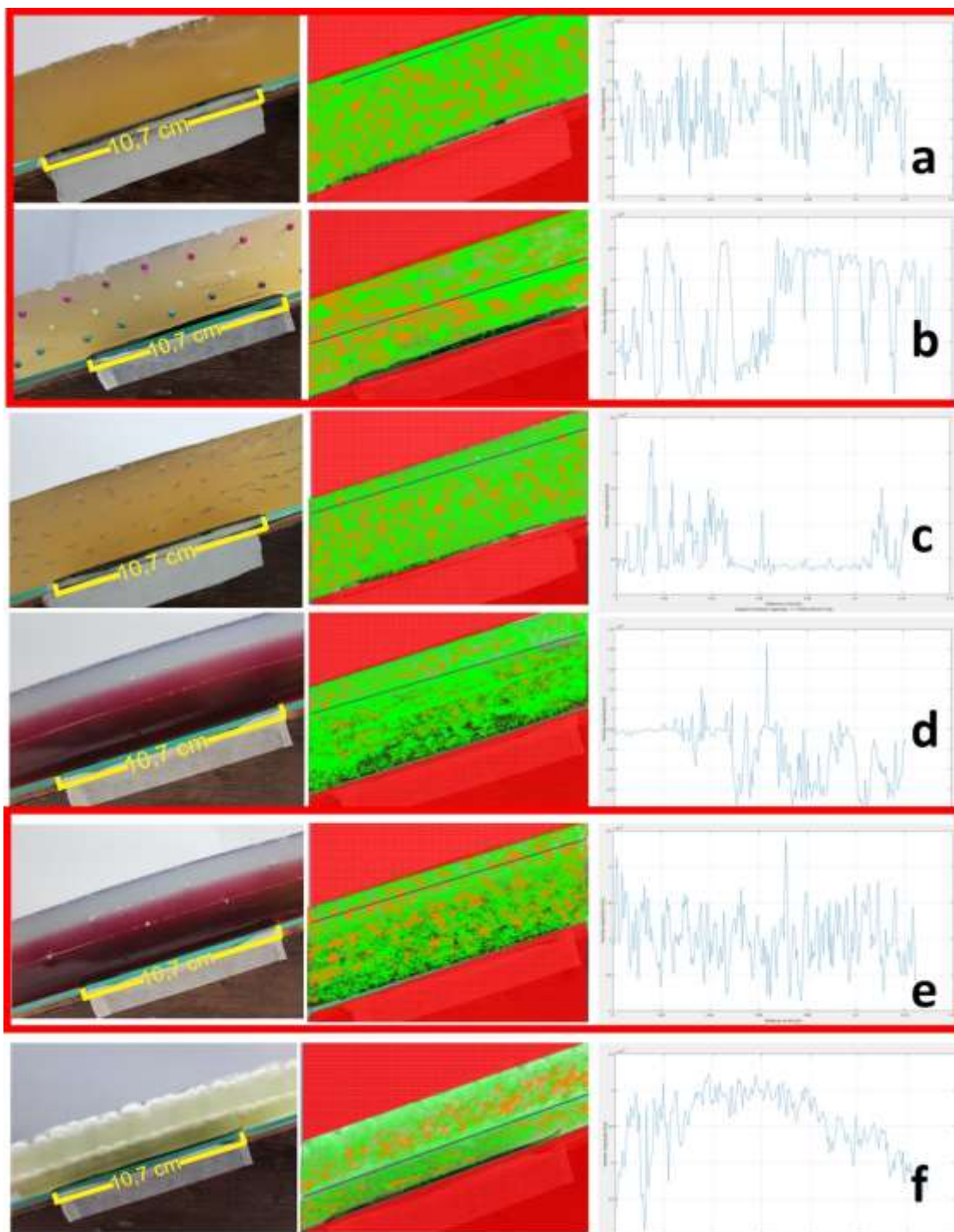


Figura 31. Segundo criterio para la selección del estilo de gelatina: Vectores (centro) y gráfica Magnitud velocidad vs Distancia (a la derecha) **a.** Gelatina pura con las condiciones mencionadas en numerales anteriores. **b.** Gelatina pura con alfileres de costura (Diámetro:5 mm). **c.** Gelatina pura con alfiler común (D: 2 mm) **d.** Gelatina pura con adición de colorante para crear capas. **e.** Gelatina pura con adición de colorante para crear capas más alfileres comunes. **f.** Gelatina pura con capas de arroz soplado. Zona sísmogénica resaltada con cinta blanca, equivalente a 10,7 cm.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

Para el entendimiento de esas zonas ausentes de vectores se traza una poli-línea (ver 4.3.1.3 post procesamiento) y se genera la gráfica magnitud velocidad vs distancia en el marco final, donde **c**, **d** y **f** se evidenció variaciones no acordes para la corta longitud de gelatina, ya que en el tramo horizontal se presentan zonas de velocidad muy variable y en otros constantes de unos centímetros a otros (Ver Figura 31)

De acuerdo a los resultados en las Figuras 30 y 31, son los estilos **a** y **e** en que el software PIVlab tuvo buena respuesta, pero a nuestro criterio se determinó que el mejor análisis de marcos sucede con el estilo **e** **“Gelatina pura con adición de colorante para crear capas + alfileres comunes”** (Ver Figura 32).

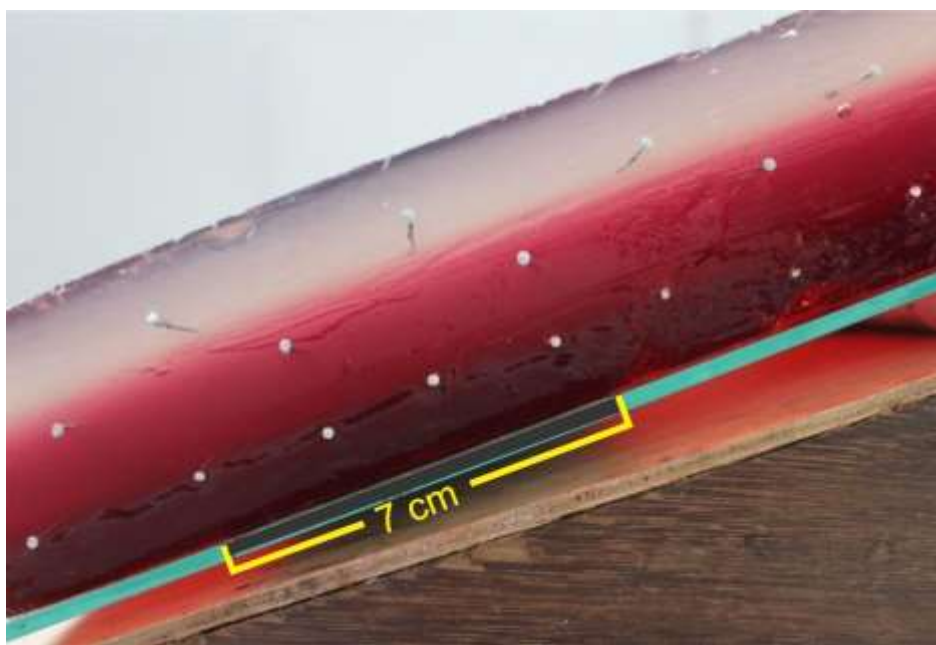


Figura 32. Estilo de “Gelatina pura con adición de colorante para crear capas + alfileres comunes” más favorable para que el análisis en el software PIVlab. Zona sismogénica resaltada con color negro, diámetro de los alfileres 2mm.

5.2 Procesamiento de los marcos: PIVlab

A continuación se describen los resultados del software PIVlab de acuerdo a la metodología ya mencionada (ver sección 4.3.1 Funcionamiento de PIVlab), y con cerca de 83 modelos ejecutados para llegar al de las condiciones que mejor representan el contacto interplaca.

5.2.1 Correlación Cruzada

PIVlab presenta los algoritmos DCC y FFC (ver sección 3.4.1.1 Evaluación de la imagen) que dividen la zona de interés de la investigación (dominio) en pequeñas áreas para analizar detalladamente durante el procesamiento. Las fotografías se tomaron con una velocidad de 3 fotos/segundo para tener desplazamientos cortos de las partículas, captar cualquier cambio en el comportamiento de la gelatina y así mejorar el análisis. Se decidió procesar un mismo paquete de imágenes con los 2 algoritmos a 2 tamaños de pixel diferente, es decir un total de 4 procesamientos de un mismo experimento para definir cuáles son los mejores resultados.

5.2.1.1 Algoritmo CCD

El primer procesamiento se realizó con el algoritmo CCD a un tamaño del área de interrogación de 64px-step: 32px, todas las áreas generaron los respectivos vectores, y se evidenciaron dos conjuntos con tendencias diferentes. La mayor tendencia son los que van a igual dirección de la gelatina (derecha a izquierda) como se observa en la Figura 33 a. El otro conjunto ubicado en los marcos 24-27, 29-33, 36, 41, 47 y 52 de los 54 en total, no presentaban una tendencia uniforme en comparación con los primeros, por el contrario tomaban formas onduladas (Ver Figura 33 b).

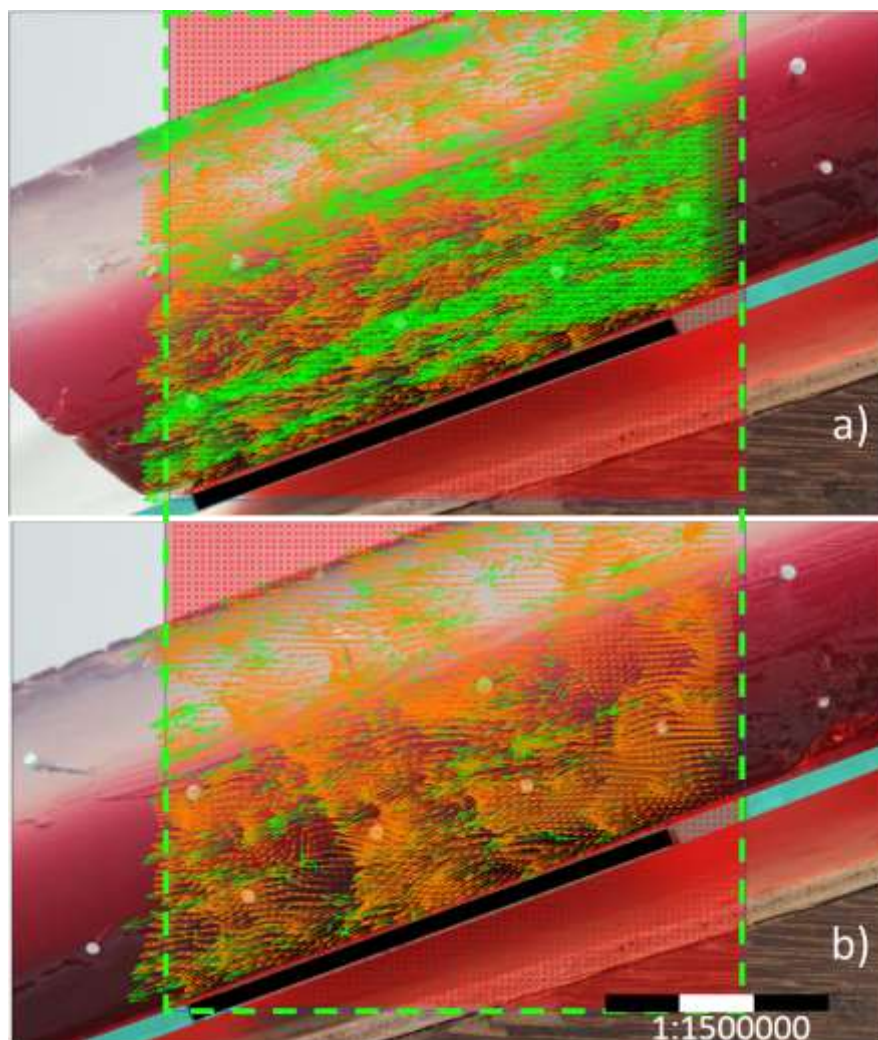


Figura 33. Algoritmo CCD 64px-step:32px. Vectores resultantes del procesamiento. **a)** Marco 1/54, vectores en igual dirección a la que avanza el bloque de gelatina. **b)** Marco 24/54, cambia la dirección de los vectores generados, tomando formas onduladas. Zona sismogénica resaltada con color negro equivalente a 7cm, diámetro de los alfileres 2mm, dominio recuadro de líneas discontinuas verdes, $\theta = 22^\circ$.

Para una zona de interrogación mayor (128px-step: 64px), resulta del procesamiento menos volumen de vectores y una sola tendencia en la mayoría de los marcos (Ver Figura 34). La comparación entre los dos tamaños de pixel del área de interrogación en un mismo marco (p.e 24/54) muestra que para un tamaño de 64px-step: 32px los vectores son mucho más marcados,

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
 BUENO-SILVA, L.

de mayor tamaño y formas mucho más onduladas que para un tamaño de 128px-step: 64px donde varios de los movimientos claramente no son detectados (Ver Figura 35).

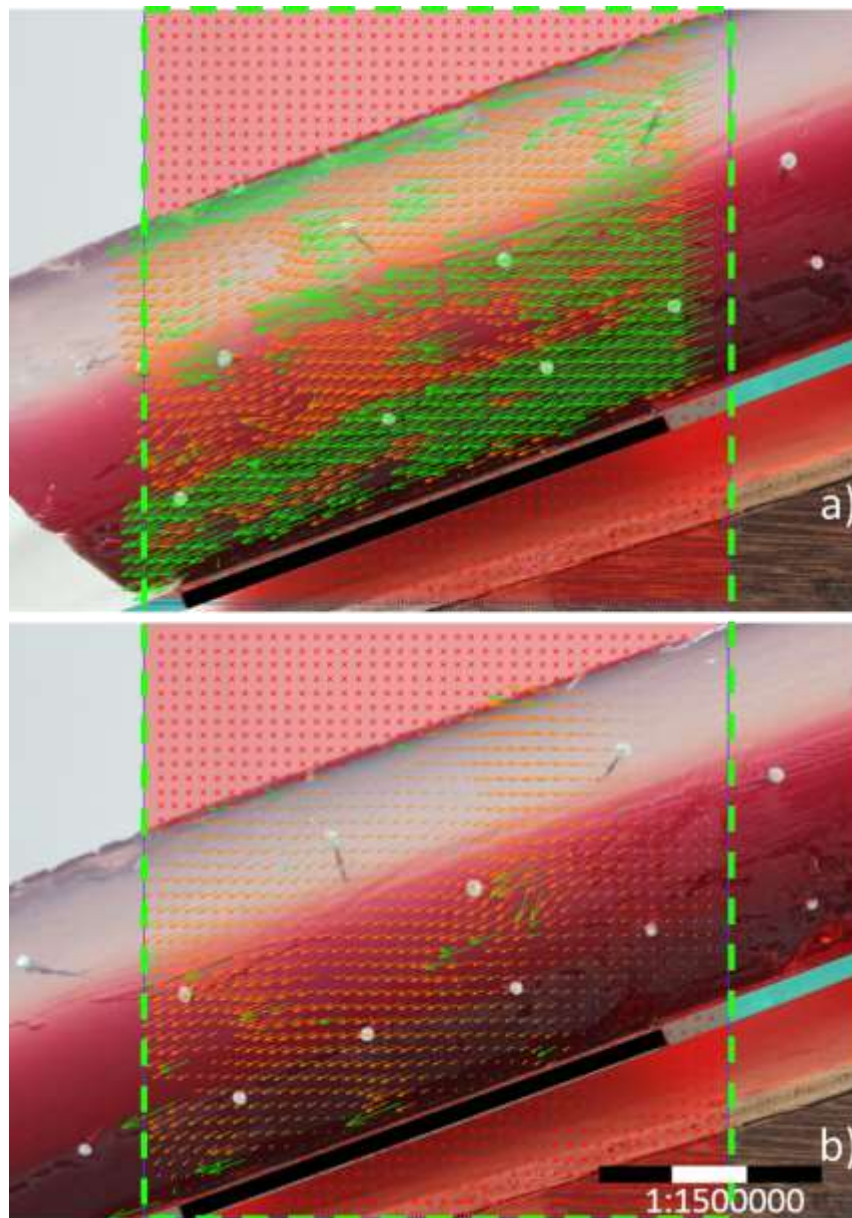


Figura 34. Algoritmo CCD 128px-step: 64px. Vectores resultantes del procesamiento. **a)** Marco 1/54, vectores en igual dirección a la que avanza el bloque de gelatina. **b)** Marco 24/54, cambia la dirección de los vectores generados, tomando formas onduladas. Zona sísmogénica resaltada con color negro equivalente a 7cm, diámetro de los alfileres 2mm, dominio recuadro de líneas discontinuas verdes, $\theta = 22^\circ$.

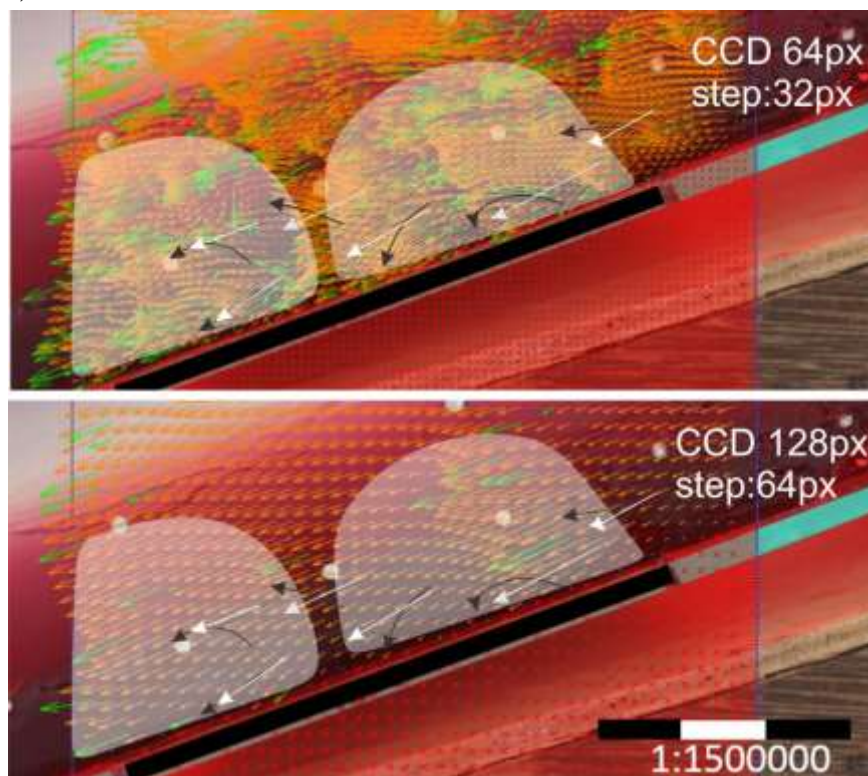


Figura 35. Comparación del marco 24/54 con el algoritmo CCD con tamaños de pixel 64px-step 32px (superior) y 128px/ 64px (inferior). Las flechas blancas muestran la dirección general de los vectores en el algoritmo inferior y las negras en el superior. Zona sismogénica resaltada con color negro equivalente a 7cm, diámetro de los alfileres 2mm

5.2.1.2 Algoritmo FFT

Se trabaja con los tamaños de 64px-step 32px y 128px-step 64px para las áreas de interrogación y el mismo paquete de fotos que con el anterior algoritmo. En el primer tamaño mencionado los vectores son grandes, marcados y abarcan todo el dominio (Ver Figura 36). A diferencia del algoritmo CCD, en éste se observan muchos vectores en distintas direcciones, pero también con dos tendencias predominantes respecto a las otras dentro del dominio. La tendencia más común es vectores en igual dirección al movimiento de la gelatina (Ver Figura 36 a), y una segunda, diferente a las que se ha observado hasta el momento, son los vectores chocando contra el plano

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
 BUENO-SILVA, L.

a un ángulo entre 50° - 60° , y en algunos sectores incluso a 110° aproximadamente (Ver Figura 36 b), en los marcos 24-27, 29-31, 36, 41 y 47.

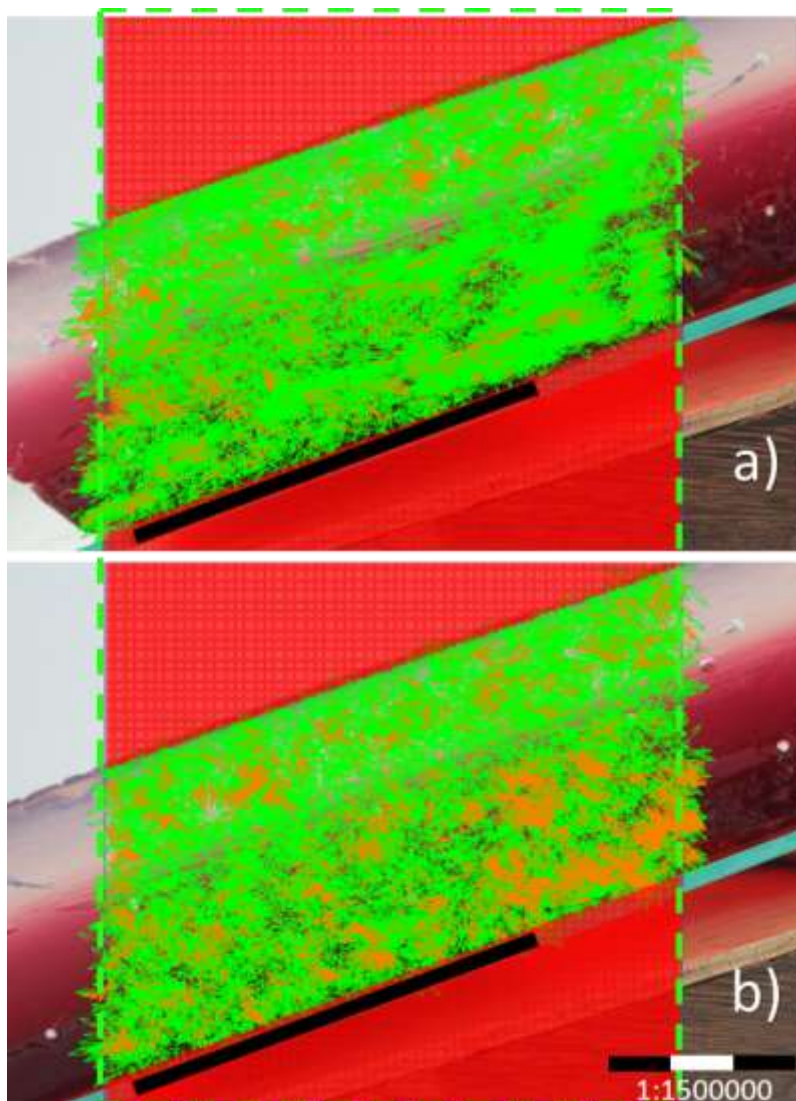


Figura 36. Algoritmo FFC 64px-step: 32px. Vectores resultantes del procesamiento. **a)** Marco 1/54, vectores en igual dirección a la que avanza el bloque de gelatina. **b)** Marco 24/54, vectores chocando sobre el plano a aproximadamente 50° - 60° , incluso 110° en algunos sectores del dominio. Zona sismogénica resaltada con color negro equivalente a 7cm, diámetro de los alfileres 2mm, dominio recuadro de líneas discontinuas verdes, $\theta=22^{\circ}$.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
 BUENO-SILVA, L.

En la zona de interrogación de 128px/ 64px, los marcos 24-27, 31 y 47, muestran algunas ondulación de los vectores (Ver Figura 37 b) pero predomina principalmente, incluso en algunos de los marcos mencionados los vectores en dirección al movimiento de la gelatina (Figura 37a).

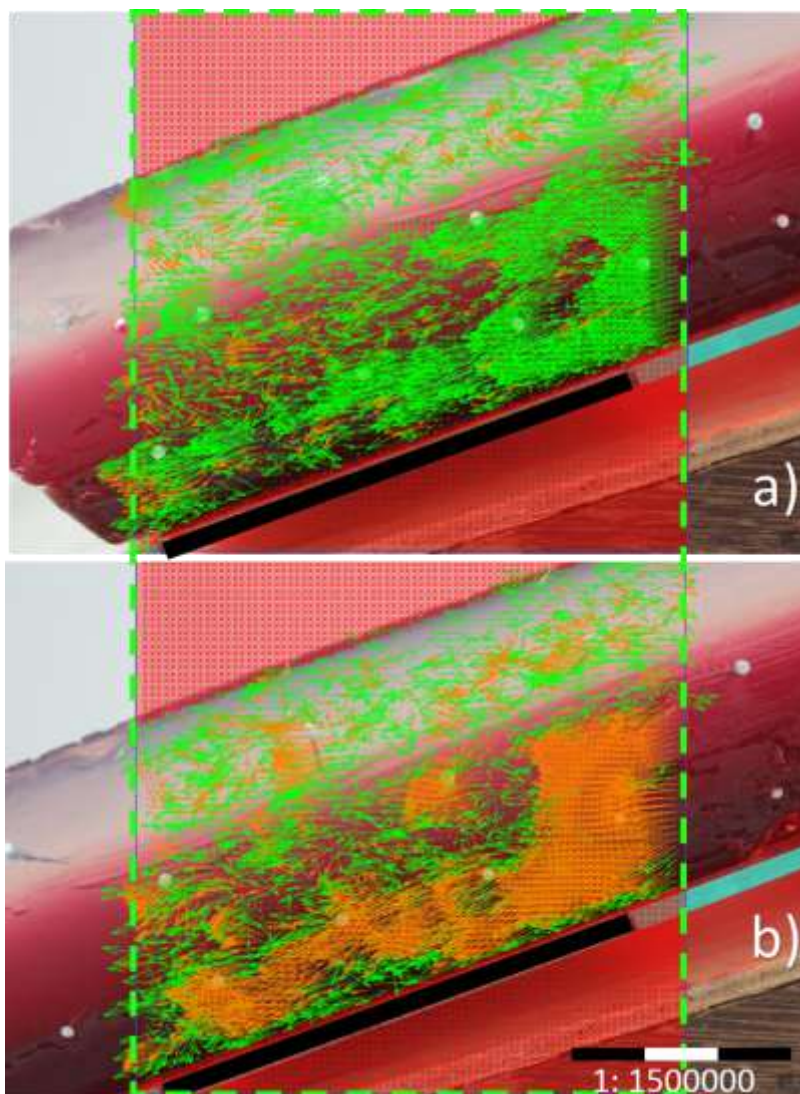


Figura 37. Algoritmo FFC 64px-step: 32px. Vectores resultantes del procesamiento. **a)** Marco 1/54, vectores en igual dirección a la que avanza el bloque de gelatina. **b)** Marco 24/54, vectores chocando sobre el plano a aproximadamente 50°-60°, incluso 110° en algunos sectores del dominio. Zona sismogénica resaltada con color negro equivalente a 7cm, diámetro de los alfileres 2mm, dominio recuadro de líneas discontinuas verdes, $\theta=22^\circ$.

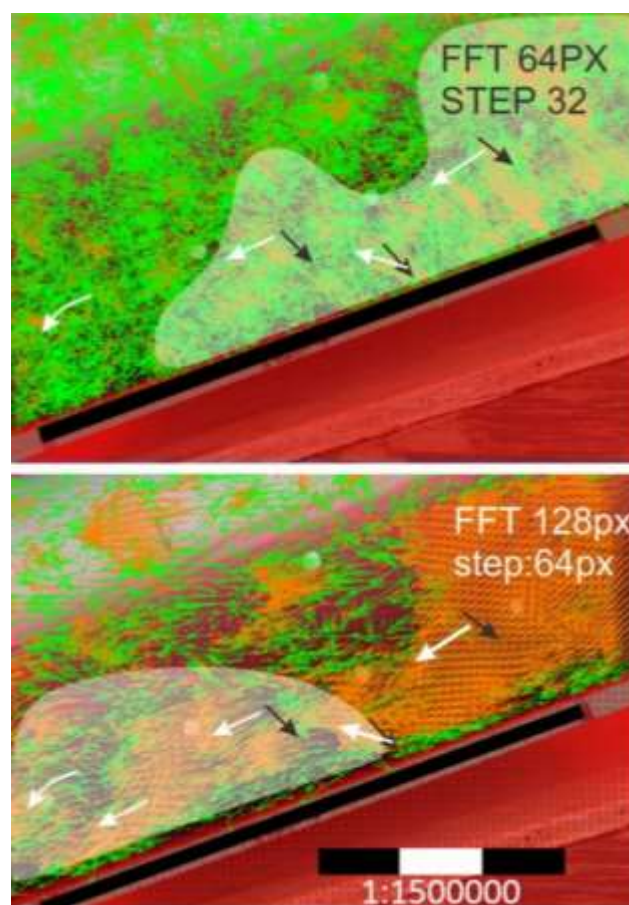


Figura 38. Comparación del marco 27/54 con el algoritmo FFC con tamaños de pixel 64px-step 32px (superior) y 128px/ 64px (inferior). Las flechas blancas muestran la dirección general de los vectores en el algoritmo inferior y las negras en el superior, zona sísmogénica resaltada con color negro equivalente a 7cm, diámetro de los alfileres 2mm.

5.2.2 Zonas del contacto interplaca

Las zonas sísmicas y asísmicas son representadas por la lija y vidrio respectivamente (ver 4.2.4 Construcción del mecanismo). En el contacto gelatina vidrio el deslizamiento fue libre, mostrando vectores muy marcados en la dirección del movimiento (Ver Figura 39). Se tomaron fotografías de la transición de la gelatina sobre los materiales y se compararon el marco final e inicial (Ver

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

Figura 40). En el marco 1/11 se evidencian vectores desordenados en el contacto de vidrio y grandes vectores en la lija, los primeros por el freno que provocó el ingresar al papel de lija y los segundos por la velocidad con la que ya venía la gelatina del vidrio (Ver Figura 40 a), cambiando ya para marcos posteriores. P.e en la parte final de los 11 marcos (11/11) la gelatina en el vidrio (zona asísmica) mantiene vectores en una sola dirección, producto de una velocidad mayor y casi constante que genera un empuje hacía el Papel de lija (zona sísmica), con velocidad muy variable por el acoplamiento (Ver Figura 40 b). Cambios en la velocidad y dirección de los vectores que se va transfiriendo a medida que el bloque avanza.

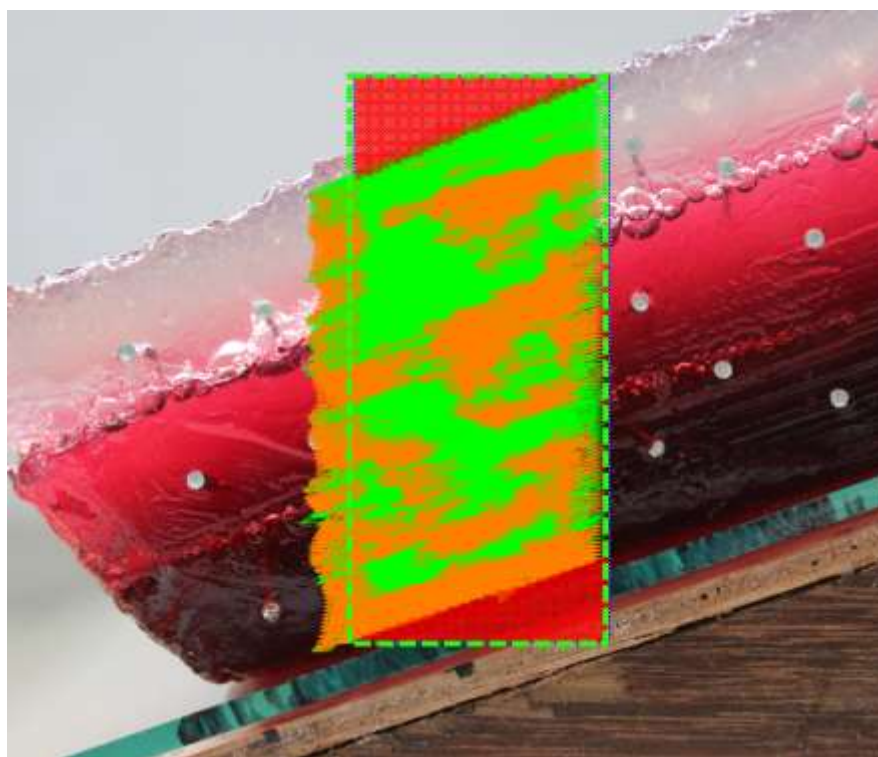


Figura 39. Vectores generados por el deslizamiento de la gelatina sobre la superficie de vidrio, marco 9/9. Se toma como escala los 2mm de diámetro de los alfileres, $\theta=22^\circ$.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
 BUENO-SILVA, L.

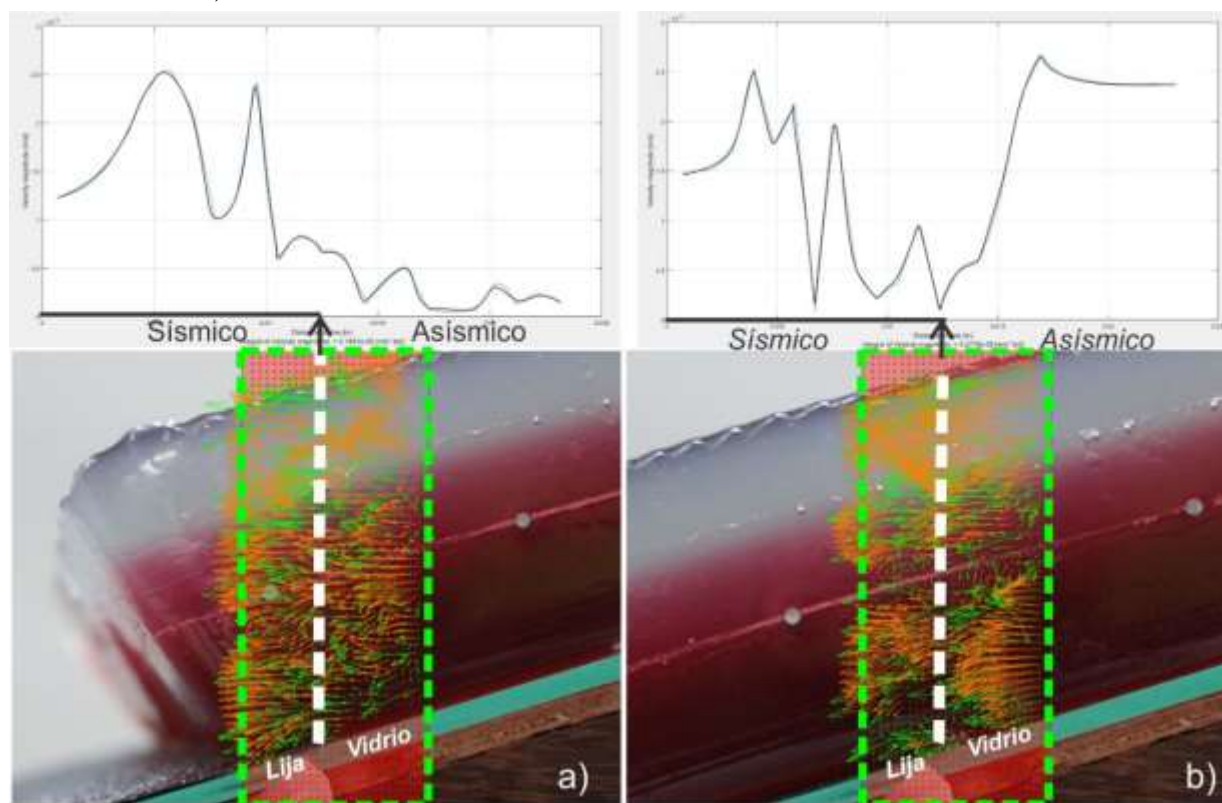


Figura 40. Zonas del contacto interplaca, transición lija-Vidrio = zona Sísmica-asísmica. Algoritmo FFT. a) Marco 1/11, ausencia de vectores en la zona inferior del contacto gelatina-vidrio. b) Marco 11/11 ausencia de vectores en el contacto Gelatina-lija. Se toma como escala los 2mm de diámetro de los alfileres, $\theta=22^\circ$.

Es necesario resaltar que los sectores dentro del dominio que no había una tendencia clara de los vectores, p.e en la parte izquierda del dominio en la Figura 36 b), con el uso de la herramienta *EXTRACTIONS*-> parameters from área-> Area mean flow direction, (como se explica en la sección 4.3.1.3 post-procesamiento), da la dirección aproximada de todos los vectores en el área que se dibuje. Así, con dicha herramienta se determinaron dos tendencias marcadas en un mismo marco (Ver Figura 41), principalmente en los marcos en que inician los vectores a cambiar de dirección, p.e marco 24 y 29.

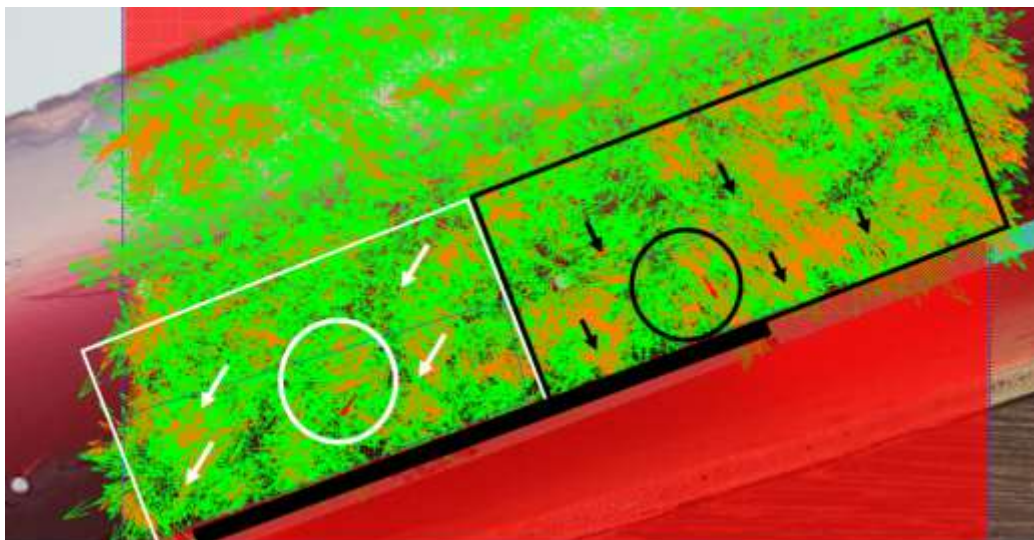


Figura 41. Zona de transición sísmica-asísmica, representada con dos tendencias de vectores. Zona sismogénica resaltada con color negro equivalente a 7cm, $\theta=22^\circ$.

5.2.3 Datos Cuantitativos de PIVlab

PIVlab en el procesamiento resalta los rasgos cualitativos de las imágenes por medio de vectores. Para apoyar y/o corroborar dichos rasgos se hace uso de las herramientas del post-procesamiento que arroja valores cuantitativos de magnitud de velocidad [m/s], razón de la deformación [1/s] y esfuerzo cortante [1/s] (Ver Tabla 9) en un área cualquiera dentro del dominio.

Durante el procesamiento se observaron 2 tendencias predominantes de los vectores, por ende, la Tabla 9 de acuerdo a la tendencia se dividió en subgrupos (verde y amarillo) y se calculó el promedio de cada parámetro (Para ver todos los valores ver Anexo C). La Figura 42 resume la relación entre la dirección de los vectores y los cambios en los valores de velocidad en los 54 marcos, a la derecha con vectores en sentido contrario al movimiento que concuerda con valores de magnitud de velocidad bajos (Ver Figura 42, color verde) y a la izquierda vectores en el mismo

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

sentido del movimiento con magnitudes de velocidad mayores que el primer conjunto (Ver Figura 42, color amarillo).

Tabla 9. Valores promedios de Magnitud de la velocidad, razón de la deformación y razón del esfuerzo cortante.

# de Marcos	Promedio del tiempo acumulado [s]	Promedio Magnitud de Velocidad [m/s]	Promedio Razón de la deformación [1/s]	Promedio Razón de esfuerzo cortante [1/s]
1 – 23	14,853	0,0019624	0,0554851	0,0857289
24 – 27	17,493	0,0014070	0,0204615	0,0482793
28	18,153	0,0023924	0,0399910	0,0745098
29 – 31	20,133	0,0016225	0,0400356	0,0682169
32 – 35	22,773	0,0021238	0,0484285	0,0819053
36	23,433	0,0014768	0,0650486	0,0722010
37 – 40	26,073	0,0022687	0,0407349	0,0619570
41	26,733	0,0013400	0,0336031	0,0411401
42 – 46	30,033	0,0022589	0,0281759	0,0525183
47	30,693	0,0013113	0,0314094	0,0499979
48 – 54	35,313	0,0020354	0,0224238	0,0315634

Nota: Los marcos resaltados con verde (conjunto 1) representan vectores que van en dirección contraria al movimiento.

Al realizar comparaciones de los valores presentes en la Tabla 9, se observa de forma general en alguno de los marcos la relación entre la caída de la razón del esfuerzo cortante y el aumento de la razón de la deformación, comparando el dato del conjunto 1 (Verde) con el valor anterior del conjunto 2 (amarillo). Así, la figura 43 muestra las gráficas de como varía la razón del esfuerzo y la deformación con respecto al tiempo, siendo cada cambio de conjunto de marcos el inicio de una nueva etapa del ciclo sísmico de subducción aquí representado (ver Figura 43b).

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

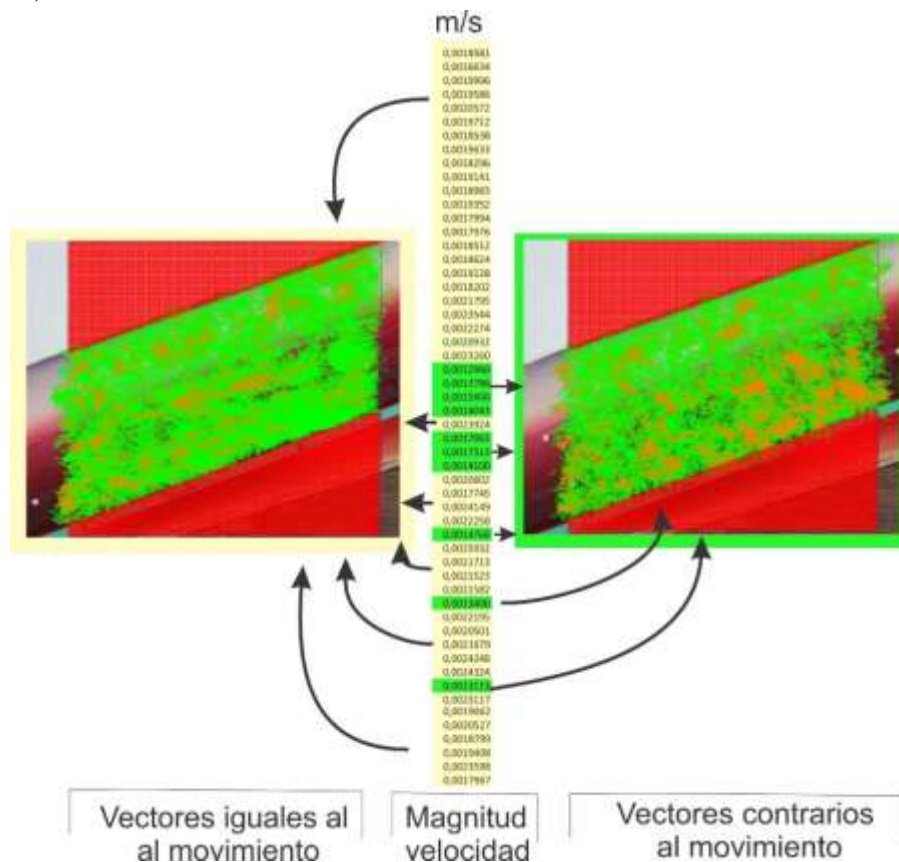


Figura 42. Relación entre el valor de la magnitud de la velocidad y la dirección de los vectores, Color amarillo magnitudes de velocidad mayores, color verde magnitudes de velocidad más bajas.

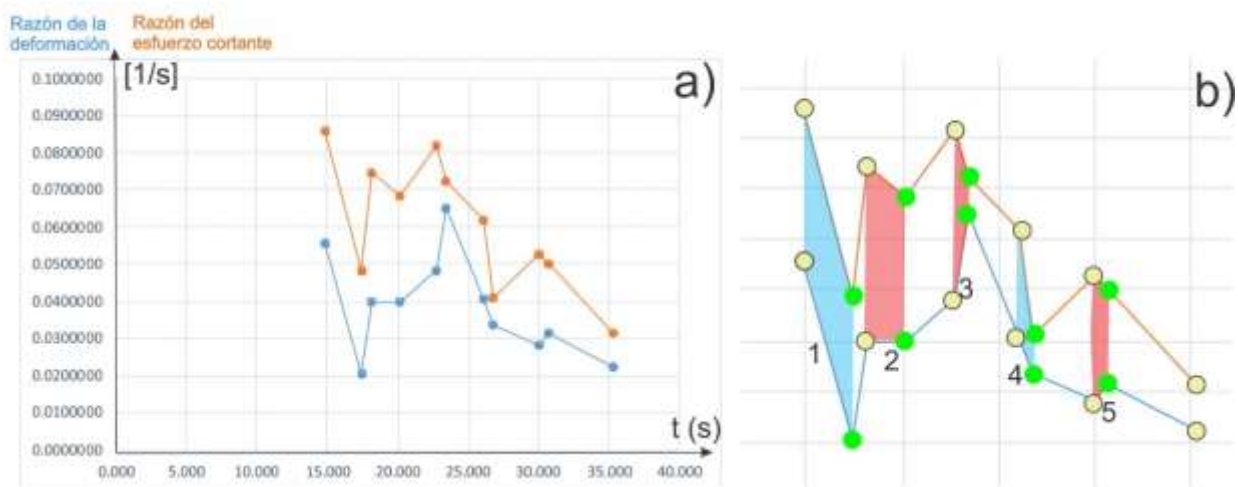


Figura 43. Relación de los datos cuantitativos del modelo. a) trazo color naranja: razón del esfuerzo cortante Vs tiempo; Trazo azul: razón de la deformación Vs tiempo. b) relación de las graficas, la enumeración corresponde a cada ciclo, las areas señaladas en rojo muestran relación ideal entre caída de esfuerzos-aumento de la deformación y las azules unicamente con la caída del esfuerzo.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

La información cuantitativa extraída del software PIVlab es importante para la respectiva similitud geométrica y cinemática, por ende, según la metodología planteada en la sección 4.2.5 Escalado, se obtiene:

Tabla 10. Similitud geométrica y cinemática de los parámetros del experimento, junto con el factor de escala

Parámetros	Símbolo	Unidad	Similaridad	Modelo	Naturaleza	F.E
Longitud	<i>l</i>	[m]	Deslizamiento	0,00043	8	5,37X10 ⁻⁵
			cosísmico medio		(Rosenau <i>et al.</i> , 2009)	
tiempo	t	[s]	Duración de la	0,333	917	3,63X10 ⁻⁴
			ruptura		(Corbi <i>et al.</i> , 2013)	
Cosísmico			Intervalo medio		1,49x10 ¹¹	
Intersísmico			de recurrencia	3,33	(Corbi <i>et al.</i> , 2013)	2,24X10 ¹¹
Velocidad	V	[m/s]	tasa de deslizamiento promedio	0,002	0,479 (Corbi <i>et al.</i> , 2013)	4,17X10 ⁻³
Aceleración	G	[m/s ²]		9,8	9,8	1

La similitud dinámica se obtiene a partir de números adimensionales los cuales tienen un factor de escala de 1, por ende, la relación de éstos, realizada en la sección 4.2.5.4 Escala de Fuerzas, resultó:

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

Tabla 11. Similaridad dinámica a partir de la relación de números adimensionales con respecto a la gravedad, inercia, elasticidad, fricción y viscosidad

	F.E	Comentarios
$\frac{\sigma^m}{\sigma} = \frac{\rho^m l^m}{\rho l} = \frac{0,4386}{22400}$	$1,96 \times 10^{-5}$	1 [Pa] en el modelo es equivalente a $5,1071 \times 10^4$ [Pa] en la naturaleza
La etapa cosísmica se caracteriza por una respuesta elástica, la fuerza inercial desempeñar un papel importante	$7,33 \times 10^{-3}$	1 [s] es equivalente a aproximadamente 3 [min] en la naturaleza
$\frac{t^m}{t} = \frac{\sqrt{l^m}}{\sqrt{l}} = \frac{2,07 \times 10^{-2}}{2\sqrt{2}}$		
A poca deformación la inercia es despreciable, pero el comportamiento viscoso es dominante. en consecuencia, la escala de tiempo intersísmico es:	$2,02 \times 10^{-5}$	1 [s] es equivalente a aproximadamente 14 [h]
$\frac{T^m}{T} = \frac{\frac{\mu^m}{\sigma^m}}{\frac{\mu}{\sigma}} = \frac{1,09 \times 10^7}{5,41 \times 10^{11}}$		
$\frac{k^m}{k} = \frac{l^m \rho^m t}{t^m \rho l} = \frac{402,19}{7459,2}$	$5,4 \times 10^2$	

5.2.4 Variaciones en el ángulo de subducción

Durante el desarrollo de la investigación se realizaron experimentos a 3 ángulos diferentes, hasta el momento los resultados presentados han sido a un ángulo de 22° , donde se tiene buen volumen de vectores, direcciones bien marcadas y valores cuantitativos coherentes con lo cualitativo. La plataforma de madera se adecuó también a 11° y 31° donde la longitud se escaló de acuerdo a los datos de Heuret *et al.* (2011) y con el procedimiento mostrado en la sección 4.2.5.1 Escala de longitudes (Ver Tabla 12).

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

Tabla 12. Longitud zonas de subducción

Zona	ángulo	W	Escala
Sumatra	11°	174	11,6
Chile	22°	105	7
WS Aleutianas	31°	72	4,8

Datos tomados de Heuret et al. (2011), escalados con la ecuación 4

Para un ángulo de 11° los vectores son menos abundantes, de menor tamaño y la dirección poco definida (Ver Figura 44). Se realiza una comparación entre los vectores en el marco 1/59 y 37/59, los cambios cualitativos no varían significativamente y el valor de la velocidad disminuye de 0.00054 m/s a 0.00030 m/s con una tendencia a seguir disminuyendo en los siguientes marcos.

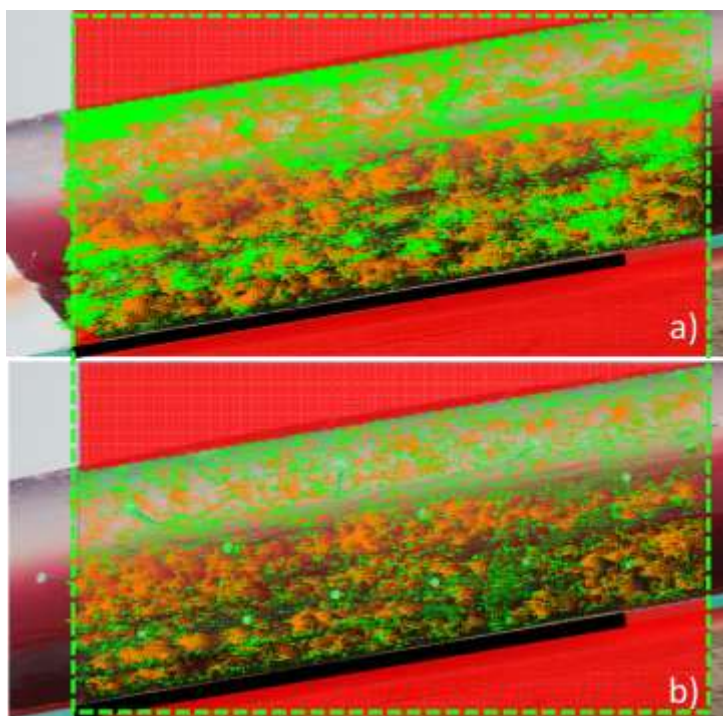


Figura 44. Experimento a 11° de inclinación. a) Vectores generados en el marco 1/59. b) Vectores en el marco 37/59, el tamaño de los vectores y el valor de la velocidad han disminuido respecto al primer marco. Zona sísmogénica resaltada con color negro equivalente a 11, 6 cm, diámetro de los alfileres 2mm, dominio recuadro de líneas discontinuas verdes

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

La plataforma a un ángulo de 31° los vectores son mucho más definidos que el de 11° , se evidencian dos tendencias de los vectores al igual que el experimento a 22° (Ver Figura 36 y 43) y también una relación con los datos cuantitativos de magnitud de velocidad (Ver Figura 45)

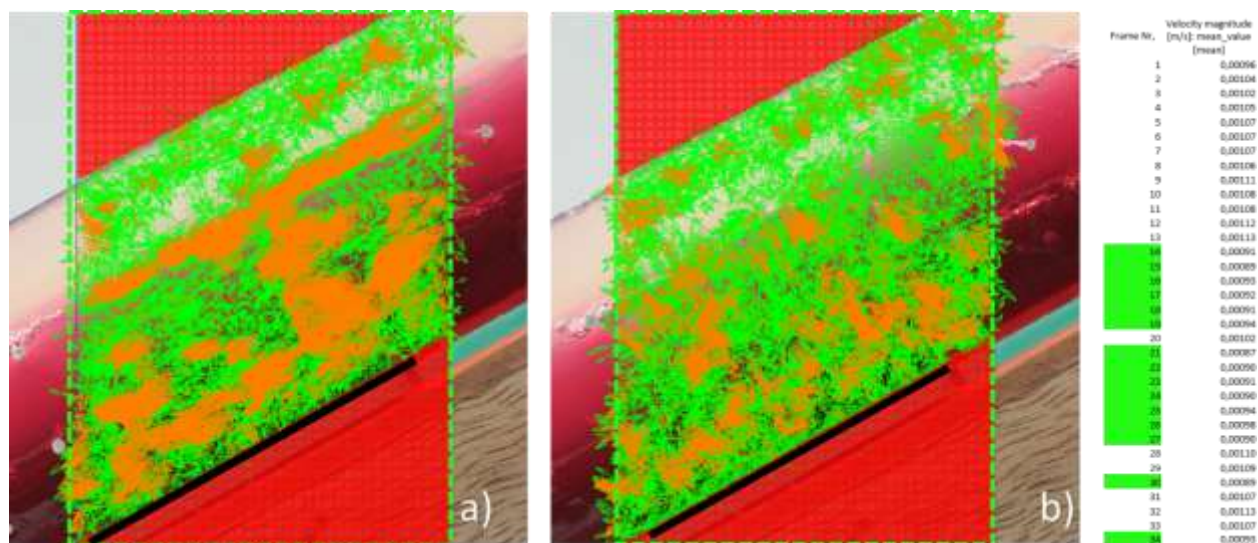


Figura 45. Experimento a 31° de inclinación. a) marco 3/34, vectores en dirección del movimiento. b) marco 17/34, vectores en dirección opuesta al movimiento, valores de velocidad disminuyen. Zona sísmogénica resaltada con color negro equivalente a 4,8 cm, diámetro de los alfileres 2mm, dominio recuadro de líneas discontinuas verdes

5.2.5 Errores de montaje

Durante el desarrollo del modelo se logró notar un error común que afectan los resultados del procesamiento. Como se mencionó en secciones anteriores, son necesario unas condiciones de iluminado del lugar puesto que el reflejo de la luz sobre el bloque arrojaría vectores erróneos, pero además de esto, se evidencio que, durante el proceso de separar el bloque de gelatina del recipiente, el trazo del bisturí también afecta los resultado (Ver Figura 46 a). Este error fue claro en el software ya que no genera vectores o son muy pequeños como se puede ver en la figura 46 b.

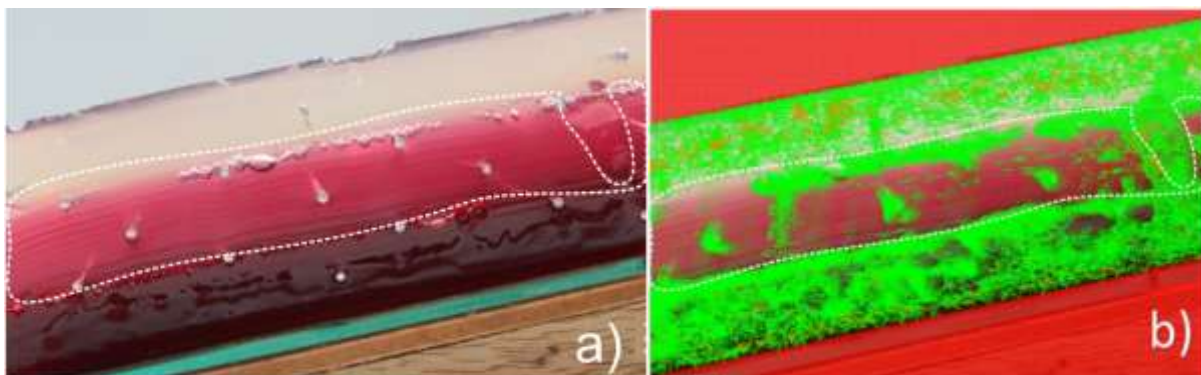


Figura 46. Error por trazo del bisturí, a) Fotografía resaltando trazo del bisturí. b) ausencia o vectores muy pequeños en la zona del trazo del bisturí. Se toma como escala el diámetro de 2mm que tienen los alfileres

6 Discusión

Las investigaciones que más resaltan sobre modelos que representan el ciclo sísmico de subducción son las realizadas por autores como Rosenau, *et al.* (2009) y Corbi *et al.* (2013), donde muestran un mecanismo escalado y electrónicamente viable para crear el proceso. A diferencia de dichos autores, esta investigación muestra de manera sencilla y asequible un modelo básico del ciclo sísmico de subducción para ser representado por cualquier persona con interés en las geociencias, siempre y cuando el entorno cumpla con las condiciones aquí planteadas.

En un principio se planteó que el proceso de subducción en el modelo no se cumplía de forma normal puesto que la gelatina, que representa la corteza continental, es la que se desliza. Pero se evidenció que siempre y cuando en el dominio haya gelatina, el modelo se cumple, ya que si bien la corteza oceánica es la que subduce, de acuerdo a Corbi *et al.* (2013) quien recibe la transferencia del esfuerzo y la deformación elástica causado en la parte bloqueada es la corteza Continental. En

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

cuanto a las propiedades de la gelatina, según Di Giuseppe *et al.* (2009), un módulo de rigidez (que se relaciona a la vez con el módulo de young, la concentración y la densidad) de aprox. 10^3 pa ($5,1 \times 10^3$ en esta investigación), es apropiado para modelar el componente elástico de la corteza.

Scholz & Campos (2012) plantean 3 zonas del contacto interplaca, una de éstas es la zona sismogénica, donde las propiedades de fricción del papel de lija son un análogo de ésta (Corbi *et al.*, 2013), otra es la zona de transición de acoplamiento intermedio, donde el deslizamiento se acomoda mediante eventos lentos (SSE), y por ultimo una interfaz donde la placa se desliza libremente a la velocidad tectónica, ocurrido sobre la superficie de vidrio (zona asísmica, ver Figura 39). Si bien las zonas sísmica y asísmica están representadas por los materiales mencionados, es bueno resaltar la zona de transición que se representó en la figura 41, donde el dominio quedó dividido en dos zonas producto de la transición lija-vidrio.

El ciclo sísmico de subducción alterna entre etapas de acumulación lenta de deformación y rápido movimiento. De acuerdo a Corbi *et al.* (2013) y Rosenau *et al.* (2009) coinciden en que la representación de las etapas del ciclo sísmico se evidencian con la dirección de los vectores generados, donde el movimiento hacia abajo (vectores en dirección del deslizamiento) ocurre sobre la zona sismogénica análoga para el periodo intersísmico y la dirección contraria al deslizamiento para el cosísmico. Así los dos conjuntos de vectores que se evidenciaron en el procesamiento (Ver Figura. 36 y 43) corresponden coherentemente a las etapas del ciclo sísmico al realizar una comparación de los rasgos cualitativos en los resultados de Corbi *et al.* (2013) y Rosenau *et al.* (2009) (Ver Figura 46).

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

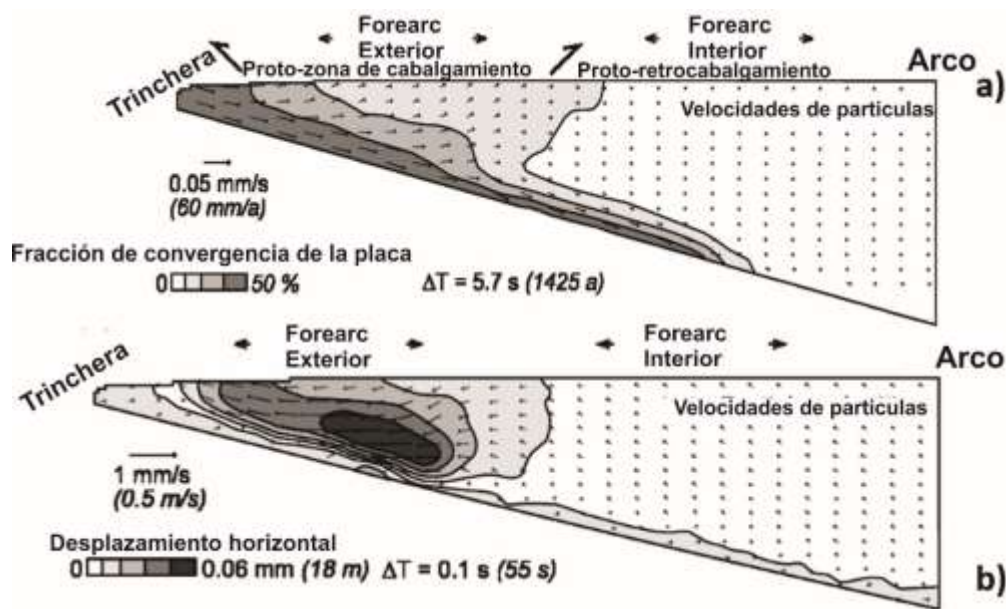


Figura 47. Resultados de la investigación de Rosenau et al (2009). a) periodo Intersísmico. b) Periodo Cosísmico

Si bien tan sólo se hace mención de dos conjuntos de dirección de vectores (etapa cosísmica e intersísmica), Quezada et al, (2012) describe una etapa más, llamada post-sísmica, que según Corbi *et al.* (2013) en los modelos físicos dicha etapa no se representa ya que se tendrían que tener en cuenta factores difíciles de involucrar en un modelo de laboratorio.

Según Corbi *et al.* (2011) el rápido movimiento es por esfuerzo de cizalla a lo largo de la base que excede la fuerza de fricción dentro de la zona sismogénica, considerándose análogas a la etapa cosísmica. De acuerdo con la velocidad del mecanismo, no habría coincidencia con los experimentos de Corbi *et al.* (2013) y Rosenau *et al* (2009), ya que contrario a ellos, los valores de velocidad bajos o incluso iguales coinciden con la etapa cosísmica. Determinada así por la recurrencia y dirección de los vectores, parámetros válidos que hacen plantear que debido a las diferentes condiciones de nuestro mecanismo, los valores de la velocidad en las etapas cosísmica e intersísmica no se diferencian significativamente

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

La velocidad con la que ejecutan los modelos Corbi *et al.* (2013) y Rosenau *et al.* (2009) es considerablemente menor a la de nuestro experimento, lo que favorece a los autores mencionados porque a pequeños esfuerzos obtienen grandes cambios en la velocidad, además de ser experimentos controlados por un ordenador y una banda elástica. Por ende las velocidades de nuestro modelo no varían representativamente, necesitando esfuerzos considerablemente mayores para obtener cambios representativos, ya que consiste básicamente en deslizamientos discontinuos impulsados por la aceleración de la gravedad.

Ya superada la fuerza de fricción que permite el deslizamiento libre, Leyton *et al.* (2009) resaltan que durante el momento de liberación de energía (sismo) ocurren las altas caídas del esfuerzo, lo que coincide con el modelo, puesto que a pesar de que en la etapa cosísmica no se muestran las aceleraciones más altas en comparación con la intersísmica, sí hay la menor razón del esfuerzo cortante y la mayor razón de la deformación al hacer la comparación en paquetes de conjuntos 1 y 2 (Ver figura 43), puesto que no se podría realizar un análisis general de los marcos ya que como también menciona Leyton *et al.* (2009), El patrón de acumulación de esfuerzo a lo largo del avance del proceso de subducción puede no ser constante durante todo el ciclo sísmico.

De acuerdo a Li *et al.* (2011) la subducción inclinada presenta ángulo inicial de 30° (alto ángulo) y plana de 10° (bajo ángulo), además Lay & Kanamori (1981) mencionan que los eventos sísmicos más característicos son los ocurridos en la zona de subducción a bajo ángulo y ausencia de los mismos a alto. En los experimentos realizados no hubo características importantes que diferenciaran según el ángulo de subducción, ya que este modelo no presenta las condiciones suficientes para evidenciar una diferencia clara. Cabe mencionar que no hay un modelo del ciclo sísmico de subducción que represente dichas variaciones.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

Thielicke (2014) menciona que el algoritmo DCC es el más preciso en comparación con FFT y Huang *et al.* (1993) resalta que a medida que aumenta el desplazamiento de la partícula, aumenta el error de la correlación cruzada. De acuerdo a los resultados obtenidos con cada algoritmo y el respectivo tamaño, se determina que a pesar de ser más preciso DCC, en nuestra investigación el algoritmo FFT da un mejor volumen de vectores, además que un tamaño de pixel de 128px step:64px no se realiza una buena correlación de las partículas, perdiendo información importante.

7 Conclusiones

Las propiedades tales como: concentración, densidad, módulo de rigidez y de Young a las que fue llevada la solución de gelatina+agua, son las adecuadas para representar el componente elástico de la corteza y mostrar los esfuerzos en el modelo.

La textura de la gelatina es un factor importante para la generación de vectores durante el procesamiento de las imágenes, puesto que capas y alfileres, no mayores a 2 mm, en el bloque de gelatina permite mejores resultados que con otras texturas acá representadas.

Las propiedades de los materiales que conformaron el montaje experimental, permitieron una buena representación del contacto interplaca del proceso de subducción. Puesto que el papel de lija favoreció a los cambios de velocidad y generación de esfuerzos, y el vidrio al deslizamiento libre, características en el modelo de las zonas sismogénica y asísmica, respectivamente. Además de una zona de transición interpretada a partir de la figura 41 ya que no todos los vectores van en la misma dirección.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN BUENO-SILVA, L.

El modelo es válido si durante la adquisición de la información siempre se mantiene gelatina en el dominio del montaje experimental, ya que serían incoherente de no cumplirse, puesto que el contacto interplaca del proceso de subducción es constante, además de que un espacio en las imágenes genera falsos vectores durante el procesamiento de la información.

Las características cualitativas de los periodos que ocurren en el ciclo sísmico de subducción, representadas por vectores, fueron evidentes, coherentes a su definición y similares a los resultados de otros autores, por el contrario las características cuantitativas, tales como velocidad, difieren a los resultados de otros autores debido a las diferentes condiciones en que se ejecutan los modelos.

Para ángulos pequeños (11°) el mecanismo no representa las etapas del ciclo sísmico debido a que la velocidad desciende a medida que aumenta el tiempo de ejecución del modelo, y para ángulos iniciales de una subducción inclinada (31°) no hay diferencias claras para comparar con un ángulo de 22° .

El modelo es una representación básica del ciclo sísmico de subducción que muestra deslizamientos discontinuos por medio de cambios en la fuerza de fricción, representados en variaciones de la velocidad en el área en contacto, donde los periodos cortos representan la etapa cosísmica y los periodos largos la etapa intersísmica.

La generación de sismos se representa en el modelo por la relación entre el aumento de la razón de la deformación que coincide con el decaimiento de la razón del esfuerzo, durante la transición de etapa intersísmica-cosísmica en algunos paquetes de marcos (Ver Figura 43 y Tabla 9).

Los resultados del modelo en algunos momentos de su ejecución muestra valores diferentes a lo esperado (p.e valores similares entre parámetros de las etapas cosísmica-intersísmica), lo

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

anterior pudiendo ser consecuencia de lo práctico y sencillo que es el modelo, donde la gravedad es la única fuerza que permite el movimiento.

8 Recomendaciones

Involucrar nuevos materiales que permitan mostrar las diferencias del ángulo de subducción y los cambios de velocidad según las definiciones del ciclo sísmico.

Experimentar con un software de tratamiento de partículas diferente para poder detectar más factores o errores que podrían ser importantes en el modelo.

Referencias bibliográficas

- Adrian, R. J. (1988). Double exposure, multiple-field particle image velocimetry for turbulent probability density. *Optics and lasers in engineering*, 9(3-4), 211-228.
- Adrian, R (1991). Particle-imaging Techniques for Experimental fluid Mechanics. *Annu. Rev. Fluid Mech* 23: 261-304.
- Anaya, C. (2014). *Análisis de estilos estructurales a partir de modelos análogos* (Tesis pregrado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Belmonte, A., & Comte, D. (Octubre de 1997). Análisis del contacto sismogénico interplaca a lo largo de Chile. *VIII Congreso Geológico Chileno y Simposio de geofísica Lautaro Ponce Mori*. Llevado a cabo en Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.
- Boutelier, D. & Cruden, A. (2016). Slab breakoff: insights from 3D thermo-mechanical analogue modelling experiments. *Tectonophysics*, 694(2), 197-213.
- Bransford, J. D., & Stein, B. S. (1984). *The IDEAL problem solver: A guide for improving thinking, learning, and creativity*. NY: WH Freeman and Company.
- Buform, E., & Udías, A. (2007). Sismicidad y mecanismo focal de los terremotos de la región Cabo de San Vicente-Argelia. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 20(3-4), 301-310.
- Burberry, C. & Swiatlowski, J. (2016). Evolution of a fold-thrust belt deforming a unit with pre-existing linear asperities: insights from analog models. *Journal of Structural Geology* 87, 1-18.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

- Buttles, J., & Olson, P. (1998). A laboratory model of subduction zone anisotropy. *Earth and Planetary Science Letters*, 164(1), 245-262.
- Catriel, G. (2008) *Reología en ligantes asfálticos* (tesis de maestría). Universidad Tecnológica Nacional. La Plata
- Chapple, W. M. & Tullis, T. E. (1977). Evaluation of the forces that drive the plates. *Journal of geophysical research*, 82(14), 1967-1984.
- Corbi, F., Funicello, F., Faccenna, C., Ranalli, G. & Heuret, A. (2011). Seismic variability of subduction thrust faults: Insights from laboratory models. *Journal of geophysical research* 116, B06304.
- Corbi, F., Funicello, F., Moroni, M., Van Dinther, Y., Mai, P., Dalguer, L. & Faccenna, C. (2013). The seismic cycle at subduction thrusts: 1. Insights from laboratory models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 1483-1501
- Crespo, A. & Perez, I. (2002). La modelización analógica como recurso didáctico en la geología estructural. *Geogaceta*, 32. 179-181
- Crespo, A. (2008). Recess drawn by the internal zone outer boundary and oblique structures in the paleomargin-derived units (Subbetic Domain, central Betics): An analogue modelling approach. *Journal of Structural Geology*, 30(1), 65-80.
- Davy, P., & Cobbold, P. R. (1991). Experiments on shortening of a 4-layer model of the continental lithosphere. *Tectonophysics*, 188(1-2), 1-25.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

- Di Giuseppe, E., Funiciello, F., Corbi, F., Ranalli, G., & Mojoli, G. (2009). Gelatins as rock analogs: A systematic study of their rheological and physical properties. *Tectonophysics* 473, 391–403.
- Dogliani, C., Harabaglia, P., Merlini, S., Mongelli, F., Peccerillo, A. T., & Piromallo, C. (1999). Orogens and slabs vs. their direction of subduction. *Earth-Science Reviews*, 45(3), 167-208.
- Dooley, T. P., & Schreurs, G. (2012). Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics*, 574, 1-71.
- Espurt, N., Funiciello, F., Martinod, J., Guillaume, B., Regard, V., Faccenna, C. and Brusset, S. (2008), Flat subduction dynamics and deformation of the South American plate: Insights from analog modeling. *Tectonics*, 27, TC3011, 1-19.
- Farmer, I. (2004). *Engineering properties of rock's*. (C. Canoba & H. Fraga, Trans). Rosario, Argentina: Universidad Nacional de Rosario. (Trabajo original publicado en 1968).
- Forsyth, D. & Uyeda, S (1975). On the relative importance of the driving forces of plate motion. *Geophysical Journal International*, 43(1), 163-200.
- Fossen, H. (2010). *Structural geology*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Froidevaux, C., Uyeda, S., & Uyeshima, M. (1988). Island arc tectonics. *Tectonophysics*, 148(1-2), 1-9.
- Funiciello, F., Faccenna, C., Giardini, D., & Regenauer-Lieb, K. (2003). Dynamics of retreating slabs: 2. Insights from three-dimensional laboratory experiments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B4).

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

- Grow, J. A. (1973a). Crustal and upper mantle structure of the central Aleutian arc. *Geological Society of America Bulletin*, 84(7), 2169-2192.
- Gutenberg, B. & Richter, C. (1956). The energy of earthquakes. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 112(1-4), 1-14.
- Heuret, A., Lallemand, S., Funiciello, F., Piromallo, C., & Faccenna, C. (2011). Physical characteristics of subduction interface type seismogenic zones revisited. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 12(1), 1-26.
- Holmes, M., Huene, R., & McManus, D. (1972). Seismic reflection evidence supporting underthrusting beneath the Aleutian Arc near Amchitka Island. *Journal of Geophysical Research*, 77(5), 959-964.
- Houston, H. (2007). Deep earthquakes. In: G. Schubert. (Ed.), *Treatise on Geophysics* (pp. 321–350). Amsterdam, Paises Bajos: Elsevier.
- Hubbert, M. (1937). Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Geological Society of America Bulletin*, 48, 1459–1520.
- Huang, H., Fiedler, H. & Wang, J. (1993). Limitation and improvement of PIV. *Experiments in fluids*, 15(3), 168-174.
- Huang, H., Dabiri, D. & Gharib, M. (1997). On errors of digital particle image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.* 8, 1427–1440.
- Jarrard, R. D. (1986). Relations among subduction parameters. *Reviews of Geophysics*, 24(2), 217-284.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

- Kanamori, H. (1977a). The energy release in great earthquakes. *Journal of geophysical research*, 82(20), 2981-2987.
- Karig, D. & Sharman, G. (1975). Subduction and accretion in trenches. *Geological Society of America Bulletin*, 86(3), 377-389.
- Kavanagh, J., Menand, T. & Daniels, K. (2013). Gelatine as a crustal analogue: Determining elastic properties for modelling magmatic intrusions. *Tectonophysics*, 582, 101-111.
- Keane, R. D., & Adrian, R. J. (1992). Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Applied scientific research*, 49(3), 191-215.
- Kulm, L., von Huene, R., Duncan, J., Ingle, J., Kling, S., Musich, L., *et al.* (1973). Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. 18, Washington: U.S. Government Printing Office.
- Koyi, H. (1997). Analogue modelling: from a qualitative to a quantitative technique a historical outline. *Journal of Petroleum Geology*, 20(2), 223-238
- Lay, T., & Kanamori, H. (1981). An asperity model of large earthquake sequences. *American Geophysical Union*, 4, 579-592.
- Leyton, F., Ruiz, J., Campos, J., & Kausel, E. (2009). Intraplate and interplate earthquakes in Chilean subduction zone: A theoretical and observational comparison. *Physics of the Earth and Planetary interiors*, 175(1), 37-46.
- Leyton, F., Ruiz, S., & Sepúlveda, S. (2010). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean geology*, 37(2), 455-472.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

- Lister, J. R. (1991). Steady solutions for feeder dykes in a density-stratified lithosphere. *Earth and planetary science letters*, 107(2), 233-242.
- Li, Z. H., Xu, Z. Q., & Gerya, T. V. (2011). Flat versus steep subduction: Contrasting modes for the formation and exhumation of high-to ultrahigh-pressure rocks in continental collision zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1), 65-77.
- Martinez, D. (2017). *Consideraciones del fracking a partir de modelos análogos y su viabilidad en territorio colombiano* (Tesis de Pregrado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Monsalve, H. & Mora, H. (2005). Esquema geodinámico regional para el noroccidente de suramérica (modelo de subducción y desplazamientos relativos). *Boletín de geología*, 27(1), 25-53.
- Muller, J. R., Ito, G. & Martel, S. J. (2001). Effects of volcano loading on dike propagation in an elastic half-space. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B6), 11101-11113.
- Nalpas, T., Townley, B., & Sanhueza, D. (2011). Influencia de un bloque rígido en un sistema de fallas de rumbo: modelamiento análogo. *Andean geology*, 38(1), 23-36.
- Pb Gelatin. (Consultado 25 de Enero de 2017). Propiedades físicas y químicas de la gelatina. Recuperado de <http://www.pbgelatins.com/es/about-gelatin/physical-and-chemical-properties/>.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

- Pennington, W. D. (1981). Subduction of the eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11), 10753-10770.
- Prasad, A. (2000). Particle Image Velocimetry. *Current Science*, 79(1), 51-60.
- Prieto, G., Beroza, G., Barrett, S., López, G. & Florez, M. (2012). Earthquake nests as natural laboratories for the study of intermediate-depth earthquake mechanics. *Tectonophysics*, 570, 42-56.
- Quezada, J., Jaque, E., Fernández, A., & Vásquez, D. (2012). Cambios en el relieve generados como consecuencia del terremoto $M_w = 8,8$ del 27 de febrero de 2010 en el centro-sur de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 53, 35-55.
- Richards, R. & Mark, R. (1966). Gelatin models for photoelastic analysis of gravity structures. *Experimental mechanics*. 30-38.
- Richardson, R, Solomon, S., & Sleep, N. (1979). Tectonic stress in the plates. *Reviews of Geophysics*, 17(5), 981-1019.
- Rosenau, M., Lohrmann, J., & Oncken, O. (2009). Shocks in a box: An analogue model of subduction earthquake cycles with application to seismotectonic forearc evolution. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B1).
- Ruiz, A. E. (2014). *Evaluación del PIV como método de medida en Geotecnia* (Tesis maestría). Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Ruiz, S., & Madariaga, R. (2012). Sismogénesis, proceso de ruptura y réplicas de megaterremoto del Maule 2010. En: M. O. Moroni. (Ed.), *$M_w = 8.8$: Terremoto en*

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

Chile, 27 de febrero de 2010 (pp. 13-30). Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.

Ruff, L., & Tichelaar, W. (1996). What controls the seismogenic plate interface in subduction zones?. *Geophysical monograph*, 96, 105-111.

Schellart, W. & Strak, V. (2016) A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. *Journal of Geodynamics*, 100, 7-32.

Schreurs, G., & Colletta, B. (1998). Analogue modelling of faulting in zones of continental transpression and transtension. *Geological Society, Special Publications*, 135(1), 59-79.

Schreurs, G., Buitter, S., Boutelier, J., Burberry, C., Callot, J., Cavozi, C., et al. (2016). Benchmarking analogue models of brittle thrust wedges. *Journal of structural geology*, 92, 116-139.

Scholl, D., von Huene, R. & Ridlon, J. (1968). Spreading of the ocean floor: undeformed sediments in the Peru-Chile Trench. *Science*, 159(3817), 869-871.

Scholz, C. & Campos, J. (2012). The seismic coupling of subduction zones revisited. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B5). B05310

Schneider, J., Pennington, W. & Meyer, R. (1987). Microseismicity and focal mechanisms of the intermediate-depth Bucaramanga Nest, Colombia. *Journal of Geophysical Research* 92, 13913–13926.

Solomon, S., & Sleep, N. (1974). Some simple physical models for absolute plate motions. *Journal of Geophysical Research*, 79(17), 2557-2567.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

- Solomon, S., Sleep, N. & Richardson, R. (1975). On the forces driving plate tectonics: Inferences from absolute plate velocities and intraplate stress. *Geophysical Journal International*, 42(2), 769-801.
- Stern, R. J. (2002). Subduction zones. *Reviews of geophysics*, 40(4), 1-38.
- Takada, A. (1990). Experimental study on propagation of liquid-filled crack in gelatin: shape and velocity in hydrostatic stress condition. *Journal of Geophysical Research*, 95(B6), 8471–8481.
- Tarbuck E., Lutgens F. & Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra, una introducción a la geología física, 8ª edición*. (AMR Traducciones científicas, Trans.). Madrid, España: Person Prentice Hall.
- Thielicke, W. (2014). *The flapping flight of birds: Analysis and application* [S.l.]: [S.n.]
- Uyeda, S., & Kanamori, H. (1979). Back-arc opening and the mode of subduction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B3), 1049-1061.
- Wang, K., Hu, J. & He, J. (2012). Deformation cycles of subduction earthquakes in a viscoelastic Earth. *Nature*, 484, 327-332.
- Van Dinther, Y., Gerya, T., Dalguer, L., Corbi, F., Funiciello, F., & Mai, P. (2013). The seismic cycle at subduction thrusts: 2. Dynamic implications of geodynamic simulations validated with laboratory models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(4), 1502-1525.

CONTACTO INTERPLACA DEL PROCESO DE SUBDUCCIÓN
BUENO-SILVA, L.

- van Otterloo, J., & Cruden, A. R. (2016). Rheology of pig skin gelatine: Defining the elastic domain and its thermal and mechanical properties for geological analogue experiment applications. *Tectonophysics*, 683, 86-97.
- Watanabe, T., Masuyama, T., Nagaoka, K. & Tahara, T. (2002). Analog experiments on magma-filled cracks: Competition between external stresses and internal pressure. *Earth Planets Space*, 54, 1247–1261.
- 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(4), 316-330.
- Westerweel, J. (1997) Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.*, 8, 1379–1392.
- Wortel, M. J., & Vlaar, N. (1988). Subduction zone seismicity and the thermo-mechanical evolution of downgoing lithosphere. *Pure and applied geophysics*, 128(3-4), 625-659.
- Worzel, J. & Shurbet, L. (1955). Gravity Interpretations from Standard Oceanic and Continental Crustal Sections*. *Geol. Soc. America*, 62, 87-100.
- Zwaan, F., Schreurs, G., Naliboff, J. & Buiters, S. (2016). Insights into the effects of oblique extension on Continental rift interaction from 3D analogue and numerical models. *Tectonophysics*, 693(B), 239-260.