

**Universidad de Nariño**  
**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales**  
**Departamento de Física**



**Modelo de grieta húmeda para sismos tipo Tornillo del volcán Galeras  
utilizando el método de elementos finitos**

**TRABAJO DE GRADO**

Para optar el título profesional de:

Físico

**Duvan Camilo Chachinoy Hidalgo**

San Juan de Pasto, Colombia

Abril 2022

**Universidad de Nariño**  
**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales**  
**Departamento de Física**

**Modelo de grieta húmeda para sismos tipo Tornillo del volcán Galeras  
utilizando el método de elementos finitos**

**Duvan Camilo Chachinoy Hidalgo**

**TRABAJO DE GRADO**

Director:

**Dr. Oscar Ernesto Cadena Ibarra.**

Doctor en Geociencias

San Juan de Pasto, Colombia

Abril 2022

©2022 - Duvan Camilo Chachinoy Hidalgo

“Las ideas y conclusiones aportadas en el trabajo de grado son responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1. del acuerdo No. 324 del 11 de Octubre de 1966, emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Todos los derechos reservados.

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

Dr. Oscar Ernesto cadena Ibarra

Director

MSc. Sandra Esperanza Sanchez Sierra

Jurado

MSc. Jaime Alfredo Betancourt Miganquer

Jurado

San Juan de Pasto, 22 de Abril de 2022

## **Agradecimientos**

Agradezco encarecidamente a mi familia, en particular, a mis padres, por su apoyo constante e incondicional, durante todo este proceso académico. A mi asesor de tesis Dr. Oscar Ernesto Cadena por su tiempo, dedicación, apoyo y constante orientación a lo largo de la elaboración de este proyecto de grado. En general, a todas las personas que participaron y apoyaron directa o indirectamente mi formación académica.

# **Modelo de grieta húmeda para sismos tipo Tornillo del volcán Galeras utilizando el método de elementos finitos**

## **Resumen**

En este trabajo se utiliza el método de elementos finitos con el fin de recrear una determinada geometría para el modelo de grieta húmeda, que será caracterizada a través de parámetros físicos asociados al medio sólido y fluido, teniendo en cuenta las condiciones actuales del volcán Galeras, con el fin de dar solución a las ecuaciones de onda que rigen el comportamiento de la grieta cuando sufre una disrupción de energía en su interior. Se estudia las formas de onda y contenido espectral de sismogramas sintéticos correspondientes a eventos tipo Tornillo, variando parámetros asociados a la geometría de la grieta tales como la longitud y el ancho de la misma. Este estudio tiene como objetivo principal el de establecer relaciones entre la geometría de la grieta y las características, en los dominios del tiempo y frecuencia, de la señal sísmica asociada.

## **Wet crack model for Tornillo-type seismicity of Galeras volcano using the finite element method.**

### **Abstract**

In this work, the finite element method is used in order to recreate a certain geometry for the wet crack model, which will be characterized through physical parameters associated with solid and fluid medium, considering the current conditions of the Galeras volcano. In order to solve the wave equations that govern the behavior of the crack when it suffers a disruption of energy inside. The waveforms and spectral content of synthetic seismograms corresponding to Tornillo-type events are studied, varying parameters associated with the geometry of the crack, such as its length and width. The main objective of this study is to establish relationships between the geometry of the crack and the characteristics, in the time and frequency domains, of the associated seismic signal.

# Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>14</b>
<b>2. Actividad Sísmica del Volcán Galeras</b>	<b>17</b>
2.1. Clasificación de sismos en el Volcán Galeras . . . . .	18
2.1.1. Sismos tipo Tornillo . . . . .	19
2.2. Antecedentes . . . . .	20
<b>3. Definición del Problema</b>	<b>26</b>
3.1. Planteamiento del Problema . . . . .	26
3.2. Formulación del Problema . . . . .	27
3.3. Objetivos . . . . .	27
3.3.1. Objetivo General . . . . .	27
3.3.2. Objetivos Específicos . . . . .	27
3.4. Justificación . . . . .	27
<b>4. Marco Teórico</b>	<b>29</b>
<b>5. Metodología.</b>	<b>38</b>
5.1. Documentacion . . . . .	38
5.2. Parametrización de la grieta húmeda y pila volcánica que la rodea. . . . .	40
5.2.1. Parametrización Corteza. . . . .	40
5.2.2. Parametrización Grieta Húmeda. . . . .	40
5.2.3. Parametrización Conducto de Magma. . . . .	41
5.2.4. Geometría del Modelo. . . . .	42
5.3. Mallado y Función fuente . . . . .	42
5.3.1. Mallado . . . . .	42
5.3.2. Funcion Fuente. . . . .	44
5.4. Programa procesador de sismos sintéticos . . . . .	45
<b>6. Resultados.</b>	<b>49</b>
6.1. Tablas de resultados . . . . .	49
6.2. Graficas de parámetros vs ancho de la grieta . . . . .	52
6.2.1. Duración vs ancho de la grieta. . . . .	53
6.2.2. Frecuencia Dominante vs ancho de la grieta . . . . .	55
6.2.3. Frecuencia Central vs ancho de la grieta . . . . .	58
6.2.4. Frecuencia Centroide vs ancho de la grieta . . . . .	61

6.2.5.	Frecuencia de máxima energía vs ancho de la grieta . . . . .	63
6.2.6.	Índice de frecuencia vs ancho de la grieta . . . . .	66
<b>7.</b>	<b>Análisis de Resultados.</b>	<b>71</b>
7.1.	Análisis descriptivo graficas sección 6.2 . . . . .	71
7.1.1.	Frecuencia central . . . . .	71
7.1.2.	Frecuencia Centroide . . . . .	76
7.1.3.	Frecuencia de máxima energía . . . . .	80
7.1.4.	Frecuencia dominante . . . . .	84
7.1.5.	Índice de frecuencia . . . . .	89
7.2.	Duración. . . . .	94
<b>8.</b>	<b>Discusión</b>	<b>96</b>
<b>9.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>98</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>100</b>

# Lista de tablas

5.1. Parámetros físicos utilizados para caracterizar el medio sólido que rodea la grieta. . . . .	40
5.2. Parámetros físicos utilizados para caracterizar el fluido dentro de la grieta. . .	41
5.3. Parámetros físicos utilizados para caracterizar el magma dentro del conducto. . . . .	42
5.4. Parámetros geométricos utilizados para caracterizar el modelo. . . . .	43
5.5. Valores utilizados en la formula para la ondícula de Ricker. . . . .	45
6.1. Tabla de resultados para una altura de grieta de 167m . . . . .	49
6.2. Tabla de resultados para una altura de grieta de 187m . . . . .	50
6.3. Tabla de resultados para una altura de grieta de 207m . . . . .	50
6.4. Tabla de resultados para una altura de grieta de 227m . . . . .	50
6.5. Tabla de resultados para una altura de grieta de 247m . . . . .	51
6.6. Tabla de resultados para una altura de grieta de 267m . . . . .	51
6.7. Tabla de resultados para una altura de grieta de 287m . . . . .	51
6.8. Tabla de resultados para una altura de grieta de 307m . . . . .	52
6.9. Tabla de resultados para una altura de grieta de 327m . . . . .	52

# Lista de figuras

5.1. Esquema de la estructura propuesta para abarcar la metodología de esta investigación. . . . .	39
5.2. Esquema ilustrativo del modelo 2D del cono volcánico del volcán Galeras tomado de esta investigación. . . . .	41
5.3. Captura de pantalla del modelo utilizado en esta investigación. . . . .	44
5.4. Interfaz gráfica del programa realizado en el software Matlab. . . . .	46
5.5. Gráfica de forma de onda para un sismo sintético generado en una grieta de 267m de altura y 80.1m de ancho. . . . .	47
5.6. Espectro de un sismo sintético generado en una grieta de 267m de altura y 80.1m de ancho. . . . .	47
5.7. Espectrograma para un sismo sintético generado en una grieta de 267m de altura y 80.1m de ancho.. . . . .	48
6.1. Gráfica de duración vs ancho de grieta para una altura de 167m. . . . .	53
6.2. Gráfica de duración vs ancho de grieta para una altura de 187m. . . . .	53
6.3. Gráfica de duración vs ancho de grieta para una altura de 247m. . . . .	54
6.4. Gráfica de duración vs ancho de grieta para una altura de 307m. . . . .	54
6.5. Gráfica de duración vs ancho de grieta para una altura de 327m. . . . .	55
6.6. Gráfica de componente Y de frecuencia dominante vs ancho de grieta para una altura de 167m. . . . .	55
6.7. Gráfica de componente Y de frecuencia dominante vs ancho de grieta para una altura de 187m. . . . .	56
6.8. Gráfica de componente Y de frecuencia dominante vs ancho de grieta para una altura de 207m. . . . .	56
6.9. Gráfica de componente Y de frecuencia dominante vs ancho de grieta para una altura de 227m. . . . .	57
6.10. Gráfica de componente Y de frecuencia dominante vs ancho de grieta para una altura de 247m. . . . .	57
6.11. Gráfica de componente Y de frecuencia dominante vs ancho de grieta para una altura de 327m. . . . .	58
6.12. Gráfica de componente Y de frecuencia central vs ancho de grieta para una altura de 167m. . . . .	58
6.13. Gráfica de componente Y de frecuencia central vs ancho de grieta para una altura de 187m. . . . .	59
6.14. Gráfica de componente Y de frecuencia central vs ancho de grieta para una altura de 267m. . . . .	59

6.15. Gráfica de componente Y de frecuencia central vs ancho de grieta para una altura de 287m. . . . .	60
6.16. Gráfica de componente Y de frecuencia central vs ancho de grieta para una altura de 327m. . . . .	60
6.17. Gráfica de componente Y de frecuencia centroide vs ancho de grieta para una altura de 187m. . . . .	61
6.18. Gráfica de componente Y de frecuencia centroide vs ancho de grieta para una altura de 207m. . . . .	61
6.19. Gráfica de componente Y de frecuencia centroide vs ancho de grieta para una altura de 287m. . . . .	62
6.20. Gráfica de componente Y de frecuencia centroide vs ancho de grieta para una altura de 307m. . . . .	62
6.21. Gráfica de componente Y de frecuencia centroide vs ancho de grieta para una altura de 327m. . . . .	63
6.22. Gráfica de componente Y de frecuencia de máxima energía vs ancho de grieta para una altura de 187m. . . . .	63
6.23. Gráfica de componente Y de frecuencia de máxima energía vs ancho de grieta para una altura de 207m. . . . .	64
6.24. Gráfica de componente Y de frecuencia de máxima energía vs ancho de grieta para una altura de 247m. . . . .	64
6.25. Gráfica de componente Y de frecuencia de máxima energía vs ancho de grieta para una altura de 267m. . . . .	65
6.26. Gráfica de componente Y de frecuencia de máxima energía vs ancho de grieta para una altura de 287m. . . . .	65
6.27. Gráfica de componente Y de frecuencia de máxima energía vs ancho de grieta para una altura de 307m. . . . .	66
6.28. Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 167m. . . . .	66
6.29. Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 187m. . . . .	67
6.30. Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 207m. . . . .	67
6.31. Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 227m. . . . .	68
6.32. Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 247m. . . . .	68
6.33. Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 267m. . . . .	69
6.34. Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 287m. . . . .	69

6.35. Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 307m. . . . .	70
6.36. Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 327m. . . . .	70
7.1. Sismogramas de Tornillos generados en COMSOL Multiphysics version 5.5 para una altura de grieta $L = 227m$ y un ancho $W = 68,1m$ . . . . .	95
95 . ((a)).. . . .	
95 . ((a)).. . . .	
95 . ((b)).. . . .	
95 . ((b)).. . . .	
7.2. Sismogramas de Tornillos generados en COMSOL Multiphysics version 5.5 para una altura de grieta $L = 267m$ y un ancho $W = 160,2m$ . . . . .	95
95 . ((a)).. . . .	
95 . ((a)).. . . .	
95 . ((b)).. . . .	
95 . ((b)).. . . .	

# Capítulo 1

## Introducción

El volcán Galeras forma parte de la Cordillera de los Andes, que está ubicada en la zona del Cinturón de Fuego del Pacífico. se localiza en el Departamento de Nariño, aproximadamente a 9 km al occidente de la Ciudad de San Juan de Pasto, capital de este departamento, en las coordenadas  $1^{\circ} 13' 43,8''$  de latitud norte y  $77^{\circ} 21' 33,0''$  de longitud oeste y con una altura de 4276 msnm. Su cono activo se ubica a 9 km al occidente de San Juan de Pasto, la capital del departamento con aproximadamente 400.000 habitantes [1].

El volcán Galeras es un estrato-volcán caracterizado por depósitos de flujos de lavas andesíticas, flujos piroclásticos y depósitos de caída. Está catalogado como el volcán más activo de Colombia, en 1991 fue declarado uno de los Volcanes de la Década por el IAVCEI (International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior) como parte del programa de las Naciones Unidas de la Década Internacional para la Reducción de Desastres Naturales [2].

A finales de 1988, el volcán Galeras mostró nuevamente (Luego de un ciclo eruptivo entre los años 1942 y 1944) señales de actividad e INGEOMINAS (hoy Servicio Geológico Colombiano SGC), en 1989, empezó su monitoreo continuo estableciendo el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (SGC-OVSP). Desde la fecha que se empezaron los registros de algunos parámetros derivados de la actividad con diferentes equipos, han ocurrido 21 erupciones de tipo Vulcaniano con columnas eruptivas relativamente bajas (menos de 12 km en altura) que han producido pequeños depósitos de material piroclástico [3].

Existe un tipo particular de eventos sísmicos de largo periodo conocidos como tornillos, registrados en volcanes andesíticos, y han precedido la mayoría de erupciones y emisiones del

volcán Galeras, desde julio 16 de 1992 hasta enero de 1995. Su número, energía y frecuencia pico han sido útiles como parámetros de actividad y como precursores de las erupciones. Entonces, estas señales sísmicas han mostrado gran interés en el monitoreo de la actividad volcánica y en el estudio de la mecánica de fluidos del sistema magma-gas [4].

Con registros derivados de sismómetros de corto periodo y triaxiales de banda ancha se investigan algunas características asociadas a estas señales y su origen. Los tornillos exhiben formas de onda cuasi-sinusoidales con un inicio ligeramente impulsivo ligado al desarrollo de un transitorio de presión que ocasiona un pulso impulsivo de corto tiempo de subida y lento decaimiento exponencial de las amplitudes que se manifiesta en largas duraciones en comparación con sus amplitudes [5]. El contenido espectral de estas señales es fuertemente cuasi-monocromático en donde se resalta uno o pocos picos espectrales agudos cuyo espectrograma muestra básicamente una banda de frecuencia constante en el tiempo. A primera vista los tornillos parecen ser una combinación de una excitación impulsiva y una resonancia dentro del volcán. Varios modelos de resonadores de vibraciones libres de una cavidad llena de fluido han sido sugeridos para explicar la fuente de los tornillos: esferas, cilindros, tuberías y grietas. Condiciones como el tamaño y geometría de la fuente, las propiedades físicas del fluido y del material sólido del entorno, así como la historia de las presiones en el tiempo y en el espacio son variables importantes que deben contemplarse en los modelos [6].

Así entonces, el objetivo de este proyecto es emplear el modelo de una grieta húmeda para conformar sismos tipo tornillo que se presentan en el volcán galeras, esto mediante la ayuda de un software que permite simular una grieta húmeda bajo determinadas condiciones en el medio sólido y fluido. La técnica a utilizar para llevar a cabo la simulación, es el método de elementos finitos, el cual, brinda una solución numérica de la ecuación de onda sísmica y la ecuación que determina las variaciones de presión en el dominio fluido. Para ello, se caracteriza físicamente la grieta y la pila volcánica simulando las condiciones actuales de la estructura interna del volcán galeras. Por tanto, con este trabajo se pretende estudiar dife-

rentes sismogramas sintéticos generados en base al modelo de grieta húmeda, con el fin de analizar los sismos tipo tornillo que se originan en el volcán Galeras, especialmente aquellos producidos bajo determinados parámetros que caracterizan el medio sólido y fluido del problema, y la influencia de la variación de dichos parámetros en la propagación de la onda y las señales sintéticas producidas.

## Capítulo 2

# Actividad Sísmica del Volcán Galeras

La sismicidad es un reflejo de procesos asociados con liberación de energía en el interior de la Tierra, en regiones volcánicas estos procesos obedecen principalmente a la dinámica del magma. Su movimiento, cambios de fase, cambios de temperatura, desprendimiento de volátiles, son algunos de los fenómenos que producen cambios de presión que son transmitidos por la roca y registrados por los sismómetros. En ocasiones estos cambios de presión son transitorios y en otros se sostienen produciendo sismos de mayor duración. Suele suceder que dichas presiones son suficientes para rebasar el nivel de fragilidad de la roca, fracturándola, originando sismos bastante similares a los sismos tectónicos.

Los sismómetros captan el movimiento del terreno cuya señal dibuja sobre los sismogramas diferentes formas denominadas firmas o registros sísmicos. Cada firma es diferente de otra, sin embargo, existen características comunes que se pueden encontrar en sismos originados por condiciones similares de fuente, de manera que un análisis de los registros y una clasificación que atienda a la fuente que los produjo son claves para lograr una adecuada interpretación del fenómeno volcánico [7].

El volcán Galeras ha registrado una amplia variedad de señales sismo-volcánicas que se han relacionado con procesos de limpieza y abertura de conductos, actividad hidrotermal, intrusiones de magma y construcción, emplazamiento y destrucción de domos. Dentro de estas señales sismo-volcánicas están las que se conocen como sismos Volcano tectónicos (VT) y que están asociados con fracturamiento de extensión o de cizalla en la parte sólida del volcán debido a presiones inducidas por magma [8]. Otro tipo son los denominados episodios de Tremor (TRE) y los sismos de Largo Período (LP), que se relacionan con procesos de dinámica de fluidos en el sistema magma-gas o hidrotermal, y que producen perturbaciones

de presiones transitorias y resonancia de los conductos o cavidades [9]. Un tercer tipo corresponde a los denominados sismos Híbridos (HIB) que se interpretan como una combinación de los procesos originados por cambios volumétricos o transporte de material fluido que casi simultáneamente inducen al fracturamiento de la roca sólida [10].

## **2.1. Clasificación de sismos en el Volcán Galeras**

La siguiente clasificación es tomada del Catálogo de señales sísmicas volcánicas de Colombia [2].

En los volcanes del mundo se presentan sismos que tienen firmas semejantes y que se han asociado con el tipo de fuente que los origina. Por ejemplo, la fractura de material cortical en el edificio volcánico, sin que importe la causa que la produjo, genera eventos sísmicos que tienen arribos impulsivos y sus fases P y S son fácilmente reconocidas, estos sismos son llamados Volcano-Tectónicos [11] [12], se distinguen por las siglas VT. Puede suceder que los sismos VT sean producto de actividad volcánica o de acumulación de esfuerzos tectónicos que se transmiten hacia la región volcánica; el hecho de que su foco esté localizado en inmediaciones de la estructura volcánica es suficiente para clasificarlo como VT.

Se observan también eventos sísmicos volcánicos[13]. Este tipo de sismos se divide en dos grupos diferenciados por el tiempo de excitación de la fuente generatriz. Se llaman sismos de Largo Periodo o LP aquellos en que su fuente es transitoria y Tremor o TRE cuando la fuente es persistente en el tiempo. Chouet considera que una concatenación de eventos LP puede ser tratada como un solo episodio de tremor. Otro tipo de sismos involucra tanto fractura de material sólido como movimiento de fluidos, estos son llamados Híbridos o HYB [12]. En algunos volcanes se observan también tipos propios, que responden a particularidades en su estructura o dinámica, por ejemplo, los Tornillos que se han registrado en los volcanes Galeras, Puracé y Ruiz en Colombia, y Meakan, Tarumai, Kusatsu-Shirane, Asama, Sakurajima,

Kirishima, y Kushinocrabujima, en Japón [5].

La clasificación de sismos en el VG ha sufrido modificaciones. Cuando se inició el monitoreo sismológico del volcán y teniendo en cuenta que no se contaba con una línea base de información sobre la cual referir la sismicidad, se decidió adoptar la clasificación que hasta el momento se utilizaba en el volcán Nevado del Ruiz, basada en la de Minakami, (1960, 1974) y Latter, (1979), y modificada por Malone, (1983) y Newhall, (1984), que era similar a la que se utilizaba en el volcán Santa Helena (EUA). Luego, con los estudios de Lahr et al., (1994) y Chouet, (1981, 1988, 1992, 1996), se adoptó la clasificación de: Largo Periodo, Volcano Tectónico, Tremor armónico y se incluyeron además el Tremor espasmódico, el Tornillo y el evento tipo Mariposa (Gómez et al., 2005).

### **2.1.1. Sismos tipo Tornillo**

El término Tornillo fue usado por primera vez para identificar un tipo específico de sismos volcán Galeras, que mostraba una forma especial en el espectrograma, pues el registro se parece a la vista lateral de un tornillo de rosca golosa [14]. Este tipo de sismicidad ha estado presente en algunos volcanes andesíticos y en diferentes etapas de la actividad de los volcanes, ya sea como precursores de erupciones, emisiones de gas o ceniza (volcán Galeras, Colombia, 1992-1993; volcán Asama, Japón, 1990), después de erupciones (volcán Tokachi, Japón, 1989), durante enjambres sísmicos (volcán Meakan, Japón, 1982) y durante estados de reposo (volcán Puracé, 1994-2012, volcán Cumbal, 2007-2012, Colombia; volcán Tarumai, Japón, 1970-1971, 1975) [14] [15] [16].

Los eventos de tipo Tornillo también se asocian a la dinámica de movimiento de fluidos, se han registrado en volcanes de tipo andesíticos cuyas erupciones son generalmente de tipo vulcaniano. Entre sus características resaltan: Su forma de onda es similar a sinusoides, las amplitudes muestran un lento decaimiento exponencial que se manifiesta en la duración de la señal, lo que implica que la tasa de pérdida de energía en la cavidad resonante es lenta también. Aunque el inicio de la señal puede mostrar un ancho de banda de altas frecuencias,

su espectro modela entre uno y muy pocos picos en una banda pequeña. La mayoría muestra inicios emergentes, pero se encuentran algunos con arribo impulsivo. Las frecuencias dominantes no están afectadas por la distancia epicentral, el acimut o tiempo de viaje indicando un efecto de la fuente [17].

Se han establecido una serie de parámetros para caracterizar este tipo de eventos, entre ellos: acimut, ángulo de incidencia, rectilinealidad, amplitud espectral, frecuencias dominantes y factor de calidad; aun así, no se tiene un modelo de fuente único que explique varios de estos parámetros al tiempo [17]. En el VG generalmente se presentan en el contexto de un sistema cerrado. Un transitorio de presión dentro de una grieta, por ejemplo, podría ser el inicio de la resonancia, que dependiendo de la composición y propiedades físicas de los fluidos involucrados, determinarían los armónicos dominantes en su espectro y la duración del evento [18].

## **2.2. Antecedentes**

**Conduit resonance models for long-period seismicity at Galeras volcano (Colombia), during 2004–2010.** *Cadena. 2022.*

En este artículo se analiza sismos de largo periodo (LP) del volcán Galeras entre los años 2004 y 2010, basándose en modelos de resonancia de una columna de magma. Este modelo consta de una disrupción de energía que viaja a través del conducto de magma en forma de onda, y atraviesa la interfaz magma-roca hasta llegar a un sismómetro situado en la superficie. Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido y el viaje de las ondas a través de la corteza se solucionan utilizando el método de elementos finitos. En particular, el modelo se divide en dos grupos: el grupo G1 abarca sismos asociados al emplazamiento de domos de lava en 2006 y 2008 y el grupo G2 relacionados con la sismicidad previa al emplazamiento de estos domos. Los dos grupos se modelaron con diferentes longitudes de columna de magma y diferentes frecuencias principales para la disrupción de energía inicial.

**Caracterización Parcial de la Fuente de Sismos Tipo Tornillo en el Volcán Cumbal Utilizando Frecuencias Complejas.***Mosquera. 2016.*

En esta investigación se caracteriza de manera parcial la fuente productora de eventos tipo Tornillo registrados en el volcán Cumbal, los cuales están mayormente asociados a tránsito de fluidos en el interior de los conductos volcánicos. Se caracteriza la fuente utilizando el modelo de grieta llena de fluido de Chouet y el método de análisis espectral Sompi. Mediante el estudio de registros sísmicos se demuestra que hay una marcada influencia hidrotermal en el origen de los sismos tipo tornillo.

**Tornillos modeled as self-oscillations of fluid filling a cavity: Application to the 1992–1993 activity at Galéras volcano, Colombia.***Konstantinou, K. I. 2015.*

En este trabajo se investiga un modelo numérico que describe el proceso del origen de eventos sismos tipo tornillo como la auto oscilación del fluido en una cavidad. Mediante parámetros asociados al dominio fluido se caracteriza el fluido dentro de la cavidad. Una vez caracterizado, es posible obtener resultados numéricos de la variación en la duración de los eventos sísmicos y el coeficiente de decaimiento de estos. Los resultados obtenidos con el modelo numérico concuerdan con los datos obtenidos en el volcán Galéras.

**An efficient finite-difference method with high-order accuracy in both time and space domains for modelling scalar-wave propagation.***Sirui Tan, Lianjie Huang. 2014.*

En este artículo se presenta el método de diferencias finitas configurado con un alto orden de precisión en el espacio y el tiempo para aproximar una solución de la ecuación de onda escalar. La efectividad del orden utilizado durante esta investigación se corrobora usando análisis de dispersión y un modelo numérico de la propagación de ondas escalares en modelos complejos de dos y tres dimensiones con una amplia gama de contrastes de velocidad.

**An analytical formula for the longitudinal resonance frequencies of a fluid-filled crack.***Maeda, Y., Kumagai, H. 2013.*

En este artículo se propone una fórmula analítica para la resonancia longitudinal de frecuencias en una grieta húmeda. Esta fórmula es evaluada a través de la comparación de resultados obtenidos empleando el método de elementos finitos. La comparación revela que la fórmula obtenida describe las frecuencias resonantes para grietas en dos y tres dimensiones.

**The Finite-Difference Time-Domain Method for Modeling of Seismic Wave Propagation.***Moczo, P., Robertsson, J. O., Eisner, L. 2007.*

En este trabajo se presenta una revisión del desarrollo reciente del modelado en el dominio del tiempo del método de elementos finitos para la propagación de ondas sísmicas. Se estudia temáticas importantes en relación al método de elementos finitos, tales como discontinuidades de materiales, atenuación realista, anisotropía, topografía de una superficie libre, excitación de campo de ondas (Incluida la dinámica de la fuente de un sismo.), etc.

**Source mechanism of long-period events at Kusatsu–Shirane Volcano, Japan, inferred from waveform inversion of the effective excitation functions.***Masaru Nakano, Hiroyuki Kumagai, Bernard A. Chouet. 2003.*

En este artículo se investiga el mecanismo de fuente sísmica para eventos de tipo LP registrados en el volcán Kusatsu-Shirane basados en la inversión de formas de onda descritas por determinadas funciones de excitación. Se estudia los resultados de la inversión de estas formas de onda y en base a ellos, se propone un modelo de mecanismo de sismicidad LP que consiste en la acumulación gradual de presión de vapor en una grieta hidrotermal.

**Temporal evolution of a hydrothermal system in Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from the complex frequencies of long-period events.** *Kumagai, H., Chouet, B. A., Nakano, M. 2002.*

En el presente artículo se presenta en detalle una descripción de las variaciones temporales de frecuencias correspondientes a eventos de tipo LP que ocurrieron en el volcán Kusatsu-Shirane en el periodo de agosto de 1992 hasta enero de 1993. Dichas variaciones son divididas en tres periodos, en los cuales se analiza los cambios en la frecuencia y el comportamiento de los espectros asociados a cada evento sísmico con el tiempo. Se destaca el hecho que estas variaciones temporales de la frecuencia pueden explicarse como una respuesta dinámica de una grieta hidrotermal a un pulso de calor magmático.

**Unusual low-frequency volcanic seismic events with slowly decaying coda waves observed at Galéras and other volcanoes.** *Gomez, D.M., Torres, R.A., 1997.*

Mediante el uso del análisis espectral, en este artículo se estudia eventos de baja frecuencia con una coda que decae lentamente en el tiempo. Además, se establece una relación entre las características de este tipo de eventos con un comportamiento determinado en la actividad sísmica y eruptiva de un volcán, debido a que este tipo de sismos se han presentado en diferentes etapas eruptivas, tanto como precursores de erupciones o después de ellas, y durante enjambres sísmicos o inactividad volcánica.

**Long-period events, the most characteristic seismicity accompanying the emplacement and extrusion of a lava dome in Galéras Volcano, Colombia, in 1991.** *Gil Cruz, F., Chouet, B.A., 1997.*

El trabajo mostrado en este artículo consiste en estudiar las principales erupciones del volcán Galeras ocurridas entre los años 1988 y 1993. La sismicidad asociada a estas erupciones estuvo dominada por una combinación de eventos de tipo LP y tremores volcánicos. Usando el

modelo de grieta con fluido de Chouet, se analiza los diferentes eventos que se presentaron como consecuencia de cada erupción, entre ellos, el emplazamiento, extrusión y destrucción de un domo de lava dentro del cráter principal, y dos grietas presentes en el domo como principales precursores de los sismos de tipo LP observados.

**Quantitative analysis of long-period events recorded during hydrofracture experiments at Fenton Hill, New Mexico.** *Ferrazzini, V., Chouet, B., Fehler, M., Aki, K. 1990.*

En este trabajo se utiliza el modelo de grieta húmeda desarrollado por Chouet para reproducir y explicar el espectro característico de diferentes clases de eventos tipo LP recogidos durante un experimento de hidrofractura realizado en Fenton Hill, Nuevo México. Mediante la caracterización del entorno con parámetros asociados a la grieta y el fluido dentro de ella, se estudia el rango de validez de modelo para diferentes distancias entre la fuente y el receptor de datos, y la presión que se aplica a la grieta.

**Resonance of a fluid-driven crack: Radiation properties and implications for the source of long-period events and harmonic tremor.** *Chouet, B.A., 1988.*

En este trabajo se presenta un modelo tridimensional de una grieta llena de fluido que sufre una presión transitoria sobre una sección de área sobre la superficie de la misma. Se estudia el comportamiento de la onda que viaja dentro de la grieta al variar parámetros sísmicos que caracterizan el fluido, la grieta y su entorno, tales como la viscosidad, rigidez, geometría de la grieta, etc. Mediante el análisis y comparación de espectros de sismos producidos sintéticamente con espectros de sismos reales de tipo LP y tremores observados en diferentes volcanes, se examina las posibles fuentes de dichos sismos.

**Slow waves trapped in a fluid-filled infinite crack: Implication for volcanic tremor.** *Ferrazzini, V., Aki, K., 1987.*

En este artículo se estudia de manera analítica el comportamiento de modos normales en una interfaz que consta de una capa de fluido rodeada de dos capas sólidas. Esto con el fin de analizar las ondas lentas que se propagan a lo largo del contorno de una grieta húmeda. Se demuestra que los valores obtenidos de la velocidad de fase y la amplitud de la onda lenta concuerdan con los obtenidos numéricamente en estudios de grietas húmeda para dos y tres dimensiones mediante el método de elementos finitos.

**Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method.**

*Chouet, B. 1986.*

En este artículo se estudia el comportamiento de una grieta tridimensional con un fluido en su interior empleando el método de elementos finitos. Se analizan las respuestas de la grieta cuando se presenta una falla repentina de una pequeña barrera en la superficie de la misma bajo diferentes configuraciones geométricas y distintos valores de rigidez del entorno que rodea la grieta. La onda en el interior de la grieta es análoga a la onda que se propaga en un tubo lleno de fluido. Esta onda tiene la característica de ser dispersiva, mostrando una velocidad de fase que disminuye al aumentar la longitud de onda.

**Dynamics of an expanding fluid-filled crack.** *Chouet, B., y Julian, B. R. 1985.*

En este trabajo se amplía el estudio de una grieta húmeda de dos dimensiones modelada mediante el método de diferencias finitas realizado por Aki y su equipo, mejorando las condiciones de contorno aplicadas y analizando una grieta húmeda en la cual se propagan ondas acústicas. Analizando aspectos como las dimensiones de la grieta, duración del evento y características de la onda que viaja en el interior de la grieta, es posible extraer información importante asociada a la naturaleza de la grieta en donde se propaga la onda y la recolección de señales sísmicas con instrumentación adecuada.

# Capítulo 3

## Definición del Problema

### 3.1. Planteamiento del Problema

Durante las últimas décadas, el volcán Galeras ha registrado un gran número de sismos asociados a procesos eruptivos, por lo que ha sido objeto de estudio a lo largo de este tiempo y también de una permanente vigilancia por parte de lo que hoy es el observatorio vulcanológico y sismológico de Pasto.

Un tipo específico de sismicidad de largo periodo se ha presentado en el volcán Galeras, que por sus características físicas y por presentarse en procesos pre eruptivos y post eruptivos, ha sido muy estudiada, por lo que actualmente los observatorios vulcanológicos y sismológicos colombianos poseen una caracterización de los eventos tipo Tornillo en cuanto a sus parámetros básicos: formas de onda, tasa de decaimiento de las amplitudes en la señal y contenido espectral. Sin embargo, no hay estudios que relacionen las propiedades geométricas de la grieta en donde se presentan los Tornillos con las características básicas que estos presentan en el volcán Galeras.

Por lo que este trabajo se centra únicamente en el estudio de los sismogramas sintéticos, generados aplicando el modelo de grieta húmeda y utilizando el método de elementos finitos variando la geometría de la grieta, y teniendo en cuenta las condiciones físicas actuales de corteza y vapor de agua en el volcán Galeras.

## **3.2. Formulación del Problema**

¿Es posible aplicar el modelo de grieta húmeda con el fin de modelar sismos tipo Tornillo generados en el volcán Galeras utilizando el método de elementos finitos?

## **3.3. Objetivos**

### **3.3.1. Objetivo General**

Aplicar el modelo de grieta húmeda para modelar sismos tipo Tornillo originados en el volcán Galeras a través del método de elementos finitos.

### **3.3.2. Objetivos Específicos**

1. Caracterizar físicamente una grieta llena de fluido y la pila volcánica que la rodea según las condiciones actuales de la estructura interna del volcán Galeras.
2. Aplicar el método de elementos finitos como técnica para solucionar el sistema de ecuaciones diferenciales que describen el origen y propagación de ondas sísmicas para el modelo de grieta húmeda.
3. Analizar los sismogramas sintéticos producto del modelado de grieta húmeda bajo diferentes condiciones de geometría de la grieta.

## **3.4. Justificación**

Los eventos tipo Tornillo son un tipo específico de sismicidad muy común en la actividad volcánica alrededor del mundo, por lo que han sido objeto de estudio reiteradas veces, estando presentes en la sismicidad de volcanes andesíticos y en diferentes etapas de actividad volcánica, ya sea como precursores de erupciones o de emisiones de gas (Volcán Galeras 1992-1993), después de erupciones (Volcán Tocachi 1992-1993) y durante estados de reposo

(Volcán Puracé, 1994-2012 y Volcán Cumbal, 2007-2012 ) (Mosquera (2016)). De ahí entonces, la importancia del estudio del comportamiento de este tipo de eventos sísmicos con el fin de aportar una mejor comprensión e interpretación de esta clase de sismicidad, en particular, eventos que se presenten en el volcán Galeras.

Por otro lado, también es importante destacar que las simulaciones a nivel computacional de disrupciones de energía dentro de una grieta, permiten encontrar características asociadas a las fuentes generadoras de sismos tipo tornillo. Además, este procedimiento posibilita generar información importante en base a los sismogramas sintéticos producidos, los cuales ayudan a una mejor comprensión de sismos reales, por lo que constituyen una importante herramienta para comparar y detectar señales reales predecesoras de erupciones volcánicas .

# Capítulo 4

## Marco Teórico

Por otra parte los sismos son ondas que precisan de un medio material para propagarse, por tanto son ondas mecánicas que se propagan por la tierra a partir de un hipocentro o foco donde se produjo el evento. Podemos dividir dichas ondas sísmicas en tres grupos:

- Ondas P, primarias o longitudinales, que son las ondas donde el movimiento de las partículas se orienta con la dirección de propagación de la onda.
- Ondas S, secundarias o transversales, que son las ondas donde el movimiento de las partículas se orienta perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda sísmica.
- Ondas superficiales, que resultan de interacción de las ondas P y S a lo largo de la superficie terrestre.

Las ondas P, son las que se registran de primeras en los sismogramas, posteriormente están las ondas S y por último las ondas superficiales más lentas pero las que más daño causan. Todas las ondas previamente mencionadas surgen teóricamente de la denominada ecuación de onda sísmica. A continuación, se presenta un breve resumen de los conceptos necesarios para llegar a esta ecuación.

Aplicando la segunda ley de Newton a una cuerda, podemos determinar que la deformación de la cuerda dio lugar a unas ondas que se propagan por la misma. De manera similar, las deformaciones en la corteza terrestre producen ondas sísmicas. Estudiaremos dichas ondas usando conceptos de la mecánica del medio continuo, que describe el comportamiento de una material continuo y deformable conformado por partículas muy juntas unas a otras, de modo que es posible considerar la densidad, fuerza y desplazamientos como funciones continuas y diferenciables. Esta aproximación no es válida a escalas atómicas, sin embargo, es adecuada

para problemas sismológicos.

Inicialmente, escribiremos la segunda ley de Newton para caracterizar el medio continuo y su respuesta a las fuerzas aplicadas. Ahora, introduciremos el tensor de esfuerzos el cual describe las fuerzas que actúan sobre un medio continuo y deformable, este está determinado por:

$$\sigma_{ji} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T^{(1)} \\ T^{(2)} \\ T^{(3)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1^{(1)} & T_2^{(1)} & T_3^{(1)} \\ T_1^{(2)} & T_2^{(2)} & T_3^{(2)} \\ T_1^{(3)} & T_2^{(3)} & T_3^{(3)} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

En donde la componente  $\sigma_{ij}$  es la  $i$ -ésima componente del vector tracción actuando sobre una superficie cuyo vector normal apunta en dirección del vector unitario  $\hat{e}_j$ . El esfuerzo viene dado en unidades de fuerza sobre área que el material fuera de la superficie ejerce sobre las partículas que se encuentran en el interior del mismo. Las tres componentes de la diagonal del tensor de esfuerzos se conocen como esfuerzos normales y las seis componentes que están por fuera de la diagonal principal se denominan esfuerzos de cizalla.

Por otro lado, consideraremos una ecuación de movimiento que describe las fuerzas que actúan sobre la superficie de un material en términos de las deformaciones, la cual es de la forma:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}(x, t)}{\partial x_j} + f_i(x, t) = \rho \frac{\partial^2 u_i(x, t)}{\partial t^2} \quad (4.2)$$

Esta ecuación se denomina ecuación de movimiento y se cumple en cualquier punto perteneciente a un medio continuo. Esta expresa la segunda ley de Newton en términos de fuerzas superficiales y volumétricas. El vector  $u(x, t)$  se conoce como el vector desplazamiento y describe las posiciones de los puntos que pertenecen al medio continuo en un instante determinado.

Además, es importante considerar el tensor de deformaciones  $e_{ij}$ , el cual describe las de-

formaciones resultantes de un movimiento infinitesimalmente pequeño de los puntos que conforman el medio continuo. El tensor de deformaciones es simétrico y sus componentes están descritas por:

$$e_{ji} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

En donde las componentes del tensor son derivadas parciales del campo de desplazamientos  $u(x)$ . Si el campo de desplazamientos no varía, las derivadas son cero, por lo que no habría deformación y únicamente se presentaría una traslación de un cuerpo rígido. Las componentes del tensor deformación son adimensionales. Los componentes de la diagonal principal describen como es el desplazamiento a lo largo de los ejes coordenados, es decir, variaciones volumétricas del material; En tanto que las componentes fuera de la diagonal describen cambios a lo largo del eje coordenado en otra dirección. La traza o suma de los términos de la diagonal principal del tensor de deformaciones se puede expresar como:

$$\theta = e_{ii} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = \nabla \cdot u \quad (4.4)$$

Que se conoce como dilatación, y se calcula como la divergencia del campo de desplazamientos  $u(x)$ . La importancia de la dilatación radica en que esta describe los cambios de volumen por unidad de volumen asociados con la deformación que sufre el cuerpo.

La respuesta del medio continuo a un esfuerzo aplicado sobre este depende del material en cuestión. Para un esfuerzo aplicado, el material más rígido responde con deformaciones pequeñas si las comparamos con las deformaciones que sufriría un material menos rígido al que se le aplicara el mismo esfuerzo. La relación que existe entre el esfuerzo y la deformación resultante en un material se conoce como ecuación constitutiva.

El tipo más simple de materiales son los materiales lineales elásticos, dado que es posible establecer una relación lineal entre los tensores de esfuerzo y deformaciones. Para escalas

cortas de tiempo, la corteza terrestre se puede considerar como linealmente elástica y es posible el análisis de la propagación de las ondas sísmicas, dado que para escalas de tiempo de 100 años o más, la roca presente en el manto se comporta como un fluido viscoso.

Al asumir que el material es elástico, también asumiremos que los desplazamientos desde un estado inicial sin esfuerzos aplicados, son pequeños. Esta condición se conoce como la teoría de los esfuerzos infinitesimales, la cual es en general válida para ondas sísmicas. La relación lineal que existe entre los esfuerzos y las deformaciones se rompe en regiones del manto de la tierra que están a una alta presión, o cuando la roca se rompe durante un sismo. Los esfuerzos y deformaciones para un material elástico lineal están relacionados por la ecuación constitutiva que se conoce como la ley de Hooke generalizada:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}e_{kl} \quad (4.5)$$

En donde la constante  $c_{ijkl}$  se conoce como el modulo elástico, el cual describe las propiedades del material. El modulo elástico es un tensor de  $3^4$  componentes, es decir, 81 componentes, sin embargo, el número de componentes independientes se reducen teniendo en cuenta unas determinadas condiciones de simetría. A gran escala, el material dentro de la tierra tiene aproximadamente las mismas propiedades físicas sin importar su orientación, una condición que se conoce como isotropía. Para un material isotrópico el modulo elástico tiene más simetrías, por lo que hay únicamente dos módulos elásticos independientes que se pueden definir de varias formas. Un par de parámetros útiles son las constantes de Lamé  $\lambda$  y  $\mu$ , las cuales se relacionan con el modulo elástico mediante la siguiente expresión:

$$c_{ijkl} = \lambda\delta_{ij}\delta_{kl} + \mu(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \quad (4.6)$$

Las ideas sobre la elasticidad expuestas anteriormente, nos permiten inferir que la ecuación de movimiento tiene soluciones que describen dos tipos de onda sísmica: Ondas compressionales y de corte. Estos dos tipos de onda se propagan de manera diferente, ya que las velocidades dependen, entre otros parámetros, de las propiedades elásticas del material.

Considerar una región de material elástico y homogéneo, en la cual, no hay fuentes de ondas sísmicas, por lo que las ondas que se propaguen en el material surgirán de un esfuerzo aplicado al mismo. Una vez la onda se propague lejos de la fuente, la relación entre esfuerzos y desplazamientos está dada por una ecuación de movimiento homogénea que no incluya ninguna termino que involucre fuerzas volumétricas. Dicha ecuación des de la forma:

$$\sigma_{ij,j}(x, t) = \rho \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \quad (4.7)$$

Al resolver la ecuación es importante tener en cuenta dos implicaciones importantes. En primera instancia, la ecuación de movimiento se puede escribir y resolver por completo en términos de los desplazamientos, dado que la relación entre los esfuerzos y las deformaciones, está constituida matemáticamente de derivadas parciales de los desplazamientos. Los esfuerzos y desplazamientos están relacionados mediante una ecuación constitutiva, por lo tanto, aunque la ecuación de movimiento no dependa de constantes elásticas, no implica que las soluciones tampoco. La segunda implicación a tener en cuenta es que la ecuación de movimiento relaciona derivadas espaciales del tensor de esfuerzos y una derivada temporal del campo de desplazamientos. Así entonces, a partir de las soluciones se obtiene el vector de desplazamientos y en consecuencia, los tensores de esfuerzos y deformaciones como funciones tanto del espacio como del tiempo.

Haciendo uso del cálculo vectorial, y realizando los cálculos respectivos, es posible llegar a la siguiente expresión:

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot u(x, t)) + \mu\nabla^2 u(x, t) = \rho \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \quad (4.8)$$

Esta es la ecuación de movimiento para un material elástico e isótropo escrita enteramente en términos de los desplazamientos, los cuales dependen de la posición y el tiempo donde  $\lambda$  y  $\mu$  son las constantes elásticas de Lamé y  $\rho$  es la densidad promedio de la corteza [19].

Por otro lado, para el dominio fluido del contexto físico de la grieta, tenemos que, la ecuación que describe la propagación de las ondas sísmicas en el fluido dentro de la grieta se deriva de

las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos. Estas son, la conservación de la masa, la cual es descrita por la ecuación de continuidad; la conservación del momentum, que a menudo conoce como las ecuaciones de Navier – Stokes; una ecuación para la conservación de energía; Las ecuaciones constitutivas del modelo; y una ecuación de estado que describe la relación entre las variables termodinámicas. En el caso clásico de la presión acústica, esta ecuación describe gran parte del fenómeno acústico con gran precisión, teniendo en cuenta que el flujo se asume sin pérdidas y adiabático, además de que se omite los efectos de la viscosidad y se utiliza una ecuación de estado lineal e isentrópica. Bajo estas consideraciones, el campo acústico es descrito por una variable, la presión, y se rige por la ecuación de onda:

$$\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) = 0 \quad (4.9)$$

Donde  $t$  es el tiempo,  $\rho_0$  es la densidad del fluido y  $c$  es la velocidad del sonido [20].

Para esta investigación, la ecuación de onda utilizada para describir las variaciones de presión dentro del fluido es de la forma:

$$\frac{1}{\rho_f c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_f} (\nabla p - q_d) \right) = Q_m \quad (4.10)$$

Donde  $p$  corresponde al campo de presión,  $\rho_f$  es la densidad promedio del fluido,  $c$  es la velocidad acústica y  $Q_m$  y  $q_d$  representan la fuente transitoria.

Por otro lado, se define un parámetro  $\gamma$ , el cual describe la atenuación intrínseca de las ondas dentro del fluido, el cual está determinado por la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{\omega^2}{2\rho_f c^3} \left( \frac{4}{3}\xi + \xi_B^2 \right) \quad (4.11)$$

Además, también es importante considerar el parámetro  $Z$  conocido como contraste de impedancia, que describe la cantidad de energía en forma que se transmite del medio fluido al

medio sólido. El contraste de impedancia se define mediante la siguiente expresión:

$$Z = \frac{\rho_s \alpha}{\rho_f c} \quad (4.12)$$

En donde  $\rho_s$  es la densidad del medio sólido,  $\rho_f$  es la densidad del fluido,  $\alpha$  es la velocidad de las ondas p en la roca y  $c$  es la velocidad acústica en el fluido dentro de la grieta.

Para la simulación realizada es importante destacar que las ecuaciones diferenciales previamente mencionadas para el dominio sólido y fluido, son las ecuaciones que se solucionaron utilizando el método de elementos finitos, teniendo en cuenta las respectivas condiciones de frontera para cada expresión. Para la solución de las ecuaciones diferenciales se empleó el método de elementos finitos que ofrece el programa Comsol Multiphysics por defecto.

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un medio continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del medio continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones algebraicas, lineales o no [21].

Para resolver este problema, el Método de los Elementos Finitos recurre a la hipótesis de discretización, que se basa en lo siguiente:

- El continuo se divide por medio de líneas o superficies imaginarias en una serie de regiones contiguas y disjuntas entre sí, de formas geométricas sencillas y normalizadas, llamadas elementos finitos.
- Los elementos finitos se unen entre sí en un número finito de puntos, llamados nodos.
- Los desplazamientos de los nudos son las incógnitas básicas del problema, y éstos

determinan unívocamente la configuración deformada de la estructura. Sólo estos desplazamientos nodales se consideran independientes.

- El desplazamiento de un punto cualquiera, viene unívocamente determinado por los desplazamientos de los nudos del elemento al que pertenece el punto. Para ello se definen para cada elemento, unas funciones de interpolación que permiten calcular el valor de cualquier desplazamiento interior por interpolación de los desplazamientos nodales. Estas funciones de interpolación serán de tal naturaleza que se garantice la compatibilidad de deformaciones necesaria en los contornos de unión entre los elementos. Las funciones de interpolación y los desplazamientos nodales definen unívocamente el estado de deformaciones unitarias en el interior del elemento. Éstas, mediante las ecuaciones constitutivas del material definen el estado de tensiones en el elemento y por supuesto en sus bordes.

Los dos aspectos más importantes de esta hipótesis, sobre los que hay que hacer hincapié son:

- La función solución del problema  $u$  es aproximada de forma independiente en cada elemento. Para una estructura discretizada en varios elementos, pueden utilizarse funciones de interpolación distintas para cada uno de ellos, a juicio del analista, aunque deben cumplirse ciertas condiciones de compatibilidad en las fronteras entre los elementos.
- La función solución es aproximada dentro de cada elemento, apoyándose en un número finito (y pequeño) de parámetros, que son los valores de dicha función en los nudos que configuran el elemento y a veces sus derivadas.

Esta hipótesis de discretización es el pilar básico del MEF, por lo que se suele decir de éste, que es un método discretizante, de parámetros distribuidos. La aproximación aquí indicada se conoce como la formulación en desplazamiento [22].

El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculos complejos (en dos o tres dimensiones). Además, el método

es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones [23].

# Capítulo 5

## Metodología.

Con el propósito de llevar un orden que permita el desarrollo metódico y sistematizado de este trabajo, se dividió el proceso investigativo en cinco etapas tal como se muestra en el esquema ilustrativo de la figura (5.1).

### 5.1. Documentacion

Durante esta primera etapa se recolecta información bibliográfica necesaria para llevar a cabo el desarrollo del proyecto. En primera instancia se debe abarcar teoría relacionada con el estudio de movimiento de fluidos dentro de los conductos de un volcán y la propagación de ondas sísmicas a raíz de estos, para posteriormente estudiar el método de elementos finitos, con el cual, se soluciona las ecuaciones diferenciales asociadas con el origen y propagación de las ondas sísmicas en el modelo de grieta húmeda. El proceso de documentación abarca conceptos básicos de sismología que ayuden a describir cualitativamente y cuantitativamente la forma en cómo se propagan la onda en el modelo de grieta húmeda, y posteriormente, ideas principales sobre el método de elementos finitos, con el fin de utilizarlo para resolver las ecuaciones diferenciales asociadas al dominio fluido dentro de la grieta, y el dominio sólido que comprende la corteza terrestre que rodea la misma. Estos conceptos se mencionan con detalle en el anterior capítulo.

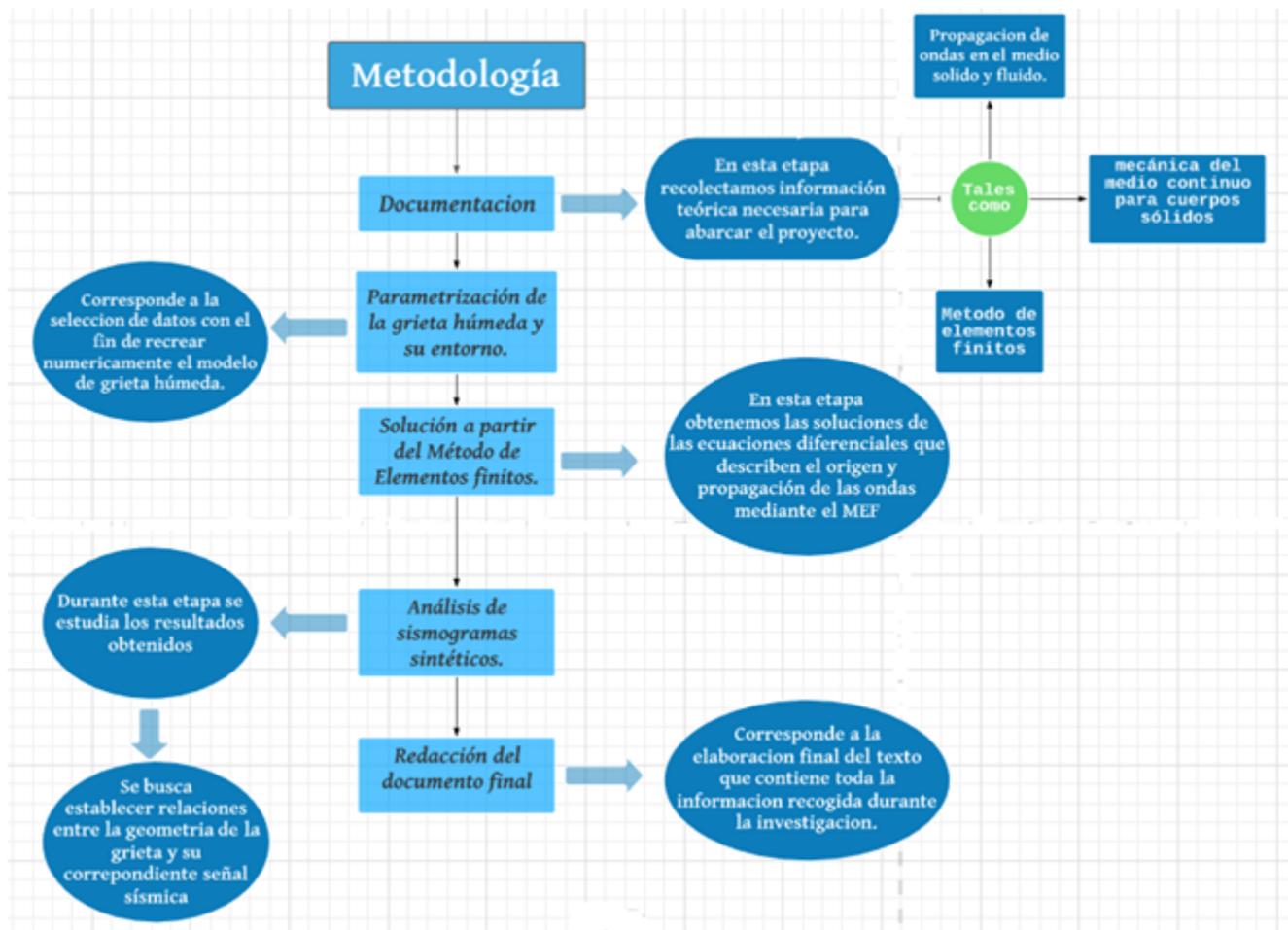


Figura 5.1: Esquema de la estructura propuesta para abarcar la metodología de esta investigación.

## 5.2. Parametrización de la grieta húmeda y pila volcánica que la rodea.

### 5.2.1. Parametrización Corteza.

En primer lugar, se realiza un estudio sobre el entorno que rodea a la grieta, esto con el fin de especificar en el software características propias del material del cual está conformado el cono volcánico, un esquema ilustrativo del modelo bidimensional del cono volcánico del volcán Galeras se muestra en la figura (5.2). Este terreno está compuesto mayormente de roca andesita que se genera a partir de un magma diferenciado asociado al volcanismo de zonas de subducción [24]. Dentro de los parámetros característicos más importantes de la roca andesita, tenemos el módulo de elasticidad ( $\kappa$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), densidad ( $\rho$ ) y las velocidades de las ondas P y S ( $v_p$  y  $v_s$  respectivamente), cuyos valores se muestran en la tabla 5.1.

$\kappa$ ( $N/m^2$ )	$\nu$	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$v_p$ (m/s)	$v_s$ (m/s)
$1,9 * 10^{11}$	0,29	2278	3300	1780

Tabla 5.1: Parámetros físicos utilizados para caracterizar el medio sólido que rodea la grieta.

Fuente: [25]

### 5.2.2. Parametrización Grieta Húmeda.

Por su parte, también es necesario la caracterización de la grieta húmeda y el conducto de magma con parámetros elásticos acordes a la situación actual del volcán Galeras. Basado en los trabajos de Kumagai (2000) y Stix (1997). Los parámetros utilizados para caracterizar el vapor de agua dentro de la grieta se muestran en la tabla 5.2.

$c$ (m/s)	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$\mu$ (Pa * s)	$Z$ (Pa * s/m)
1500	231,03	55,52	346545

Tabla 5.2: Parámetros físicos utilizados para caracterizar el fluido dentro de la grieta.

Fuente: [26] [27]

Siendo  $c$  la velocidad acústica en el medio,  $\rho$  la densidad del gas de agua en burbujas,  $\mu$  la viscosidad del vapor de agua y  $Z$  la impedancia acústica característica.

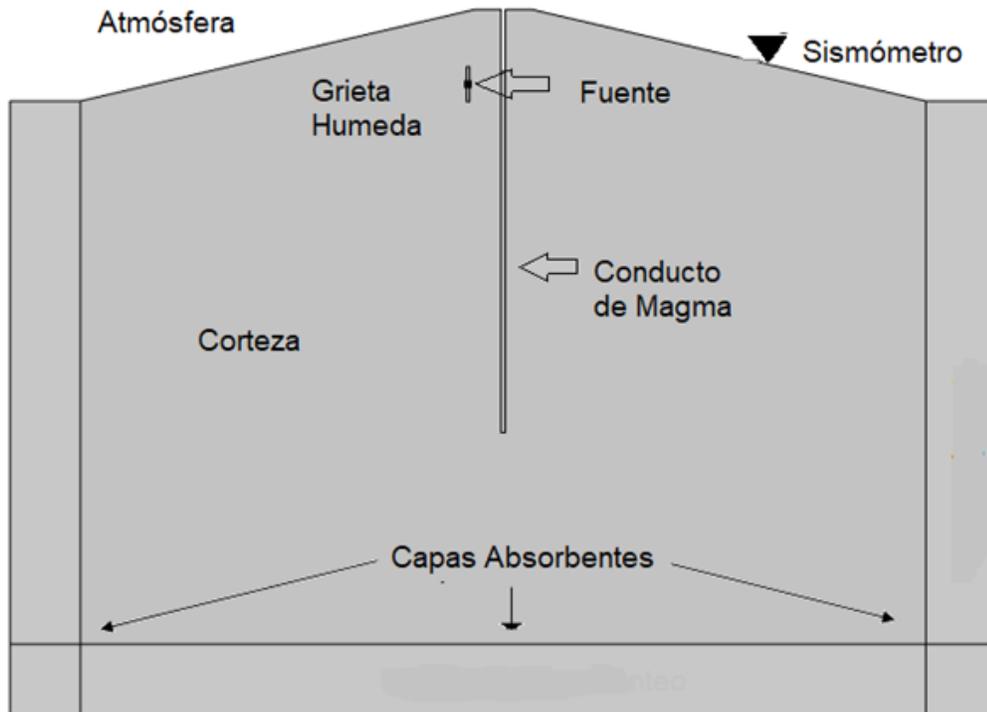


Figura 5.2: Esquema ilustrativo del modelo 2D del cono volcánico del volcán Galeras tomado de esta investigación.

### 5.2.3. Parametrización Conducto de Magma.

Por su parte, para caracterizar el magma dentro del conducto, se utilizó los valores consignados en la investigación de Cadena (2022) los cuales se muestran en la tabla 5.3.

$c$ (m/s)	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$\mu$ (Pa * s)	$Z$ (Pa * s/m)
2254	2472	2500000	55718888

Tabla 5.3: Parámetros físicos utilizados para caracterizar el magma dentro del conducto.

Fuente: [25]

En donde  $c$  la velocidad acústica en el medio,  $\rho$  la densidad del magma,  $\mu$  la viscosidad del magma en el conducto y  $Z$  la impedancia acústica característica.

#### 5.2.4. Geometría del Modelo.

Así mismo, uno de los aspectos importantes dentro de la caracterización física del problema planteado es la replicación geométrica bidimensional del mismo, en la interfaz gráfica de Comsol multiphysics. Para esto, se utilizó como referencia, el modelo geométrico planteado en la investigación de Cadena (2022) en la que se replica una sección transversal del volcán Galeras, de modo tal que el sismómetro de la estación cuñño, coincide con la línea de corte. Las características geométricas del modelo se muestran en la tabla 5.4 .

### 5.3. Mallado y Función fuente

#### 5.3.1. Mallado

Una vez definida la geometría del problema y haber caracterizado físicamente cada uno de los dominios involucrados en el modelo, se procede a aplicar el método de elementos finitos, con el fin de resolver las ecuaciones diferenciales que determinan las variaciones de presión en el dominio fluido y el campo de desplazamientos en el dominio sólido. En la figura (5.3) es posible observar un ejemplo del mallado para este modelo. Uno de los factores más determinantes dentro del método de elementos finitos es el tamaño de los subdominios usados para la discretización del objeto geométrico a analizar, por lo que una de las ventajas de utilizar el programa (COMSOL Multiphysics, 5.5) es que genera un mallado adecuado,

Parámetro	Descripción	Valor
$H_c$	Altura de la corteza	4500m
$W_c$	Ancho de la corteza	6000m
$W_{abs}$	Ancho capa absorbente	500m
$H_{abs}$	Altura capa absorbente	5000m
$S_x$	Componente $x$ posición sismómetro	1900m
$S_y$	Componente $y$ posición sismómetro	-395m
$L$	Longitud de grieta húmeda	variable
$L_m$	Longitud columna de magma	2560m
$W$	Ancho grieta húmeda	Variable
$W_m$	Ancho columna de magma	30m

Tabla 5.4: Parámetros geométricos utilizados para caracterizar el modelo.

Fuente: [25]

teniendo en cuenta las longitudes de onda más cortas del modelo, el valor más alto de la velocidad de las ondas y el elemento de malla más pequeño basado en la física del problema [20].

El tamaño máximo de un elemento ( $l_{max}$ ) está directamente relacionado con la longitud de onda más pequeña en el siguiente rango.

$$de \frac{c_{min}}{1,5f_{max}} a \frac{c_{min}}{2f_{max}} \quad (5.1)$$

En donde  $f_{max}$  es la máxima frecuencia y  $c_{min}$  corresponde al valor de velocidad mínima en el modelo. Los sismogramas sintéticos para este modelo están configurados con una tasas de muestreo igual a la de los sismogramas reales,  $\Delta t = 0,01s$  lo que hace posible el estudio de frecuencias superiores a los  $50Hz$  (Cadena, 2022).

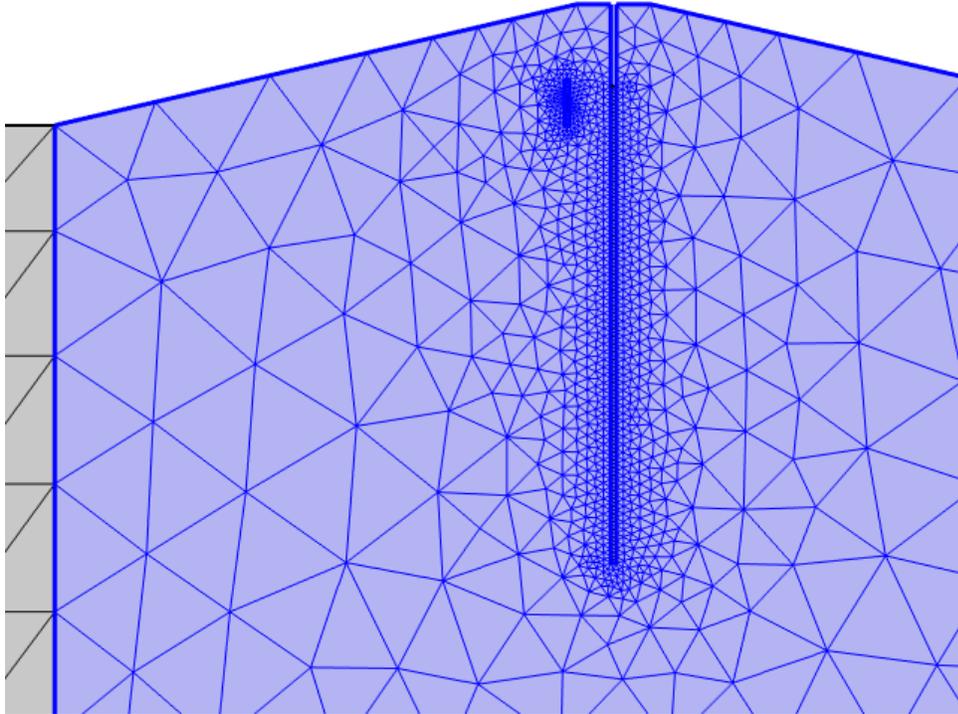


Figura 5.3: Captura de pantalla del modelo utilizado en esta investigación.

### 5.3.2. Funcion Fuente.

Dado que se pretende generar una disrupción de presión súbita dentro de la grieta húmeda, es necesario utilizar un tipo de funcion con un crecimiento repentino de corta duración, por lo que se utilizaron wavelets u ondículas, las cuales, son un tipo especial de transformada matemática que representa una señal en términos de ondas dilatadas y trasladadas, que en algunos casos tienen expresiones analíticas, que pueden ser usadas por su forma [24], en este caso, se utilizó la ondícula de Ricker que se define mediante la siguiente expresión:

$$F(t) = P_0(1 - 2(\pi f_0(t - t_0))^2)e^{-(\pi f_0(t-t_0))^2} \quad (5.2)$$

En donde  $P_0$  corresponde a la presión máxima,  $f_0$  es la frecuencia de la fuente y  $t_0$  es el tiempo de la misma. En este caso, los valores utilizados para cada uno de estos parámetros se muestran en la tabla 5.5.

$P_0$ (Pa)	$f_0$ (Hz)	$t_0$ (s)
15	4	0,25

Tabla 5.5: Valores utilizados en la formula para la ondícula de Ricker.

Fuente: [24]

## 5.4. Programa procesador de sismos sintéticos

Durante el desarrollo y el procesamiento de los resultados arrojados por los sismogramas generados de manera sintética, fue necesario la implementación de una rutina computacional que permita el cálculo de parámetros que permitan la caracterización de cada uno de los sismos sintéticos obtenidos. Por lo que se utilizaron estas cinco propiedades descritas a continuación:

- Frecuencia dominante: Frecuencia con mayor energía del espectro.
- Frecuencia central: Valor de frecuencia que divide la energía del espectro en dos secciones de igual energía.
- Frecuencia Centroide: Valor de frecuencia que resulta de la intersección de las bandas de mayor energía vertical y horizontalmente en el espectrograma.
- Frecuencia de máxima energía: Pixel de espectrograma con mayor energía.
- Índice de frecuencia: Relación espectral que se define mediante la siguiente expresión:

$$FI = \log_{10} \left( \frac{\bar{F}_s}{\bar{F}_l} \right)$$

Siendo  $\bar{F}_s$  la frecuencia promedio de la banda superior de frecuencia y  $\bar{F}_l$  es la frecuencia promedio de la banda inferior de frecuencia [28].

La rutina computacional empleada para la realización de este programa se encuentra en el documento Anexos, sección: Anexo B: *Código programa utilizado para la extracción de información de los sismogramas sintéticos.*

Así entonces, al correr este programa en el software Matlab nos encontramos con una interfaz gráfica como la de la figura 5.4

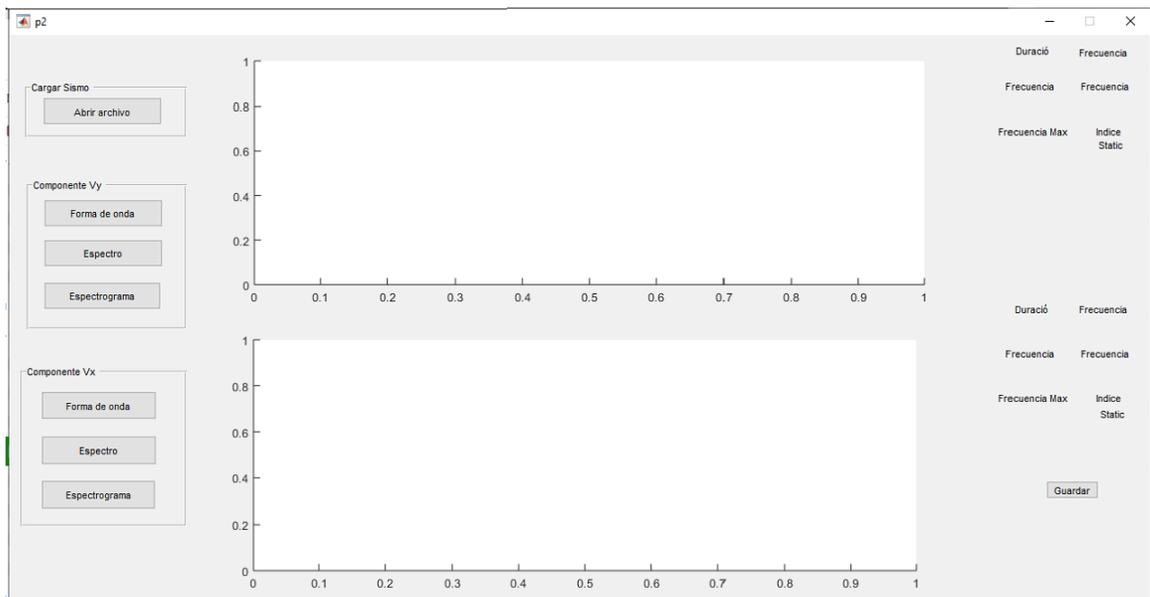


Figura 5.4: Interfaz gráfica del programa realizado en el software Matlab.

Al presionar el botón “Abrir archivo”, aparece una ventana emergente en donde se selecciona un archivo con la extensión “.txt” que contiene la información del sismo sintético generado en Comsol. Posteriormente, el programa lee el archivo y al presionar los botones “Forma de Onda”, “Espectro”, y “Espectrograma” para cada componente, genera estas tres gráficas para cada componente como se indica en las figuras 5.5, 5.6, 5.7.

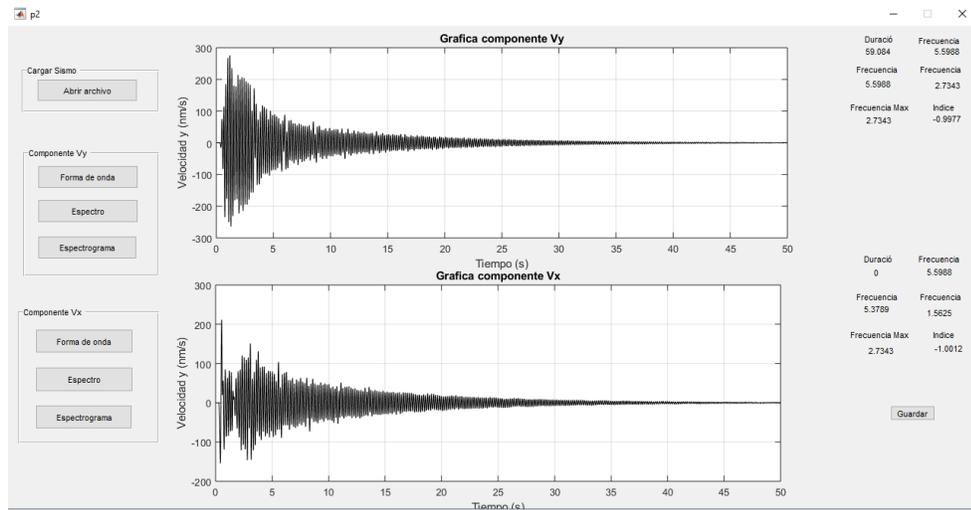


Figura 5.5: Gráfica de forma de onda para un sismo sintético generado en una grieta de 267m de altura y 80.1m de ancho.

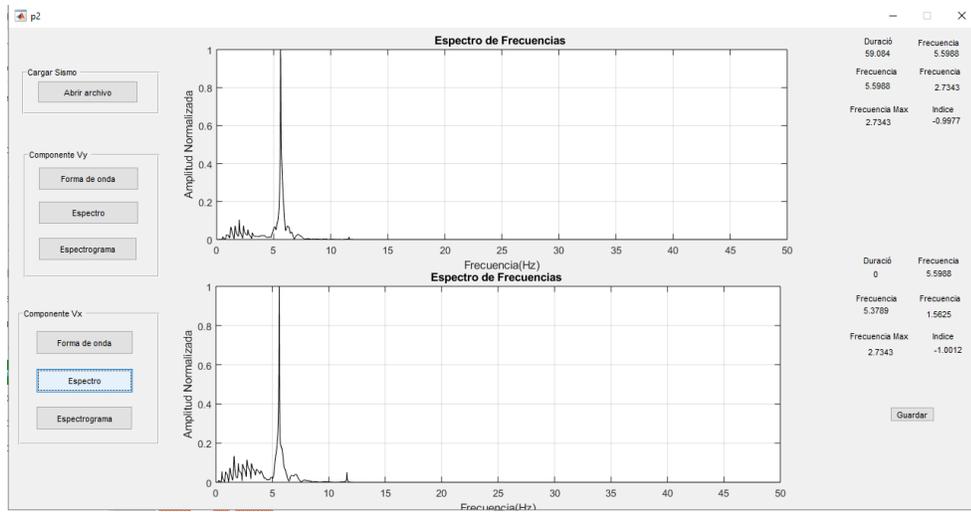


Figura 5.6: Espectro de un sismo sintético generado en una grieta de 267m de altura y 80.1m de ancho.

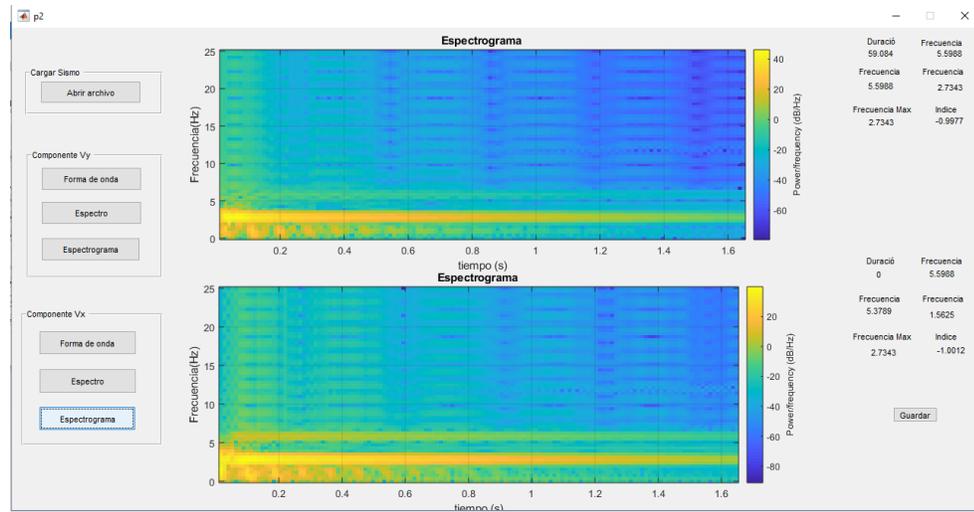


Figura 5.7: Espectrograma para un sismo sintético generado en una grieta de 267m de altura y 80.1m de ancho..

Finalmente, al presionar el botón “Guardar”, se genera un archivo excel con los datos de frecuencia central, frecuencia dominante, frecuencia centroide, índice de frecuencia y frecuencia de máxima energía para cada componente rectangular.

# Capítulo 6

## Resultados.

### 6.1. Tablas de resultados

Haciendo uso del software procesador de sismos, fue posible extraer información que permitió clasificar y caracterizar los sismogramas sintéticos en base a seis parámetros:

1. Duración
2. Frecuencia dominante
3. Frecuencia Central
4. Frecuencia Centroide
5. Frecuencia de Máxima energía
6. Índice de frecuencia.

La información extraída de los 72 sismogramas para cada altura de grieta trabajada se muestra en las siguientes tablas (6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, ).

Altura grieta 167 m											
Ancho de la grieta (m)	Duración (s)	Frec. Dominante		Frecuencia Central		Frec. Centroide		Frec. De máxima energía		Índice de Frecuencia	
		Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X
16,7	25,03	2,00	8,90	3,20	3,40	1,17	1,56	1,17	1,56	-1,00	-0,78
33,4	25,24	2,00	8,94	3,23	3,40	1,17	1,56	1,17	1,56	-0,93	-0,76
50,1	34,76	2,00	8,97	3,26	3,40	1,17	1,56	1,17	1,56	-0,90	-0,77
66,8	32,23	9,03	8,90	3,51	3,57	1,17	1,56	1,17	1,56	-0,82	-0,69
83,5	34,58	9,00	9,00	3,77	3,63	1,17	1,56	1,17	1,56	-0,68	-0,68
100,2	30,03	9,23	9,23	4,03	3,66	1,17	1,56	1,17	1,56	-0,62	-0,68
116,9	31,10	9,20	2,77	4,23	3,66	1,17	1,56	1,17	1,56	-0,56	-0,74
133,6	34,44	9,65	9,65	5,08	4,14	1,17	1,56	1,17	1,56	-0,43	-0,50

Tabla 6.1: Tabla de resultados para una altura de grieta de 167m

Altura grieta 187 m											
Ancho de la grieta (m)	Duración (s)	Frec. Dominante		Frecuencia Central		Frec. Centroide		Frec. De máxima energía		Índice de Frecuencia.	
		Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X
18,7	32,18	7,97	7,97	3,46	3,57	1,17	1,56	1,17	1,56	-0,76	-0,65
37,4	35,05	8,00	8,00	3,86	3,74	1,17	1,56	1,17	1,56	-0,60	-0,53
56,1	40,00	8,00	8,00	3,80	3,95	1,17	1,56	1,17	1,56	-0,65	-0,47
74,8	39,84	8,05	8,05	4,30	3,90	1,17	1,56	1,17	1,56	-0,47	-0,51
93,5	50,00	8,04	8,04	4,58	3,84	3,91	1,56	3,91	1,56	-0,44	-0,57
112,2	39,99	8,22	8,22	4,16	4,12	1,17	1,56	1,17	1,56	-0,56	-0,46
130,9	39,99	8,22	8,22	4,70	4,32	1,17	1,56	1,17	1,56	-0,49	-0,43
149,6	29,88	8,40	8,40	5,43	4,96	2,73	1,56	4,30	1,56	-0,37	-0,32

Tabla 6.2: Tabla de resultados para una altura de grieta de 187m

Altura grieta 207m											
Ancho de la grieta (m)	Duración (s)	Frecuencia Dominante		Frecuencia Central		Frecuencia Centroide		Frec. De máxima energía		Índice de Frecuencia.	
		Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X
20,7	29,96	7,20	7,20	6,46	4,40	3,52	3,52	3,52	3,52	-0,22	-0,31
41,4	44,88	7,22	7,22	7,06	4,29	3,56	1,56	3,52	3,52	-0,11	-0,33
62,1	44,88	7,22	7,22	7,13	6,51	3,52	3,52	3,52	3,52	-0,06	-0,22
82,8	44,94	7,26	7,26	7,06	4,09	3,52	1,56	3,52	1,56	-0,10	-0,43
103,5	44,64	7,26	7,26	7,15	4,55	3,52	1,56	3,52	1,56	-0,04	-0,34
124,2	34,95	7,43	7,43	7,00	4,17	3,91	1,56	3,91	1,56	-0,15	-0,45
144,9	34,72	7,43	7,43	7,05	4,54	3,52	1,56	3,52	1,56	-0,14	-0,40
165,6	34,67	7,40	7,40	7,26	4,80	3,52	1,56	3,52	1,56	-0,05	-0,37

Tabla 6.3: Tabla de resultados para una altura de grieta de 207m

Altura grieta 227m											
Ancho de la grieta (m)	Duración (s)	Frecuencia Dominante		Frecuencia Central		Frecuencia Centroide		Frec. De máxima energía		Índice de Frecuencia.	
		Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X
22,7	39,79	6,55	6,52	6,50	3,62	3,12	1,56	3,12	1,56	0,00	-0,55
45,4	39,68	6,57	6,57	6,55	3,75	3,12	1,56	3,12	1,56	0,08	-0,49
68,1	54,83	6,60	6,60	6,56	5,27	3,12	1,56	3,12	1,56	0,12	-0,29
90,8	49,73	6,64	6,64	6,60	6,00	3,12	1,56	3,12	3,52	0,14	-0,23
113,5	59,60	6,63	6,63	6,53	4,78	3,12	1,56	3,12	1,56	0,02	-0,35
136,2	59,84	6,78	6,78	6,57	6,00	3,52	1,56	3,52	3,52	-0,11	-0,23
158,9	58,25	6,77	6,77	6,60	5,95	3,52	1,56	3,52	3,52	-0,12	-0,24
181,6	39,90	6,75	6,75	6,62	6,00	3,52	1,56	3,52	1,56	-0,09	-0,23

Tabla 6.4: Tabla de resultados para una altura de grieta de 227m

Altura grieta 247m											
Ancho de la grieta (m)	Duración (s)	Frecuencia Dominante		Frecuencia Central		Frecuencia Centroide		Frec. De máxima energía		Indice de Frecuencia.	
		Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X
24,7	59,97	6,03	6,03	6,00	5,88	3,12	1,56	3,12	3,12	-0,22	-0,37
49,4	44,94	6,04	6,04	6,04	5,93	3,12	1,56	3,12	3,12	-0,12	-0,28
74,1	44,88	6,06	6,06	6,04	5,89	3,12	1,56	3,12	3,12	-0,18	-0,32
98,8	49,80	6,10	6,10	6,08	5,56	3,12	1,56	3,12	3,12	-0,16	-0,38
123,5	49,93	6,10	6,10	6,10	5,44	3,12	1,56	3,12	3,12	0,06	-0,41
148,2	49,13	6,16	6,16	6,16	5,18	3,12	1,56	3,12	3,12	0,01	-0,42
172,9	49,93	6,16	9,20	6,16	5,02	3,12	1,56	3,12	1,56	-0,02	-0,38
197,6	45,04	6,14	6,14	6,24	6,06	3,52	1,95	3,52	3,91	0,06	-0,21

Tabla 6.5: Tabla de resultados para una altura de grieta de 247m

Altura grieta 267m											
Ancho de la grieta (m)	Duración (s)	Frecuencia Dominante		Frecuencia Central		Frecuencia Centroide		Frec. De máxima energía		Indice de Frecuencia.	
		Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X
26,7	45,03	5,56	5,56	5,54	5,28	2,73	1,56	2,73	2,73	-0,97	-1,00
53,4	44,89	5,60	5,60	5,58	5,30	2,73	1,56	2,73	2,73	-1,03	-0,98
80,1	44,97	5,60	5,60	5,60	5,38	2,73	1,56	2,73	2,73	-1,00	-1,00
106,8	50,07	5,64	5,64	5,62	5,50	2,73	1,56	2,73	2,73	-0,90	-1,03
133,5	44,91	5,64	5,64	5,64	5,46	2,73	1,56	2,73	2,73	-0,84	-1,00
160,2	45,17	5,70	5,70	5,72	5,58	2,73	1,56	2,73	2,73	-0,69	-0,83
186,9	45,58	5,70	5,70	5,72	5,58	3,12	1,56	2,73	2,73	-0,58	-0,73
213,6	44,91	5,68	5,68	6,06	5,70	3,12	3,12	3,12	3,52	-0,23	-0,40

Tabla 6.6: Tabla de resultados para una altura de grieta de 267m

Altura grieta 287m											
Ancho de la grieta (m)	Duración (s)	Frecuencia Dominante		Frecuencia Central		Frecuencia Centroide		Frec. De máxima energía		Indice de Frecuencia.	
		Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X
28,7	49,66	5,20	5,20	5,18	5,18	2,73	2,73	2,73	2,73	-1,27	-1,24
57,4	50,00	5,22	5,22	5,20	5,20	2,73	2,73	2,73	2,73	-1,28	-1,29
86,1	54,93	5,22	5,22	5,22	5,22	2,73	2,73	2,73	2,73	-1,22	-1,25
114,8	65,31	5,24	5,24	5,24	5,24	2,73	2,73	2,73	2,73	-1,20	-1,26
143,5	65,03	5,24	5,24	5,24	5,24	2,73	2,73	2,73	2,73	-1,20	-1,26
172,2	59,96	5,31	5,31	5,34	5,31	2,73	2,73	2,73	2,73	-0,61	-0,81
200,9	60,33	5,30	5,31	5,38	5,31	2,73	1,95	2,73	2,73	-0,52	-0,76
229,6	46,45	5,29	5,29	6,12	5,32	3,12	3,12	3,12	2,73	-0,22	-0,52

Tabla 6.7: Tabla de resultados para una altura de grieta de 287m

Altura grieta 307m											
Ancho de la grieta (m)	Duración (s)	Frecuencia Dominante		Frecuencia Central		Frecuencia Centroide		Frec. De máxima energía		Índice de Frecuencia.	
		Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X
30,7	65,03	4,84	4,84	4,86	4,83	2,34	2,34	2,34	2,34	-1,35	-1,35
61,4	65,12	4,86	4,86	4,88	4,84	2,34	2,34	2,34	2,34	-1,42	-1,40
92,1	65,12	4,88	4,88	4,89	4,84	2,34	2,34	2,34	2,34	-1,42	-1,30
122,8	64,84	4,91	4,91	4,91	4,88	2,34	2,34	2,34	2,34	-1,32	-1,10
153,5	59,96	4,91	4,90	4,92	4,88	2,34	1,95	2,34	2,34	-1,13	-0,96
184,2	50,30	4,97	4,97	4,98	4,98	2,34	1,95	2,34	2,73	-0,93	-0,68
214,9	46,35	4,94	4,94	5,11	5,28	2,73	1,95	2,34	3,52	-0,51	-0,40
245,6	39,88	4,94	6,28	5,92	5,74	3,12	2,73	3,12	3,12	-0,28	-0,36

Tabla 6.8: Tabla de resultados para una altura de grieta de 307m

Altura grieta 327m											
Ancho de la grieta (m)	Duración (s)	Frecuencia Dominante		Frecuencia Central		Frecuencia Centroide		Frec. De máxima energía		Índice de Frecuencia.	
		Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X	Comp. Y	Comp. X
32,7	249,67	4,58	4,58	4,58	4,58	2,34	2,34	2,34	2,34	-1,28	-1,52
65,4	99,53	4,56	4,56	4,58	4,56	2,34	2,34	2,34	2,34	-1,33	-1,44
98,1	69,62	4,57	4,57	4,58	4,57	2,34	2,34	2,34	2,34	-1,30	-1,3748
130,8	60,24	4,60	4,60	4,61	4,60	2,34	2,34	2,34	2,34	-1,23	-1,16
163,5	50,11	4,60	4,60	4,65	4,60	2,34	1,95	2,34	2,34	-1,06	-0,84
196,2	50,35	4,65	4,65	4,77	4,67	2,73	1,95	2,34	2,34	-0,71	-0,71
228,9	40,37	4,63	4,63	5,58	5,32	3,12	1,95	3,12	3,52	-0,40	-0,39
261,6	40,05	5,38	5,38	5,35	5,27	2,73	2,34	2,73	2,73	-0,99	-0,96

Tabla 6.9: Tabla de resultados para una altura de grieta de 327m

## 6.2. Graficas de parámetros vs ancho de la grieta

En esta sección se organiza los datos obtenidos mediante el uso de gráficas, con el fin de analizar el comportamiento de la duración, frecuencia dominante, frecuencia central, frecuencia centroide, frecuencia de máxima energía e índice de frecuencia cuando se varia el ancho de la grieta para una determinada longitud de la misma. Las gráficas que se muestran a continuación son las que muestran los resultados más llamativos para esta investigación. Las demás, se ubicaron en el documento Anexos, sección: Anexo A: *Forma de onda, Espectro y Espectrograma de Sismos Sintéticos*.

### 6.2.1. Duración vs ancho de la grieta.

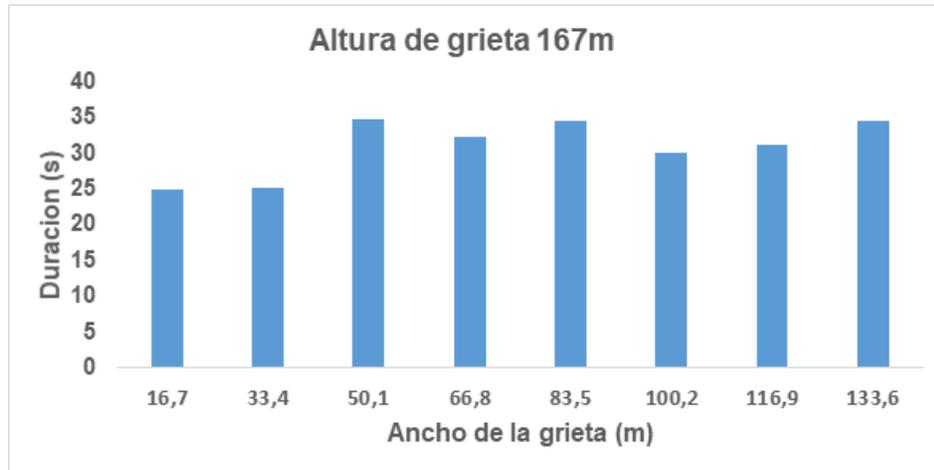


Figura 6.1: Gráfica de duración vs ancho de grieta para una altura de 167m.

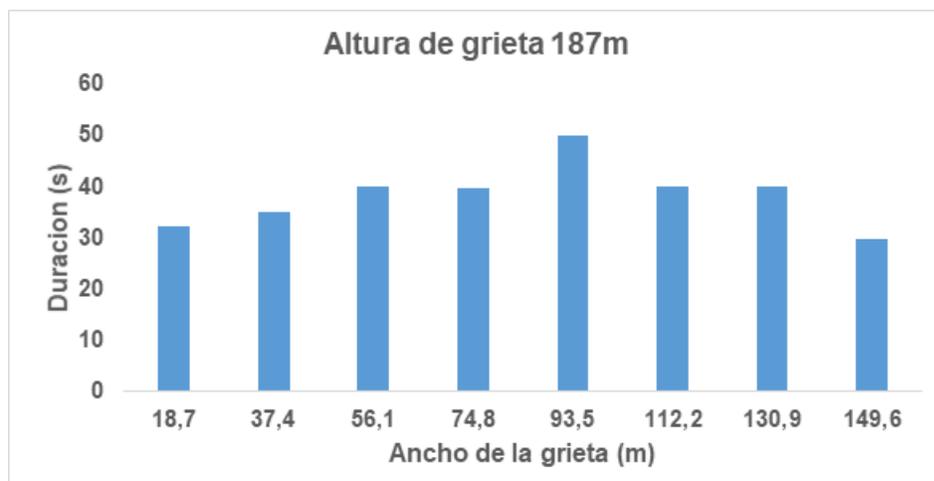


Figura 6.2: Gráfica de duración vs ancho de grieta para una altura de 187m.

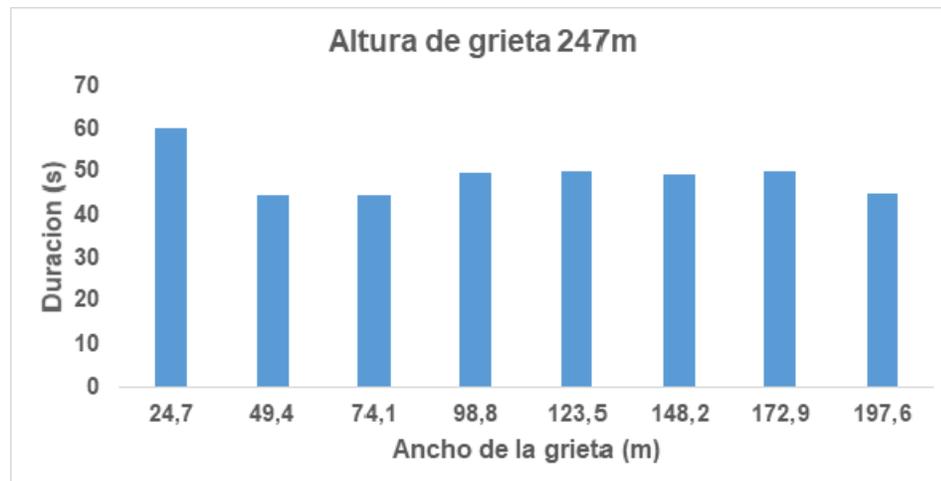


Figura 6.3: Gráfica de duración vs ancho de grieta para una altura de 247m.

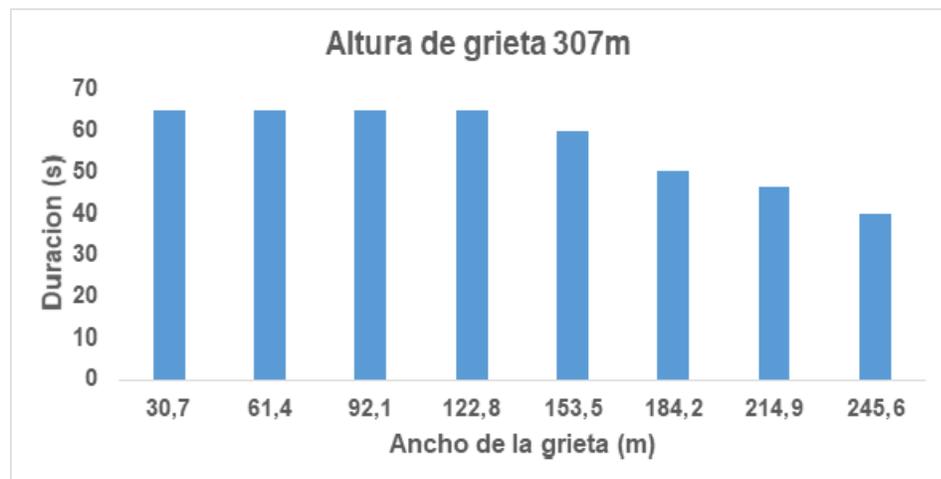


Figura 6.4: Gráfica de duración vs ancho de grieta para una altura de 307m.



Figura 6.5: Gráfica de duración vs ancho de grieta para una altura de 327m.

### 6.2.2. Frecuencia Dominante vs ancho de la grieta

#### Frecuencia Dominante componente Y vs ancho de la grieta



Figura 6.6: Gráfica de componente Y de frecuencia dominante vs ancho de grieta para una altura de 167m.

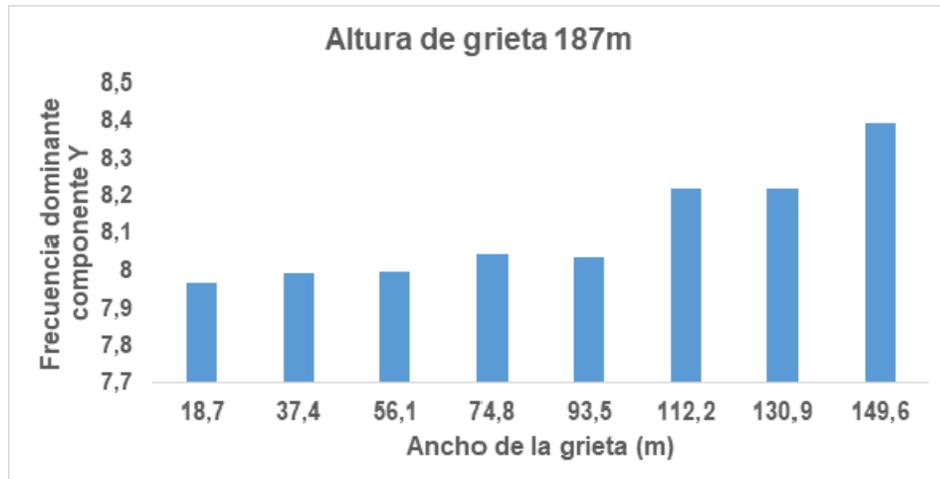


Figura 6.7: Gráfica de componente Y de frecuencia dominante vs ancho de grieta para una altura de 187m.

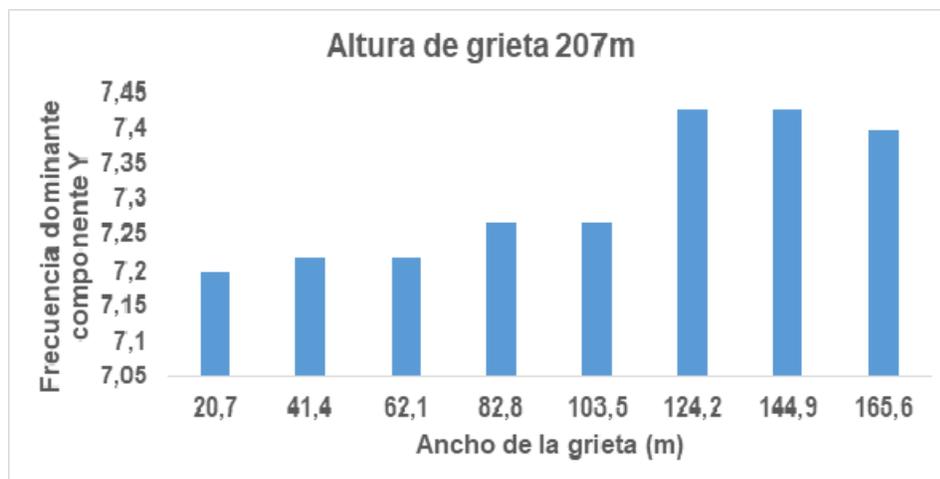


Figura 6.8: Gráfica de componente Y de frecuencia dominante vs ancho de grieta para una altura de 207m.

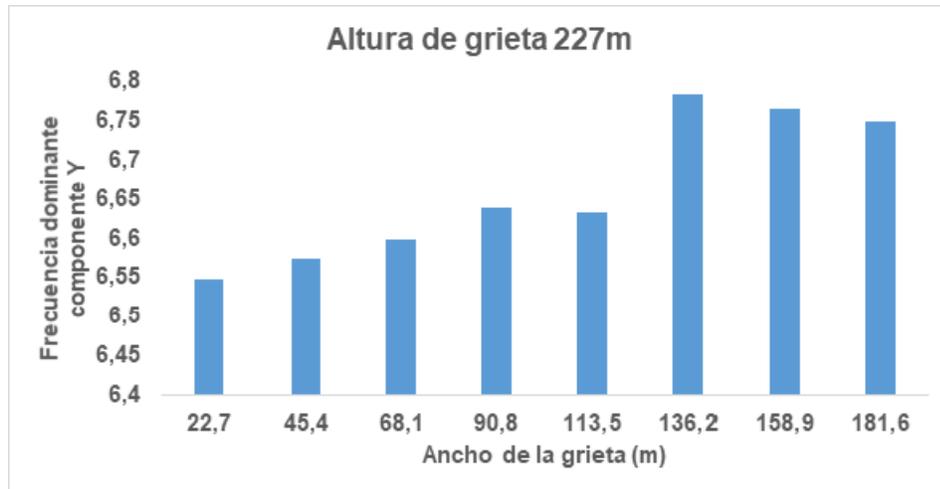


Figura 6.9: Gráfica de componente Y de frecuencia dominante vs ancho de grieta para una altura de 227m.

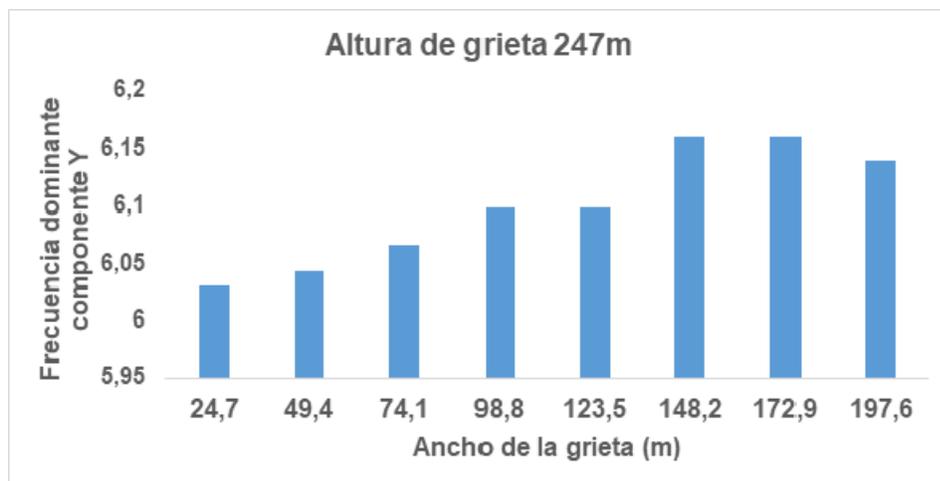


Figura 6.10: Gráfica de componente Y de frecuencia dominante vs ancho de grieta para una altura de 247m.

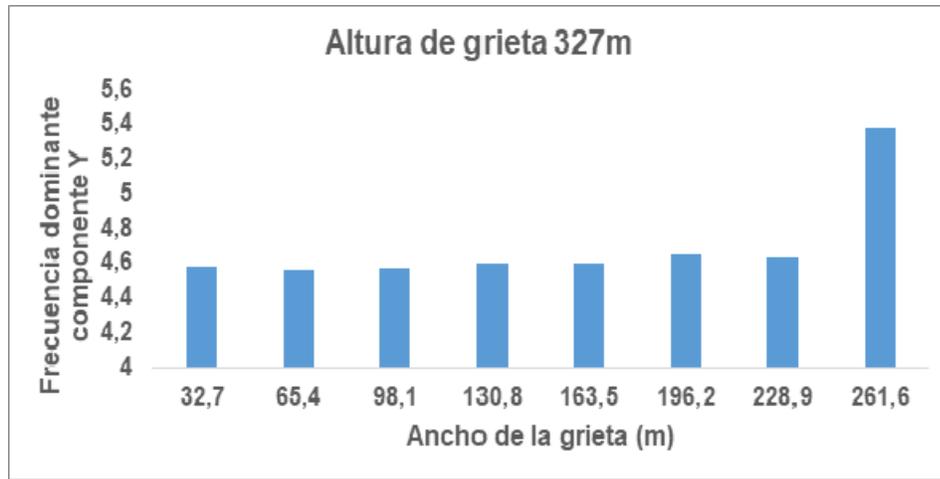


Figura 6.11: Gráfica de componente Y de frecuencia dominante vs ancho de grieta para una altura de 327m.

### 6.2.3. Frecuencia Central vs ancho de la grieta

#### Frecuencia Central componente Y vs ancho de la grieta

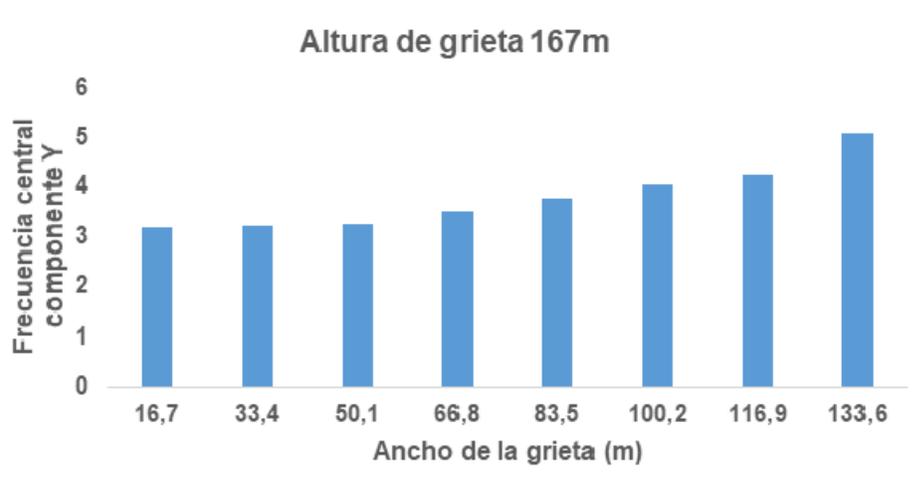


Figura 6.12: Gráfica de componente Y de frecuencia central vs ancho de grieta para una altura de 167m.

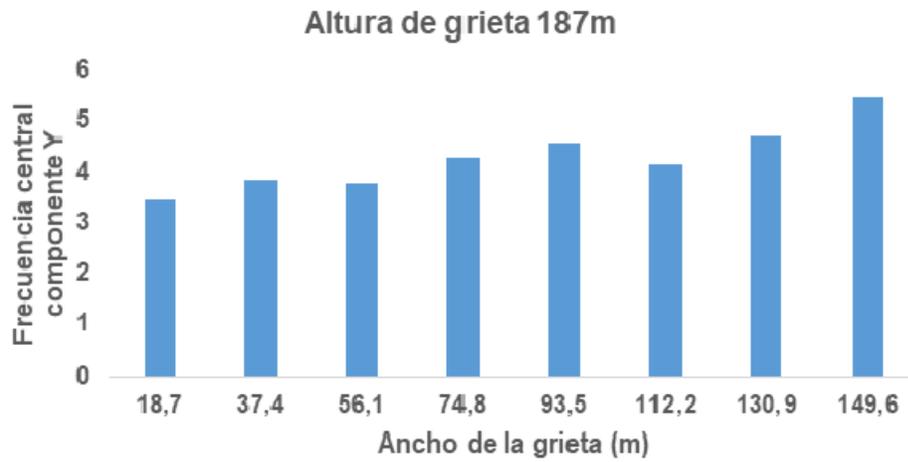


Figura 6.13: Gráfica de componente Y de frecuencia central vs ancho de grieta para una altura de 187m.

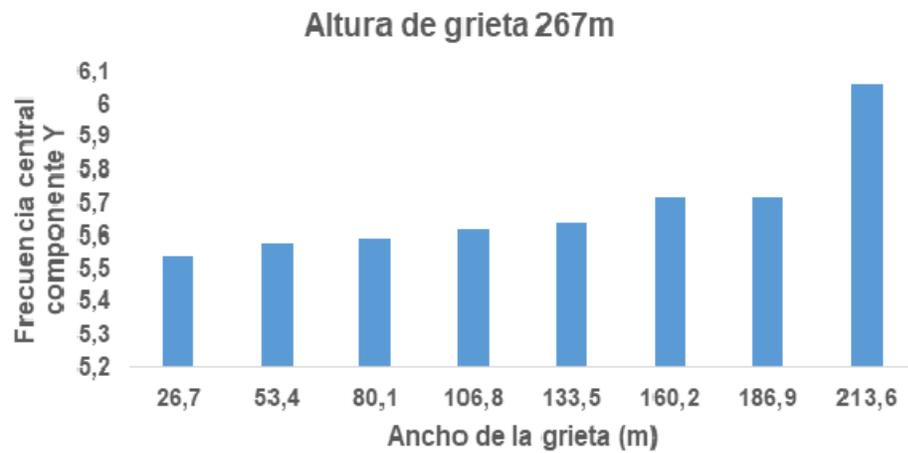


Figura 6.14: Gráfica de componente Y de frecuencia central vs ancho de grieta para una altura de 267m.

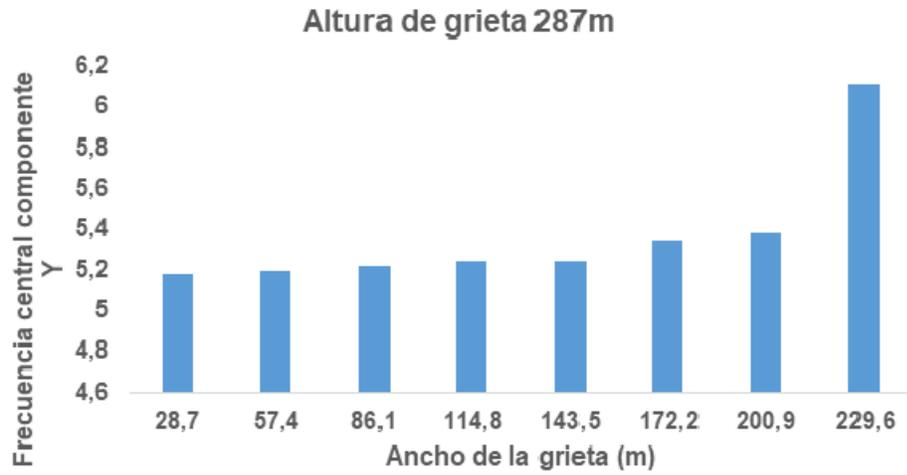


Figura 6.15: Gráfica de componente Y de frecuencia central vs ancho de grieta para una altura de 287m.

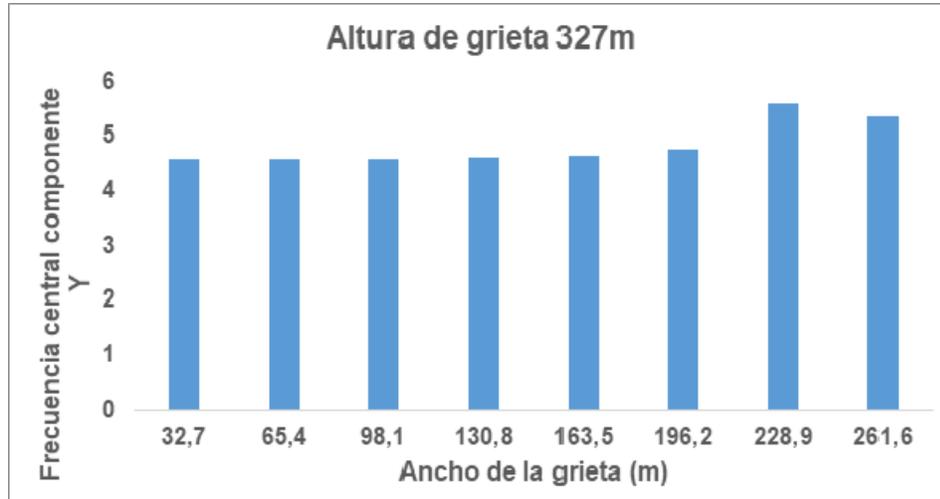


Figura 6.16: Gráfica de componente Y de frecuencia central vs ancho de grieta para una altura de 327m.

### 6.2.4. Frecuencia Centroide vs ancho de la grieta

#### Frecuencia Centroide componente Y vs ancho de la grieta

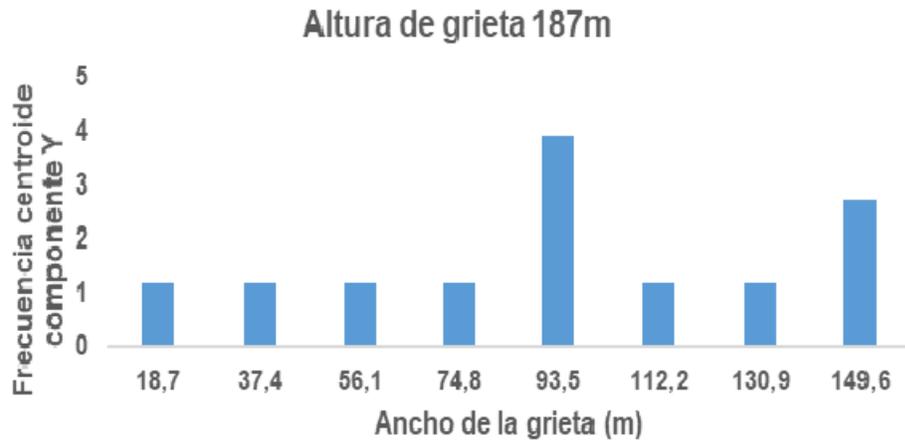


Figura 6.17: Gráfica de componente Y de frecuencia centroide vs ancho de grieta para una altura de 187m.

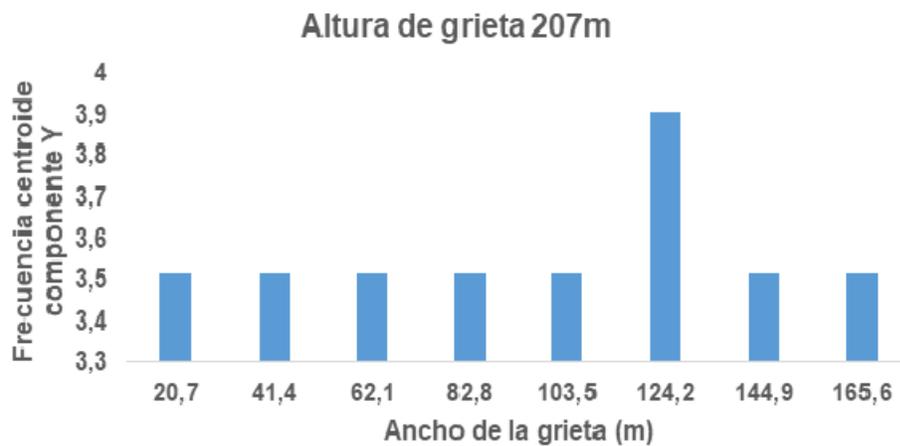


Figura 6.18: Gráfica de componente Y de frecuencia centroide vs ancho de grieta para una altura de 207m.

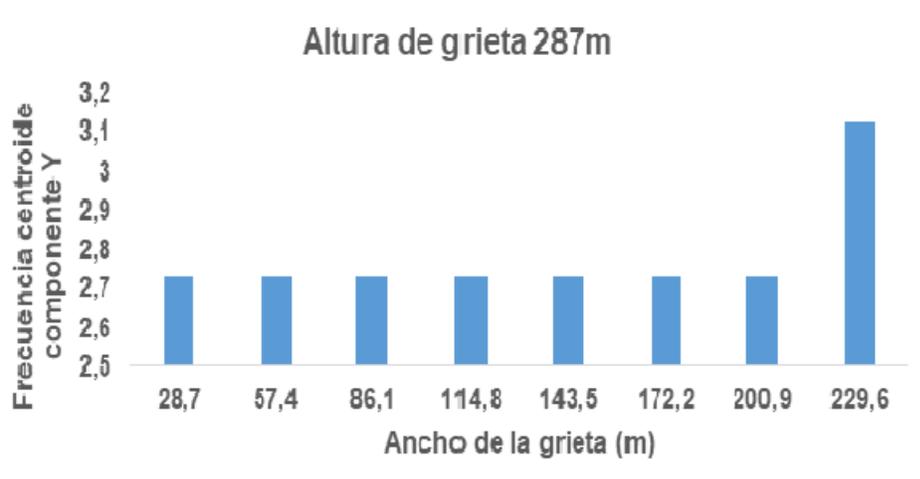


Figura 6.19: Gráfica de componente Y de frecuencia centroide vs ancho de grieta para una altura de 287m.

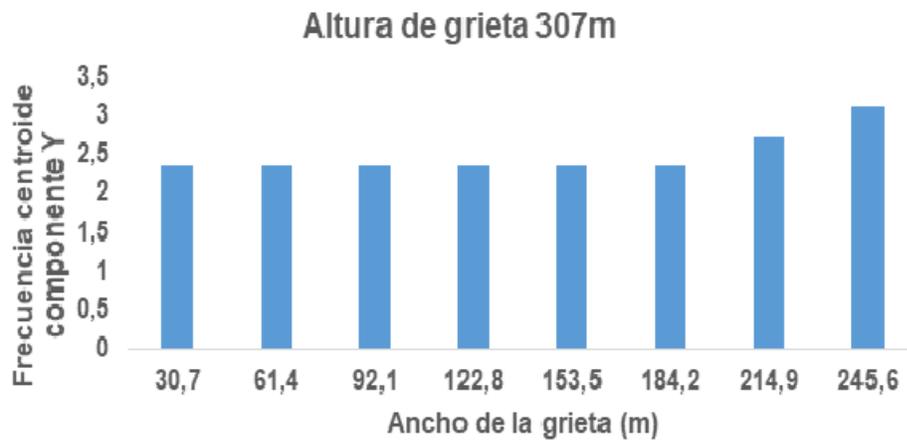


Figura 6.20: Gráfica de componente Y de frecuencia centroide vs ancho de grieta para una altura de 307m.

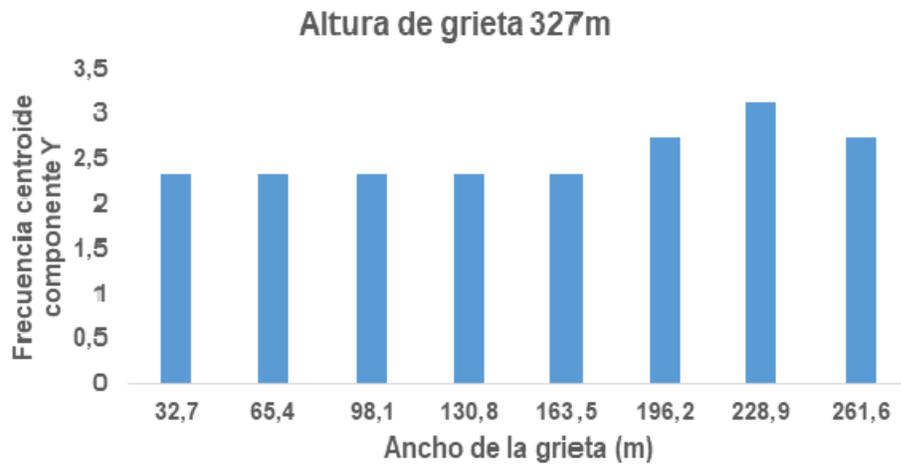


Figura 6.21: Gráfica de componente Y de frecuencia centroide vs ancho de grieta para una altura de 327m.

### 6.2.5. Frecuencia de máxima energía vs ancho de la grieta

#### Frecuencia de máxima energía componente Y vs ancho de la grieta

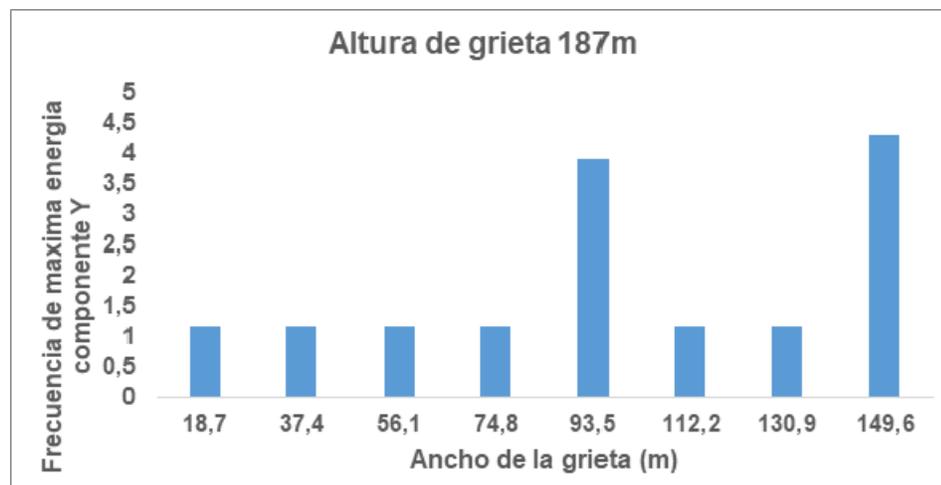


Figura 6.22: Gráfica de componente Y de frecuencia de máxima energía vs ancho de grieta para una altura de 187m.

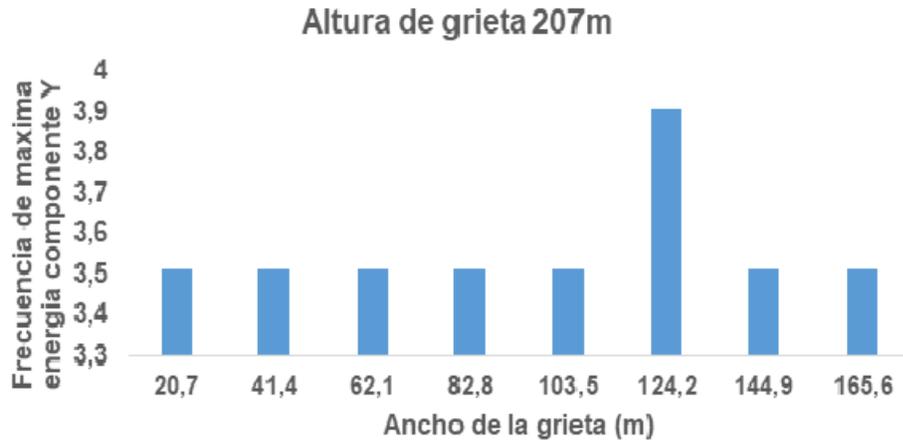


Figura 6.23: Gráfica de componente Y de frecuencia de máxima energía vs ancho de grieta para una altura de 207m.

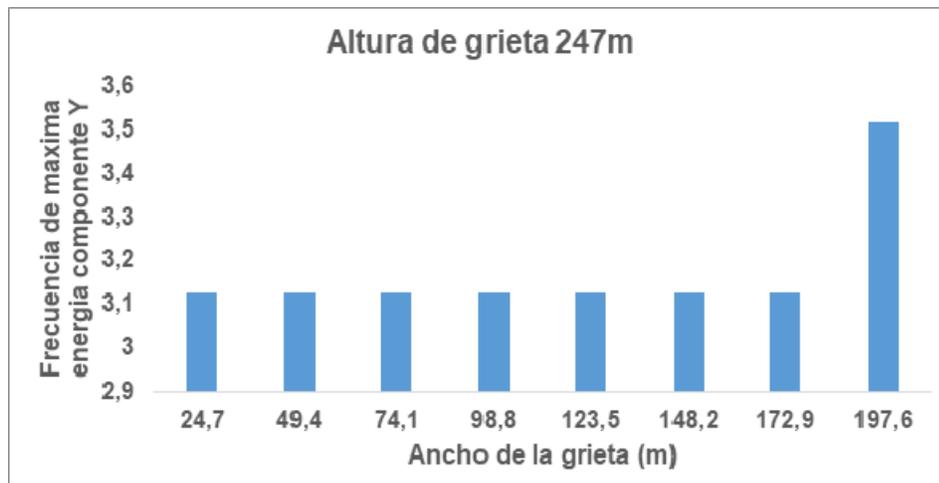


Figura 6.24: Gráfica de componente Y de frecuencia de máxima energía vs ancho de grieta para una altura de 247m.

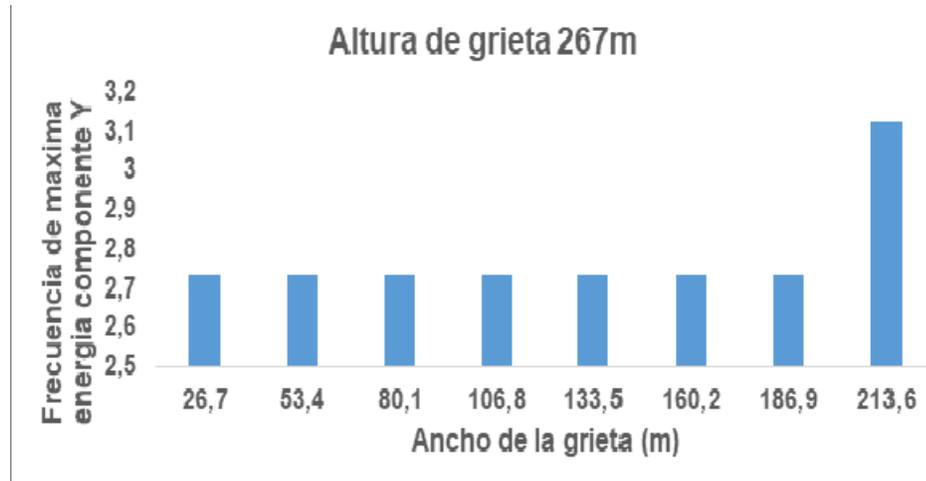


Figura 6.25: Gráfica de componente Y de frecuencia de máxima energía vs ancho de grieta para una altura de 267m.



Figura 6.26: Gráfica de componente Y de frecuencia de máxima energía vs ancho de grieta para una altura de 287m.

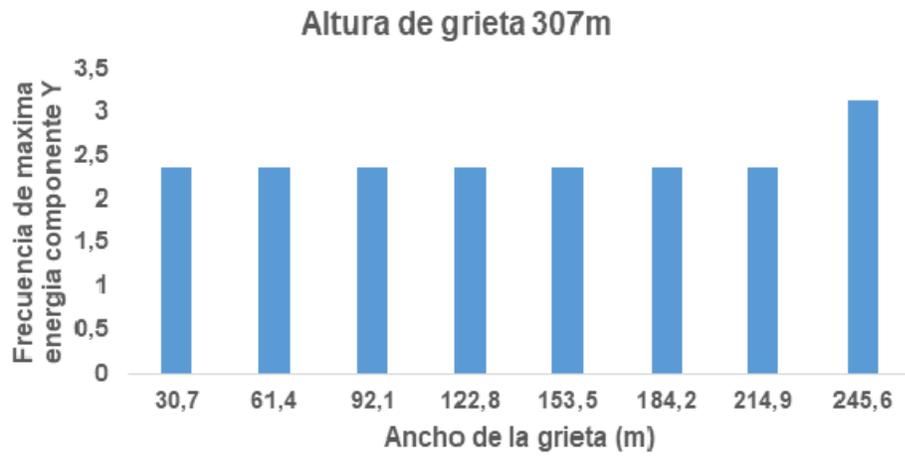


Figura 6.27: Gráfica de componente Y de frecuencia de máxima energía vs ancho de grieta para una altura de 307m.

### 6.2.6. Índice de frecuencia vs ancho de la grieta

#### Índice de frecuencia componente Y vs ancho de la grieta

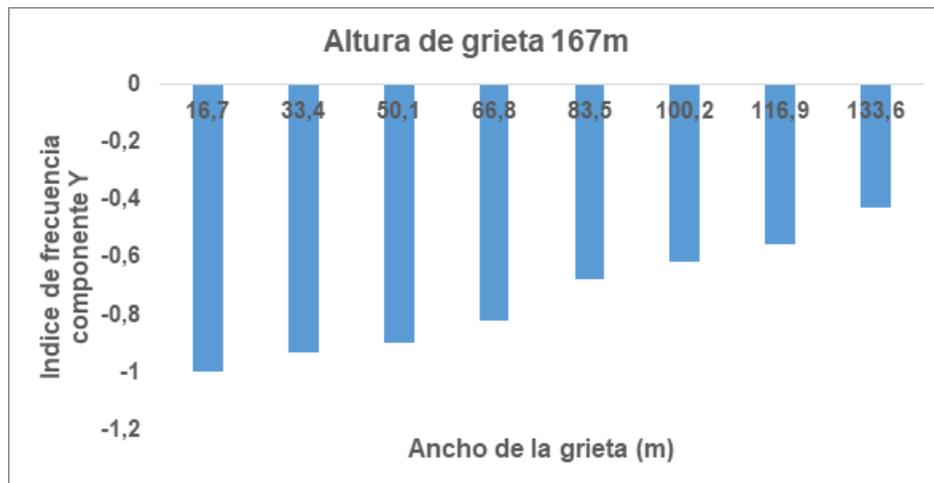


Figura 6.28: Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 167m.

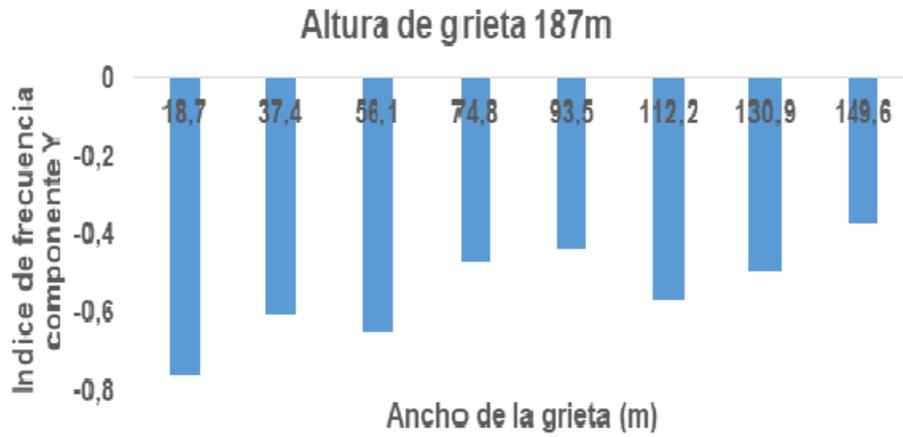


Figura 6.29: Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 187m.

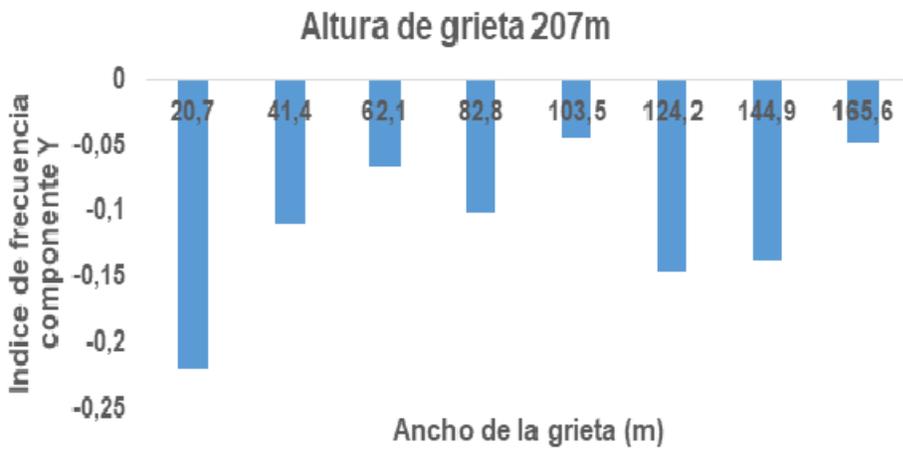


Figura 6.30: Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 207m.

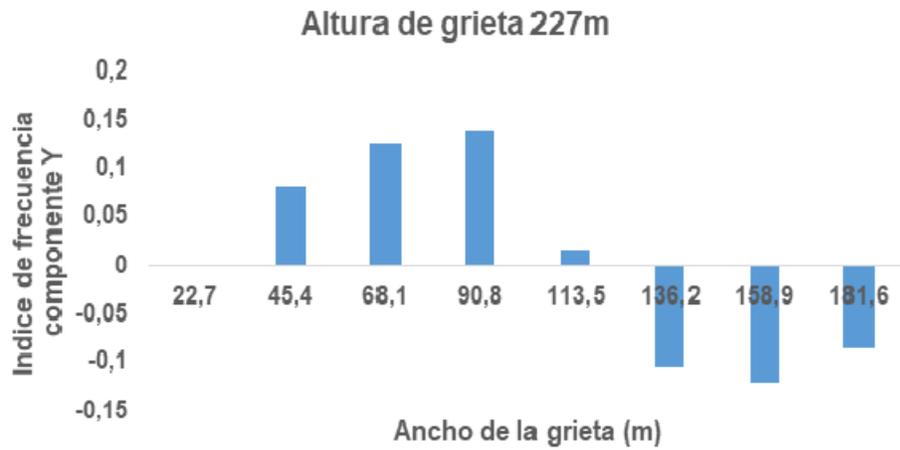


Figura 6.31: Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 227m.

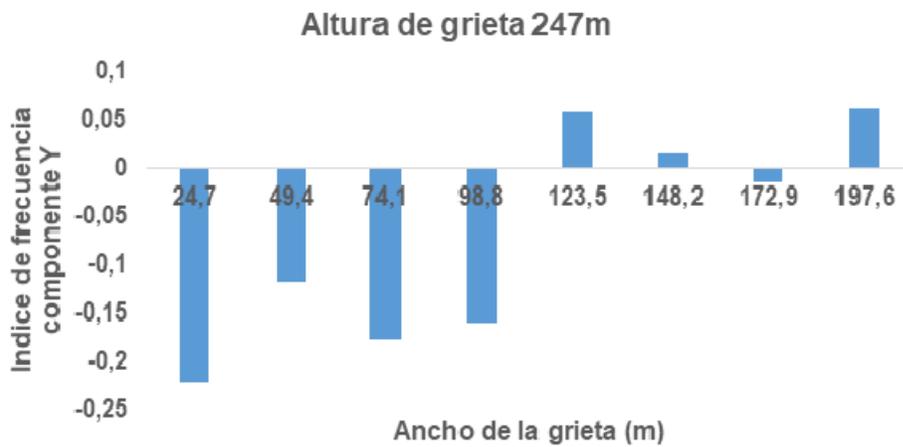


Figura 6.32: Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 247m.

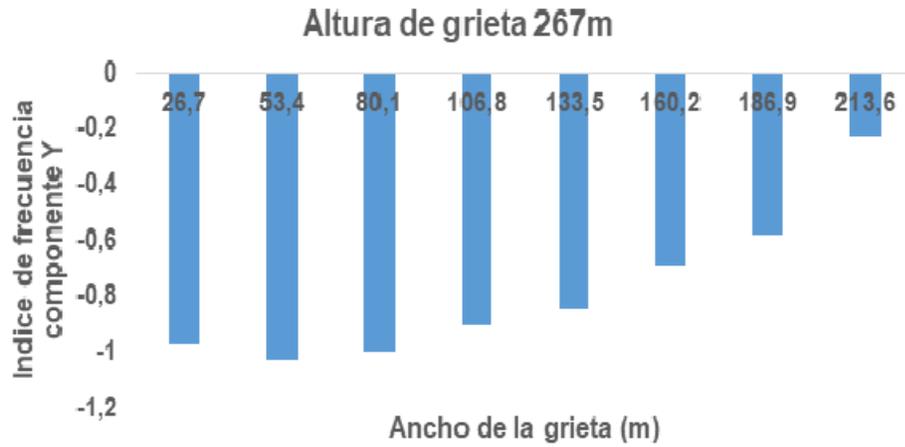


Figura 6.33: Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 267m.

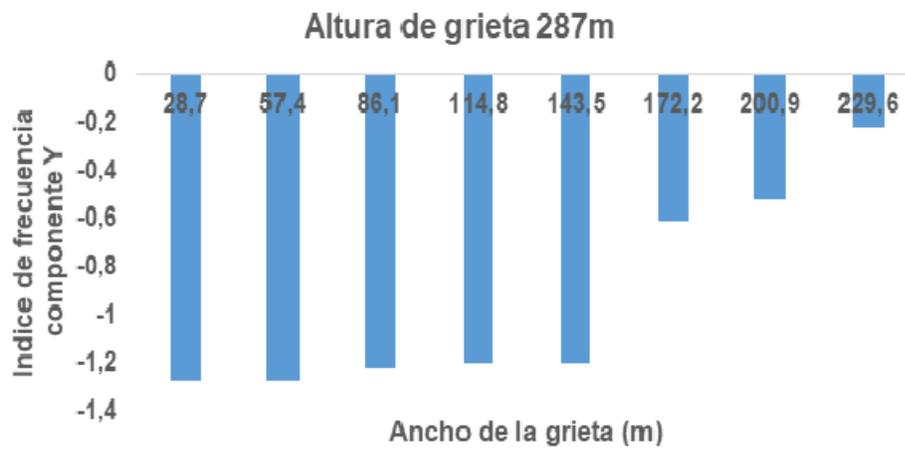


Figura 6.34: Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 287m.

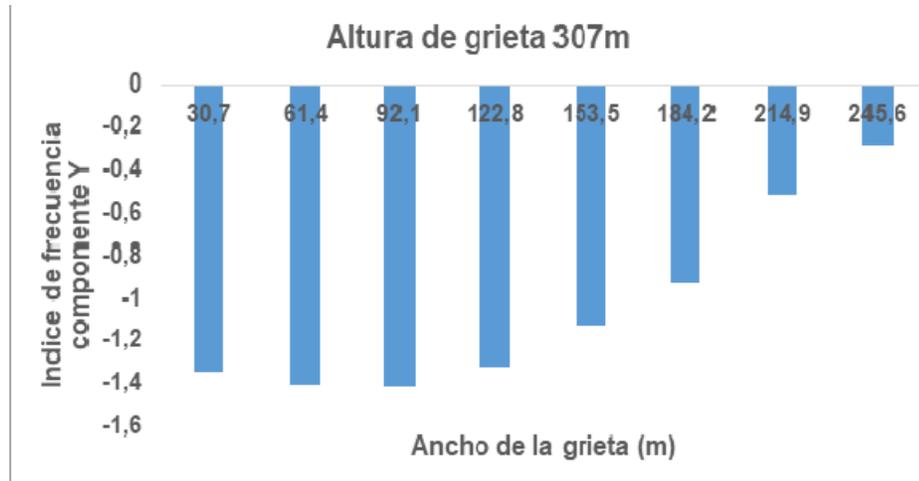


Figura 6.35: Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 307m.

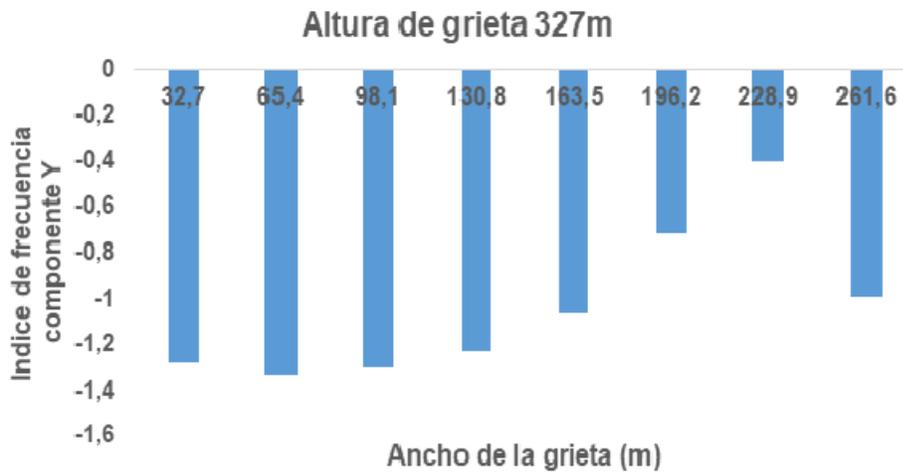


Figura 6.36: Gráfica de componente Y de índice de frecuencia vs ancho de grieta para una altura de 327m.

# Capítulo 7

## Análisis de Resultados.

### 7.1. Análisis descriptivo graficas sección 6.2

En esta sección se realiza un estudio descriptivo de las gráficas presentadas en el anterior capítulo, con el fin de encontrar particularidades en el comportamiento de la componente X y Y de la frecuencia dominante, frecuencia central, frecuencia centroide, frecuencia de máxima energía e índice de frecuencia.

#### 7.1.1. Frecuencia central

##### Altura de grieta de 167m

Considerando una altura de grieta ( $L$ ) de 167m y variando el ancho ( $w$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se deduce, a partir de la figura (6.12), un aumento paulatino de la componente Y de la frecuencia central cuando se incrementa gradualmente el ancho de la grieta, este aumento se da desde un valor mínimo de frecuencia de 3.19Hz cuando la grieta tiene 16.7m de ancho, hasta los 5.08Hz cuando el ancho de la grieta es de 133.6m. El rango de variación de la componente Y de la frecuencia central en este caso es de 1.90Hz aproximadamente. En tanto que, al observar la figura (33 Anexo A), se determina que la componente X de la frecuencia central también aumenta progresivamente cuando se incrementa el ancho de la grieta, sin embargo, este aumento gradual es mucho más lento que el de la componente Y de la frecuencia central. El rango de variación de la frecuencia para este caso es de 0.75Hz aproximadamente, en donde el valor mínimo de frecuencia es de 3.39Hz para un ancho de grieta de 16.7m y el valor máximo es de 4.14Hz cuando la grieta tiene 133.6m de ancho.

**Altura de grieta de 187m**

Teniendo en cuenta una altura de grieta ( $L$ ) de 187m y variando el ancho ( $W$ ) en base a relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.13), un incremento generalizado de la componente  $Y$  de la frecuencia central, salvo cuando el ancho de la grieta es de 56.1m y 112.2m en donde los valores de frecuencia decaen hasta 3.79Hz y 4.16Hz respectivamente. El rango de variación de la frecuencia central en su componente  $Y$  en este caso es de 1.99Hz aproximadamente, en donde la frecuencia mínima es de 3.45Hz para un ancho de grieta de 18.7m y la frecuencia máxima es 5.43Hz cuando el ancho de la grieta es de 149.6m. Por otra parte, para la figura (34 Anexo A) se determina un crecimiento similar al de la gráfica de la derecha, excepto cuando la grieta tiene un ancho de 93.5m, en donde la frecuencia decae hasta 3.84Hz. El intervalo de variación de la frecuencia para este caso es de 1.39Hz, en donde la frecuencia mínima es de 3.57Hz para un ancho de grieta de 18.7m y la frecuencia máxima es de 4.96Hz para un ancho de grieta de 149.6m.

**Altura de grieta de 207m**

Para una altura de grieta ( $L$ ) de 207m y variando el ancho ( $W$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (29 Anexo A), que los valores de la componente  $Y$  de la frecuencia central oscilan entre un valor mínimo de 6.46Hz para un ancho de grieta de 20.7m y un máximo de 7.25Hz cuando la grieta tiene un ancho de 165.6m. Además, se observa un incremento de frecuencia particular cuando el ancho de la grieta aumenta de 20.7 m a 41.4m, este incremento es de aproximadamente 0.6 Hz. El rango de variación de la frecuencia en este caso es de 0.79Hz. Por otro lado, Al observar la figura (35 Anexo A) se observa un comportamiento fluctuante de la componente  $x$  de la frecuencia central a medida que el ancho de la grieta varia. Los valores de frecuencia oscilan entre un mínimo de 4.08Hz cuando la grieta tiene 82.8m de ancho, y un máximo de 6.50Hz para un ancho de grieta de 62.1m por lo que el rango de variación de la frecuencia es de 2.42 Hz. Entre estos cambios en la frecuencia se destaca una disminución de que coincide justamente con el rango de variación, el cual sucede cuando el ancho de la grieta aumenta de 62.1m a 82.8m.

**Altura de grieta de 227m**

Ahora, para altura de grieta ( $L$ ) de 227m y variando el ancho ( $W$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, en base a la figura (30 Anexo A), que los valores de la componente  $Y$  de la frecuencia central oscilan entre un valor mínimo de 6.49Hz para un ancho de grieta de 22.7m y un máximo de 6.62Hz cuando la grieta tiene un ancho de 181.6m, por lo que el rango de variación en este caso es de 0.13 Hz aproximadamente. Además, se observa un incremento de frecuencia desde que la grieta tiene un ancho de 22.7m hasta los 90.8m, a partir del cual, la frecuencia decae, y vuelve a crecer hasta llegar a un valor máximo de 6.62Hz para un ancho de grieta de 181.6m. Por otro lado, al observar la figura (36 Anexo A), se determina que los valores de la frecuencia central en su componente  $X$  fluctúan entre un valor mínimo de 3.62Hz cuando el ancho de la grieta es de 22.7m y un máximo de 5.99Hz para un ancho de grieta de 90.8m, 136.2m, 158.9m y 181.6m, así entonces, el rango de variación de la frecuencia en este caso es de 2.37Hz. Los valores de frecuencia en este caso aumentan desde un valor mínimo de 3.62Hz y tienen una tendencia a estabilizarse a los 5.99Hz a medida que el ancho de la grieta aumenta.

**Altura de grieta de 247m**

Para una altura de grieta ( $L$ ) de 247m y variando el ancho ( $W$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (31 Anexo A), que los valores de la componente  $Y$  de la frecuencia central tienden a aumentar a medida que el ancho de la grieta crece. Este aumento se da entre un valor mínimo de 5.99Hz para un ancho de grieta de 24.7m y un valor máximo de 6.23Hz cuando la grieta tiene un ancho de 197.6m, así entonces, el rango de variación de la frecuencia para este caso es de 0.24 Hz. Por otro lado, al analizar la figura (37 Anexo A), se observa una disminución generalizada de la frecuencia central en su componente  $X$  a medida que aumenta el ancho de la grieta, salvo cuando la grieta tiene un ancho de 197.6m. La reducción en la frecuencia se da entre un valor mínimo de 5.01Hz cuando la grieta tiene un ancho de 172.9m y un valor máximo de 6.05Hz cuando la grieta tiene un ancho de 197.6m, por lo que el rango de variación para la frecuencia en este caso es de 1.04Hz.

**Altura de grieta de 267m**

Ahora, considerando una altura de grieta ( $L$ ) de 267m y variando el ancho ( $W$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, en base a la figura (6.14), que los valores de la componente  $Y$  de la frecuencia central varían entre un valor mínimo de 5.53Hz para un ancho de grieta de 26.74m y un valor máximo de 6.05Hz cuando la grieta tiene un ancho de 213.6m. El rango de variación de la frecuencia para este caso es de 0.52Hz. Por otro lado, al analizar la figura (38 Anexo A), se determina que, de manera similar a la componente  $Y$ , la componente  $X$  de la frecuencia central también tienen un comportamiento fluctuante y con tendencia a aumentar a medida que se aumenta el ancho de la grieta. Estos valores de frecuencia oscilan entre 5.27Hz y 5.69Hz por lo que el rango de variación de la frecuencia en este caso es de 0.42Hz.

**Altura de grieta de 287m**

Para una altura de grieta ( $L$ ) de 287m y variando el ancho ( $W$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.15), que los valores de la componente  $Y$  de la frecuencia central tienden a aumentar a medida que se incrementa el ancho de la grieta. El incremento de la frecuencia central en su componente  $Y$  ocurre entre un valor mínimo de 5.17Hz para un ancho de grieta de 28.7m y un máximo de 6.10Hz cuando la grieta tiene un ancho de 229.6m, por lo que el rango de variación de la frecuencia es de 0.93Hz aproximadamente. En particular, se observa un incremento mucho más pronunciado cuando la grieta tiene 200.9m a 229.6m, en donde pasa de una frecuencia de 5.38Hz a una de 6.10Hz. Por otro lado, al observar la figura (39 Anexo A), se determina que, de manera similar a la componente  $Y$ , la componente  $X$  de la frecuencia central también aumenta a medida que el ancho de la grieta crece. Este crecimiento se presenta desde un valor mínimo de frecuencia de 5.17Hz cuando el ancho de la grieta es de 28.7m y un valor máximo de 5.32Hz cuando el ancho de la grieta es de 229.6m. El rango de variación de la frecuencia para este caso es de 0.15Hz.

**Altura de grieta de 307m**

Considerando una altura de grieta ( $L$ ) de 307m y variando el ancho ( $W$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se deduce, a partir de la figura (32 Anexo A), un aumento paulatino de la componente  $Y$  de la frecuencia central cuando se incrementa gradualmente el ancho de la grieta, salvo cuando la grieta pasa de 214.9m a 245.6m de ancho, en donde se observa el crecimiento más pronunciado. Este aumento se da desde un valor mínimo de frecuencia de 4.86Hz cuando la grieta tiene 30.7m de ancho, hasta los 5.92Hz cuando el ancho de la grieta es de 245.6m. El rango de variación de la componente  $Y$  de la frecuencia central en este caso es de 1.06Hz aproximadamente. En tanto que, al observar la figura (40 Anexo A), se determina que la componente  $X$  de la frecuencia central también aumenta progresivamente cuando se incrementa el ancho de la grieta, del mismo modo, se presenta un crecimiento mucho más pronunciado cuando el ancho de la grieta pasa de 214.9m a 245.6m. El rango de variación de la frecuencia para este caso es de 0.54Hz aproximadamente, en donde el valor mínimo de frecuencia es de 4.83Hz para un ancho de grieta de 30.7m y el valor máximo es de 5.73Hz cuando la grieta tiene 245.6m de ancho.

**Altura de grieta de 327m**

Teniendo en cuenta una altura de grieta ( $L$ ) de 327m y variando el ancho ( $W$ ) en base a relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.16), un incremento generalizado de la componente  $Y$  de la frecuencia central, salvo cuando el ancho de la grieta es de 65.4m y 261.6m en donde los valores de frecuencia decaen hasta 4.57Hz y 5.34Hz respectivamente. El rango de variación de la frecuencia central en su componente  $Y$  en este caso es de 1.01Hz aproximadamente, en donde la frecuencia mínima es de 4.57Hz para un ancho de grieta de 65.4m y la frecuencia máxima es 5.34Hz cuando el ancho de la grieta es de 261.6m. Por otro lado, para la figura (41 Anexo A) se determina un crecimiento similar al de la gráfica de la derecha, excepto cuando el ancho de la grieta es de 228.9m y 261.6m, en donde la frecuencia tiene un crecimiento mucho mayor en relación a los valores de ancho de grieta anteriores. El intervalo de variación de la frecuencia para este caso es de 0.71Hz, en donde la frecuencia mínima es de 4.55Hz para un ancho de grieta de 65.4m y la

frecuencia máxima es de 5.31Hz para un ancho de grieta de 228.9m.

### **7.1.2. Frecuencia Centroide**

#### **Altura de grieta de 167m**

Para una altura de grieta (L) de 167m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (42 Anexo A), que los valores de la componente Y de la frecuencia dominante no varían cuando se aumenta gradualmente el ancho de la grieta. La componente Y de la frecuencia centroide se mantiene en el valor de 1.17Hz para los diferentes anchos de grieta propuestos. Por otro lado, al analizar la figura (46 Anexo A), se determina que, de manera similar a la componente Y, la componente X de la frecuencia centroide también se mantiene constante en un valor de 1.56Hz a medida que el ancho de la grieta aumenta.

#### **Altura de grieta de 187m**

Considerando ahora una altura de grieta (L) de 187m y variando de igual manera el ancho (w) en base a relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.17), un comportamiento constante (1.17Hz) del valor de la componente Y de la frecuencia centroide cuando se modifica el ancho de la grieta, excepto cuando la grieta tiene 93.5m y 149.6m de ancho, para los cuales los valores de frecuencia son de 3.90Hz y 2.73Hz respectivamente. El rango de variación de la frecuencia en este caso es de 2.73Hz aproximadamente, en donde la frecuencia mínima es de 1.17Hz para un ancho de grieta de 18.7m, 37.4m 56.1m, 74.8m, 112.2m y 130.9m; y la frecuencia máxima es 3.90Hz cuando el ancho de la grieta es de 93.5m. Por otro lado, a partir de la figura (47 Anexo A) se determina que el comportamiento de la componente X de la frecuencia centroide cuando se aumenta gradualmente el ancho de la grieta es constante y tiene un valor de 1.56Hz.

**Altura de grieta de 207m**

Para una altura de grieta (L) de 207m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.18), que los valores de la componente Y de la frecuencia centroide tienden a mantenerse en un valor determinado (3.51Hz) a medida que se incrementa el ancho de la grieta, salvo cuando la grieta tiene un ancho de 124.2m, para la cual, la frecuencia tiene un valor de 3.90Hz. En este orden de ideas, el rango de variación de la frecuencia para este caso es de 0.39Hz en donde el valor máximo de frecuencia es de 3.90Hz cuando el ancho de la grieta es de 124.2m y el valor mínimo es 3.51Hz para todos los demás anchos de grieta. Por otro lado, al observar la figura (48 Anexo A), se determina que, de manera similar a la componente Y, los valores de la componente X de la frecuencia centroide también tienen a mantenerse constante (1.56Hz) a medida que el ancho de la grieta crece, excepto cuando la grieta tiene 20.7m y 62.1m de ancho, para los cuales, la frecuencia tiene un valor de 3.51Hz. El rango de variación de la frecuencia en este caso es de 1.95Hz.

**Altura de grieta de 227m**

Para una altura de grieta (L) de 227m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (43 Anexo A), que los valores de la componente Y de la frecuencia centroide varían únicamente entre dos valores de frecuencia; dado que, si el ancho de la grieta es de 22.7m, 45.4m, 68.1m, 90.8m y 113.5m la frecuencia es de 3.12Hz y cuando el ancho de la grieta es de 136.2m, 158.9m y 181.6m la frecuencia tiene un valor de 3.51Hz, por lo que el rango de variación en este caso es de 0.39Hz. Por otra (49 Anexo A), se determina que, el valor de la componente X de la frecuencia centroide se mantiene constante (1.56Hz) a medida que el ancho de la grieta aumenta gradualmente.

**Altura de grieta de 247m**

Para una altura de grieta (L) de 247m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (44 Anexo A), que los valores de la componente Y de la frecuencia centroide se mantienen en un valor de 3.12Hz a medida que se incrementa el ancho de la grieta, excepto cuando la grieta tiene un ancho de 197.6m, para el cual, la frecuencia tiene un valor de 3.51Hz. Así entonces, el rango de variación de la frecuencia para este caso es de 0.39Hz en donde el valor máximo de frecuencia es de 3.51Hz cuando el ancho de la grieta es de 197.6m y el valor mínimo es 3.12Hz para los anchos de grieta restantes. Por otro lado, al observar la figura (50 Anexo A), se determina que, de manera análoga a la componente Y, los valores de la componente X de la frecuencia centroide también se mantienen constantes (1.56Hz) a medida que se incrementa gradualmente el ancho de la grieta, salvo cuando la grieta tiene 197.6 m de ancho, caso en el cual, la frecuencia aumenta hasta los 1.95Hz, en consecuencia, el rango de variación de la frecuencia en este caso es de 0.39Hz.

**Altura de grieta de 267m**

Considerando ahora una altura de grieta (L) de 267m y variando de igual manera el ancho (w) en base a relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (45 Anexo A), que la componente Y de la frecuencia centroide en este caso solo toma dos valores cuando se aumenta paulatinamente el ancho de la grieta, estos valores son: 2.73Hz cuando la grieta tiene 26.7m, 53.4m, 80.1m, 106.8m, 133.5m y 160.2m, y 3.12Hz cuando el ancho de la grieta es de 186.9m y 213.6m, por lo que el rango de variación de la frecuencia en este caso es de 0.39Hz. Por otro lado, a partir de la figura (51 Anexo A) se determina que el comportamiento de la componente X de la frecuencia centroide cuando se aumenta gradualmente el ancho de la grieta es mayormente constante y tiene un valor de 1.56Hz, salvo cuando la grieta es de 213.6m de ancho, para el cual, la frecuencia es de 3.12Hz, en consecuencia, el rango de variación de la frecuencia para este caso es de 1.56Hz.

**Altura de grieta de 287m**

Para una altura de grieta (L) de 287m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se infiere, a partir de la figura (6.19), que los valores de la componente Y de la frecuencia centroide tienden a mantenerse constantes en un valor de 2.73Hz cuando se aumenta de manera gradual el ancho de la grieta, excepto cuando la grieta tiene un ancho de 229.6m ya que, para este caso, la frecuencia aumenta hasta alcanzar un valor de 3.12Hz. El rango de variación de la frecuencia para este caso es de 0.39Hz. Ahora, al analizar la figura (52 Anexo A), se determina que, de manera similar a la componente Y, la componente X de la frecuencia centroide también tiende a mantenerse constante en un valor de 2.73Hz a medida que aumenta el ancho de la grieta, sin embargo, este valor disminuye hasta 1.93Hz cuando la grieta tiene un ancho de 200.9m y aumenta hasta 3.12Hz para un ancho de grieta de 229.6m, por lo que el rango de variación de la frecuencia en este caso es de 0.39Hz.

**Altura de grieta de 307m**

Para una altura de grieta (L) de 307m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (6.20), que los valores de la componente Y de la frecuencia centroide tienden a permanecer constantes en un valor de 2.34Hz a medida que el ancho de la grieta se incrementa, salvo cuando la grieta tiene 214.9m y 245.6m de ancho, para los cuales, la frecuencia alcanza un valor de 2.73Hz y 3.12 Hz respectivamente. El rango de variación de la frecuencia en este caso es de 0.79Hz. Por otro lado, Al analizar la figura (53 Anexo A) se observa un comportamiento fluctuante de la componente x de la frecuencia centroide a medida que el ancho de la grieta varia. Los valores de frecuencia oscilan entre un mínimo de 1.95Hz cuando la grieta tiene 153.5m, 184.2m y 214.9m de ancho, y un máximo de 2.73Hz para un ancho de grieta de 245.6m por lo que el rango de variación de la frecuencia en este caso es de 0.78Hz.

### **Altura de grieta de 327m**

Para una altura de grieta ( $L$ ) de 327m y variando el ancho ( $W$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se infiere, a partir de la figura (6.21), que los valores de la componente  $Y$  de la frecuencia centroide oscilan entre un valor mínimo de 2.34Hz y un máximo de 3.12Hz a medida que se incrementa el ancho de la grieta, por lo que el rango de variación de la frecuencia para este caso es de 0.78Hz. Por otro parte, al analizar la figura (54 Anexo A), se determina que los valores de la componente  $X$  de la frecuencia centroide fluctúan entre un valor mínimo de 1.95Hz cuando la grieta tiene 163.5m, 196.2m y 228.9m de ancho, y un valor máximo de 2.34Hz para los anchos de grieta restantes, de modo que, el rango de variación de la frecuencia en este caso es de 0.39Hz.

### **7.1.3. Frecuencia de máxima energía**

#### **Altura de grieta de 167m**

Considerando una altura de grieta ( $L$ ) de 167m y variando el ancho ( $W$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se infiere, en base a la figura (55 Anexo A), que los valores de la componente  $Y$  de la frecuencia de máxima energía permanece constantes y con un valor de 1.17Hz a medida que se aumenta paulatinamente el ancho de la grieta. Por otro lado, al observar la figura (58 Anexo A), se determina que los valores de la frecuencia de máxima energía en su componente  $X$ , de manera análoga al caso de la componente  $Y$ , no varían a medida que se aumentan el ancho de la grieta. La frecuencia máxima en este caso permanece en un valor de 1.56Hz.

#### **Altura de grieta de 187m**

Ahora, considerando una altura de grieta ( $L$ ) de 187m y variando el ancho ( $W$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, teniendo en cuenta la figura (6.22), que los valores de la componente  $Y$  de la frecuencia dominante varían entre un valor mínimo de 1.17Hz para un ancho de grieta de 18.7m, 37.4m, 56.1m, 74.8m, 112.2m y 130.9m, y un valor máximo de 4.29Hz cuando la grieta tiene un ancho de 149.6m, en consecuencia, el

rango de variación de la frecuencia en este caso es de 3.12Hz. Por otro parte, al analizar la figura (59 Anexo A), se determina que la magnitud de la componente X de la frecuencia de máxima energía permanece constante en un valor de 1.56Hz a medida que se aumenta gradualmente el ancho de la grieta.

### **Altura de grieta de 207m**

Teniendo en cuenta una altura de grieta (L) de 207m y variando el ancho (W) en base a relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (6.23), que la componente Y de la frecuencia de máxima energía tiende a permanecer en un valor de 3.51Hz a medida que el ancho de la grieta se aumenta gradualmente, salvo cuando el ancho es de 142.2m, para el cual, la frecuencia correspondiente es de 3.90Hz. El rango de variación de la frecuencia de máxima energía en este caso es de 0.31Hz. Por otro lado, para la figura (60 Anexo A) se determina que la componente X de la frecuencia de máxima energía oscila entre dos valores: 3.51Hz cuando el ancho de la grieta es de 20.7m, 41.4m, y 1.56Hz cuando la grieta es de 82.8m, 103.5m, 124.2m, 144.9m, y 165.6m de ancho; por lo que el rango de variación de la frecuencia en este caso es de 1.95Hz.

### **Altura de grieta de 227m**

Para una altura de grieta (L) de 227m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (56 Anexo A), que los valores de la componente Y de la frecuencia de máxima energía oscilan entre un valor mínimo de 3.12Hz para un ancho de grieta de 22.7m, 45.4m, 68.1m, 90.8m y 113.5m, y un máximo de 3.51Hz cuando la grieta tiene 136.2m, 158.9m y 181.6m; así entonces, la frecuencia varía en un rango de 0.39Hz en este caso. Ahora, al analizar la figura (61 Anexo A) se observa un comportamiento fluctuante de la componente x de la frecuencia de máxima energía a medida que el ancho de la grieta se aumenta gradualmente. Los valores de frecuencia oscilan entre un mínimo de 1.56Hz cuando la grieta tiene 22.7m, 45.4m, 68.1m, 113.5m y 181.6m de ancho, y un máximo de 3.51Hz para un ancho de grieta de 90.8m, 136.2m y 158.9m; por lo que el rango de variación de la frecuencia en este caso es de 1.95Hz.

**Altura de grieta de 247m**

Para una altura de grieta (L) de 247m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (6.24), que los valores de la componente Y de la frecuencia de máxima energía tienden a permanecer constantes en un valor de 3.12Hz cuando se aumenta gradualmente el ancho de la grieta, excepto cuando la grieta tiene un ancho de 197.6m, valor para el cual, la frecuencia aumenta hasta 3.51Hz. Así entonces, se deduce que el rango en el que varía la componente Y de la frecuencia de máxima energía es de 0.39Hz. Por otro lado, al examinar la figura (62 Anexo A), se observa un comportamiento mayormente constante de la frecuencia de máxima energía en su componente X a medida que aumenta el ancho de la grieta, salvo cuando la grieta tiene un ancho de 172.9m y 197.6m, para los cuales, la frecuencia disminuye hasta 1.56Hz y luego aumenta hasta 3.90Hz respectivamente. En consecuencia, el rango de variación de la frecuencia en este caso es de 2.34Hz.

**Altura de grieta de 267m**

Ahora, considerando una altura de grieta (L) de 267m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, en base a la figura (6.25), que los valores de la componente Y de la frecuencia de máxima energía tienden a no variar a medida que se aumenta el ancho de la grieta, excepto cuando la grieta tiene 213.6m de ancho, para el cual, la frecuencia aumenta hasta alcanzar el valor de 3.12Hz. Así entonces, el rango en el que varía la frecuencia de máxima energía para este caso es de 0.39Hz. Por otra parte, al analizar la figura (63 Anexo A), se determina que, de manera similar a la componente Y, la componente X de la frecuencia de máxima energía también tiene un comportamiento mayormente constante (2.73Hz), salvo cuando la grieta tiene 213.6m de ancho, para el cual, la frecuencia correspondiente es de 3.51Hz; así entonces, el rango de variación de la frecuencia en este caso es de 0.78Hz.

**Altura de grieta de 287m**

Para una altura de grieta ( $L$ ) de 287m y variando el ancho ( $W$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.26), que los valores de la componente  $Y$  de la frecuencia de máxima energía tienden a permanecer constantes en un valor de 2.73Hz medida que se incrementa el ancho de la grieta, salvo cuando la grieta tienen un ancho de 229.6m, para el cual, la frecuencia correspondiente es de 3.12Hz; por lo que el rango de variación de la frecuencia es de 0.39Hz aproximadamente. Ahora, al observar la figura (64 Anexo A), se determina que, la componente  $X$  de la frecuencia de máxima energía también tiene una tendencia a permanecer constante mientras se aumenta el ancho de la grieta. A diferencia del caso anterior, la frecuencia permanece constante en el valor de 2.73Hz para todos los anchos de grieta propuestos.

**Altura de grieta de 307m**

Considerando una altura de grieta ( $L$ ) de 307m y variando el ancho ( $W$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se deduce, a partir de la figura (6.27), que la componente  $Y$  de la frecuencia de máxima energía tiende a no variar a medida que se incrementa gradualmente el ancho de la grieta, salvo cuando la grieta es de 245.6m de ancho, en donde la frecuencia crece hasta 3.12Hz. Así entonces, el rango de variación de la componente  $Y$  de la frecuencia de máxima energía es de 0.69Hz. En tanto que, al observar la figura (65 Anexo A), se determina que la componente  $X$  de la frecuencia de máxima energía tiende a permanecer constante en un valor de 2.43Hz para los primeros anchos de grieta, sin embargo, se observa un aumento de la frecuencia para los tres últimos anchos de grieta, en donde alcanza un valor máximo de 3.51Hz. En consecuencia, el rango de variación de la frecuencia para este caso es de 1.06Hz.

**Altura de grieta de 327m**

Para una altura de grieta ( $L$ ) de 327m y variando el ancho ( $W$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (57 Anexo A), que los valo-

res de la componente Y de la frecuencia de máxima energía tienden a permanecer constantes (2.34Hz) a medida que se incrementa el ancho de la grieta, excepto cuando el ancho de la grieta es de 228.9m y 261.6m, para los cuales, la frecuencia aumenta hasta 3.12Hz y luego disminuye hasta 2.73Hz respectivamente. El rango de variación de la frecuencia para este caso es de 0.78Hz. Por otro lado, al analizar la figura (66 Anexo A), se observa un comportamiento similar de la frecuencia de máxima energía en su componente X en relación a la componente Y, dado que a medida que aumenta el ancho de la grieta, la frecuencia tiende a no variar (2.34Hz), salvo cuando la grieta tiene 228.9m y 261.6m de ancho, en los cuales, la frecuencia aumenta hasta 3.51Hz y posteriormente disminuye hasta 2.73Hz respectivamente. Así entonces, el rango de variación de la frecuencia en este caso es de 1.17Hz.

#### **7.1.4. Frecuencia dominante**

##### **Altura de grieta de 167m**

Para una altura de grieta (L) de 167m y variando el ancho (w) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  es posible observar, a partir de la figura (6.6), un aumento de la componente Y de la frecuencia dominante cuando se incrementa gradualmente el ancho de la grieta, en particular, al pasar de un ancho de grieta  $W = 50.1\text{m}$  a  $W = 66.8\text{m}$ . El rango de variación de la componente Y de la frecuencia dominante en este caso es de 7.8 Hz aproximadamente, en donde, el valor mínimo de frecuencia es de 1.9Hz para un ancho de grieta de 16.7m y el valor máximo es de 9.6Hz cuando el ancho de la grieta es de 133.6m. En tanto que, al observar la figura (20 Anexo A), se determina que la componente X de la frecuencia dominante también aumenta progresivamente cuando se incrementa el ancho de la grieta, este aumento gradual es del orden de las centésimas de Hertz. Sin embargo, la frecuencia decae significativamente para el ancho de grieta  $W = 116.9\text{m}$  y posteriormente se estabiliza. La frecuencia dominante en este caso oscila los 9 Hz a excepción del caso mencionado anteriormente, en donde la frecuencia decae hasta los 2.7Hz aproximadamente.

**Altura de grieta de 187m**

Considerando ahora una altura de grieta ( $L$ ) de 187m y variando de igual manera el ancho ( $w$ ) en base a relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.7), un incremento paulatino de la componente Y de la frecuencia dominante cuando se modifica el ancho de la grieta. El rango de variación de la frecuencia dominante en este caso es de 0.5Hz aproximadamente, en donde la frecuencia mínima es de 7.9Hz para un ancho de grieta de 18.7m y la frecuencia máxima es 8.4Hz cuando el ancho de la grieta es de 149.6m. Por otro lado, para la figura (21 Anexo A) se determina que, al igual que la componente Y de la frecuencia dominante, la componente X aumenta mínima y gradualmente a medida que el ancho de la grieta varia. El rango de variación de la frecuencia 0.5Hz, al igual que en el caso de la componente Y. El valor mínimo de frecuencia es de 7.9Hz para un ancho de grieta de 18.7m y el valor máximo de frecuencia es de 8.4Hz para un ancho de grieta de 149.6m.

**Altura de grieta de 207m**

Teniendo en cuenta una altura de grieta ( $L$ ) de 207m y variando el ancho ( $w$ ) en base a relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.8), un incremento general de la componente Y de la frecuencia dominante, salvo cuando el ancho de la grieta es de 165.6m. Además, este incremento se presenta en pares de ancho de grieta (excepto cuando el ancho de grieta es de 20.7m y 165.6m), es decir, cuando el ancho de la grieta es de 41.4m y 62.1m la componente Y de la frecuencia dominante es de 7.22Hz, de manera similar, cuando el ancho de grieta es de 82.8m y 103.5m, la componente Y de la frecuencia dominante es de 7.26Hz y finalmente cuando el ancho de grieta es de 124.2m y 144.9m la frecuencia es de 7.42Hz. El rango de variación de la frecuencia dominante en este caso es de 0.23Hz aproximadamente, en donde la frecuencia mínima es de 7.19Hz para un ancho de grieta de 20.7m y la frecuencia máxima es 7.42Hz cuando el ancho de la grieta es de 165.6m. Por otra parte, para la figura (22 Anexo A) se determina que, al igual que la componente Y de la frecuencia dominante, la componente X aumenta en pares de ancho de grieta, excepto cuando el ancho de la grieta es de 144.9. De modo que, cuando el ancho de la grieta es de 41.4m y 62.1m la componente X de la frecuencia dominante es de 7.22Hz, de manera similar, cuando el ancho

de grieta es de 82.8m y 103.5m, la componente Y de la frecuencia dominante es de 7.26Hz y finalmente cuando el ancho de grieta es de 124.2m y 144.9m la frecuencia es de 7.42Hz. Al igual que en el caso anterior, el rango de variación de la frecuencia dominante en este caso es de 0.23Hz aproximadamente, en donde la frecuencia mínima es de 7.19Hz para un ancho de grieta de 20.7m y la frecuencia máxima es 7.42Hz cuando el ancho de la grieta es de 144.9m.

### **Altura de grieta de 227m**

Para una altura de grieta (L) de 227m y variando el ancho (w) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.9), que los valores de la componente Y de la frecuencia dominante oscilan entre un valor mínimo de 6.54Hz para un ancho de grieta de 22.7m y un máximo de 6.78Hz cuando la grieta tiene un ancho de 136.2m. Además, se observa un incremento de frecuencia cuando la grieta tiene un ancho de 22.7m hasta los 90.8m, a partir del cual, la frecuencia disminuye. Posteriormente la frecuencia aumenta cuando la grieta tiene un ancho de 136.2m para finalmente disminuir cuando el ancho aumenta hasta los 181.6m. El rango de variación de la frecuencia en este caso es de 0.24Hz. Al observar la figura (23 Anexo A), se determina que, de manera similar a la componente Y, la componente X de la frecuencia dominante también aumenta cuando la grieta tiene un ancho de 22.7m hasta los 90.8m, a partir del cual, la frecuencia disminuye. Así mismo, la frecuencia aumenta cuando la grieta tiene un ancho de 136.2m para finalmente disminuir cuando el ancho aumenta hasta los 181.6m. La componente X de la frecuencia dominante tiene un mínimo de 6.52 Hz cuando el ancho de la grieta es de 22.7m y un valor máximo de 6.78Hz cuando el ancho de la grieta es de 136.2m. El rango de variación de la frecuencia para este caso es de 0.26Hz.

### **Altura de grieta de 247m**

Ahora, para altura de grieta (L) de 247m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (6.10), que los valores de la componente Y de la frecuencia dominante varían entre un valor mínimo de 6.03Hz para un ancho de grieta de 24.7m y un máximo de 6.15Hz cuando la grieta tiene un ancho

de 172.9m. Además, se observa un incremento de frecuencia desde que la grieta tiene un ancho de 24.7m hasta los 172.9m, a partir del cual, la frecuencia disminuye. Cabe resaltar que la frecuencia tiene el mismo valor (6.09 Hz) cuando el ancho de la grieta es de 98.8m y 123.5m, del mismo modo, la frecuencia tiene un valor de 6.16Hz cuando la grieta tiene 148.2m y 172.9m de ancho. El rango de variación de la frecuencia en este caso es de 0.12Hz aproximadamente. Por otro lado, al observar la figura (24 Anexo A), se observa que la componente X de la frecuencia dominante no aumenta de manera significativa al aumentar el ancho de la grieta, a excepción del ancho de grieta de 172.9m en donde la componente X de la frecuencia dominante tiene un valor de 9.19Hz. La componente X de la frecuencia dominante tiene un valor mínimo de 6.02 Hz cuando el ancho de la grieta es de 24.7m y un valor máximo de 9.19Hz cuando el ancho de la grieta es de 172.9m. El rango de variación de la componente X de la frecuencia dominante para esta altura de grieta es de 3.17 Hz

### **Altura de grieta de 267m**

Considerando ahora una altura de grieta (L) de 267m y variando de igual manera el ancho (W) en base a relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (17 Anexo A), un incremento paulatino de la componente Y de la frecuencia dominante cuando se modifica el ancho de la grieta, excepto cuando el ancho de la grieta es de 213.6m. Además, este incremento se presenta por pares de ancho de grieta, es decir, cuando el ancho de la grieta es de 53.4m y 80.1m la componente Y de la frecuencia dominante es de 5.59Hz, de manera similar, cuando el ancho de grieta es de 106.8m y 133.5m, la componente Y de la frecuencia dominante es de 5.63Hz y finalmente cuando el ancho de grieta es de 160.2m y 186.9m la frecuencia es de 5.69Hz. La frecuencia mínima en este caso es de 5.55Hz para un ancho de grieta de 26.7m y la frecuencia máxima es 5.69Hz cuando el ancho de la grieta es de 186.9m, por lo que el rango de variación de la frecuencia dominante en este caso es de 0.14Hz aproximadamente. Por otro lado, para la figura (25 Anexo A) se determina que, al igual que la componente Y de la frecuencia dominante, la componente X aumenta mínima y gradualmente a medida que el ancho de la grieta varía salvo el caso cuando el ancho de la grieta es de 213.6m. Este incremento se da por pares de ancho de grieta, en donde, para el

ancho de la grieta es de 53.4m y 80.1m la componente Y de la frecuencia dominante es de 5.59Hz, de manera similar, cuando el ancho de grieta es de 106.8m y 133.5m, la componente Y de la frecuencia dominante es de 5.63Hz y finalmente cuando el ancho de grieta es de 160.2m y 186.9m la frecuencia es de 5.69Hz. La frecuencia mínima es de 5.55Hz para un ancho de grieta de 26.7m y la frecuencia máxima es 5.69Hz cuando el ancho de la grieta es de 186.9m, por lo que el rango de variación de la frecuencia dominante en este caso es de 0.14Hz.

### **Altura de grieta de 287m**

Para una altura de grieta (L) de 287m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (18 Anexo A), que los valores de la componente Y de la frecuencia dominante oscilan entre 5.19Hz para un ancho de grieta de 28.7m, y 5.30Hz para un ancho de grieta de 172.2m, por lo que su rango de variación es de 0.11Hz. La frecuencia aumenta desde un ancho de grieta de 28.7m hasta 172.2m a partir del cual, la frecuencia disminuye hasta estabilizarse en 5.29 Hz. Por otro lado, al observar la figura (26 Anexo A), se determina que el valor mínimo de frecuencia es de 5.19Hz cuando el ancho de la grieta es de 28.7m y el valor máximo es de 5.30Hz cuando la grieta tiene 200.9m de ancho, por lo que su rango de variación es de 0.11 Hz. La componente X de la frecuencia dominante aumenta a medida que el ancho de la grieta varia, excepto en los dos últimos anchos de grieta, debido a que, en este caso, la frecuencia pasa de 5.30Hz a 5.29 Hz.

### **Altura de grieta de 307m**

Para una altura de grieta (L) de 307m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (19 Anexo A), que los valores de la componente Y de la frecuencia dominante fluctúan entre un valor mínimo de 4.84Hz para un ancho de grieta de 30.7m y un valor máximo de 4.96Hz cuando la grieta tiene un ancho de 184.2m. Además, se observa un incremento de frecuencia cuando la grieta tiene un ancho de 30.7m hasta los 184.2m, a partir del cual, la frecuencia disminuye y posteriormente se estabiliza cuando el ancho de grieta es de 214.9m y 245.6m en 4.93Hz. El

rango de variación de la frecuencia en este caso es de 0.12Hz. Por otro lado, al analizar la figura (27 Anexo A), se determina que, de manera similar a la componente Y, la componente X de la frecuencia dominante también oscilan entre 4.8Hz y 5.0Hz aproximadamente, salvo cuando la grieta tiene un ancho de 245.6m, para la cual, la frecuencia aumenta hasta 6.27Hz. El rango de variación de la frecuencia para este caso es de 1.43Hz aproximadamente.

### **Altura de grieta de 327m**

Ahora, considerando una altura de grieta (L) de 327m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, en base a la figura (6.11), que los valores de la componente Y de la frecuencia dominante varían entre un valor mínimo de 4.56Hz para un ancho de grieta de 65.4m y un valor máximo de 4.64Hz cuando la grieta tiene un ancho de 196.2m, esto sucede para los primeros valores de ancho de grieta, dado que, cuando la grieta tienen un ancho de 261.6m la frecuencia crece hasta alcanzar el valor de 5.38Hz. El rango de variación de la frecuencia para este caso es de 0.82Hz. Por otro lado, al analizar la figura (28 Anexo A), se determina que, de manera similar a la componente Y, la componente X de la frecuencia dominante también oscilan entre 4.56Hz y 4.64Hz para los primeros siete valores de ancho de grieta, salvo el octavo ancho de grieta, en donde la frecuencia dominante crece hasta los 5.38 Hz aproximadamente. El rango de variación de la frecuencia para este caso es de 0.82Hz.

### **7.1.5. Índice de frecuencia**

#### **Altura de grieta de 167m**

Para una altura de grieta (L) de 167m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.28), que los valores de la componente Y para el índice de frecuencia tienden a aumentar a medida que se aumenta gradualmente el ancho de la grieta. Dicho aumento se da entre un valor mínimo de -0.99 cuando la grieta tiene 16.7m de ancho y un valor máximo de -0.42 para un ancho de grieta de 133.6m, por lo que el rango de variación del índice de frecuencia en este caso es de 0.57.

Por otra parte, al analizar la figura (67 Anexo A), se determina que los valores del índice de frecuencia en su componente X tienden a fluctuar entre un valor mínimo de -0.77 y cuando la grieta tiene 16.7m de ancho y un valor máximo de -0.49 para un ancho de grieta de 133.6m, así entonces, el rango en el que varían los valores de índice de frecuencia en este caso es de 0.28.

### **Altura de grieta de 187m**

Para una altura de grieta (L) de 187m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, en base a la figura (6.29), que los valores del índice de frecuencia para la componente Y tienden a crecer gradualmente mientras que el ancho de la grieta se aumenta de manera progresiva, este incremento se presenta entre un valor mínimo de -0.75 para un ancho de grieta de 18.7m y un valor máximo de -0.37 si el ancho de la grieta es de 149.6m, por lo que el rango de variación del índice de frecuencia en este caso es de 0.38. En tanto que, Al analizar la figura (68 Anexo A) se determina un comportamiento oscilante del índice de frecuencia para la componente X a medida que el ancho de la grieta incrementa gradualmente. Los valores del índice de frecuencia varían entre un mínimo de -0.65 cuando la grieta tiene 18.7m de ancho, y un máximo de -0.32 para un ancho de grieta de 149.6m, así entonces, el rango de variación del índice de frecuencia en este caso en este caso es de 0.78Hz.

### **Altura de grieta de 207m**

Para una altura de grieta (L) de 207m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.30), que los valores del índice de frecuencia para la componente Y tienden a fluctuar a medida que se incrementa el ancho de la grieta. Estos cambios se dan entre un valor máximo de -0.044 cuando el ancho de la grieta es de 103.5m y el valor mínimo es -0.22 para un ancho de grieta de 20.7m, así entonces, el rango de variación del índice de frecuencia en este caso es de 0.176. Por otra parte, al analizar la figura (69 Anexo A), se determina que, de manera similar a la componente Y, los valores del índice de frecuencia para la componente X tienden a disminuir a medida

que el ancho de la grieta se aumenta progresivamente, esta disminución se presenta entre un valor mínimo de -0.44 cuando la grieta es de 124.2m de ancho y un valor máximo de -0.21 para un ancho de grieta de 62.1m, por lo que el rango de variación del índice de frecuencia en este caso es 0.23.

### **Altura de grieta de 227m**

Para una altura de grieta (L) de 227m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (6.31), que los valores del índice de frecuencia para la componente Y tienden a tener un comportamiento oscilante entre un valor máximo de 0.13 cuando el ancho de la grieta es de 90.8m y un valor mínimo de -0.12 para un ancho de grieta de 158.9m mientras se aumenta gradualmente al ancho de la grieta, por lo que el rango de variación del índice de frecuencia para este caso es de 0.25. En tanto que, en base a la figura (70 Anexo A), se determina que, los valores del índice de frecuencia para la componente X Tienden a aumentar a medida que se incrementa progresivamente el ancho de la grieta, este crecimiento se da entre un valor mínimo de -0.55 cuando la grieta es de 22.7m de ancho y un valor máximo de -0.23 para grietas de 90.8m, 136.2m, 158.9m y 181.6m de ancho.

### **Altura de grieta de 247m**

Considerando ahora una altura de grieta (L) de 247m y variando de igual manera el ancho (W) en base a relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, a partir de la figura (6.32), que el índice de frecuencia para la componente Y tiene a aumentar cuando se incrementa paulatinamente el ancho de la grieta, este aumento se da desde un valor mínimo de -0.21 para un ancho de grieta de 24.7m y un valor máximo de 0.06 cuando la grieta tienen 197.6m de ancho, en este orden de ideas, el rango de variación para el índice de frecuencia en este caso es de 0.27. Por otra parte, en base a la figura (71 Anexo A) se observa que el índice de frecuencia para la componente X tiene un comportamiento oscilante, en donde alcanza un valor máximo de -0.21 para un ancho de grieta de 197.6m y un valor mínimo de -0.41 cuando la grieta tiene 148.2m de ancho, por lo que el rango de variación del índice de frecuencia

para este caso es de 0.20.

### **Altura de grieta de 267m**

Considerando ahora una altura de grieta (L) de 267m y variando de igual manera el ancho (W) en base a relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.33), que el índice de frecuencia para la componente Y tiene a incrementar su valor a medida que se aumenta paulatinamente el ancho de la grieta, el aumento se da entre un valor mínimo de -1.03 para un ancho de grieta de 53.4m y un valor máximo de -0.22 cuando la grieta tiene 213.6m de ancho, en este orden de ideas, el rango en el que varía el índice de frecuencia en este caso es de 0.81. Por otro lado, en base a la figura (72 Anexo A) se determina que el comportamiento del índice de frecuencia para la componente X cuando se aumenta gradualmente el ancho de la grieta tiende a incrementar, en donde, este aumento se presenta entre un valor mínimo de -1.03 para un ancho de grieta de 106.8m y un valor máximo de -0.40m cuando la grieta tiene 213.6m de ancho, por lo que el rango de variación del índice de frecuencia en este caso es de 0.63.

### **Altura de grieta de 287m**

Para una altura de grieta (L) de 287m y variando el ancho (W) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.34), que los valores del índice de frecuencia para la componente Y tienden a crecer a medida que se aumenta gradualmente al ancho de la grieta. El incremento en el índice de frecuencia se da entre un valor mínimo de -1.27 para un ancho de grieta de 57.4m y un valor máximo de -0.21 cuando la grieta tiene 229.6m de ancho, así entonces, el rango de variación del índice de frecuencia para este caso es de 1.06. En tanto que, en base a la figura (73 Anexo A), se determina que, los valores del índice de frecuencia para la componente X tienden a aumentar a medida que se incrementa progresivamente el ancho de la grieta, este crecimiento se da entre un valor mínimo de -1.28 cuando la grieta es de 57.4m de ancho y un valor máximo de -0.51 para una grieta de 229.6m de ancho.

**Altura de grieta de 307m**

Dada una altura de grieta ( $L$ ) de 307m y variando el ancho ( $W$ ) en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se observa, a partir de la figura (6.35), que los valores del índice de frecuencia para la componente  $Y$  tienden a aumentar a medida que se incrementa gradualmente el ancho de la grieta. Dicho aumento se da entre un valor mínimo de -1.42 cuando la grieta tiene 92.1m de ancho y un valor máximo de -0.28 para un ancho de grieta de 245.6m, por lo que el rango de variación del índice de frecuencia en este caso es de 1.14. Por otra parte, al analizar la figura (74 Anexo A), se determina que los valores del índice de frecuencia para la componente  $X$  tienden a incrementar mientras que el ancho de la grieta se aumenta gradualmente. El aumento en el índice de frecuencia se da entre un valor mínimo de -1.40 y cuando la grieta tiene 61.4m de ancho y un valor máximo de -0.36 para un ancho de grieta de 245.6m, así entonces, el rango en el que varían los valores de índice de frecuencia en este caso es de 1.04.

**Altura de grieta de 327m**

Considerando ahora una altura de grieta ( $L$ ) de 327m y variando de igual manera el ancho ( $W$ ) en base a relaciones de aspecto  $W/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.8$  se determina, en base a la figura (6.36), que el índice de frecuencia para la componente  $Y$  tiene a aumentar cuando se incrementa paulatinamente el ancho de la grieta, salvo cuando la grieta tiene 261.6m de ancho, valor para el cual, el índice de frecuencia disminuye hasta alcanzar el valor de -0.98. Este incremento en el índice de frecuencia se da desde un valor mínimo de -1.33 para un ancho de grieta de 65.4m y un valor máximo de -0.40 cuando la grieta tiene 228.9m de ancho, en este orden de ideas, el rango de variación para el índice de frecuencia en este caso es de 0.93. Por otra parte, analizando la figura (75 Anexo A) se determina que el índice de frecuencia para la componente  $X$  tiende a incrementar su valor a medida que se aumenta gradualmente el ancho de la grieta, excepto cuando la grieta es de 261.6m de ancho, en la cual, el índice de frecuencia disminuye hasta -0.96. El aumento en el índice de frecuencia se encuentra entre un valor mínimo de -1.51 para un ancho de grieta de 32.7m y un valor máximo de -0.39 cuando la grieta tiene 228.9m de ancho, por lo que el rango de variación del índice de frecuencia para

este caso es de 1.12.

## 7.2. Duración.

En base a las figuras (6.1,6.2, (13 Anexo A), (14 Anexo A), 6.3, (15 Anexo A), (16 Anexo A), 6.4, 6.5) se observa que la duración de los tornillos sintéticos tienden a variar entre 40 y 70s cuando la altura de la grieta es de 167m, 207m, 227m, 2447m, 267m, 287m y 307m, variando el ancho de la grieta en base a las relaciones de aspecto  $W/L = 0,1, 0,2, \dots, 0,8$  para cada altura respectivamente. Por otro lado, al analizar la figura (6.5) tenemos que para una altura de 327m y un ancho de 32.7m la duración del tornillo es mucho mayor que para las geometrías propuestas anteriormente, ya que su duración excede los 250s, algo que se observa mejor en el sismograma de la figura (10 Anexo A), a diferencia de la duración de, por ejemplo, un Tornillo generado en una grieta con una altura de 227m y 68.1m de ancho cuya duración es de 60s aproximadamente, tal como se observa en la figura (7.1) o del Tornillo de la figura (7.2), . Sin embargo, es importante recalcar que la duración de los Tornillos disminuyen a medida de que el ancho de la grieta aumenta, cuando esta tiene una altura fija de 327m.

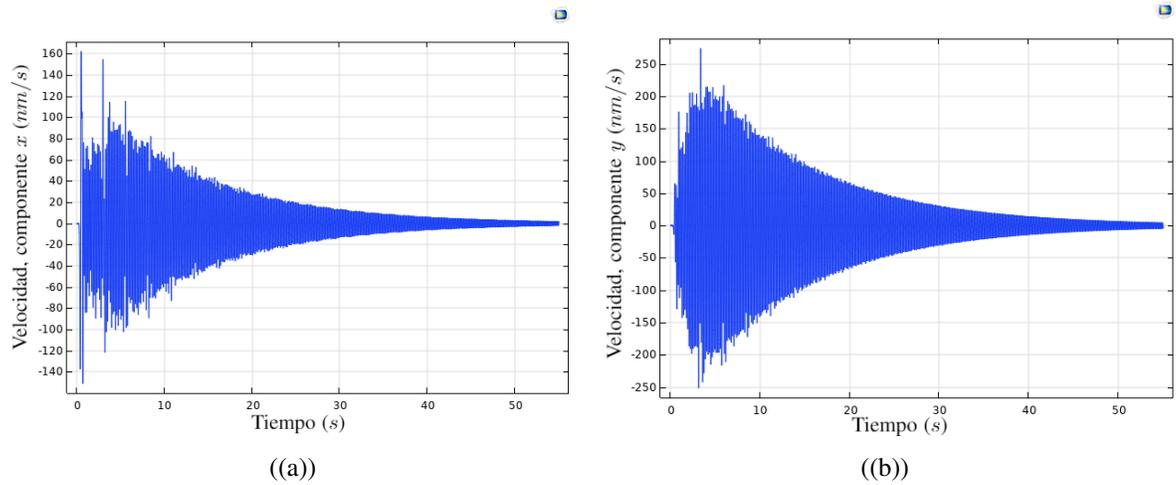


Figura 7.1: Sismogramas de Tornillos generados en COMSOL Multiphysics version 5.5 para una altura de grieta  $L = 227m$  y un ancho  $W = 68,1m$

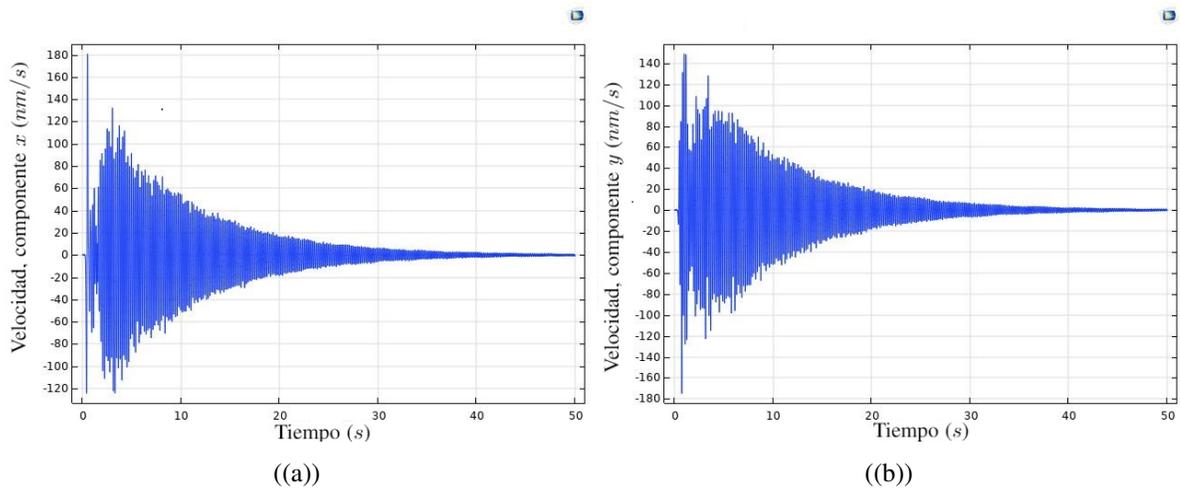


Figura 7.2: Sismogramas de Tornillos generados en COMSOL Multiphysics version 5.5 para una altura de grieta  $L = 267m$  y un ancho  $W = 160,2m$

# Capítulo 8

## Discusión

Se observa una variación mínima en la frecuencia dominante para las diferentes configuraciones geométricas de las grietas, estos valores oscilan entre los  $5Hz$  y  $10Hz$  aproximadamente, producto de que el impulso inicial de energía dentro de la grieta es de  $4Hz$  y de la interacción de las ondas propagándose a través del edificio volcánico hasta llegar al sismómetro. Por su parte, los valores de frecuencia central no varían significativamente para cada altura de grieta analizada cuando se varia el ancho de esta, por lo que se infiere que variaciones en la geometría de la grieta no afectan de manera directa la distribución energética del sismo en el espectrograma, dada la naturaleza monocromática de los sismos tipo Tornillo y los modelos geométricos propuestos para la grieta.

En tanto que, la componente  $x$  del índice de frecuencia es negativo para todas las alturas de la grieta propuestas, dado que los sismos tipo Tornillo son eventos sísmicos de baja frecuencia, sin embargo, cuando se aumenta el ancho de la grieta, los valores tienden a acercarse a cero, lo que indica que la energía en las bajas y altas frecuencias tienden a estabilizarse. Para la componente  $y$  del índice de frecuencia tenemos un comportamiento similar al de la componente  $x$ , sin embargo, para grietas de 227m y 247m de alto, el índice de frecuencia es positivo cuando el ancho es de 45.4m, 68.1m, 90.8m y 123.5m, 148.2m, 197.6m respectivamente. Lo que sugiere que, para estos casos, la mayor parte de la energía de los Tornillos está en la banda de alta frecuencia del espectrograma.

Para la frecuencia centroide, tenemos que tiende a aumentar mínima y paulatinamente a medida que se incrementa el ancho de la grieta para cada altura considerada, esto comportamiento se presenta en las componentes  $x$  y  $y$ , dado que los sismos generados son de baja frecuencia y se caracterizan por ser eventos monocromáticos. Finalmente, la frecuencia de

máxima energía tiende a variar entre  $1Hz$  y  $5Hz$  aproximadamente tanto para componente  $x$  como para la componente  $y$ , lo que muestra una variación de la frecuencia de máxima energía en los Tornillos sintéticos generados no se ve afectada por variaciones significativas en la geometría de la grieta.

# Capítulo 9

## Conclusiones

Mediante el uso del software COMSOL Multiphysics fue posible el modelamiento 2D del edificio volcánico del volcán Galeras, el cual consta principalmente de: una grieta húmeda, el conducto de magma, y el cono volcánico que los rodea. Con este modelo y en base a parámetros físicos que permitieron caracterizar el fluido dentro de la grieta, el magma dentro del conducto y la roca circundante, se generaron sismos sintéticos tipo Tornillo para diferentes configuraciones geométricas de la grieta. En particular, se varió el largo de la grieta desde un valor mínimo de 167m hasta 327m con un salto de 20m, y para cada longitud, se modifica el ancho de la grieta en base a la razón entre ancho y longitud  $W/L = 0,1, 0,2, \dots, 0,8$  con lo que se obtuvo en total 72 sismos sintéticos tipo Tornillo.

Por otro lado, para el análisis cuantitativo de la situación física planteada, se utiliza el software COMSOL Multiphysics, mediante el cual se aplica el método de elementos finitos como recurso para dar solución al sistema de ecuaciones diferenciales que permiten describir el sismo, desde su origen en la grieta húmeda y propagación a través del edificio volcánico, hasta ser recogidas por el sismómetro. En el software se genera un mallado por defecto en el que se asigna el tamaño apropiado de cada dominio dependiendo de la geometría propuesta en el modelo, además, permite recoger información a una tasa de muestreo igual a los sismogramas reales ( $\Delta t = 0,01s$ ) por lo que fue posible el estudio de un amplio rango de frecuencias, incluso superiores a los  $50Hz$ .

Obtenidos los sismogramas, fue posible el estudio de los mismos según cinco parámetros sísmicos: Frecuencia dominante, frecuencia central, frecuencia centroide, frecuencia de máxima energía e índice de frecuencia. Así entonces, se desarrolla un software con el fin de procesar la información obtenida a partir de los sismogramas, calcular los parámetros físicos

y realizar graficas a partir de los datos obtenidos, con el fin de estudiar el comportamiento de estos parámetros para diferentes configuraciones geométricas de la grieta en el modelo.

# Bibliografía

- [1] Servicio Geológico Colombiano. Generalidades Volcán Galeras. *SGC*, 2021.
- [2] Roberto Armando. Torres Corredor. Modelo 3- D del volcán Galeras utilizando tomografía sísmica. *Universidad Nacional de Colombia*, Maestría thesis, 2012.
- [3] L. NARVÁEZ A. ORTEGA B. SILVA J. TORRES R. TORRES D. GOMEZ, C. LAVERDE. Catálogo de señales sísmicas volcánicas de Colombia. *Ingeominas*, Centro Operativo Regional Pasto, 2004.
- [4] Ospina A. L. F Londoño B., J. M. Estructura tridimensional de velocidad de onda P para el volcán Galeras. *Boletín Geológico*, 42:7–24, 2008.
- [5] Murcia H. F. Cortés G. P. Laverde C. A. García, A. M. Simulación de flujos Piróclásticos en el volcán Galeras con el código TITAN2D. *Geología Colombiana*, (Recuperado a partir de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/22508>.):135–162, 2011.
- [6] Diego M.; Ortega E. Adriana M.; Seidl Dieter Torres C., Roberto A; Gómez M. Señales sísmicas tipo tornillo en Galeras y otros volcanes activos. *In Memoria.*, pages 13–13, 2002.
- [7] O. E Cadena Ibarra. *Detección y clasificación automática de registros sísmicos en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto utilizando redes neuronales artificiales*. Departamento de Geociencias, 2011.
- [8] B. Chouet. Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method. 1986.
- [9] B. Chouet. Resonance of a fluid-driven crack: Radiation properties and implications for the source of long-period events and harmonic tremor. 1988.

- [10] B. Chouet. A seismic model for the source of long-period events and harmonic tremor. *In Volcanic seismology*. Springer, Berlin, Heidelberg., D82:pp. 133–156, 1992.
- [11] J. H. Latter. Volcanological observations at tongariro national park. ii: Types and classification of volcanic earthquakes. *Report-Geophysics Division*, 1979.
- [12] B. A. Chouet. Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature*, pages 309–316., 1996.
- [13] B. Chouet. A seismic model for the source of long-period events and harmonic tremor. *In Volcanic seismology*, pages pp. 133–156, 1992.
- [14] Gómez M D. M. Narvàez M L. Torres C, R. A. Unusual seismic signals associated with the activity at Galeras volcano, Colombia, from July 1992 to September 1994. 1996.
- [15] Torres C R. A. Gómez M, D. M. Unusual low-frequency volcanic seismic events with slowly decaying coda waves observed at Galeras and other volcanoes. *Journal of volcanology and geothermal research.*, 77:173–193, 1997.
- [16] Torres C R. A. Seidl D. Hellweg M. & Rademacher H. Gómez M, D. M. Tornillo seismic events at Galéras volcano, Colombia: a summary and new information from broadband three-component measurements. 1999.
- [17] Roberto A. Gómez M. Diego M. Adriana O. E. & Seidl D. Torres, C. Señales sísmicas tipo tornillo en Galeras y otros volcanes activos. *In Memoria*, pages pp. 13–13, 2002.
- [18] F. Acosta. Aplicación del método Sompi en la evaluación temporal de las propiedades características de sismos tipo tornillo en el volcán Galeras. 2013.
- [19] Wyssession M Stein, S. *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. Blackwell Publishing, 2009.
- [20] www.comsol.com. Comsol multiphysics reference manual. 2019.

- 
- [21] L. O. Pereiro. Aprendiendo sobre el método de los elementos finitos. *Ingeniería Mecánica*, 9(3), 7-13, 2006.
- [22] J. T. Celigüeta-Lizarza. Método de los elementos finitos para análisis estructural. 2011.
- [23] P.G Ciarlet. The finite element method for elliptic problems. 1978.
- [24] N. Martínez. Modelamiento computacional de la propagación de ondas en una grieta seca, utilizando método de elementos finitos. 2015.
- [25] Sánchez J. J. Cadena, Ó. E. Conduit resonance models for long-period seismicity at galeras volcano (colombia), during 2004–2010. *Journal of South American Earth Sciences*, 113, 2022.
- [26] Chouet B. A. Kumagai, H. Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B11), 2000.
- [27] Torres R. C. Narváez L. Raigosa J. A. Gómez D. Castonguay R. Stix, J. A model of vulcanian eruptions at galeras volcano, colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77(1-4), 1997.
- [28] West M. E. Power J. A. Buurman, H. Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 eruption of augustine volcano. *The*, 41-57, 2006.