



**Generación de señales sintéticas de eventos sismo-volcánicos del volcán
Cotopaxi mediante el método de *Bootstrap*.**

Pérez Moreno, Brenda Elizabeth

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Electrónica y
Telecomunicaciones

Ing. Román Alcides Lara Cueva PhD.

26 de enero del 2022



Bernda_Perez.pdf

Scanned on: 14:50 January 26, 2022 UTC



El modo de usar este documento es por:
ROMAN
ALCIDES LARA

Identical Words	65
Words with Minor Changes	13
Paraphrased Words	145
Ommited Words	2920



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "Generación de señales sintéticas de eventos sísmo-volcánicos del volcán Cotopaxi mediante el método de Bootstrap." fue realizado por la señorita Pérez Moreno Brenda Elizabeth, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 26 de enero del 2022



Firmado electrónicamente por:
ROMÁN
ALCIDES LARA

Ing. Román Alcides Lara Cueva PhD.

C.C: 1713988218



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, Pérez Moreno Brenda Elizabeth, con cédula de ciudadanía n° 1724159759, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "Generación de señales sintéticas de eventos sismo-volcánicos del volcán Cotopaxi mediante el método de Bootstrap." es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 26 de enero del 2022

Pérez Moreno Brenda Elizabeth

C.C: 1724159759



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, Pérez Moreno Brenda Elizabeth, con cédula de ciudadanía n° 1724159759, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "Generación de señales sintéticas de eventos sísmo-volcánicos del volcán Cotopaxi mediante el método de Bootstrap." en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 26 de enero del 2022

Brenda Elizabeth Pérez Moreno

C.C: 1724159759

Dedicatoria

Dedico este trabajo primero a Dios, gracias por llenarme de bendiciones en mi vida, a mis padres Isidro y Lorena, gracias por su apoyo incondicional y las bendiciones que me brindan a diario, cada logro se debe a ustedes que apoyan mis decisiones y procuran ser parte del proceso, a mis hermanos Israel y Francis que me dan su cariño y compañía, a mi abuelita Grimaneza que se siente orgullosa de mí desde niña gracias por ser mi apoyo y a mi angelito mi abuelito Ignacio que desde el cielo me impulsa a mejorar cada día, gracias por tus consejos, tu apoyo y tu bendición, te quiero.

Brenda Elizabeth Pérez Moreno

Agradecimientos

Agradezco a las personas que son parte del proceso de este trabajo, a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE donde pase duros y buenos momentos que forman parte de toda la experiencia, a mis tutores el Dr. Román Lara y el Ing. Julio Larco que me brindaron su apoyo en cada etapa de este trabajo, a los expertos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional por brindarme la información necesaria, la base de datos y la evaluación de las señales sintéticas en mi trabajo.

A mis amigos, voy a ir por el orden que los conocí, Enver gracias por nunca fallar en la salidas, Mel a mi doramaniática favorita gracias por presentarme otro mundo, Stefy gracias por ser incondicional y tan chévere, Adri mi mejor amiga gracias por ser parte indispensable de mi vida y por tus ocurrencias, Álvaro gracias por cada momento y el apoyo brindado en todo sentido, no los puedo nombrar a todos pero a las personas que me brindaron su amistad y puedo llamarlos amigos gracias por cada momento juntos.

Brenda Elizabeth Pérez Moreno

Índice de Contenidos

Reporte de verificación de similitud	2
Certificado del director del proyecto	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos.....	7
Índice de Contenidos.....	8
Índice de Tablas	12
Índice de Figuras.....	13
Resumen.....	20
PALABRAS CLAVE.....	20
Abstract.....	21
KEY WORDS	21
Capítulo 1	22
Introducción	22
Antecedentes	23
Justificación	25
Alcance del Proyecto	26

Objetivos.....	9
Objetivos.....	27
Objetivo General.....	27
Objetivos Específicos	27
Capítulo 2.....	29
Fundamentación Teórica.....	29
Volcán Cotopaxi.....	29
Desastres Provocados por el Volcán Cotopaxi	30
Provincias Afectadas Frente a una Posible Erupción.....	31
Eventos Sismo-Volcánicos	32
Señales Sintéticas.....	33
Métodos de Generación de Señales Sintéticas.....	34
Método <i>Bootstrap</i>	35
Ventajas del Método	36
Desventajas del Método	37
Transformada de Fourier.....	37
Análisis Matemático.....	38
Análisis Matemático de la Transformada Inversa de Fourier.....	40
Software Matlab	40
Capítulo 3.....	42
Metodología	42

	10
Introducción	42
Base de Datos	42
Desarrollo de Software en Matlab	44
Diagramas de Flujo.....	45
Desarrollo del Código para la Generación de Señales Sinusoidales Sintéticas	45
Uso de la Aplicación	50
Código Desarrollado en Matlab.....	53
Selección de Señales por su Magnitud	55
Selección de Señales por su Fase.....	66
Unión de Magnitud y Fase Sintéticas.....	87
Transformada Inversa de Fourier.....	89
Capítulo 4.....	90
Análisis de Resultados	90
Señales Originales, Semisintéticas y Sintéticas	90
Señales Originales, Semisintéticas y Sintéticas de Eventos LP	90
Señales Originales, Semisintéticas y Sintéticas de Eventos VT.....	93
Señales Originales, Semisintéticas y Sintéticas de Eventos HB	95
Señales Originales, Semisintéticas y Sintéticas de Eventos ICEQUAKE	98
Señales Originales, Semisintéticas y Sintéticas de Eventos REGIONAL	100
Detector y clasificador de eventos de tipo LP Y VT	103

	11
Resultados de Detección y Clasificación de Evento LP.....	105
Resultados de Detección y Clasificación de Señales Semisintéticas.	105
Resultados de Detección y Clasificación de Señales Sintéticas.....	108
Resultados de Detección y Clasificación de Evento VT.....	111
Resultados de Detección y Clasificación de Señales Semisintéticas.	111
Resultados de Detección y Clasificación de Señales Sintéticas.....	115
Clasificador de Eventos de Tipo LP Y VT.....	118
Evaluación de Señales Sintéticas y Semisintéticas Mediante Expertos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.....	122
Capítulo 5.....	127
Conclusiones y Recomendaciones.....	127
Conclusiones	127
Recomendaciones	129
Trabajos Futuros.....	129
Bibliografía	131

Índice de Tablas

Tabla 1 Distribución de Base de datos de señales sismo-volcánicas.	43
Tabla 2 Datos ideales aplicados en el tercer filtro para replicar las fases.	82
Tabla 3 Resultados del formulario sobre señales sintéticas y originales respondido por expertos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.	123
Tabla 4 Resultados del formulario de clasificación de señales según su evento respondido por expertos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. ...	125

Índice de Figuras

Figura 1 Foto del volcán Cotopaxi visto desde el norte.....	30
Figura 2 Superficie afectada en caso de erupción del Volcán Cotopaxi.....	32
Figura 3 Diagramas de las funciones f y f^{\wedge} evaluadas en -1 y 1.	40
Figura 4 Estaciones de la red sismológica del volcán Cotopaxi.	44
Figura 5 Diagrama de flujo de generación de señales sintéticas sinusoidales.	46
Figura 6 Transformada de Fourier y transformada inversa de Fourier de una señal sinusoidal.	47
Figura 7 Transformada de Fourier y transformada inversa de Fourier de una señal sinusoidal sintética.	48
Figura 8 Transformada de Fourier y transformada inversa de Fourier de una señal sinusoidal con ruido añadido.	49
Figura 9 Transformada de Fourier y transformada inversa de Fourier de una señal sinusoidal sintética con ruido añadido.	50
Figura 10 Diagrama de flujo de la aplicación.	51
Figura 11 Interfaz gráfica de la aplicación: Pantalla de Inicio.....	52
Figura 12 Interfaz gráfica de la aplicación: Pantalla de generación de base de datos sintética.....	53
Figura 13 Diagrama de flujo general.....	54
Figura 14 Diagrama de Flujo de selección y Bootstrap de la magnitud de las señales.	56
Figura 15 Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP. Ejemplo 1.....	57
Figura 16 Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP. Ejemplo 2.....	58
Figura 17 Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP. Ejemplo 3.....	59
Figura 18 Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP después del primer filtro. Ejemplo 1.	60

	14
Figura 19 Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP después del primer filtro.	
Ejemplo 2.	61
Figura 20 Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP después del segundo filtro.	
Ejemplo 1.	62
Figura 21 Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP después del segundo filtro.	
Ejemplo 2.	63
Figura 22 Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP sintética. Ejemplo 1.	64
Figura 23 Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP sintética. Ejemplo 2.	65
Figura 24 Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP. Ejemplo 1.	66
Figura 25 Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP. Ejemplo 2.	67
Figura 26 Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP. Ejemplo 3.	67
Figura 27 Diagrama de Flujo de selección y Bootstrap de la fase de las señales.	69
Figura 28 Valor del último punto de la fase que indica el valor de la amplitud.	70
Figura 29 Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es menor a la media.	71
Figura 30 Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es mayor a la media.	72
Figura 31 Fase madre de datos de la media de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es menor a la media.	73
Figura 32 Fase madre de datos de la mediana de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es menor a la media.	74
Figura 33 Fase madre de datos de la media de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es mayor a la media.	75
Figura 34 Fase madre de datos de la mediana de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es mayor a la media.	75

Figura 35 Fase madre de datos de la media suavizada de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es menor a la media.	76
Figura 36 Fase madre de datos de la mediana suavizada de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es menor a la media.	77
Figura 37 Fase madre de datos de la media suavizada de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es mayor a la media.	77
Figura 38 Fase madre de datos de la mediana suavizada de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es mayor a la media.	78
Figura 39 Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el segundo filtro.	79
Figura 40 Fase madre de datos de la media de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el segundo filtro.	80
Figura 41 Fase madre de datos de la mediana de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el segundo filtro.	80
Figura 42 Fase madre suavizada de datos de la media de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el segundo filtro.	81
Figura 43 Fase madre suavizada de datos de la mediana de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el segundo filtro.	81
Figura 44 Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el tercer filtro.	84
Figura 45 Fase madre de datos de la media de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el tercer filtro.	85
Figura 46 Fase madre de datos de la mediana de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el tercer filtro.	85
Figura 47 Fase madre suavizada de datos de la media de una señal sismo-volcánica de	

	16
tipo LP sintética después de ser aplicado el tercer filtro.	86
Figura 48 Fase madre suavizada de datos de la mediana de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el tercer filtro.....	86
Figura 49 Magnitud de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética.....	88
Figura 50 Magnitud de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética aplicada el sistema espejo, simétrica a los primeros 4096 puntos.	88
Figura 51 Señal original sismo-volcánica de tipo LP, su transformada de Fourier y su transformada inversa de Fourier.....	91
Figura 52 Magnitud de una señal sintética, fase de una señal original y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo LP.....	91
Figura 53 Magnitud de una señal original, fase de una señal sintética y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo LP.....	92
Figura 54 Magnitud de una señal sintética, fase de una señal sintética y una señal sintética sismo-volcánica de tipo LP.	92
Figura 55 Señal original sismo-volcánica de tipo VT, su transformada de Fourier y su transformada inversa de Fourier.....	93
Figura 56 Magnitud de una señal sintética, fase de una señal original y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo VT.	94
Figura 57 Magnitud de una señal original, fase de una señal sintética y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo VT.	94
Figura 58 Magnitud de una señal sintética, fase de una señal sintética y una señal sintética sismo-volcánica de tipo VT.....	95
Figura 59 Señal original sismo-volcánica de tipo HB, su transformada de Fourier y su transformada inversa de Fourier.....	96
Figura 60 Magnitud de una señal sintética, fase de una señal original y una señal	

	17
semisintética sismo-volcánica de tipo HB.	96
Figura 61 Magnitud de una señal original, fase de una señal sintética y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo HB.	97
Figura 62 Magnitud de una señal sintética, fase de una señal sintética y una señal sintética sismo-volcánica de tipo HB.	97
Figura 63 Señal original sismo-volcánica de tipo ICEQUAKE, su transformada de Fourier y su transformada inversa de Fourier.	98
Figura 64 Magnitud de una señal sintética, fase de una señal original y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo ICEQUAKE.	99
Figura 65 Magnitud de una señal original, fase de una señal sintética y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo ICEQUAKE.	99
Figura 66 Magnitud de una señal sintética, fase de una señal sintética y una señal sintética sismo-volcánica de tipo ICEQUAKE.	100
Figura 67 Señal original sismo-volcánica de tipo REGIONAL, su transformada de Fourier y su transformada inversa de Fourier.	101
Figura 68 Magnitud de una señal sintética, fase de una señal original y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo REGIONAL.	101
Figura 69 Magnitud de una señal original, fase de una señal sintética y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo REGIONAL.	102
Figura 70 Magnitud de una señal sintética, fase de una señal sintética y una señal sintética sismo-volcánica de tipo REGIONAL.	102
Figura 71 Pestaña de configuración de operación automática, donde se define el número de señales a ingresar, formatos y datos de configuración.	103
Figura 72 Pestaña de ruta de detección de señales.	104
Figura 73 Pestaña de procesamiento de detección y clasificación de señales micro-	

	18
sísmicas.	104
Figura 74 Pestaña del registro histórico de las señales procesadas, indica puntos de inicio, fin, tipo, duración, nombre del archivo y número de detecciones.	105
Figura 75 Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 1 a la 36.	106
Figura 76 Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 36 a la 73.	106
Figura 77 Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 64 a la 100.	107
Figura 78 Resultados de la clasificación de las señales semisintéticas.	108
Figura 79 Ruta y nombre de los archivos de las señales sísmicas.	109
Figura 80 Resultados de las señales sintéticas evaluadas de la 1 a la 42.	109
Figura 81 Resultados de las señales sintéticas evaluadas de la 38 a la 77.	110
Figura 82 Resultados de las señales sintéticas evaluadas de la 60 a la 100.	110
Figura 83 Resultados de la clasificación de las señales sintéticas.	111
Figura 84 Ruta y nombre de los archivos de las señales sísmicas.	112
Figura 85 Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 1 a la 9.	112
Figura 86 Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 11 a la 45.	113
Figura 87 Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 44 a la 79.	113
Figura 88 Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 64 a la 100.	114
Figura 89 Resultados de la clasificación de las señales semisintéticas.	115
Figura 90 Ruta y nombre de los archivos de las señales sísmicas.	116
Figura 91 Resultados de las señales sintéticas evaluadas de la 1 a la 36.	116
Figura 92 Resultados de las señales sintéticas evaluadas de la 36 a la 71.	117
Figura 93 Resultados de las señales sintéticas evaluadas de la 64 a la 100.	117
Figura 94 Resultados de la clasificación de las señales sintéticas.	118
Figura 95 Resultados de clasificación de 2000 señales sintéticas de eventos LP.	119
Figura 96 Resultados de clasificación de 2000 señales sintéticas de eventos VT.	120

Figura 97 Resultados de clasificación balanceada de 1000 señales sintéticas de eventos LP y 1000 señales sintéticas de eventos VT.	121
Figura 98 Ejemplo de pregunta que consta el formulario.	122

Resumen

Vivimos en un mundo de información, que aportan conocimiento que se aplica a diferentes áreas. Las personas encargadas de analizar dicha información logran múltiples objetivos con sus trabajos en diferentes actividades y estudios, las bases de datos que utilizan se obtienen y se generan mediante instrumentos de medición y otros métodos de adquisición de datos. Pero conseguir estos datos conlleva dificultades, donde muchos de ellos suelen necesitar de un periodo de tiempo, recursos económicos, equipos, variables físicas como temperatura, presión, concentración de gases, entre muchos más, por estas razones nace la necesidad de desarrollar bases de datos sintéticas a partir de una base original, la cual es útil para que los investigadores puedan tener acceso a la información y puedan continuar con sus estudios.

El método de muestreo aleatorio para la generación de datos sintéticos propuesto en este trabajo es el método de *Bootstrap* que junto con la transformada de Fourier, analizan las señales micro-sísmicas del volcán Cotopaxi en sus componentes de magnitud y fase, así se obtienen las mejores características de cada uno, y se generan datos sintéticos que cumplen con las características de los datos originales, finalmente se obtiene bases de datos sintéticas de señales de eventos micro-sísmicos, que las evaluaron expertos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, detectores y clasificadores desarrollados en nuestro grupo de investigación con resultados del 100% en LP, 95% en VT y 97% entre VT y LP en la clasificación de señales sintéticas.

PALABRAS CLAVE:

- **BASE DE DATOS SINTÉTICOS.**
- **MÉTODO *BOOTSTRAP*.**
- **TRANSFORMADA DE FOURIER.**

Abstract

We live in a world of information, which provide knowledge that is applied to different areas. People in charge of analyzing said information achieve multiple objectives with their work in different activities and studies, databases used are obtained and these are generated by means of measuring instruments and other data acquisition methods.

But obtaining this data entails difficulties, where many of them usually need a period of time, economic resources, equipment, physical variables such as temperature, pressure, gas concentration, among many others, for these reasons. The need arises to develop synthetic databases from an original base, which is useful for researchers to have access to information, and to continue their studies.

The random sampling method for the generation of synthetic data proposed in this work is *Bootstrap* method which, together with the Fourier transform, analyzes the micro-seismic signals of the Cotopaxi volcano in their magnitude and phase components, so you get the best features of each one, and synthetic data are generated that meet the characteristics of the original data, finally synthetic databases of micro-seismic event signals are obtained, which were evaluated by experts from the Geophysical Institute of the National Polytechnic School, detectors and classifiers developed in our research group with results of 100% in LP, 95% in VT and 97% between VT and LP in the classification of synthetic signals.

KEY WORDS:

- **SYNTHETIC DATABASE.**
- **BOOTSTRAP METHOD.**
- **FOURIER TRANSFORM.**

Capítulo 1

Introducción

Las múltiples investigaciones que se realizan continuamente, han originado el consumo masivo de bases de datos, con una demanda tan alta y necesaria para los investigadores que se ha planteado la necesidad de buscar nuevas alternativas para obtener datos y continuar con múltiples investigaciones, esta necesidad proviene porque al momento de obtener los datos estos presentan limitaciones físicas, económicas, estructurales, entre otras más, por este motivo la generación de datos sintéticos entre sus beneficios se encuentra superar el límite de tiempo de espera y ahorro de recursos frente a la obtención de datos generados, el uso de modelos estadísticos y comportamientos de gradientes de señales es uno de los métodos utilizados para generar nuevos datos (León F., Rodríguez Lozano, Cubero Fernández, & Palomares, 2019).

Otro método de generación de datos sintéticos es el uso de *wavelets* es en este caso de registros sísmicos donde se observó que se ajustan a señales reales mediante la generación de acelerogramas, donde interviene el ajuste espectral, escalado lineal y el ajuste en el dominio de la frecuencia, la funcionalidad matemática de *wavelets* se encuentra tanto en el dominio del tiempo y la frecuencia, característica que permite trabajar con señales no estacionarias como son las señales sísmicas (Flores López & Ayes Zamudio, 2018).

Además, los métodos de detección en el ámbito industrial son de suma importancia para facilitar la detección de irregularidades en procesos, el análisis de señales es fundamental para el desarrollo de estos procesos, para obtener estos datos

y aumentar la cantidad de información, el uso de señales sintéticas son útiles para entrenamientos para resolver problemas futuros y aumentar el rendimiento del desarrollo de algoritmos en diversos entornos y características (García Cantalapiedra, 2017).

Para la generación de las señales sintéticas el uso de métodos de remuestreo de datos son indispensables, existen múltiples métodos como se nombraron anteriormente, el método usado en el presente trabajo es el método de *Bootstrap* que presenta características de remuestreo que usan los datos originales, por este motivo es de mucha utilidad para las señales micro-sísmicos, en el trabajo de (Ledesma, 2008) indica que este método permite resolver problemas relacionados con la estimación de intervalos de confianza, ya que es capaz de simular un proceso de muestreo aleatorio de los datos.

Este trabajo se complementa con el uso de técnicas de análisis de datos como se indica en el trabajo de (Bobadilla, Gómez, & Bernal, 1999), la transformada de Fourier se presenta con un enfoque más didáctico para que sea fácilmente entendido por las personas que no están tan relacionadas con las matemáticas y explica como su función es el traspaso de señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, el autor en (Duoandikoetxea, 2003) indica que el análisis en muestras presenta ventajas en la manipulación de los datos y en el dominio de la frecuencia se pueden analizar más propiedades y características por este motivo es útil conocer sobre qué técnica presenta mayores ventajas para el desarrollo del estudio.

Antecedentes

En la actualidad, la adquisición de datos se ha convertido en el pilar de grandes

investigaciones, con la data obtenida se han realizado grandes descubrimientos en múltiples áreas y estudios, pero para obtener estas bases de datos se debe recurrir a múltiples medios que dependen según la clase de estudio a realizarse, en muchos casos representan costos elevados por el equipo humano y tecnológico a utilizarse, grandes distancias para obtener la información, múltiples equipos, entre otras dificultades.

Por los motivos mencionados, los investigadores han limitado el desarrollo de sus estudios, obtener la data significativa para un estudio representa gran parte del éxito del desarrollo de la investigación. Estas son las razones para el desarrollo de bases de datos sintéticas que parten de una base de datos original.

El uso de la técnica de *Bootstrap* se ha popularizado gracias al gran procesamiento de equipos que pueden manejar de forma eficaz el remuestro de datos. La técnica se basa en el remuestro de datos aleatoriamente, con la ayuda de esta técnica se pueden generar datos aleatorios que son utilizados especialmente en análisis estadísticos.

Con la demanda de datos, se ha incrementado la necesidad del desarrollo de aplicaciones o software que simulen estos datos con un porcentaje alto de confiabilidad y cumplan con las características de los datos originales.

Las bases de datos que se han obtenido mediante el uso de sensores en volcanes han necesitado varios recursos que limitan la liberación de esta información. En Ecuador la entidad encargada de la monitorización sísmica es el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) que tiene bases de datos de los volcanes que se monitorizan constantemente, en especial el volcán Cotopaxi que presenta un

alto riesgo si entra en erupción, las bases de datos que provienen de este volcán son limitadas por los propios instrumentos de medida y también del volcán.

Justificación

Una investigación se fundamenta en los datos que se obtienen o que son analizados, donde se pueden obtener de diversos medios como encuestas, sensores, entre otros, en la mayoría de casos los investigadores no pueden continuar con su trabajo porque las bases de datos son limitadas, difíciles de conseguir o presentan un costo elevado para obtenerlas, por este motivo muchas investigaciones no continúan, la información a ser manejada no se puede inventar porque el análisis no llegaría a una respuesta real y confiable.

Para que la información sea confiable existen métodos de remuestreo que presentan características propias a la información original una de ellas es el método de *Bootstrap* que es un remuestreo que se utiliza para aproximar la distribución en el muestro de un estadístico, se utiliza para el desarrollo de señales sintéticas a partir de los datos obtenidos, es una vía que si se maneja adecuadamente puede llegar a ser confiable, porque las señales generadas se basan en señales reales, es de gran ayuda para los investigadores que disponen de base de datos limitadas o que tardan mucho tiempo en generar nuevas bases de datos actualizadas un ejemplo es obtener datos de sensores que guardan información de meses o años para generar una tendencia o analizar un cambio, como estas bases presentan dichos problemas, los investigadores no pueden continuar su análisis por este motivo ellos necesitan bases que son similares a las originales y avanzar en su trabajo.

Dentro de las señales volcánicas que se tiene a disposición se encuentran

señales de diferentes eventos como de largo período (LP), de terremotos vulcano tectónicos (VT), híbridos (HB), regionales (REGIONAL) y debido al rompimiento de hielo (ICEQUAKE), el evento que presenta mayor cantidad de señales son de tipo LP, luego VT y de las últimas tres se tiene una cantidad muy escasa para ser analizadas, por estos motivos no se ha desarrollado algoritmos de detección, clasificación, entre otros, de los eventos con escasas señales y de los evento que han sido analizados y se ha trabajado en múltiples investigaciones son los LP y VT que representan la mayoría de la información de las bases de datos de las señales micro-sísmicos, los eventos que no han sido objeto de investigación por su escasa información son los híbridos, regionales y icequake.

Por los motivos mencionados es necesario generar señales confiables para poder desarrollar una base de datos balanceada que pueda ser utilizada para la generación de conocimiento y estimar que clase de evento sucede al ser analizado mediante los expertos del IGEPN quienes evalúan las señales generadas con el respectivo reconocimiento de evento.

Alcance del Proyecto

En el presente trabajo de investigación se realiza una aplicación desarrollada en el software de Matlab que es amigable con el usuario mediante una aplicación e interfaz gráfica que sirve para la generación de base de datos sintéticos.

Primero se realiza un levantamiento de información acerca de los eventos sismo-volcánicos que se producen en el volcán Cotopaxi, después se realiza el levantamiento de estado del arte correspondiente a métodos de generación de señales sintéticas junto con el análisis del método *Bootstrap* sus ventajas y desventajas de su

uso en el desarrollo de remuestreo aleatorio de datos. Una vez terminado el levantamiento de información teórica, se continúa con el desarrollo de generación de señales sintéticas a partir de señales sinusoidales y el respectivo análisis a partir de características y gráficas.

La segunda parte se centra en el desarrollo de la generación de señales sintéticas de eventos micro-sísmicos obtenidos a partir de una base de datos original de eventos micro-sísmicos del volcán Cotopaxi, base que ha sido provista por el IGEPN.

Finalmente se realiza el protocolo de pruebas mediante el uso de un clasificador de eventos y se evalúan las señales mediante la categorización del IGEPN, donde se encarga del reconocimiento y categorización de la base de datos generada.

Para ello se han planteado los siguientes objetivos:

Objetivos

Objetivo General

Implementar un sistema de generación de señales sintéticas de eventos sismo-volcánicos del volcán Cotopaxi mediante el método de Bootstrap.

Objetivos Específicos

- Implementar una base de datos sintéticas a partir de señales sinusoidales.
- Analizar el comportamiento de señales sintéticas sinusoidales mediante la transformada de Fourier y su inversa con características propias de las señales.

- Generar una base de datos sintéticas a partir de señales sismo-volcánicas.
- Analizar las señales sintéticas mediante el método de la transformada de Fourier, su inversa mediante las gráficas obtenidas de los datos generados.
- Evaluar las señales generadas con los expertos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

Capítulo 2

Fundamentación Teórica

En el capítulo 2, se presenta el fundamento teórico que permite comprender la elaboración del presente trabajo. En primer lugar, se trata sobre los eventos sismo-volcánicos, antecedentes y estado actual del volcán Cotopaxi, después se trata sobre los métodos de generación de señales sintéticas, análisis de la transformada de Fourier. Finalmente se trata sobre el método de *Bootstrap* sus ventajas y desventajas en la generación de datos aleatorios.

Volcán Cotopaxi

El volcán Cotopaxi es un volcán activo que durante el tiempo ha demostrado tener erupciones devastadoras, este se muestra en la Figura 1, se encuentra localizado sobre la Cordillera Oriental en la provincia que lleva el mismo nombre Cotopaxi, en la ciudad de la Latacunga, su altura es de 5897 msnm, es considerado uno de los volcanes más peligrosos del mundo debido a su alta actividad por este motivo es uno de los más monitoreados, su última gran erupción ocurrió en el año 1877 provocó no solo altas pérdidas económicas, también humanas, por este motivo representa un gran peligro para las comunidades que viven alrededor del volcán, en su última erupción llegó a destruir hasta el Valle de los Chillos, actualmente representa un peligro para la alta densidad de personas que viven en zonas de alto impacto de afectación si el volcán llegará a entrar en erupción (Toapaxi, Torres, Hamad, Vera, & Méndez, 2019).

Figura 1

Foto del volcán Cotopaxi visto desde el norte



Nota. Es una fotografía del volcán Cotopaxi. Tomado del *IGEPN*, foto tomada por S. Hidalgo (<https://www.igepn.edu.ec/cotopaxi>).

Desastres Provocados por el Volcán Cotopaxi

Durante los periodos de tiempo que el volcán se ha encontrado activo ha causado múltiples daños como flujos piroclásticos, emisiones permanentes de ceniza, coladas de lava, sismo-volcánicos, gases volcánicos, domos de lava, flujos de lodo y escombros, avalanchas de escombros que han afectado la vida humana y natural cercana a la zona por este motivo es uno de los volcanes más peligrosos del Ecuador, las comunidades que se encuentran y han vivido muchos años cerca del volcán han expresado que han aprendido a convivir con esta amenaza continua y han seguido con sus actividades con normalidad, también han declarado que si se encuentran en alerta de cualquier cambio de estado del volcán (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2015).

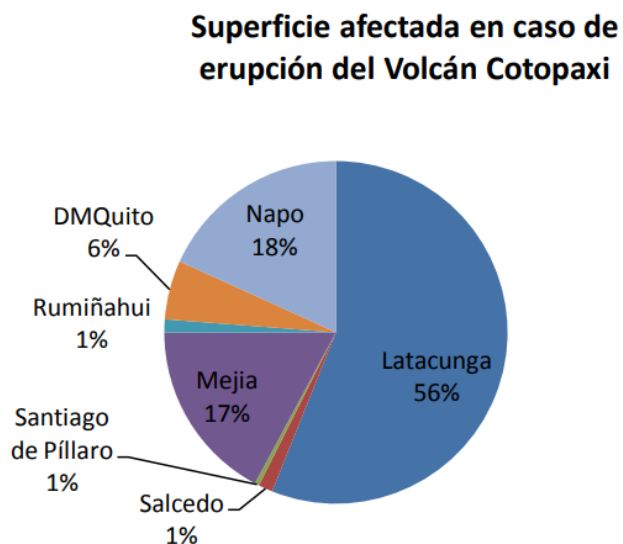
Provincias Afectadas Frente a una Posible Erupción

Las provincias más afectadas en el caso que el volcán Cotopaxi entre en erupción es la provincia de Cotopaxi y Pichincha, debido a la magnitud, alcance y volumen del proceso eruptivo del volcán, las zonas con mayor riesgo son en el Valle de los Chillos, Mejía, Cumbayá en la provincia de Pichincha, los cantones de Salcedo y Latacunga en la provincia del Cotopaxi, también afectaría la ciudad de Ambato en la provincia de Tungurahua y el cantón de Archidona en la provincia de Napo (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2015).

La Figura 2 indica un diagrama de pastel con los porcentajes de las superficies afectadas en el caso de erupción, el análisis fue realizado porque a mediados de abril del 2015 la actividad sísmica incrementó, acompañada de emisiones de dióxido de azufre (SO₂) por este motivo se realizó el estudio sobre la superficie afectada para indicar las provincias que sufren riesgo en el periodo de tiempo cuando el volcán se encontró en alerta (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2015).

Figura 2

Superficie afectada en caso de erupción del Volcán Cotopaxi



Nota. Tomado de Subsecretaría de Gestión de la Información y Análisis de Riesgos – SGIAR, por Gestión de Riesgos, 2015, PLAN DE CONTINGENCIA AMENAZA DE ERUPCIÓN DEL VOLCÁN “COTOPAXI”.

Eventos Sismo-Volcánicos

Dentro de los eventos que se producen en un volcán es importante conocer de donde provienen para el conocer las posibles interacciones entre movimientos telúricos volcánicos y procesos volcánicos, en especial su monitorización y clasificación para poder emitir una alerta temprana.

Clasificar señales sísmicas es muy importante al descubrir micro-sismos que permiten identificar que el volcán entre en estado de erupción provocando desastres a su alrededor, los eventos conocidos como VT y LP, son los más generales y son clasificados mediante una inspección visual (Alvarez, Henao, & Duque, 2007).

Las señales que han sido detectadas por los instrumentos y sensores que se encuentran en la monitorización del volcán Cotopaxi han captado eventos LP, VT, eventos híbridos (HYB) y tremores (TRE), para la clasificación de estos eventos los especialistas los examinan a cada uno para determinar a cuál evento pertenece (Lara Cueva, Paillacho, & Villalva, 2016).

La sismología resulta ser una herramienta eficaz al tratarse de la monitorización de volcanes con ayuda de sismómetros que se encuentran siempre en función de detectar vibraciones producidas en el volcán Cotopaxi. Todos los eventos registrados presentan características y patrones que sirven para identificar y la clasificación de eventos sismo-volcánicos (Lara Cueva, Benítez, Carrera, Ruiz, & Rojo Álvarez, 2016).

Señales Sintéticas

Las señales nos rodean continuamente y son parte de nuestro desarrollo tecnológico y natural porque siempre se encuentran presentes, una de las herramientas para la recolección de datos que se interpretan en señales son los sensores, utilizados ampliamente en múltiples campos de investigación, aunque con el amplio uso de estos sensores no garantiza la facilidad de conseguir señales, dado que existen múltiples adversidades como superficies inaccesibles, entornos con dificultades de temperatura, incluso existen motivos legales que no permiten el uso de estas señales al ser propiedad privada.

Por estos y muchos más motivos se ha popularizado el uso de datos y señales sintéticas que emulen el comportamiento de las reales y presenten ventajas sobre estas como la robustez al ser generadas a detalle y que no provienen de sensores que pueden enviar datos erróneos al encontrarse en situaciones de adversidad, también

garantizan seguridad al ser generadas con un nivel alto de detalle y realismo para los estudios en donde se utilice (León F., Rodríguez Lozano, Cubero Fernández, & Palomares, 2019).

El uso de señales sintéticas ayuda con investigaciones que no han logrado concluir por problemas al conseguir base de datos, que son las pilares en dichos estudios, el uso de generadores de señales sintéticas ha permitido llevar a cabo con éxito múltiples pruebas en varios estudios con mayor cantidad de resultados que son más representativos en comparación con señales reales (García Cantalapiedra, 2017).

Métodos de Generación de Señales Sintéticas

Existen múltiples métodos para generar señales sintéticas en especial en el estudio a realizarse donde se trabaja con diferentes variables según la necesidad de cada estudio.

En (Frasch, Lodwich, Shafait, & Breuel, 2011) los autores informan que la generación de señales sintéticas de su trabajo se basa en el método *WGKS (White Gaussians on k-simplex)*, basándose en aprendizaje automático y la generación de datos mediante una distribución gaussiana, su trabajo garantiza datos sintéticos con propiedades estadísticas globales y específicas, también proponen reproducir experimentos con conocimiento de los parámetros previamente utilizados y controlan la tasa de error de Bayes.

Otro método utilizado al generar bases de datos sintéticas, que se basa en el método de árboles de decisión junto con una modificación del algoritmo *ID3 (Iterative Dichotomiser 3)*, como en el caso anterior estos datos también se generaron junto con aprendizaje automático, este método trabaja con la posición de variables y distribución

del espacio, el autor afirma que es puede ser usado intuitivamente con una estimación aceptable, orientada y localizada en el espacio (Peng & Hanke, 2016).

Los estudios antes mencionados son investigaciones que se han tratado en la última década con el apoyo de tecnología que el trabajo de (Theodoridis, Jefferson, & Silva, 1999) realizado muchos años antes no contaba, donde proponen el método de acceso espacio-temporal, donde los datos sintéticos simulen una variedad de escenarios de la vida real, para realizar esto ellos utilizan un algoritmo denominado “*Generate Spatio Temporal Data*”(GSTD), el cual genera datos móviles que siguen a un conjunto de distribuciones.

Muchos investigadores han adaptado estos métodos para la generación de datos sintéticos, en varias investigaciones se presentan varios estudios con las ventajas y desventajas según el criterio usado y el enfoque de la investigación en especial en la aplicación, en el campo específico de la generación de señales sintéticas en cada uno de sus trabajos.

Método *Bootstrap*

Con el uso de la tecnología y los beneficios que presenta, ha aumentado la capacidad de análisis de datos que antes requería de mucho tiempo para realizar, peor con la cantidad de datos que ahora pueden ser analizados, en especial con el remuestreo de datos, como es el método de *Bootstrap*.

Al hablar de remuestreo es fácil asociarlo con el método de *Bootstrap*, el cuál estima probabilidades empíricas a partir de datos propios, se basa en la extracción de muestras de los datos originales en un número alto de muestras, por este motivo junto con la tasa alta de procesamiento de los computadores, ha sido más sencillo el análisis

de muestras, por este motivo los investigadores se han enfocado en el análisis de datos al utilizar la técnica de *Bootstrap*. El autor (Ledesma, 2008) también aclara que también puede ser aplicado en fines exploratorios, descriptivos, evaluar y replicar los resultados de un estudio.

Ventajas del Método

El método ha sido tan usado en múltiples estudios donde los investigadores han encontrado grandes ventajas en su uso como las que se presentan a continuación:

- Es una técnica útil por su capacidad de enfocarse en el análisis de datos, presenta un enfoque general con el uso de información verificada, y como su uso es sencillo resulta un método atractivo para el remuestreo de datos (Ledesma, 2008).
- Al momento de usar el remuestreo *Bootstrap* presenta tres categorías que se adaptan al estudio a realizarse, en este caso se clasifican en (1) *Bootstrap* paramétrico, en este caso se generan nuevos datos al mantener fijas las variables explicativas y también remuestreo con reemplazos residuales y una distribución normal, (2) *Bootstrap* residual esta categoría genera los nuevos datos al mantener las variables fijas, remuestreo con reemplazo de los residuales brutos observados y (3) *Bootstrap* en casos que generan nuevos datos mediante el remuestreo con el reemplazo de los vectores de observación r-dimensional originales de las muestras originales (Vallejo Seco, Ato García, Fernández García, & Livacic Rojas, 2013).

Desventajas del Método

Como toda técnica usada presenta características que no pueden ser usadas en todos los casos o estudios, entre las desventajas que presenta el método encontramos las siguientes:

- El momento de determinar el tamaño mínimo de la muestra y el número de réplicas que son necesarias para que las distribuciones de las muestras se aproximen con un rango de confianza alto a la verdadera, al enfrentar problemas paramétricos como lo explica en (Ramírez, Barrera, & Correa , 2013).
- El autor (Andrews, 2000), afirma que las varianzas estimadas de los coeficientes aleatorios generalmente son tan pequeñas y por este motivo también lo son las varianzas verdaderas que sus coeficientes podrían ser cero y determina que por este motivo el método no es consistente.
- Como la distribución de *Bootstrap* tiende a ser variable, la forma y dispersión no se puede estimar con precisión, por este motivo el método no es confiable para parámetros estadísticos como la mediana y cuartiles en el escenario que el tamaño de las muestras sea pequeño (Hesterberg, Monaghan, Moore, Clipson, & Epstein, 2003).

Transformada de Fourier

Al hablar de análisis matemáticos es clásico hablar sobre las series e integrales de Fourier. Se consideraron un importante tema de estudio desde su aparición en el siglo XVIII, dentro de la teoría es importante conocer sobre la transformada de Fourier en casos de investigación con análisis estadísticos.

La teoría de la transformada de Fourier, ha usado integrales de Lebesgue desde el principio y, por supuesto, también es conveniente usar la forma compleja. La integral de Lebesgue guarda los parámetros en la demostración porque puede obtener resultados más poderosos y es más fácil de aplicar (como el teorema de convergencia de dominación y el teorema de Fubini). La dificultad de definir transformadas de Fourier para funciones no integrables también requiere recursos de análisis no elementales para adaptarse mejor a la integración de Lebesgue (Duoandikoetxea, 2003).

Análisis Matemático

La serie de Fourier representa una función definida en un intervalo de línea recta, o de manera equivalente, representa una función periódica en una línea recta. Para representar la función definida en toda la línea en lugar de ser periódica, se reemplaza por la transformada de Fourier. Ahora conviene trabajar de forma compleja, como se muestra en las siguientes ecuaciones.

Se puede deducir la expresión de la transformada de Fourier a partir de la serie, de este modo se deduce en la siguiente fórmula.

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{2l} \int_{-l}^l f(t) e^{-\pi i n t / l} dt \right) e^{\pi i n x / l}. \quad (1)$$

Si se supone que f es una función periódica de periodo $2l$, sí, $\xi_n = n/2l$

$$h(\xi) = \int_{-l}^l f(t) e^{-2\pi i \xi t} dt,$$

al reemplazar se obtiene,

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} (\xi_n - \xi_{n-1}) h(\xi_n) e^{2\pi i \xi_n x}. \quad (2)$$

La ecuación (2) presenta el aspecto de una suma de Riemann de este modo se tendría la siguiente igualdad,

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-2\pi i \xi t} dt \right] e^{2\pi i \xi x} d\xi, \quad (3)$$

la fórmula (3), es conocida como la transformada de Fourier de f .

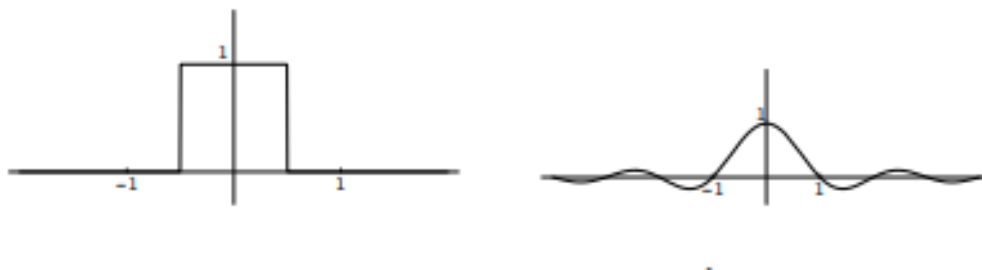
Si f es una función integrable definida en \mathbb{R} , su transformada será representada como \hat{f} , y está dada por:

$$\hat{f}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i x \xi} dx, \quad (4)$$

la definición varía con el cambio de las constantes, en este caso se habla de $-ix\xi$. De esta forma se realiza una descomposición de f en componentes, de este modo aparece un rango continuo de frecuencias en todo \mathbb{R} , en cada frecuencia ξ , le corresponde a una frecuencia $\hat{f}(\xi)$, lo que será un número complejo, como se presenta en la Figura 3 las funciones son evaluadas en -1 y 1 y presentan las siguientes formas (Duoandikoetxea, 2003).

Figura 3

Diagramas de las funciones f y f^{\wedge} evaluadas en -1 y 1 .



Nota. Tomado del libro de Lecciones sobre las series y transformadas de Fourier (pág. 81), figura 11.1 (Duoandikoetxea, 2003).

Análisis Matemático de la Transformada Inversa de Fourier

La función definida en todo \mathbb{R} , se puede suponer que se encuentra en el intervalo infinito en el tiempo $[-\infty, \infty]$. Se puede representar con la transformada integral:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(w)H(w, t) dw, \quad (5)$$

donde las transformadas inversas se llaman a las funciones $K(w, t)$ y $H(w, t)$.

Si las transformadas se definen en un rango de $[-\infty, \infty]$, y un periodo $\frac{1}{2\pi}$ (Bobadilla, Gómez, & Bernal, 1999), la función integrable está definida por:

$$\mathcal{F}^{-1}\{F(w)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w)e^{j\omega t} dw = f(t). \quad (6)$$

Software Matlab

Un software con múltiples herramientas desarrollado para un análisis iterativo y

analítico que se especializa en la matemática y estadística de datos. Dentro de las herramientas que dispone son desarrollo de algoritmos, gráficas, análisis de datos, creación de apps, uso de Matlab con múltiples lenguajes, hardware, cálculo paralelo, cálculo en la nube, entre otras.

Matlab es un programa utilizado en gran variedad de campos como por ejemplo en sistemas de control, *Deep learning*, procesamiento de imágenes, mantenimiento predictivo, *machine learning*, procesamiento de datos y entre otras aplicaciones (MathWorks, 2021).

Capítulo 3

Metodología

Introducción

Este capítulo se clasifica en los siguientes apartados:

Primero, en la clase de eventos sismo-volcánicos que provienen del volcán Cotopaxi, explicación y aplicativos del método Bootstrap.

Segundo, el desarrollo de la aplicación elaborada en el software MATLAB y herramientas de procesamiento de señales como la transformada de Fourier. Dentro de este apartado se encuentra el procesamiento previo con señales conocidas como son las señales sinusoidales, después se procede a aplicar el mismo procedimiento a las señales sismo-volcánicas y realizar el análisis con los métodos aplicados en las señales sinusoidales.

Finalmente se procede a evaluar las señales mediante el reconocimiento y la categorización con aplicaciones que detectan y clasifican señales micro-sísmicas.

Base de Datos

En el repositorio del IGEPN se encuentran dos bases de datos que se encuentran disponibles en https://www.igepn.edu.ec/eseismic_web_site/index.php. La primera base de datos contiene las señales micro-sísmicas (MigSigV1) y la otra contiene una base con 84 características (SeisMenchV1). La base utilizada en el presente proyecto es MigSigV1, la cual se constituye de 1187 señales entre VT, LP, HB, REGIONAL y ICEQUAKE de acuerdo a la Tabla 1.

Las señales fueron adquiridas durante el 2012, enero del 2013, enero del 2014, enero del 2018 y enero a marzo del 2019.

Tabla 1

Distribución de Base de datos de señales sismo-volcánicas.

Evento	Número de señales
Vulcano Tectónicos (VT)	101
Largo Periodo (LP)	1044
Híbrido (HB)	8
REGIONAL	21
ICEQUEAKE	7

Nota. Base de datos proporcionada por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional

Las estaciones que adquirieron estas señales son BREF y VC1 con frecuencias de muestreo de 50 Hz y 100 Hz, respectivamente. Las estaciones se encuentran localizadas en el volcán Cotopaxi como se indican en la Figura 4.

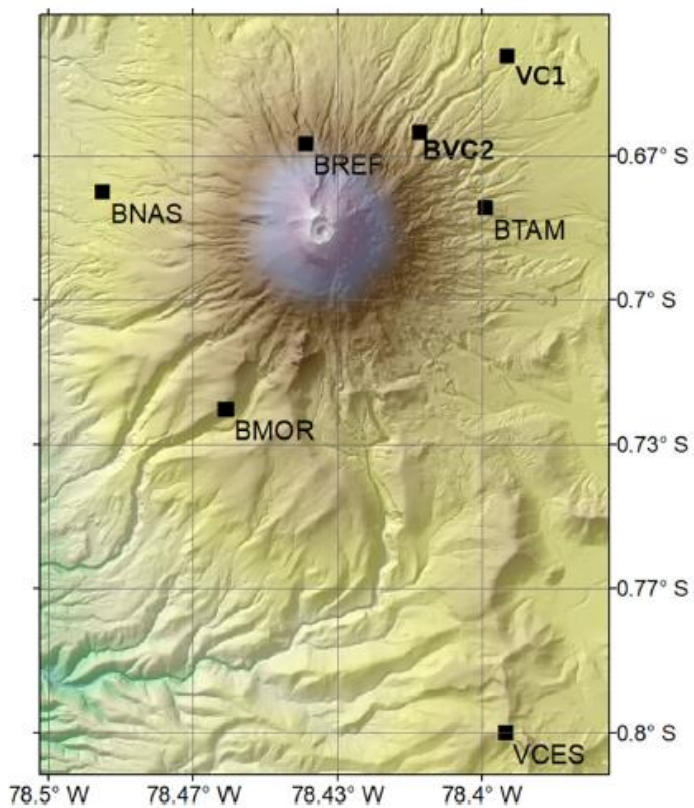
Las señales antes de ser agregadas a la base de datos, eliminaron los efectos instrumentales y luego fueron filtradas por medio de un filtro FIR de paso alto, no causal de fase cero de orden 128 a una frecuencia de corte de 1 Hz, el objetivo fue preservar el contenido espectral para mayor información visite (Pérez, y otros, 2020).

Dentro de la base de datos también se encuentran características propias de cada señal como la red, estación, frecuencia, componentes, año, mes, tipo, duración, punto de inicio, punto de fin, datos, pico de frecuencia uno, dos, tres y cuatro.

Para nuestro escenario de pruebas, las señales han sido muestreadas todas a 100 Hz.

Figura 4

Estaciones de la red sismológica del volcán Cotopaxi.



Nota. Los datos usados son de la estación VC1 y BREF. Tomada del artículo de (Pérez, y otros, 2020).

Desarrollo de Software en Matlab

El programa se desarrolla con el uso del software Matlab 2020, en esta versión es posible realizar aplicaciones que permitan la interacción con el usuario y el código para el desarrollo de la generación de señales sintéticas.

Diagramas de Flujo

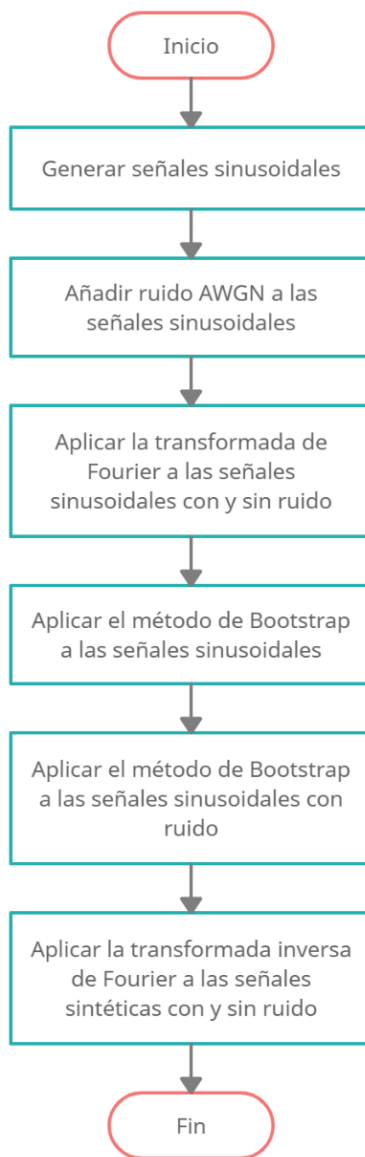
El diagrama de flujo representa de forma sencilla la elaboración y funcionamiento del software desarrollado y permite comprender los procesos internos realizados. Y brinda una visión gráfica de comprender los procesos que comprenden el programa desarrollado.

Desarrollo del Código para la Generación de Señales Sinusoidales Sintéticas

El desarrollo para la generación de señales sintéticas sinusoidales parte con la elaboración del diagrama de flujo que ayudan a comprender en forma gráfica y sistemática el desarrollo sistemático del código desarrollado en Matlab.

Figura 5

Diagrama de flujo de generación de señales sintéticas sinusoidales.

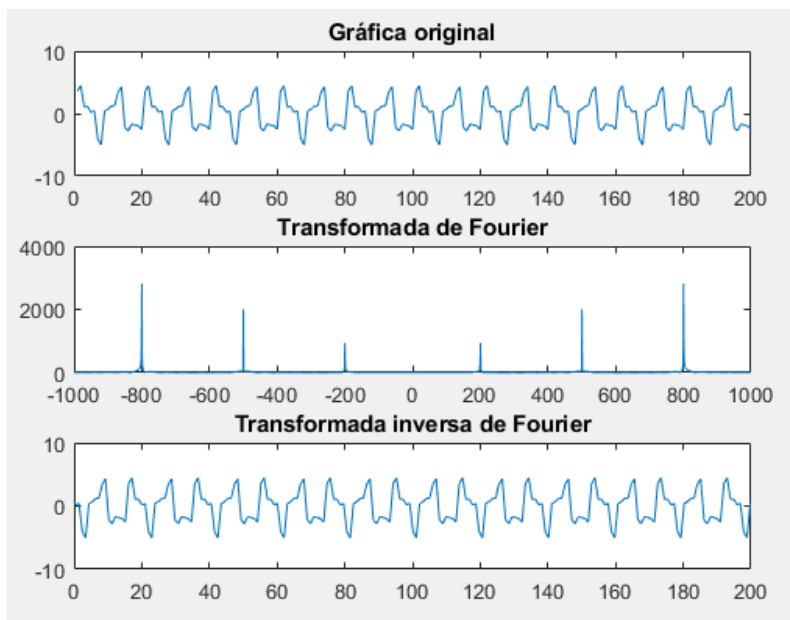


La Figura 5 representa el diagrama de flujo del código desarrollado para la generación de señales sinusoidales sintéticas, primero se realiza la generación de una base de datos de señales sinusoidales, a estas señales se les añade ruido, en este caso ruido AWGN, estos dos grupos de señales pasan por la transformada de Fourier,

se aplica el método de *Bootstrap* a estos dos grupos de señales y finalmente se aplica la transformada inversa de Fourier para obtener señales sintéticas sinusoidales.

Figura 6

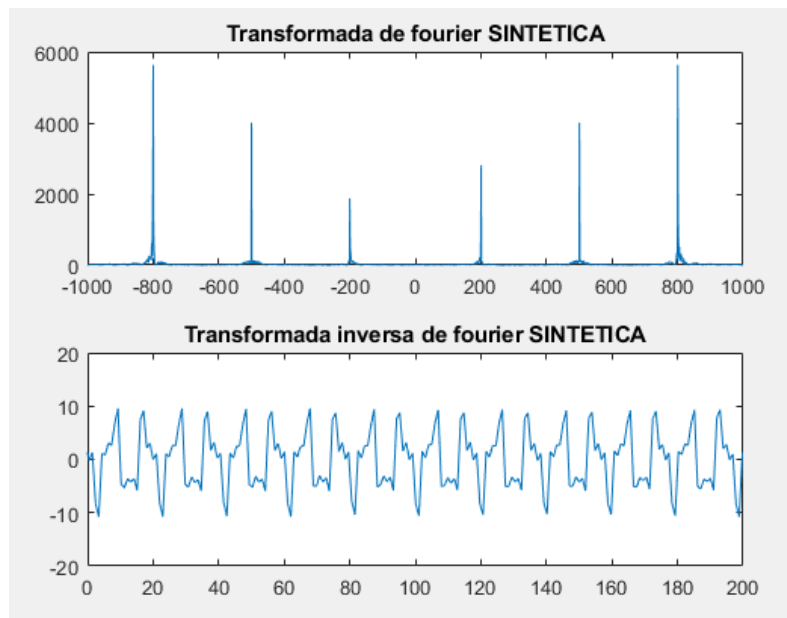
Transformada de Fourier y transformada inversa de Fourier de una señal sinusoidal.



La Figura 6 representa la señal sinusoidal, transformada de Fourier y transformada inversa de la señal, las frecuencias de la transformada de Fourier se encuentran en 200, 500 y 800 Hz, y la transformada inversa de Fourier, lo que se realizó en esta figura es comprobar que la transformada y la transformada inversa de Fourier realicen correctamente su función, y la primera y tercera señal comprueban esto, he indican ondas de señales similares.

Figura 7

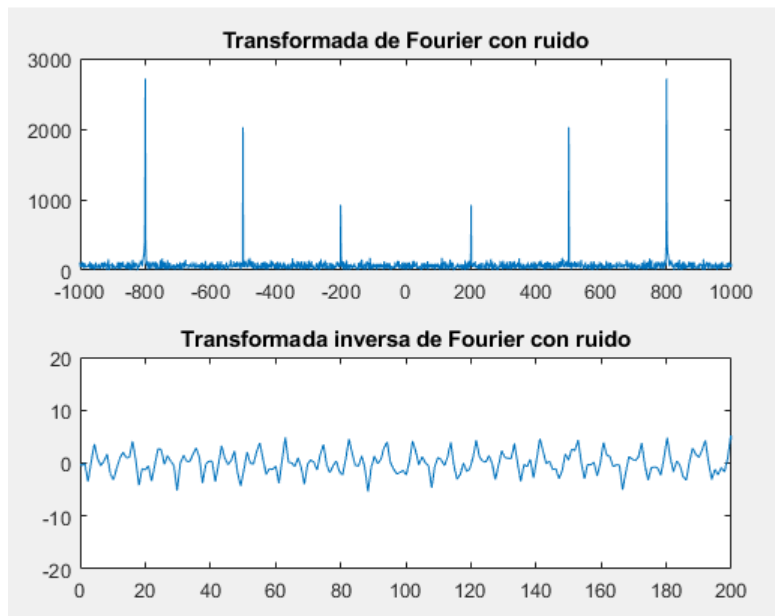
Transformada de Fourier y transformada inversa de Fourier de una señal sinusoidal sintética.



La Figura 7 representa la transformada de Fourier y la transformada inversa de la señal sintética, se puede observar que los puntos de frecuencia son en 200, 500 y 800 Hz, que son los mismos puntos de las señales originales, en la transformada inversa que es la señal sinusoidal sintética es similar a las señales originales, lo que se verifica el funcionamiento del método de *Bootstrap*.

Figura 8

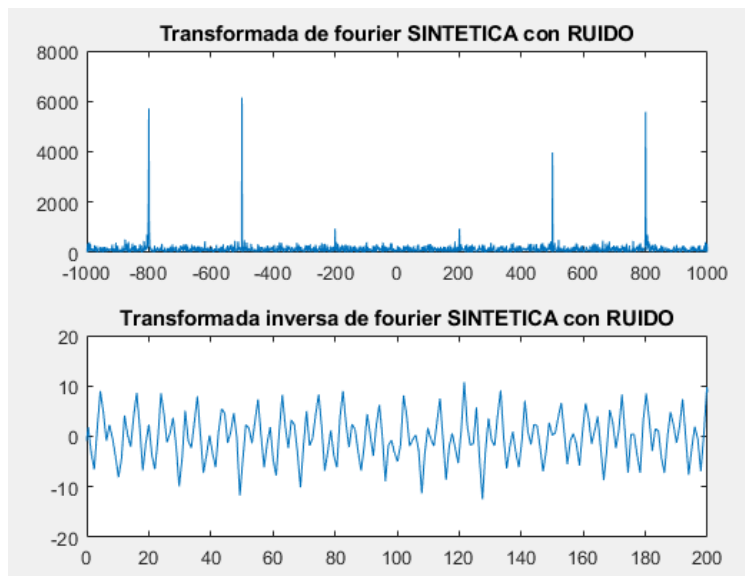
Transformada de Fourier y transformada inversa de Fourier de una señal sinusoidal con ruido añadido.



La Figura 8 representa la transformada de Fourier y la transformada inversa de una señal sinusoidal con ruido AWGN, se puede observar que presentan los mismos componentes en frecuencia de las figuras anteriores, la diferencia que se observa es que las figuras se encuentran con ruido añadido.

Figura 9

Transformada de Fourier y transformada inversa de Fourier de una señal sinusoidal sintética con ruido añadido.



La Figura 9 está compuesta por la transformada de Fourier y la transformada inversa de la señal sintética con ruido añadido, se puede observar que los componentes en frecuencia si se pueden identificar, y la transformada inversa tiene similitud con la Figura 8 que era una señal original.

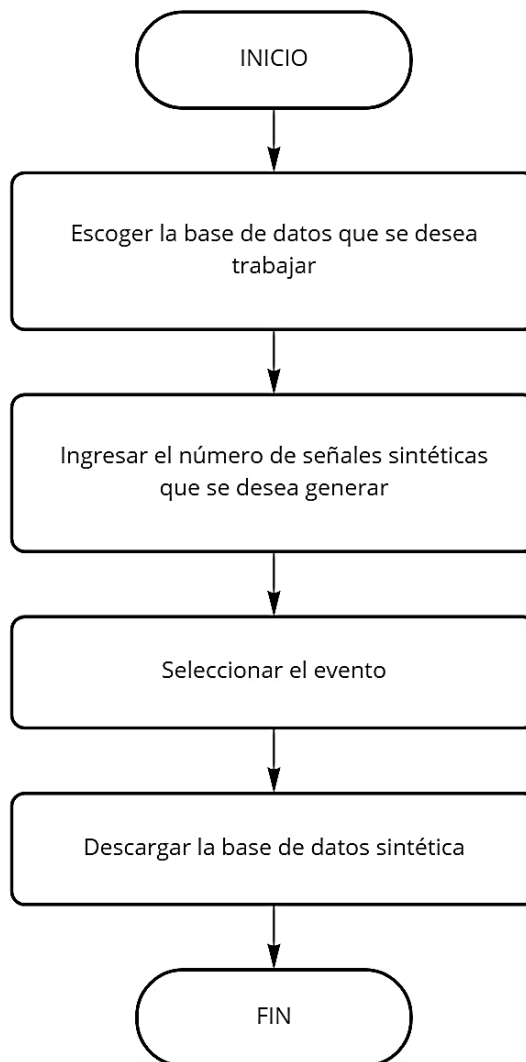
Con las figuras anteriores se verifica el funcionamiento de la transformada de Fourier y el método de *Bootstrap* y se puede identificar con las señales sinusoidales que presentan características similares a las señales originales.

Uso de la Aplicación

La interfaz de usuario es una aplicación desarrollada en Matlab, que es intuitiva y sencilla de usar, especifica los datos de ingreso necesarios para generar los datos sintéticos que el usuario final desea.

Figura 10

Diagrama de flujo de la aplicación.



miro

La Figura 10 representa el diagrama de flujo del uso de la aplicación que es la interfaz gráfica que se presenta al usuario y el proceso para la generación de señales sintéticas.

En primer lugar, el usuario debe escoger la base de datos del volcán que se

desea obtener las señales semisintéticas luego se procede a ingresar el número de señales sintéticas que desea generar, luego selecciona el evento que desea la base de datos sintéticas después se inicia el proceso de generación de datos sintéticos y finalmente se descarga el archivo que con tiene la base de datos sintética.

Figura 11

Interfaz gráfica de la aplicación: Pantalla de Inicio.



APLICACIÓN DE GENERACIÓN Y RECONOCIMIENTO DE SEÑALES MICRO-SÍSMICAS



Autor: Brenda Elizabeth Pérez Moreno

Director: Dr. Román Lara

Colaboradores: Ing. Julio Larco

Figura 12

Interfaz gráfica de la aplicación: Pantalla de generación de base de datos sintética.

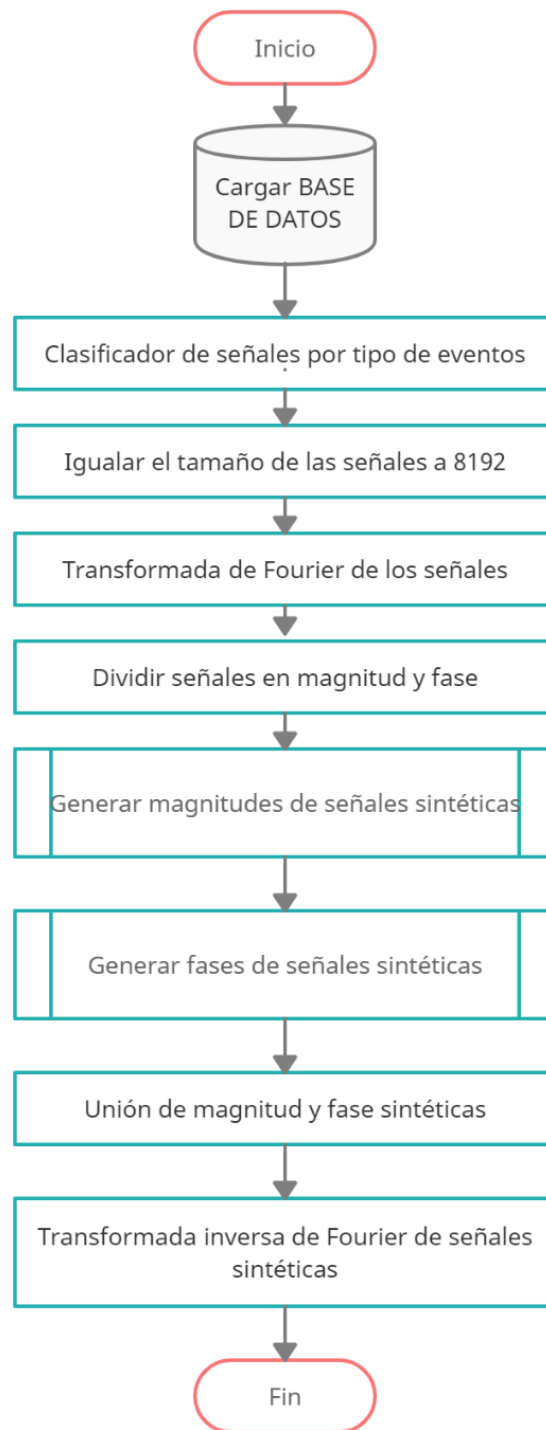


Código Desarrollado en Matlab

El desarrollo para la generación de señales sintéticas conlleva varios procesos para comprender la elaboración de código, los diagramas de flujo ayudan a comprender en forma gráfica y sistemática el desarrollo del mismo, el diagrama que se presenta a continuación presenta el orden en el cual se desarrolló el trabajo.

Figura 13

Diagrama de flujo general.



La Figura 13 representa el diagrama de flujo general del proceso de la generación de datos sintéticos de eventos sismo-volcánicos.

Al iniciar el programa se carga la base de datos que fue proporcionada por el IGEPN, luego se clasifica las señales por el tipo de evento, se iguala al tamaño de 8192 a todas las señales en su duración, que es una alta resolución 8k que es útil para el método de remuestreo que se usa, a las señales seleccionadas de un evento se realiza la transformada de Fourier de cada señal, con estos datos se divide la magnitud y fase de las señales.

Con la magnitud de las señales pasan por filtros para seleccionar las señales que se adaptan a ciertos parámetros que se establecen después se aplica el método de *Bootstrap*, al obtener señales sintéticas en magnitud, lo mismo se realiza con la fase de las señales, y al obtener fases madres que provienen de la media y mediana de todas las fases sintéticas obtenidas.

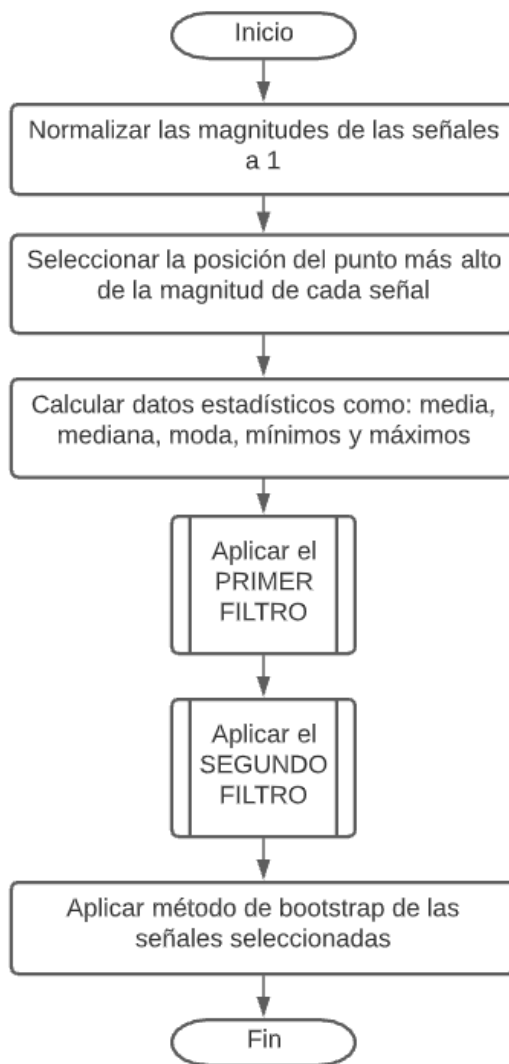
Con las señales sintéticas que se obtienen tanto en magnitud como en fase, se regenera las señales y se obtienen señales sintéticas en frecuencia, finalmente se realiza la transformada inversa de Fourier y se obtienen las señales sintéticas que son evaluadas.

Selección de Señales por su Magnitud

En esta sección de código, se seleccionan señales que cumplen ciertas características establecidas para obtener magnitudes de las señales que sean adecuadas para luego proceder aplicar el método de *Bootstrap*.

Figura 14

Diagrama de Flujo de selección y Bootstrap de la magnitud de las señales.

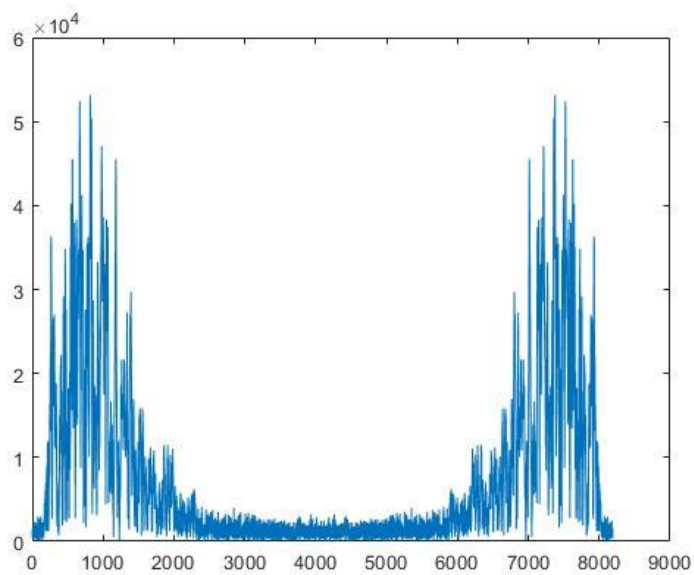


La Figura 14 representa el proceso realizado en la selección de las magnitudes de las señales que presentan ciertas características que se encuentran llamadas como PRIMER FILTRO y SEGUNDO FILTRO para que las señales resultantes sean usadas para la generación de señales sintéticas mediante el método de *Bootstrap*.

A continuación, se presentan diferentes tipos de magnitudes que se pueden encontrar en la base de datos, las tres que se presentan características propias con diferencias entre ellas como el punto más alto y el nivel de ruido.

Figura 15

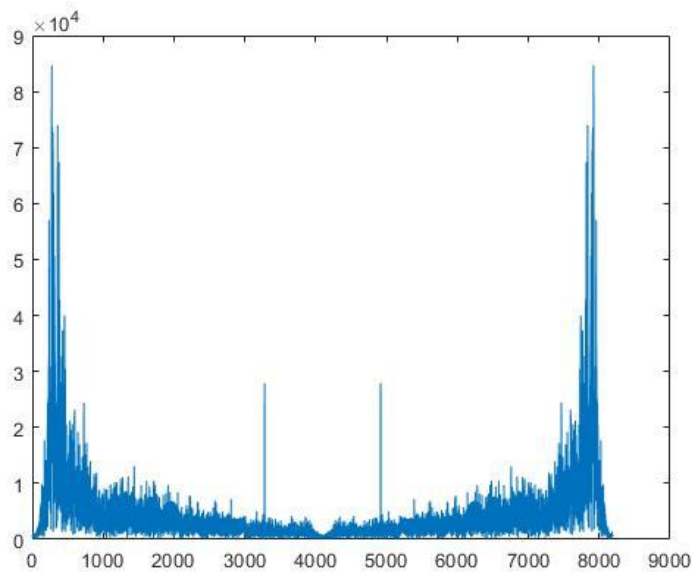
Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP. Ejemplo 1.



En la Figura 15 se puede observar la magnitud de una señal, que su forma es muy ruidosa y presenta varios picos en múltiples puntos.

Figura 16

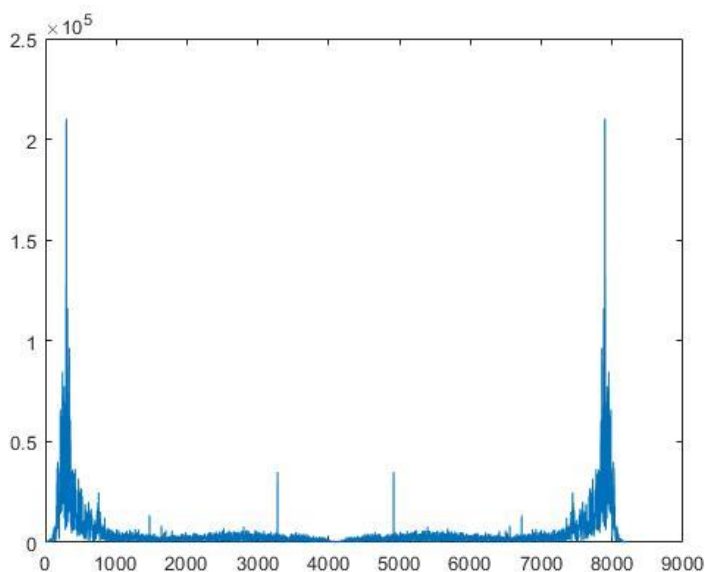
Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP. Ejemplo 2.



En la Figura 16 se puede observar la magnitud de una señal sismo-volcánica, su forma presente menos ruido que la Figura 15 del ejemplo 1 y los picos que presenta son en menor cantidad de puntos. Su forma es más definida y sus componentes como el pico más alto son más notorios.

Figura 17

Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP. Ejemplo 3.



En esta Figura 17 igual representa la magnitud de una señal sismo-volcánica, se puede observar que el pico de la magnitud se presenta en una sola posición y es específico, el ruido es casi nulo en comparación de la Figura 15 y Figura 16.

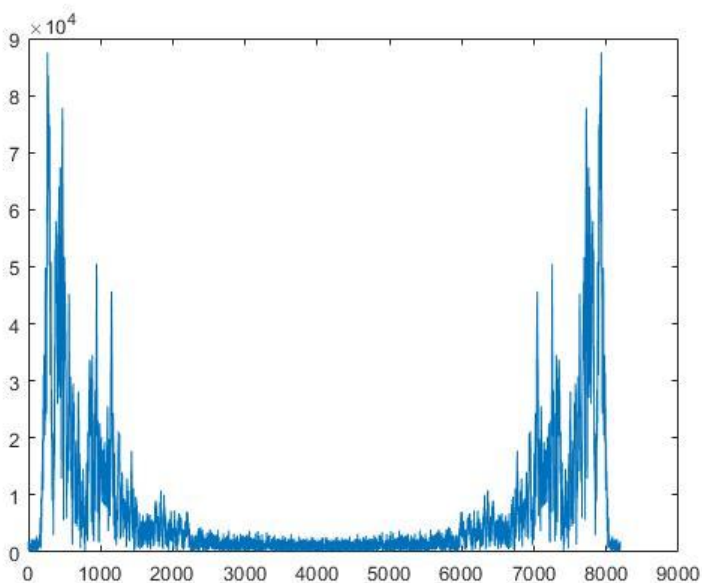
Con la Figura 15, Figura 16 y Figura 17 se puede realizar una comparación de las clases de magnitudes que se puede encontrar en la base de datos, la primera figura del ejemplo 1 es una de las peores magnitudes para ser replicables dado que por su forma y el alto ruido que presenta hace que las magnitudes replicables sean mucho más ruidosas y con picos en múltiples puntos que no se pueden identificar con facilidad, la Figura 17, es una magnitud ideal para ser replicable por que presenta el pico en un solo punto y el ruido de la señal es muy bajo con estas características es una magnitud ideal para ser replicable.

A continuación, se explica a detalle los filtros aplicados en la magnitud de las señales para seleccionar las magnitudes ideales para ser replicables.

Primer Filtro: Selección de Señales por la Posición de su Punto Máximo. En esta sección de código, se seleccionan señales que presenten características donde se escogen las señales según la posición del punto máximo normalizado que tiene el valor de 1. Para escoger la magnitud de las señales que cumplen con la condición que la posición del punto máximo normalizado que es igual a uno sea menor a la posición del punto máximo medio, esta condición se aplica a todas las magnitudes de las señales, después se selecciona las señales que pasaron este filtro, finalmente las magnitudes de las señales seleccionadas son normalizadas nuevamente.

Figura 18

Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP después del primer filtro. Ejemplo 1.

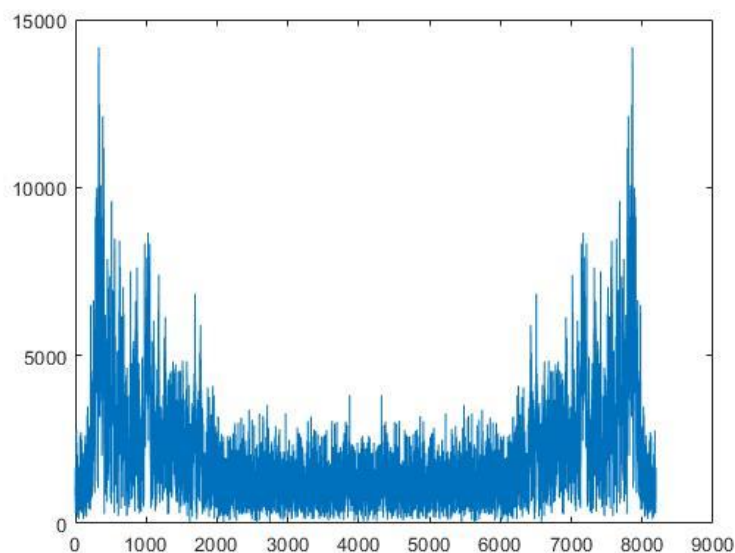


La Figura 18 representa la magnitud de una señal aplicadas el primer filtro, se

puede observar que el pico se puede identificar, pero la magnitud presenta ruido y múltiples picos en puntos medios.

Figura 19

Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP después del primer filtro. Ejemplo 2.



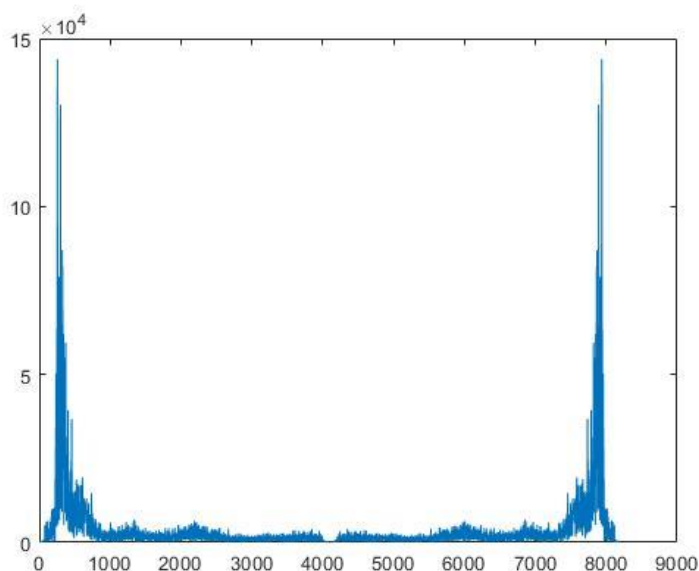
La Figura 19 es el ejemplo 2 es la magnitud de una señal aplicada el primer filtro, se puede observar que el pico se puede identificar, pero a comparación de la Figura 18 del ejemplo uno esta magnitud presenta un alto ruido y los múltiples picos en puntos medios se presentan en toda la magnitud no es alta para ser replicable.

A continuación, estas magnitudes pasan por un segundo filtro, la funcionalidad de este filtro se explica a detalle en el siguiente apartado.

Segundo filtro: Selección de señales por el tamaño de la amplitud de la magnitud de las señales. En el segundo filtro se escoge la magnitud de las señales que su amplitud desde la posición del punto máximo normalizado que es uno hasta la posición 1024 sean menores en un rango de 0.3 a 0.5 de la magnitud de las señales normalizadas, las magnitudes que pasen por este filtro son las magnitudes seleccionadas para ser replicables mediante el método de *Bootstrap*.

Figura 20

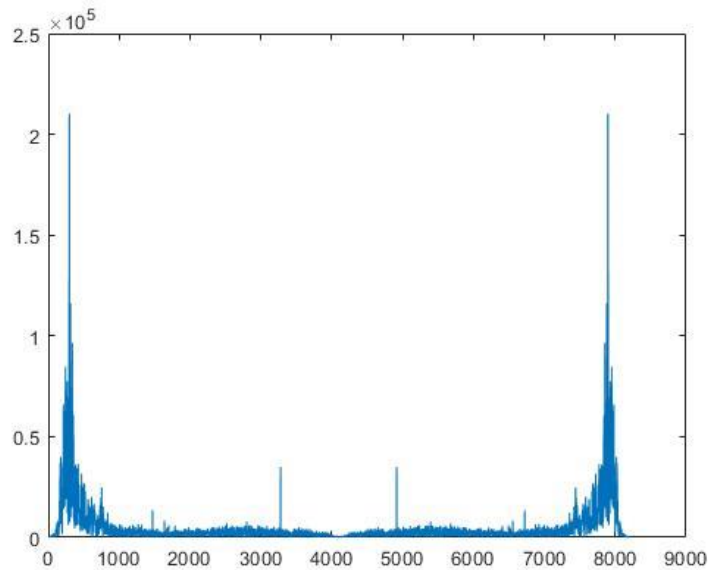
Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP después del segundo filtro. Ejemplo 1.



La Figura 20 es la magnitud de una señal después de pasar por los dos filtros, presenta las características para ser la magnitud ideal con un pico de frecuencia claramente identificado y con el nivel de ruido muy bajo.

Figura 21

Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP después del segundo filtro. Ejemplo 2.



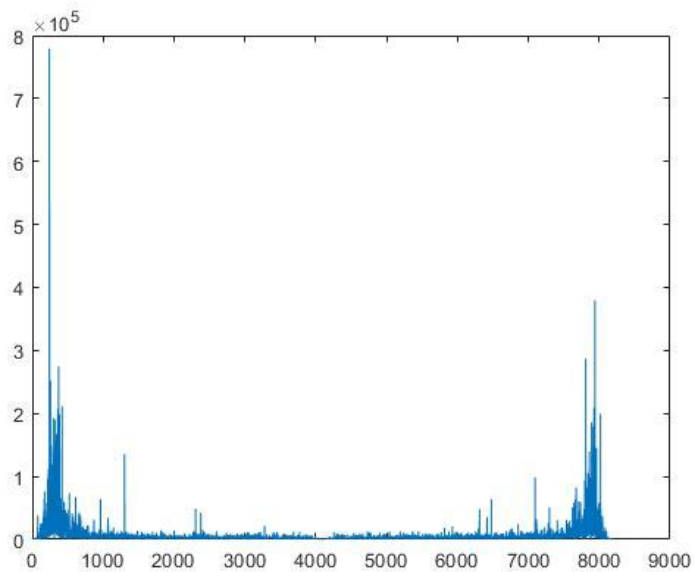
La Figura 21 es el ejemplo 2 de la magnitud de una señal después de pasar por los dos filtros, presenta las mismas características que la del ejemplo 1, por este motivo es una magnitud ideal para ser replicada.

Señales Sintéticas en Magnitud: Aplicar el Método de *Bootstrap*. En esta sección de código, se aplica el método de *Bootstrap* y se obtiene las señales sintéticas en magnitud.

A continuación, hay ejemplos de magnitudes sintéticas.

Figura 22

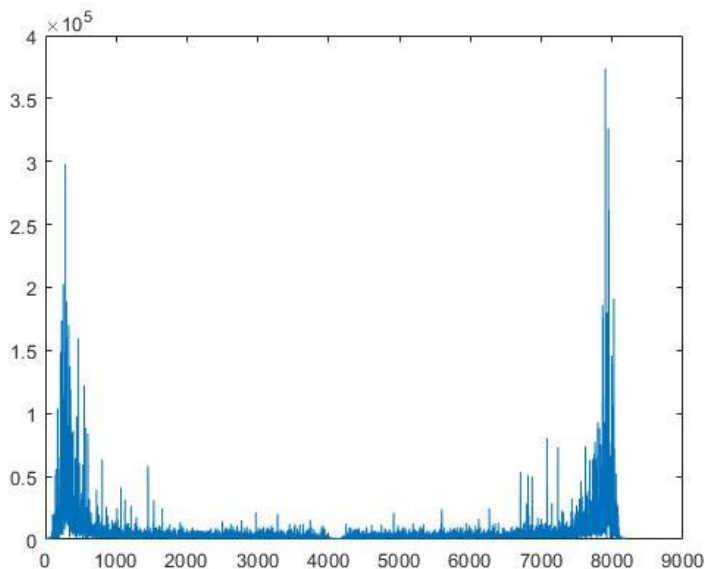
Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP sintética. Ejemplo 1.



La Figura 22 representa la magnitud sintética de una señal, como se puede observar en la figura la señal presenta picos claramente identificados en un punto y el nivel del ruido es muy bajo es una señal sintética que presenta las características ideales que se obtuvieron después del primer y segundo filtro.

Figura 23

Magnitud de señal sismo-volcánica de tipo LP sintética. Ejemplo 2.



La Figura 23 es un ejemplo 2 de la magnitud sintética de una señal, presenta picos claramente identificables y el nivel de ruido es bajo.

Los dos ejemplos presentan características que fueron escogidas en el filtro 1 y el filtro 2.

En los dos ejemplos se puede observar que la magnitud al ser sintética presenta dos espectros uno a la derecha y otro a la izquierda ya que el método *Bootstrap* remuestrea en los 8192 puntos, como se puede observar que no son réplicas simétricas, por este motivo se trabaja con los primeros 4096 puntos para generar las señales sintéticas.

Más adelante se explica cómo se realiza las magnitudes sintéticas simétricas.

Selección de Señales por su Fase

En la siguiente sección de código se realiza el mismo proceso anterior, con el que se usó para las magnitudes de las señales, pero en este caso con la fase de las señales.

Figura 24

Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP. Ejemplo 1.

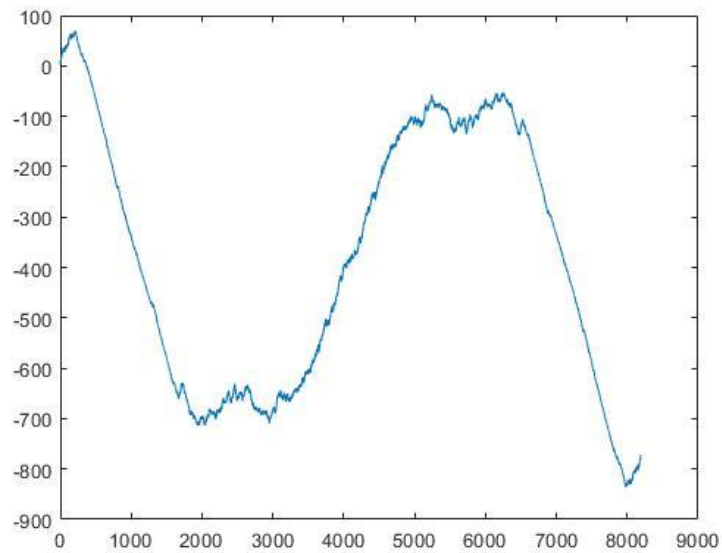
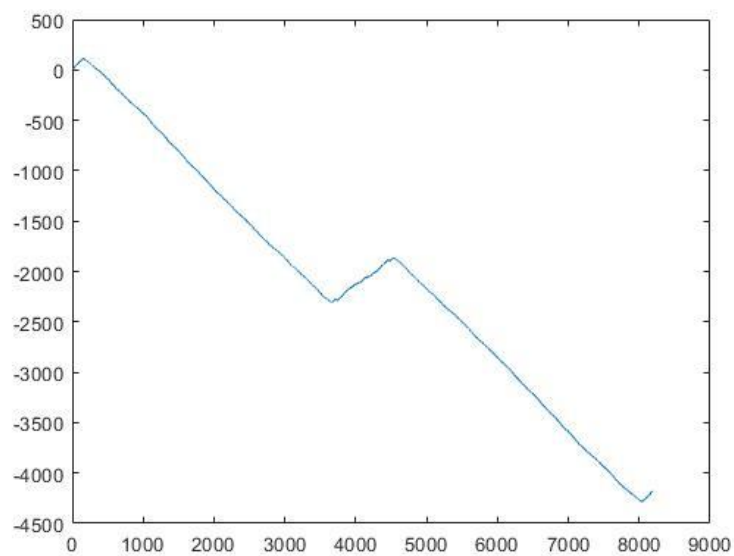
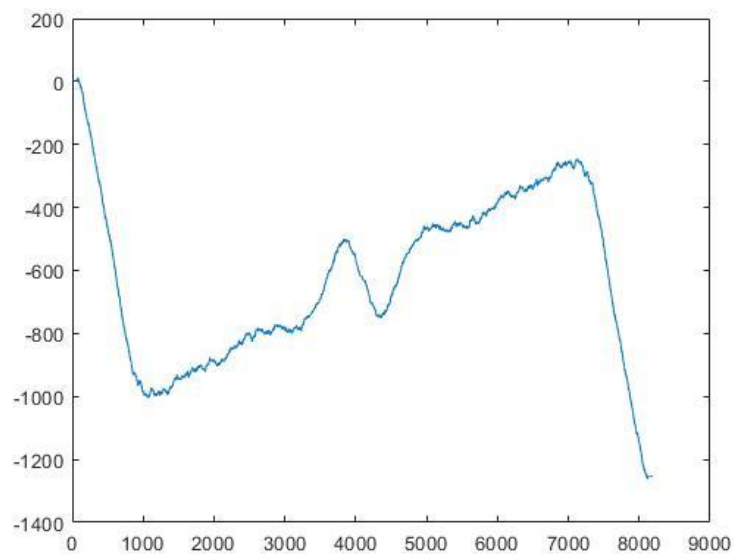


Figura 25

Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP. Ejemplo 2.

**Figura 26**

Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP. Ejemplo 3.

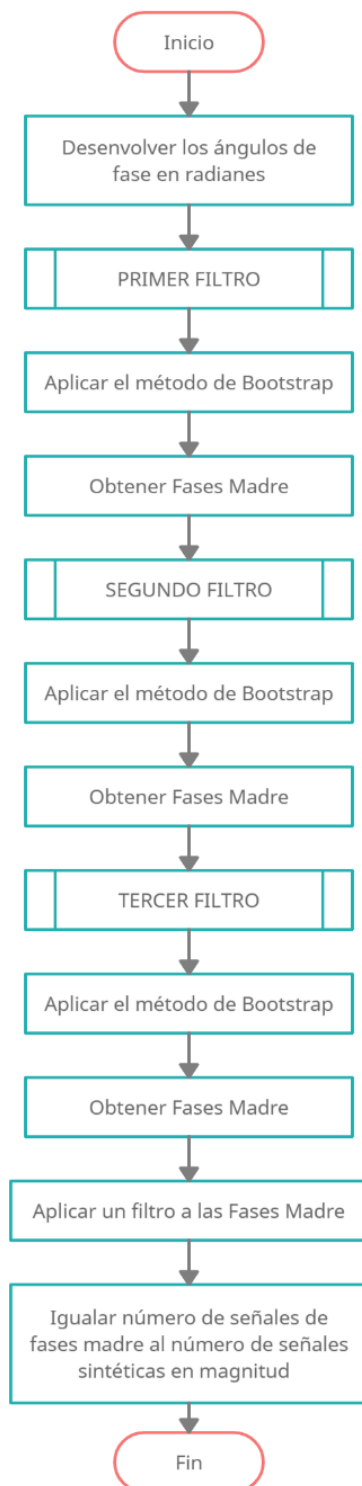


La Figura 24, Figura 25 y Figura 26 representan las formas de las fases que se puede encontrar en la base de datos, se determinaron formas con ondas sinusoidales y otras que tienden a forma rectilínea, una de las características principales de la fase es que da la forma a la señal y también su nivel de ruido se ve claramente afectado en la reconstrucción de la señal final, por lo que es igual de importante que la magnitud.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo de los procesos realizados para escoger las fases madre.

Figura 27

Diagrama de Flujo de selección y Bootstrap de la fase de las señales.



La Figura 27 representa el proceso realizado en la selección de las fases de las señales que presentan ciertas características que se encuentran llamadas como PRIMER FILTRO, SEGUNDO FILTRO y TERCER FILTRO para que las fases de las señales resultantes sean usadas para la generación de fases sintéticas mediante el método de *Bootstrap*, finalmente se obtiene la media y mediana de las fases sintéticas obtenidas y se utilizan como fases madre para la generación de señales sintéticas.

Primer Filtro: Clasificación de Fases de Señales por Amplitud. En esta sección del código se clasifican las señales por el valor de la amplitud de la fase que se encuentra en la última posición, se dividen en dos grupos los cuales son mayores y menores a la media de la amplitud.

Figura 28

Valor del último punto de la fase que indica el valor de la amplitud.

	8185	8186	8187	8188	8189	8190	8191	8192
1	-3.0858e-03	-3.0856e-03	-3.0858e-03	-3.0858e-03	-3.0855e-03	-3.0852e-03	-3.0850e-03	-3.0850e-03
2	-2.1141e-03	-2.1136e-03	-2.1132e-03	-2.1129e-03	-2.1126e-03	-2.1123e-03	-2.1118e-03	-2.1114e-03
3	-3.1505e-03	-3.1499e-03	-3.1483e-03	-3.1463e-03	-3.1447e-03	-3.1433e-03	-3.1419e-03	-3.1402e-03
4	-3.2697e-03	-3.2682e-03	-3.2662e-03	-3.2651e-03	-3.2543e-03	-3.2634e-03	-3.2618e-03	-3.2593e-03
5	-3.5552e-03	-3.5542e-03	-3.5561e-03	-3.5553e-03	-3.5544e-03	-3.5533e-03	-3.5519e-03	-3.5293e-03
6	-3.3365e-03	-3.3381e-03	-3.3364e-03	-3.3344e-03	-3.3322e-03	-3.3303e-03	-3.3289e-03	-3.3263e-03
7	-4.3122e-03	-4.3121e-03	-4.3123e-03	-4.3110e-03	-4.3083e-03	-4.3068e-03	-4.3057e-03	-4.3048e-03
8	-3.1570e-03	-3.1559e-03	-3.1546e-03	-3.1533e-03	-3.1509e-03	-3.1492e-03	-3.1480e-03	-3.1468e-03
9	-4.1785e-03	-4.1796e-03	-4.1782e-03	-4.1767e-03	-4.1752e-03	-4.1735e-03	-4.1718e-03	-4.1702e-03
10	-3.7246e-03	-3.7239e-03	-3.7235e-03	-3.7236e-03	-3.7228e-03	-3.7215e-03	-3.7200e-03	-3.7183e-03
11	-6.2049e-03	-6.2043e-03	-6.2034e-03	-6.2025e-03	-6.2016e-03	-6.2008e-03	-6.1999e-03	-6.1991e-03
12	-3.5444e-03	-3.5474e-03	-3.5460e-03	-3.5441e-03	-3.5428e-03	-3.5419e-03	-3.5413e-03	-3.5410e-03
13	-3.2996e-03	-3.2925e-03	-3.2913e-03	-3.2911e-03	-3.2905e-03	-3.2891e-03	-3.2871e-03	-3.2849e-03
14	-3.6889e-03	-3.6884e-03	-3.6877e-03	-3.6872e-03	-3.6867e-03	-3.6860e-03	-3.6858e-03	-3.6853e-03
15	-3.5020e-03	-3.5011e-03	-3.5003e-03	-3.4998e-03	-3.4992e-03	-3.4981e-03	-3.4956e-03	-3.4949e-03
16	-2.9577e-03	-2.9569e-03	-2.9559e-03	-2.9548e-03	-2.9539e-03	-2.9528e-03	-2.9509e-03	-2.9490e-03
17	-934.6077	-934.1241	-934.3096	-933.9921	-934.1991	-933.8590	-933.7430	-933.3668
18	-3.8360e-03	-3.8331e-03	-3.8351e-03	-3.8380e-03	-3.8394e-03	-3.8369e-03	-3.8372e-03	-3.8364e-03
19	-3.7186e-03	-3.7178e-03	-3.7170e-03	-3.7161e-03	-3.7153e-03	-3.7147e-03	-3.7142e-03	-3.7138e-03
20	-4.1956e-03	-4.1940e-03	-4.1924e-03	-4.1907e-03	-4.1934e-03	-4.1917e-03	-4.1902e-03	-4.1886e-03
21	-1.7108e-03	-1.7104e-03	-1.7101e-03	-1.7097e-03	-1.7095e-03	-1.7092e-03	-1.7090e-03	-1.7089e-03
22	-2.2150e-03	-2.2143e-03	-2.2135e-03	-2.2128e-03	-2.2131e-03	-2.2129e-03	-2.2119e-03	-2.2107e-03
23	-3.8828e-03	-3.8810e-03	-3.8791e-03	-3.8761e-03	-3.8743e-03	-3.8731e-03	-3.8733e-03	-3.8722e-03
24	-5.7495e-03	-5.7466e-03	-5.7454e-03	-5.7445e-03	-5.7438e-03	-5.7430e-03	-5.7421e-03	-5.7413e-03
25	-3.1792e-03	-3.1780e-03	-3.1772e-03	-3.1772e-03	-3.1784e-03	-3.1779e-03	-3.1773e-03	-3.1768e-03
26	-3.4358e-03	-3.4348e-03	-3.4338e-03	-3.4322e-03	-3.4293e-03	-3.4285e-03	-3.4273e-03	-3.4265e-03
27	-4.6615e-03	-4.6616e-03	-4.6607e-03	-4.6591e-03	-4.6520e-03	-4.6600e-03	-4.6586e-03	-4.6572e-03
28	-3.0879e-03	-3.0880e-03	-3.0876e-03	-3.0871e-03	-3.0863e-03	-3.0849e-03	-3.0836e-03	-3.0827e-03
29	-3.3805e-03	-3.3793e-03	-3.3782e-03	-3.3771e-03	-3.3761e-03	-3.3738e-03	-3.3703e-03	-3.3752e-03
30	-4.7269e-03	-4.7263e-03	-4.7259e-03	-4.7254e-03	-4.7247e-03	-4.7242e-03	-4.7237e-03	-4.7232e-03
31	-2.8207e-03	-2.8200e-03	-2.8192e-03	-2.8179e-03	-2.8168e-03	-2.8156e-03	-2.8144e-03	-2.8151e-03

La Figura 28 representa la base de datos con el valor del último punto que se encuentra en el cuadro, donde se puede observar que el valor de la amplitud con diferentes valores. Bajo este criterio se realiza la selección de las fases del primer filtro que ya fue explicado.

Señales sintéticas en fase: Aplicar el método de *Bootstrap*. En esta sección de código, se aplica el método de *Bootstrap* y se obtiene las señales sintéticas en fase del primer filtro.

A continuación, se presentan las figuras de las fases de las señales sintéticas de diferente amplitud, una menor y otra mayor a la media de la amplitud.

Figura 29

Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es menor a la media.

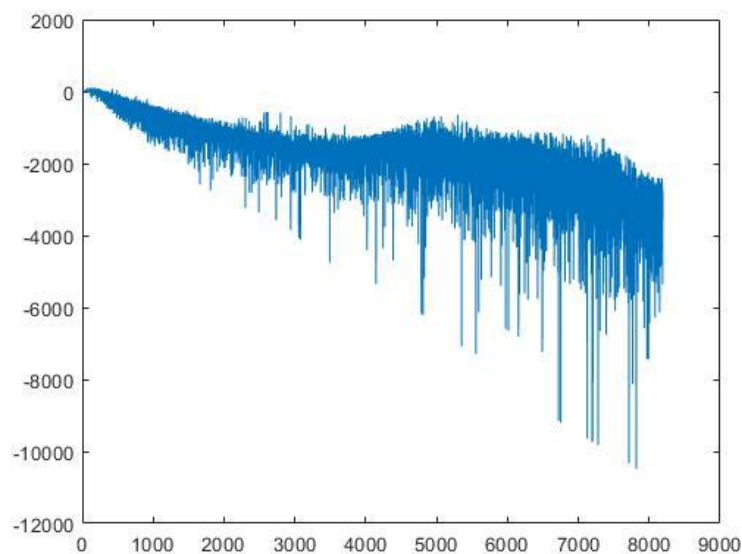
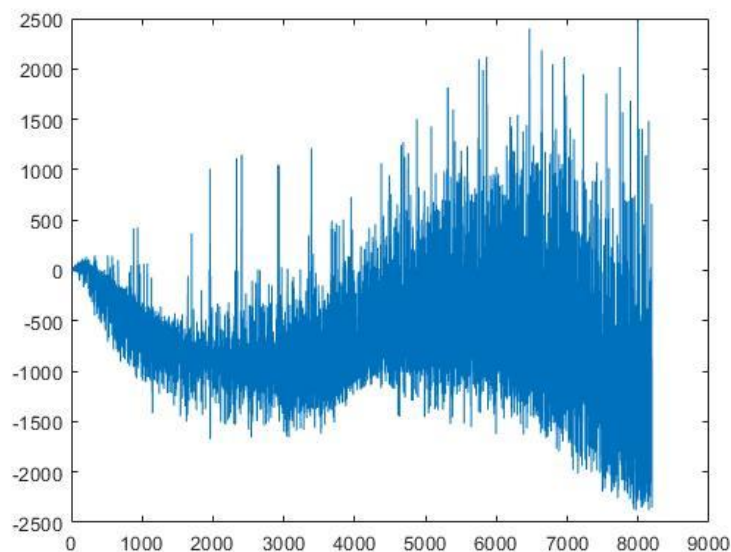


Figura 30

Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es mayor a la media.



Las fases de las señales sintéticas que se presentan en la Figura 29 y la Figura 30 son las que su amplitud es mayor y menor a la media de las amplitudes, las fases sintéticas presentan un nivel de ruido alto y las formas son parecidas en los dos casos, estas fases no son aptas de usar porque por su alto nivel de ruido la señal sintética resultante tendrá un alto nivel de ruido y no presentará ninguna forma.

Señales Fase Madre Sintéticas: Media y Mediana. En esta sección de código, se escoge la media y mediana de toda la base de datos sintéticas para obtener una señal de cada uno, estas vendrían hacer las señales de fase madre obtenidas del primer filtro.

Figura 31

Fase madre de datos de la media de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es menor a la media.

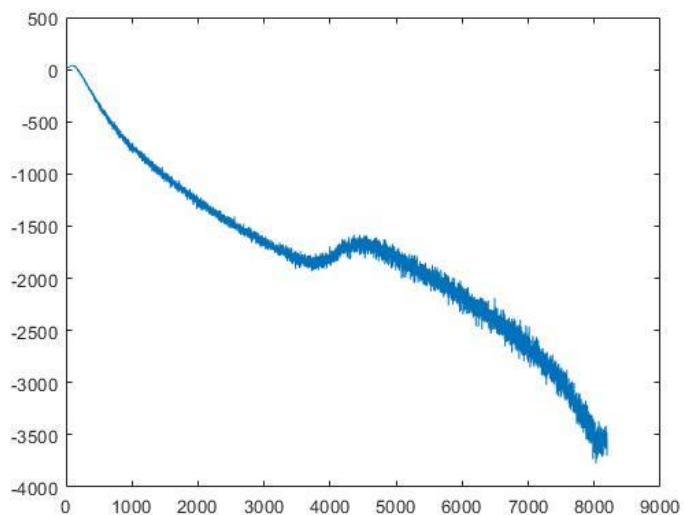
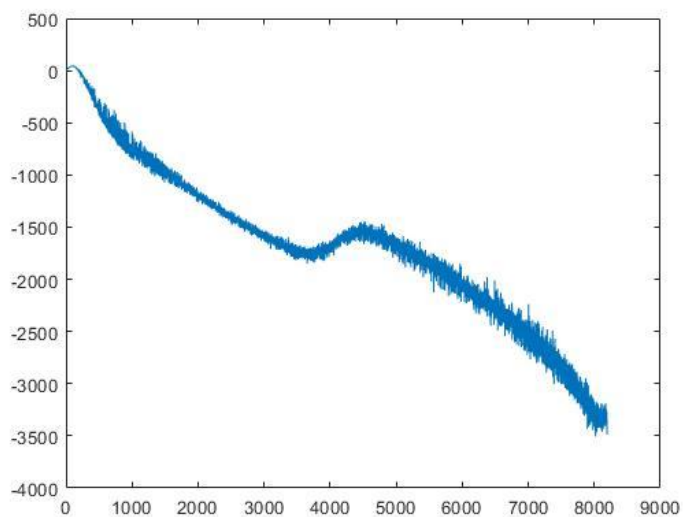


Figura 32

Fase madre de datos de la mediana de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es menor a la media.

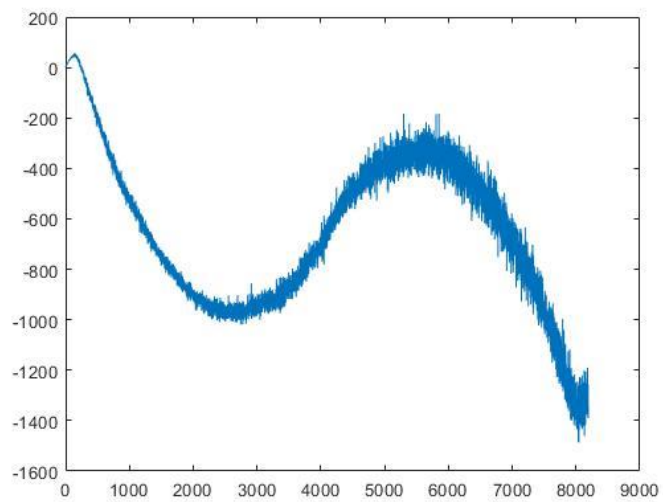


La Figura 31 y Figura 32 son las fases madre sintéticas de las señales que su amplitud es menor a la media, la primera es la fase sintética de su media y la segunda es de la mediana.

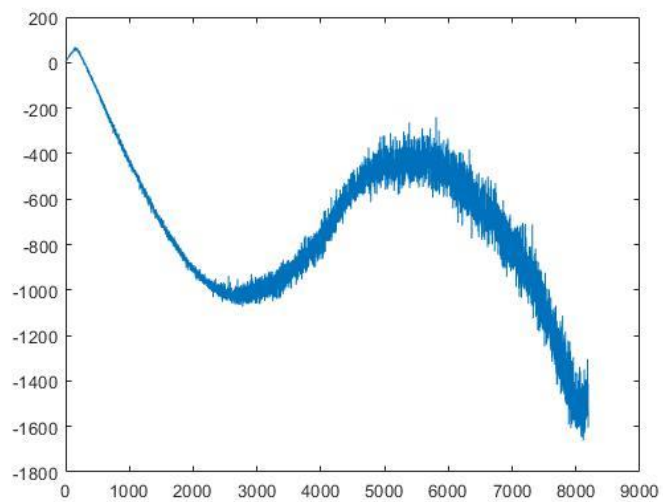
A continuación, se realiza el mismo proceso para las fases que su amplitud es mayor a la media, se escoge dos fases madre sintéticas.

Figura 33

Fase madre de datos de la media de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es mayor a la media.

**Figura 34**

Fase madre de datos de la mediana de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es mayor a la media.



La Figura 33 y Figura 34 son las fases madre sintéticas de las señales cuya amplitud es menor a la media de la amplitud, la primera es sobre la media y la segunda es de la mediana.

Como se observa en las fases el nivel de ruido es mucho menor a una fase sintética, pero presenta un nivel alto de ruido para ser usado en la generación de señales sintéticas.

Señales fase madre sintéticas suavizadas. Se aplico un filtro para suavizar las fases madre obtenidas del primer filtro. A continuación, se presenta la Figura 35, Figura 36, Figura 37 y Figura 38 que son las fases obtenidas después de pasar por el filtro.

Figura 35

Fase madre de datos de la media suavizada de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es menor a la media.

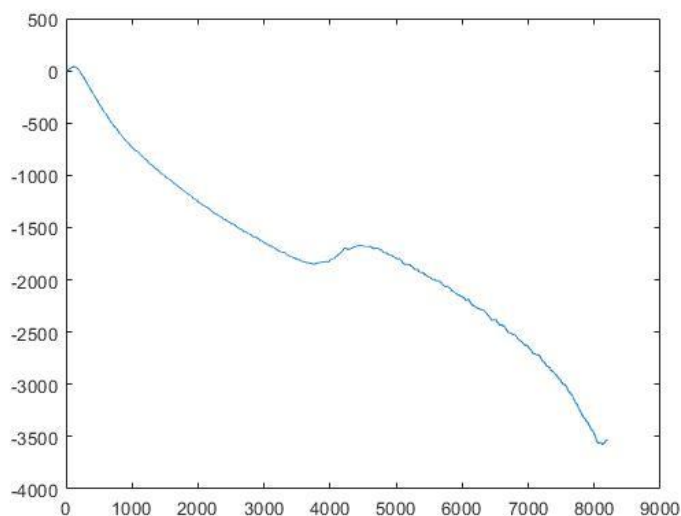
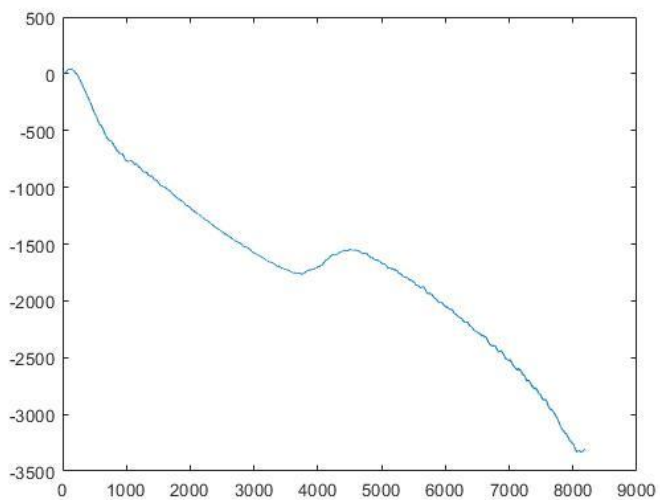


Figura 36

Fase madre de datos de la mediana suavizada de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es menor a la media.

**Figura 37**

Fase madre de datos de la media suavizada de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es mayor a la media.

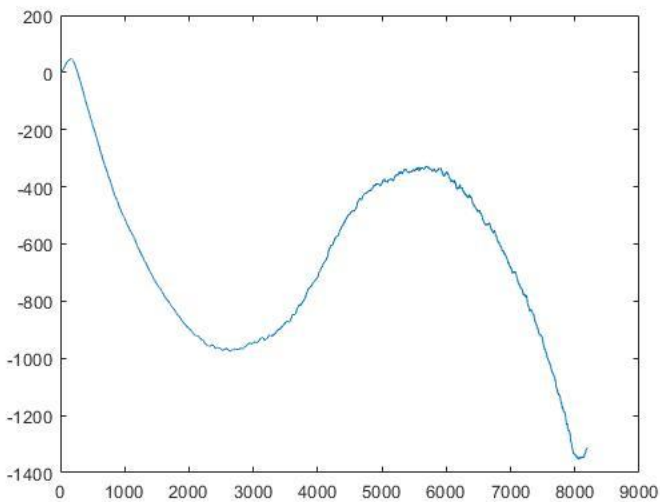
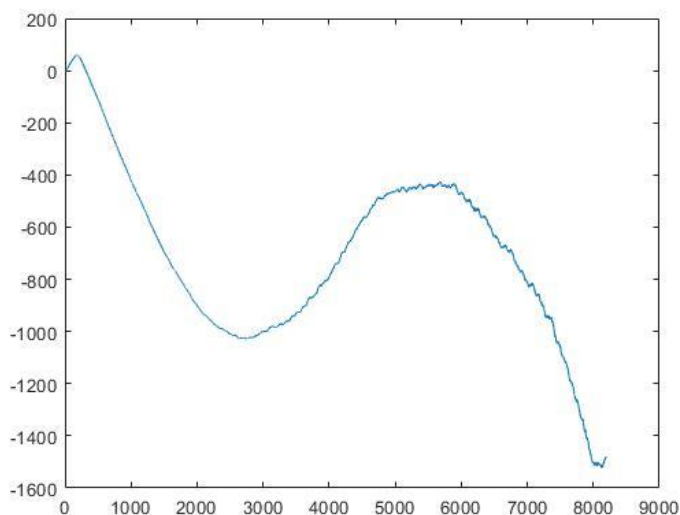


Figura 38

Fase madre de datos de la mediana suavizada de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética que su amplitud es mayor a la media.

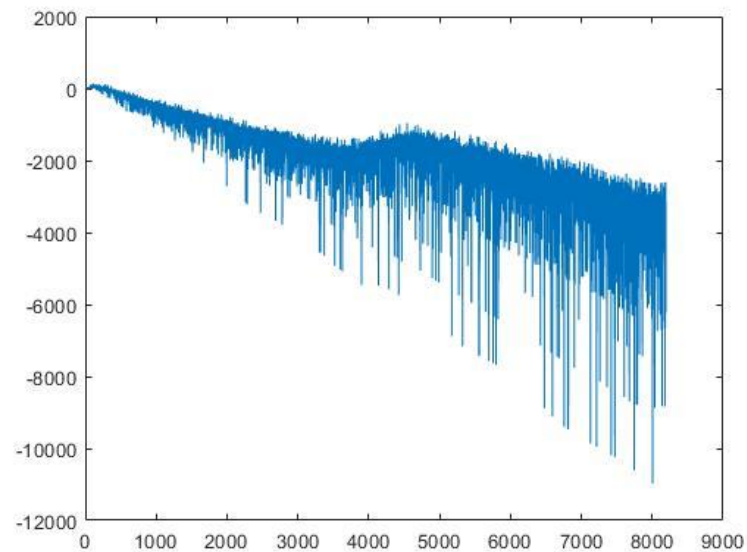


Segundo filtro: Selección de señales por puntos dentro de un intervalo de confianza. En el segundo filtro se escoge las fases que presenten una forma linealizada y dentro de un rango de confianza del 20% a la derecha y a la izquierda, para realizar esto se normalizan los datos de las fases de las señales originales, se escogen cuatro puntos para verificar que se encuentren dentro del rango de los datos ideales, en este caso como se encuentran normalizados con un punto máximo de 0 a -1, los datos ideales en los cuatro puntos son: -0.125, 0.250, -0.750, -0.875, estos puntos ideales se encuentran en las posiciones, 1024, 2048, 6144, 7168 respectivamente.

Después que las fases que los puntos se encuentren dentro del rango pasen por este filtro son las que serán replicables.

Figura 39

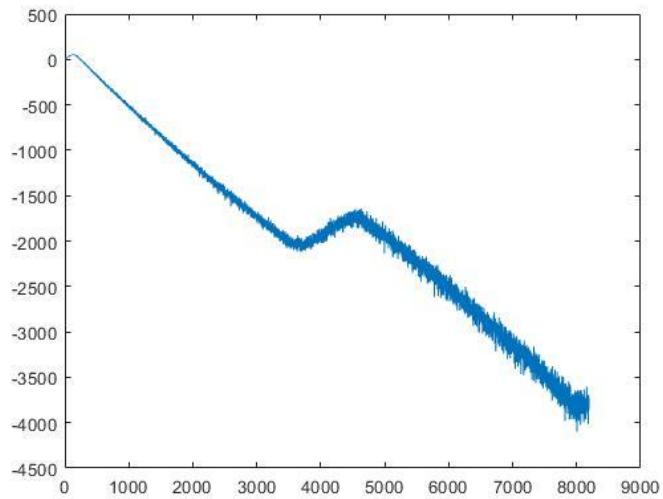
Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el segundo filtro.



A continuación, en la Figura 40 y la Figura 41 se presenta las fases sintéticas para obtener las fases madre de las señales, se realiza el mismo proceso que en el primer filtro.

Figura 40

Fase madre de datos de la media de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el segundo filtro.

**Figura 41**

Fase madre de datos de la mediana de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el segundo filtro.

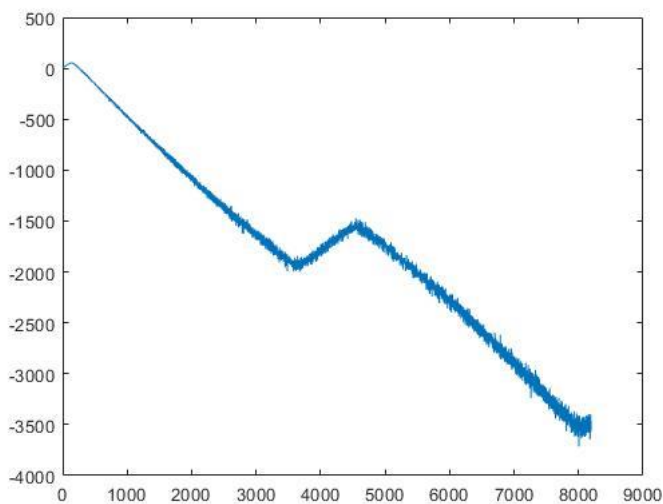
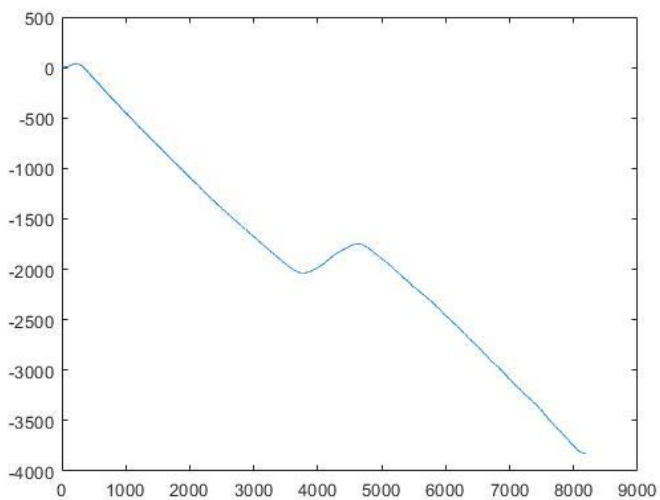
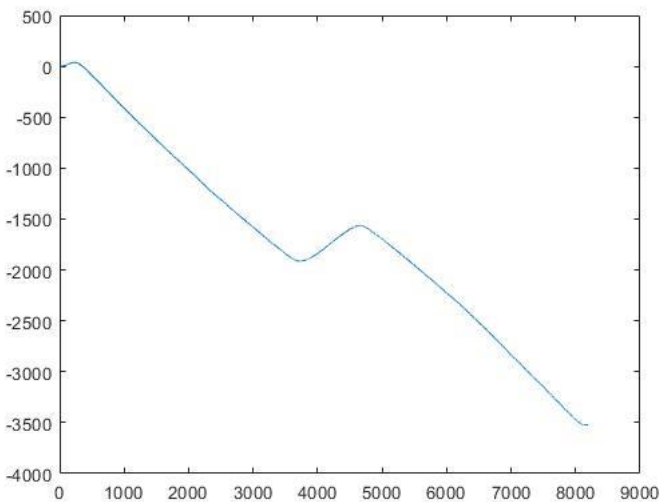


Figura 42

Fase madre suavizada de datos de la media de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el segundo filtro.

**Figura 43**

Fase madre suavizada de datos de la mediana de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el segundo filtro.



La Figura 42 y la Figura 43 son las fases madre suavizadas obtenidas en el segundo filtro, la forma de estas es más rectilínea y presentan una forma diferente a las anteriores fase madre.

Tercer Filtro: Selección de Fases de Señales por Valor de Pendiente Dentro de un Rango de Confianza. En el tercer filtro se escoge las fases que presenten una forma linealizada y cumplan con la pendiente dentro de un rango de confianza del 20% a la derecha y a la izquierda, para realizar esto se normalizan los datos de las fases de las señales originales se toma datos ideales que también se usaron en el anterior filtro, y se aplica el valor de la pendiente ideal, se aplicaron las siguientes operaciones:

Tabla 2

Datos ideales aplicados en el tercer filtro para replicar las fases.

Amplitud normalizada	Posición
-0.125	1024
-0.250	2048
-0.750	6144
-0.875	7168

Nota. Datos ideales propuestos para aplicar un filtro y escoger fases que cumplan con estas características.

Con los datos de la Tabla 2 que presenta los datos ideales y exactos, se puede encontrar el valor de la pendiente ideal, para obtener una fase que presente la mejor forma.

Para encontrar la pendiente utilizamos la siguiente fórmula:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (7)$$

Con los datos de la Tabla 2 donde la amplitud normalizada son los valores de y y los valores de la posición son los valores de x , se reemplaza estos datos y se obtiene:

$$m = \frac{-0.750 + 0.250}{6144 - 2048} \quad (8)$$

Se resuelve la operación y se obtiene el siguiente valor,

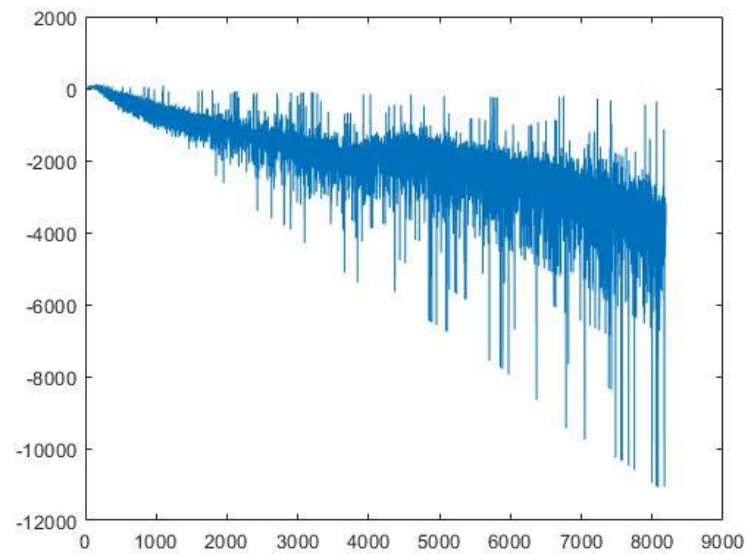
$$m = -1222.07 \times 10^{-6} \quad (9)$$

El valor de la ecuación 9 es el valor de la pendiente ideal, este valor se encuentra dentro de un rango de confianza de 20% a la derecha y a la izquierda, las fases que cumplan con estas características son las escogidas para ser replicables y obtener la última fase madre para la generación de señales sintéticas.

A continuación, se presentan las fases sintéticas obtenidas y el proceso para obtener la fase madre sintética resultante del tercer filtro.

Figura 44

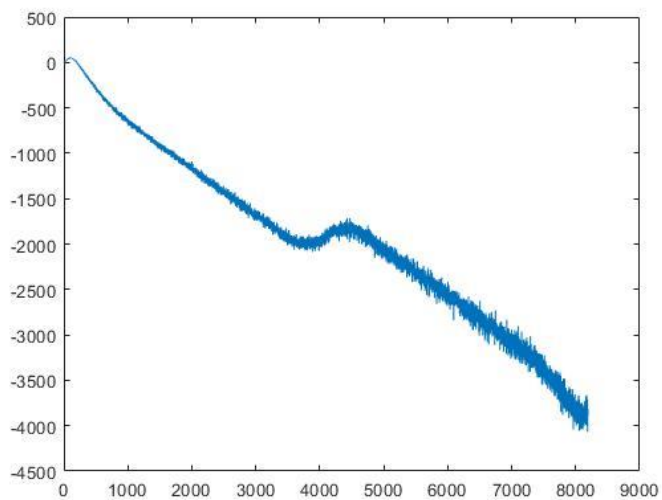
Fase de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el tercer filtro.



La Figura 44 representa la fase de una señal sismo-volcánica de un evento LP después de aplicar el método de *Bootstrap*.

Figura 45

Fase madre de datos de la media de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el tercer filtro.

**Figura 46**

Fase madre de datos de la mediana de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el tercer filtro.

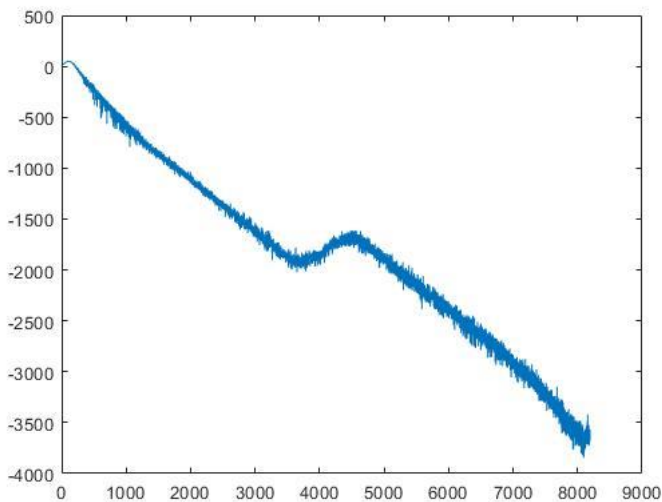
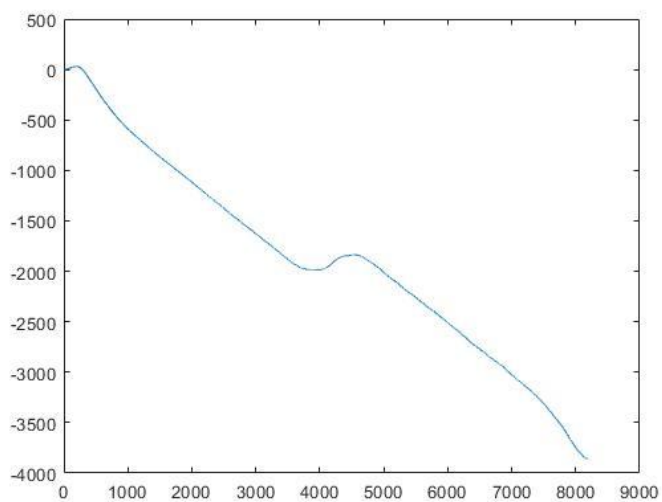
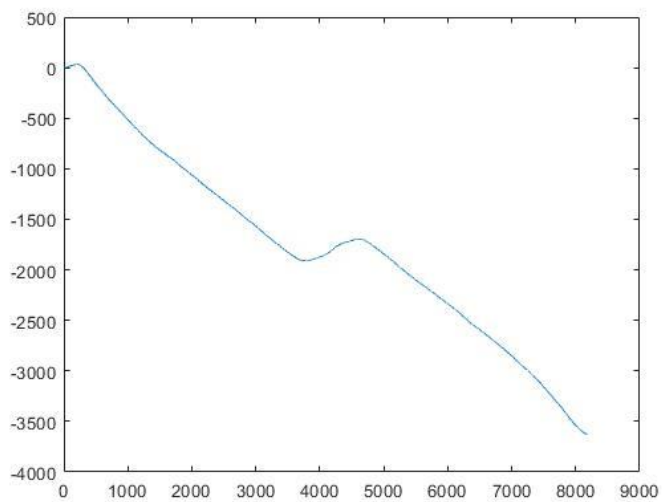


Figura 47

Fase madre suavizada de datos de la media de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el tercer filtro.

**Figura 48**

Fase madre suavizada de datos de la mediana de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética después de ser aplicado el tercer filtro.



La Figura 45 y Figura 46 son las fases madres tanto de los datos de media y la mediana de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética,

La Figura 47 y Figura 48 son las fases madre suavizadas obtenidas en el tercer filtro, la forma de estas es más oblicua y tiende a los puntos dentro del intervalo de confianza de la pendiente.

Igualar Número de Señales Sintéticas en Magnitud con Señales Sintética de Fases Madre. En el último paso con las 8 fases madre se replican aleatoriamente hasta igualar el número de las magnitudes sintéticas, finalmente con esto, se tiene el mismo número de señales sintéticas en magnitud y en fase para generar las señales sintéticas.

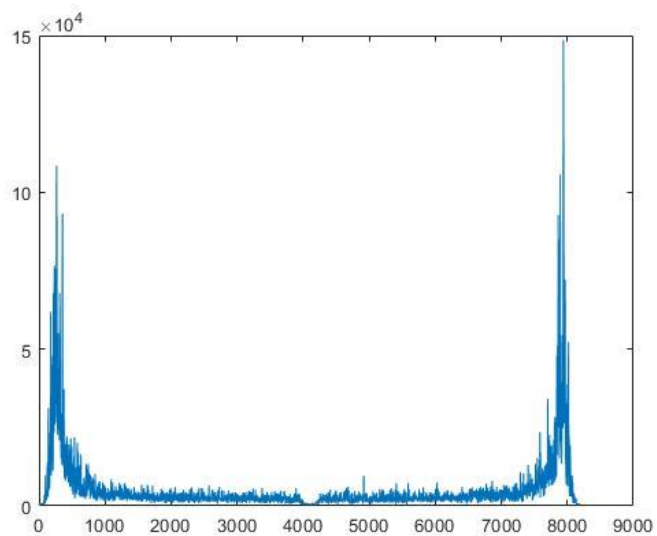
Unión de Magnitud y Fase Sintéticas

En la siguiente sección de código a las magnitudes sintéticas se les aplica un sistema de reflejo, donde los primeros 4096 puntos que es la mitad de la señal se refleja a la derecha, como se puede observar en la Figura 49, se presenta la magnitud de una señal sintética y tanto la derecha como la izquierda presenta diferentes puntos, para recuperar la señal es necesario que la magnitud sea simétrica, por este motivo se aplica este sistema y se obtienen estas magnitudes que son aptas para ser utilizadas como se observa en la Figura 50.

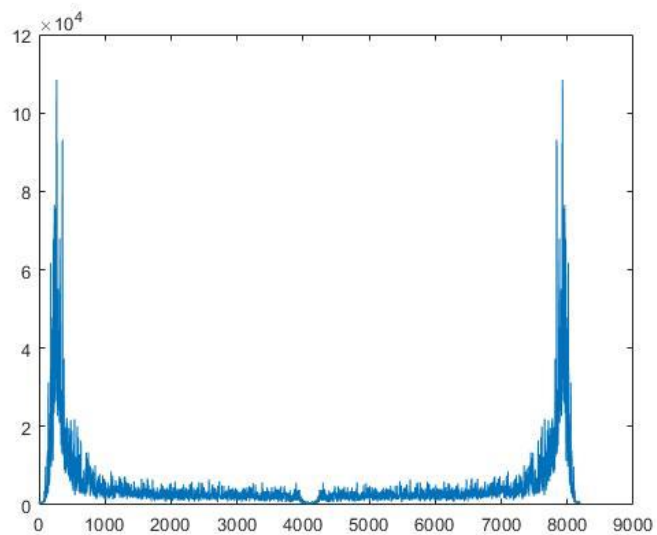
Finalmente se realiza la unión de la parte de la magnitud de la señal y la fase de la misma mediante soluciones matemáticas, con esto se obtiene el grupo de señales sintéticas tanto en fase como en magnitud en frecuencia.

Figura 49

Magnitud de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética.

**Figura 50**

Magnitud de una señal sismo-volcánica de tipo LP sintética aplicada el sistema espejo, simétrica a los primeros 4096 puntos.



Transformada Inversa de Fourier

En la sección final del código se aplica a las señales la transformada inversa de Fourier así se obtiene finalmente la señal que se va a presentar en la base de datos sintéticas.

Capítulo 4

Análisis de Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de las señales semisintéticas y sintéticas generadas y los resultados se utilizan detectores y clasificadores de señales que identifica eventos de tipo VT y LP.

A continuación, se presentan ejemplos de las señales de todos los diferentes eventos, señales originales, semisintéticas y sintéticas.

Señales Originales, Semisintéticas y Sintéticas

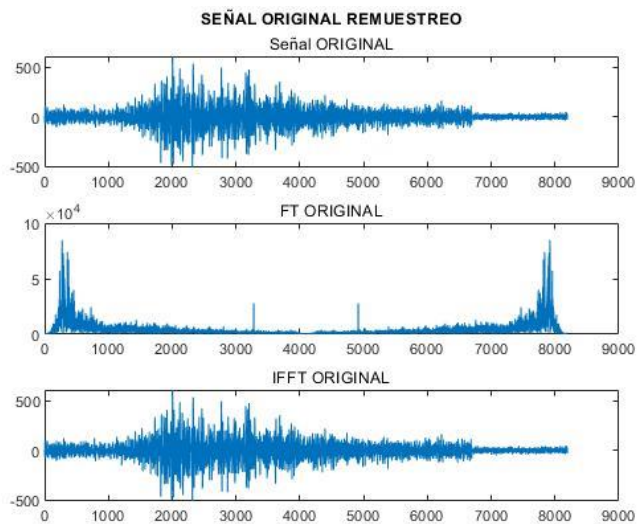
En este apartado se presentan ejemplos de las señales de todos los diferentes eventos, señales originales, semisintéticas y sintéticas. Mediante las siguientes figuras se puede apreciar las formas de las señales en cada uno de sus eventos LP, VT, HYB, ICEQUEAKE Y REGIONAL.

Señales Originales, Semisintéticas y Sintéticas de Eventos LP

Los eventos de tipo LP como indica su nombre son evento de un periodo prolongado como se muestra en la Figura 51, Figura 52, Figura 53 y Figura 54 .

Figura 51

Señal original sismo-volcánica de tipo LP, su transformada de Fourier y su transformada inversa de Fourier.

**Figura 52**

Magnitud de una señal sintética, fase de una señal original y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo LP.

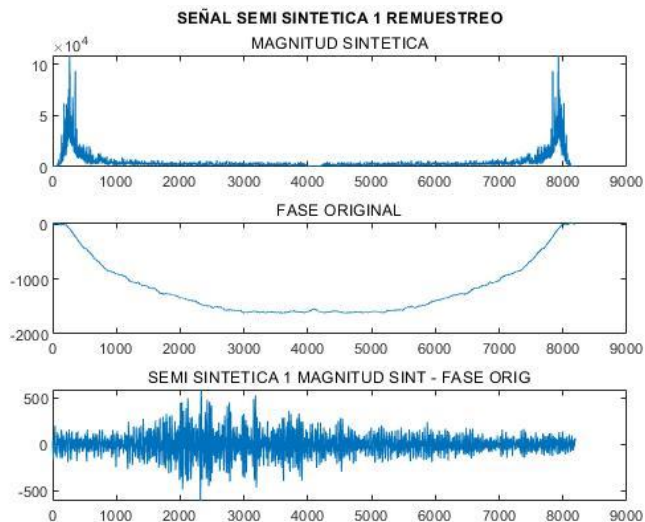
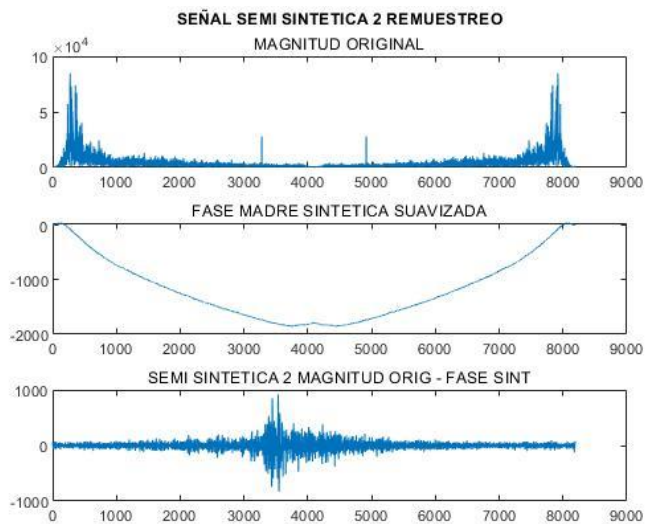
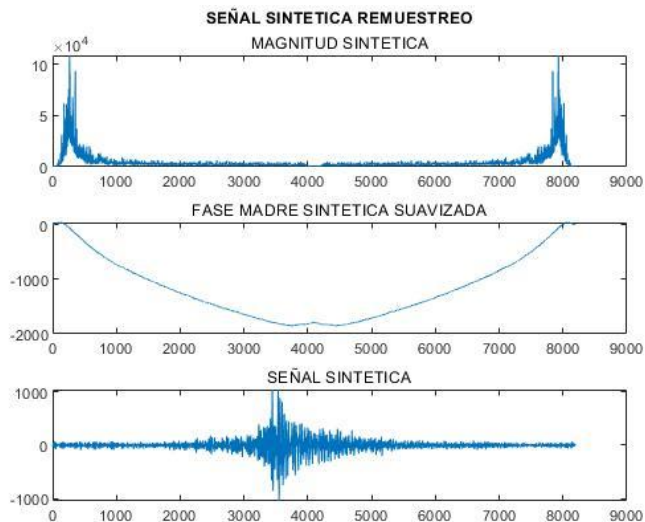


Figura 53

Magnitud de una señal original, fase de una señal sintética y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo LP.

**Figura 54**

Magnitud de una señal sintética, fase de una señal sintética y una señal sintética sismo-volcánica de tipo LP.



Señales Originales, Semisintéticas y Sintéticas de Eventos VT

Los eventos de tipo VT se producen en el interior del volcán y presentan la forma como se muestra en la Figura 55, Figura 56, Figura 57 y Figura 58.

Figura 55

Señal original sismo-volcánica de tipo VT, su transformada de Fourier y su transformada inversa de Fourier.

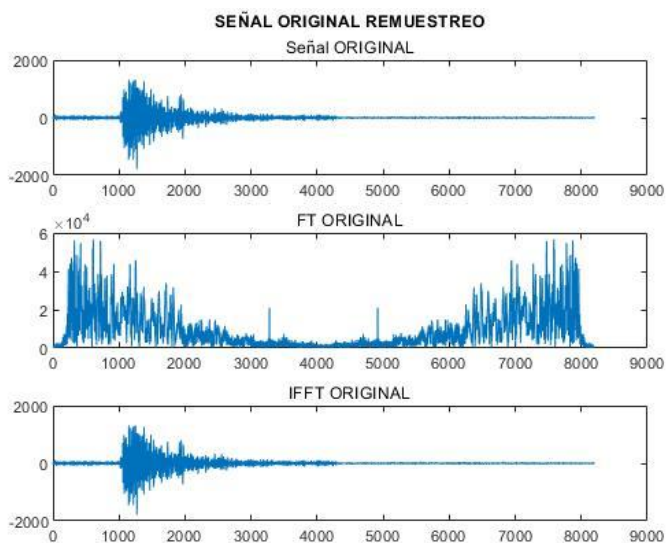
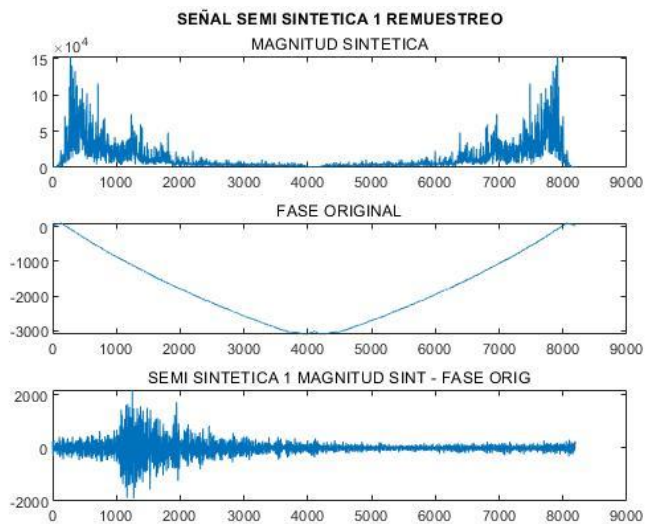


Figura 56

Magnitud de una señal sintética, fase de una señal original y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo VT.

**Figura 57**

Magnitud de una señal original, fase de una señal sintética y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo VT.

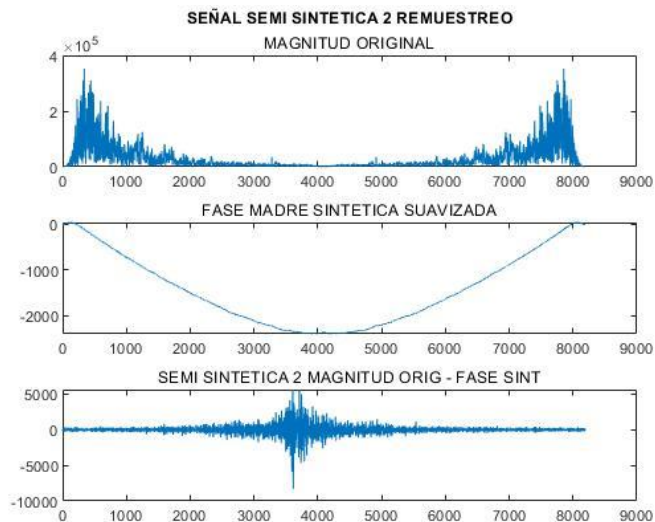
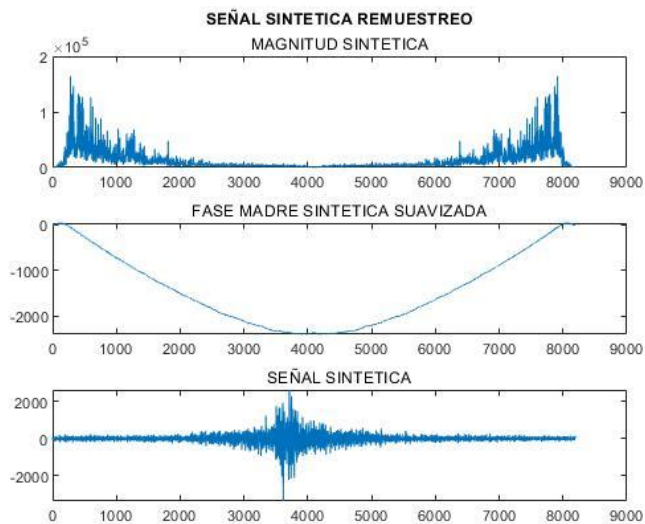


Figura 58

Magnitud de una señal sintética, fase de una señal sintética y una señal sintética sismo-volcánica de tipo VT.

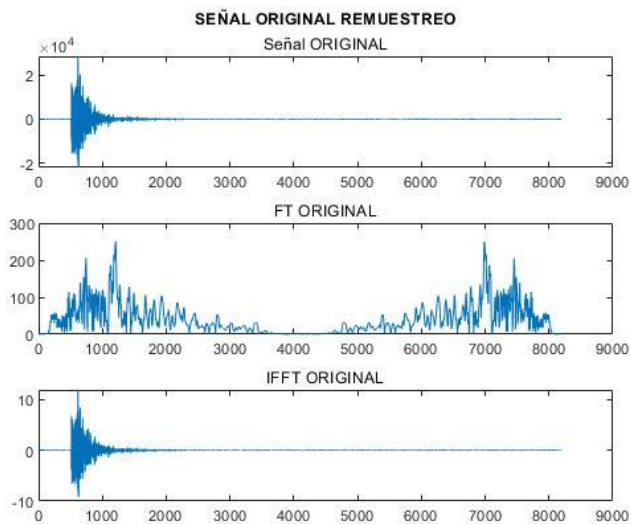


Señales Originales, Semisintéticas y Sintéticas de Eventos HB

Los eventos de tipo HB son eventos que presentan características de evento LP y VT y presentan la forma mixta como se muestra en la Figura 59, Figura 60, Figura 61 y Figura 62.

Figura 59

Señal original sismo-volcánica de tipo HB, su transformada de Fourier y su transformada inversa de Fourier.

**Figura 60**

Magnitud de una señal sintética, fase de una señal original y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo HB.

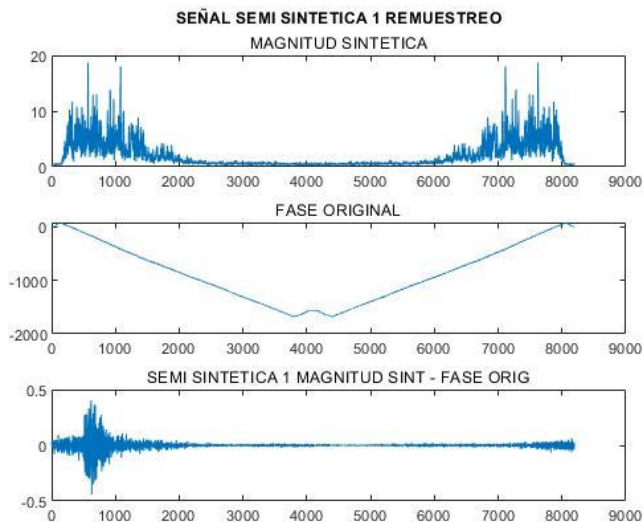


Figura 61

Magnitud de una señal original, fase de una señal sintética y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo HB.

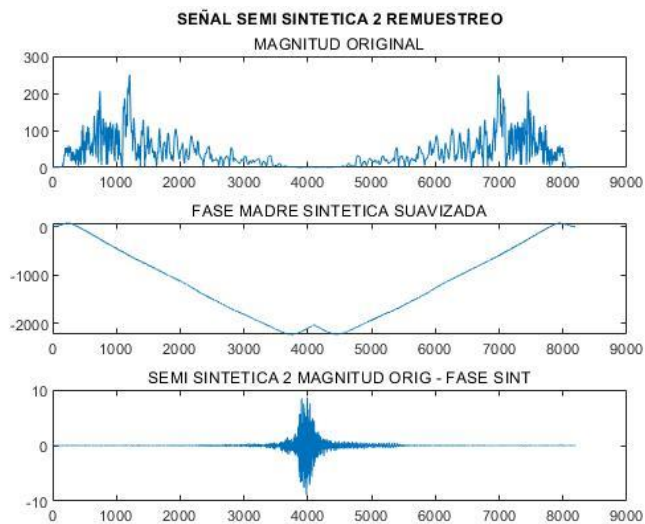
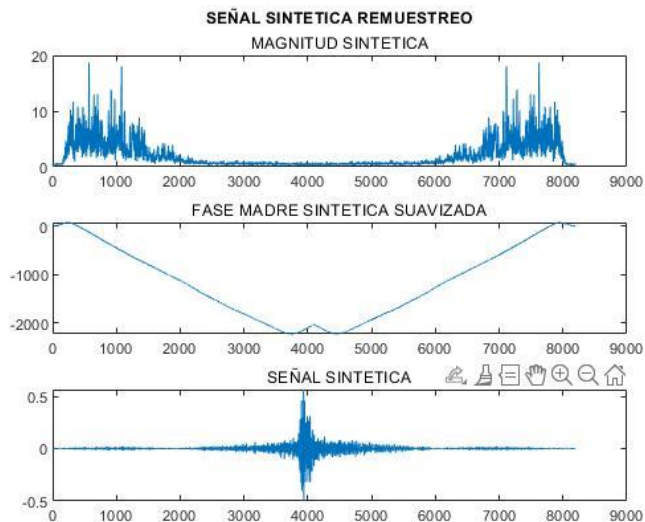


Figura 62

Magnitud de una señal sintética, fase de una señal sintética y una señal sintética sismo-volcánica de tipo HB.



Señales Originales, Semisintéticas y Sintéticas de Eventos ICEQUAKE

Los eventos de tipo ICEQUAKE se producen en el hielo que presenta el volcán Cotopaxi y presentan la forma como se muestra en la Figura 63, Figura 64, Figura 65 y Figura 66.

Figura 63

Señal original sismo-volcánica de tipo ICEQUAKE, su transformada de Fourier y su transformada inversa de Fourier.

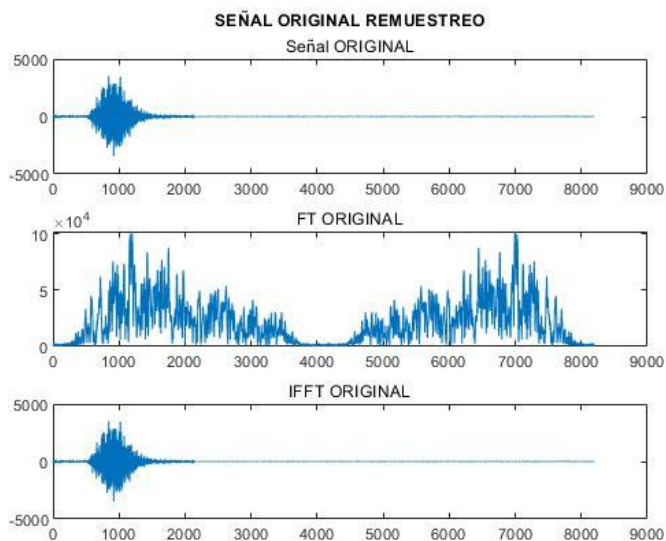


Figura 64

Magnitud de una señal sintética, fase de una señal original y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo ICEQUAKE.

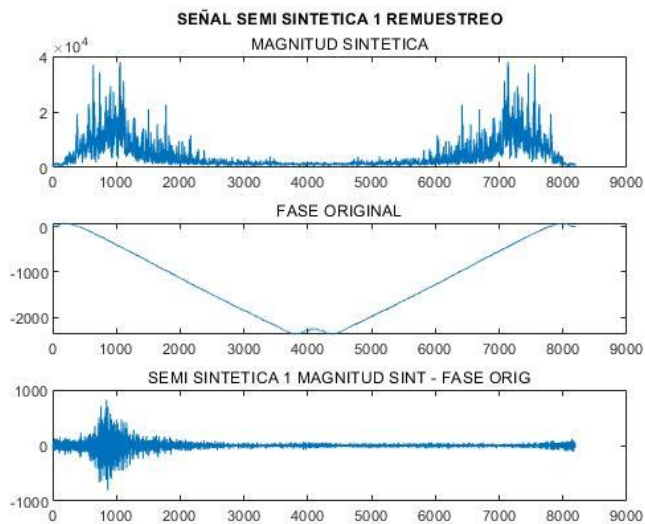


Figura 65

Magnitud de una señal original, fase de una señal sintética y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo ICEQUAKE.

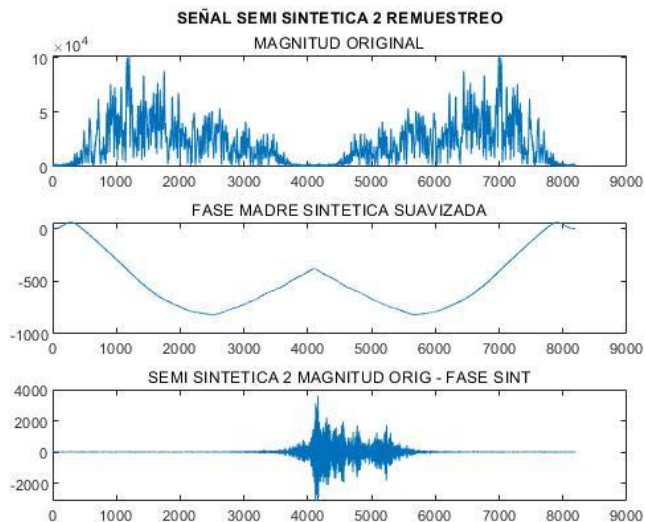
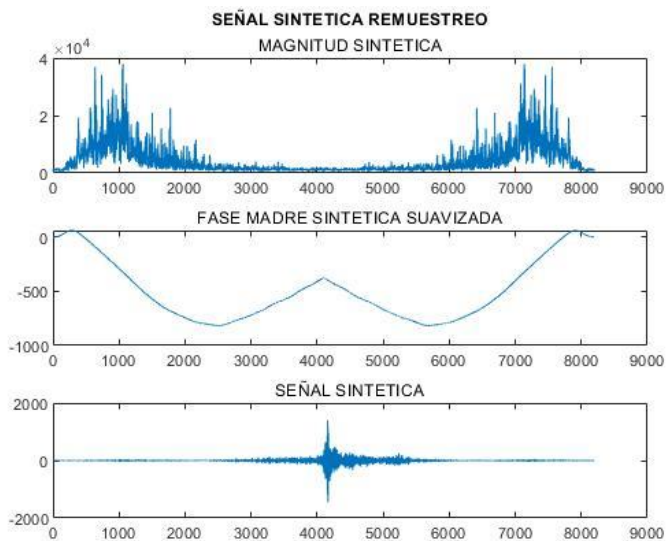


Figura 66

Magnitud de una señal sintética, fase de una señal sintética y una señal sintética sismo-volcánica de tipo ICEQUAKE.

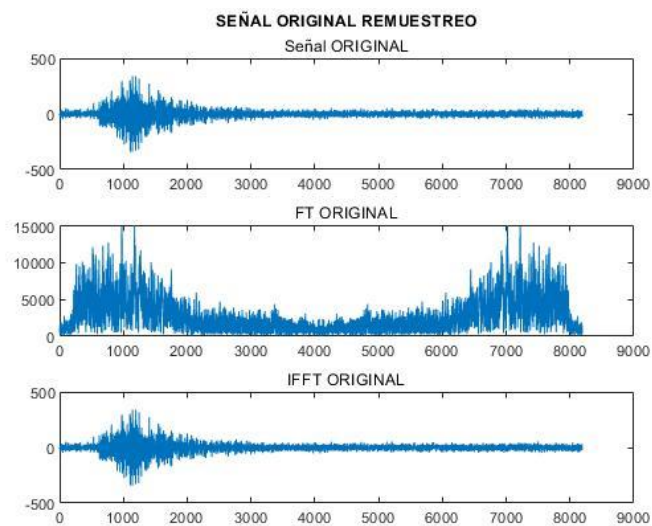


Señales Originales, Semisintéticas y Sintéticas de Eventos REGIONAL

Los eventos de tipo REGIONAL presentan la forma como se muestra en la Figura 67, Figura 68, Figura 69 y Figura 70.

Figura 67

Señal original sismo-volcánica de tipo REGIONAL, su transformada de Fourier y su transformada inversa de Fourier.

**Figura 68**

Magnitud de una señal sintética, fase de una señal original y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo REGIONAL.

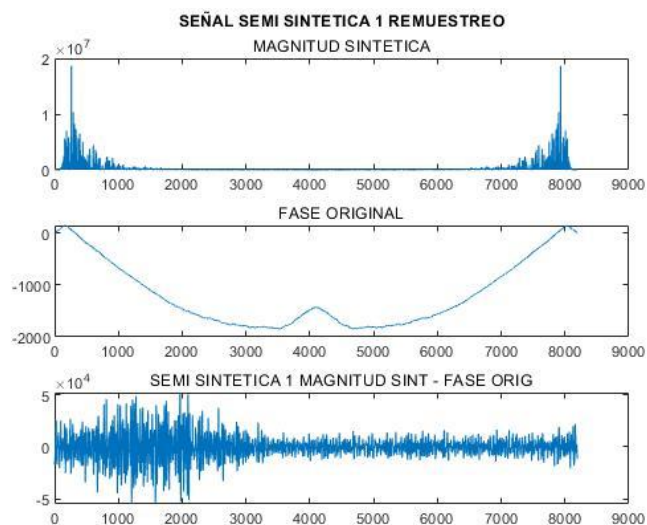
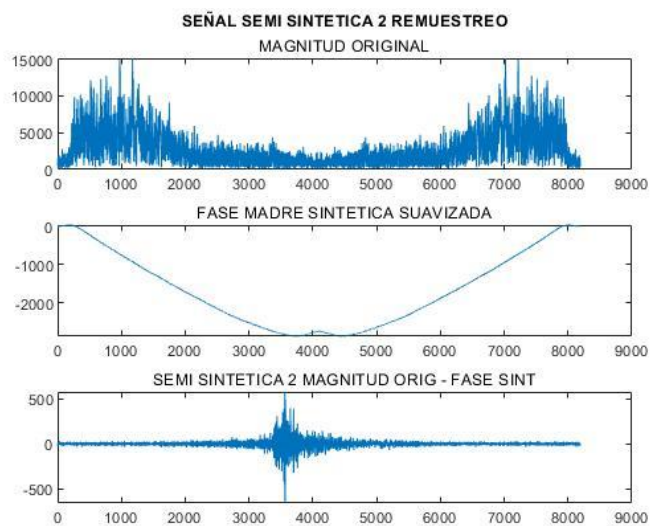
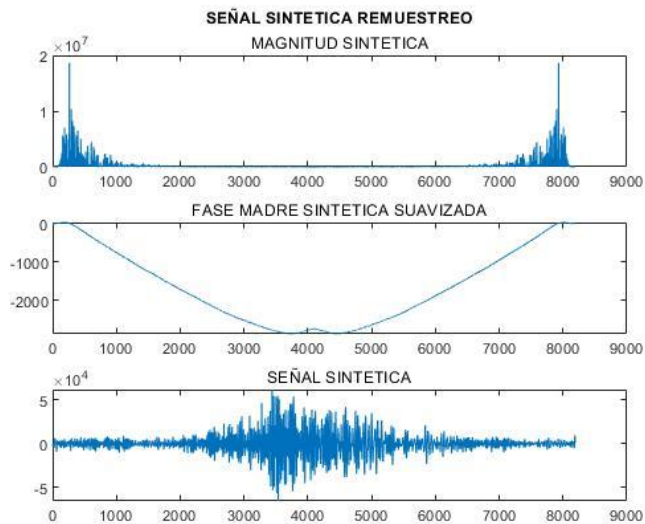


Figura 69

Magnitud de una señal original, fase de una señal sintética y una señal semisintética sismo-volcánica de tipo REGIONAL.

**Figura 70**

Magnitud de una señal sintética, fase de una señal sintética y una señal sintética sismo-volcánica de tipo REGIONAL.



Detector y clasificador de eventos de tipo LP Y VT

El detector y clasificador de señales micro-sísmicas es una aplicación desarrollada en el software Matlab y es un trabajo de investigación desarrollado por nuestro grupo de investigación, la detección y clasificación se basa en Redes Neuronales Convolucionales mediante espectrogramas, con 99% de éxito en la detección y 97% en clasificación, el cual presenta las siguientes pestañas que se muestran en la Figura 71, Figura 72, Figura 73 y Figura 74.

Figura 71

Pestaña de configuración de operación automática, donde se define el número de señales a ingresar, formatos y datos de configuración.

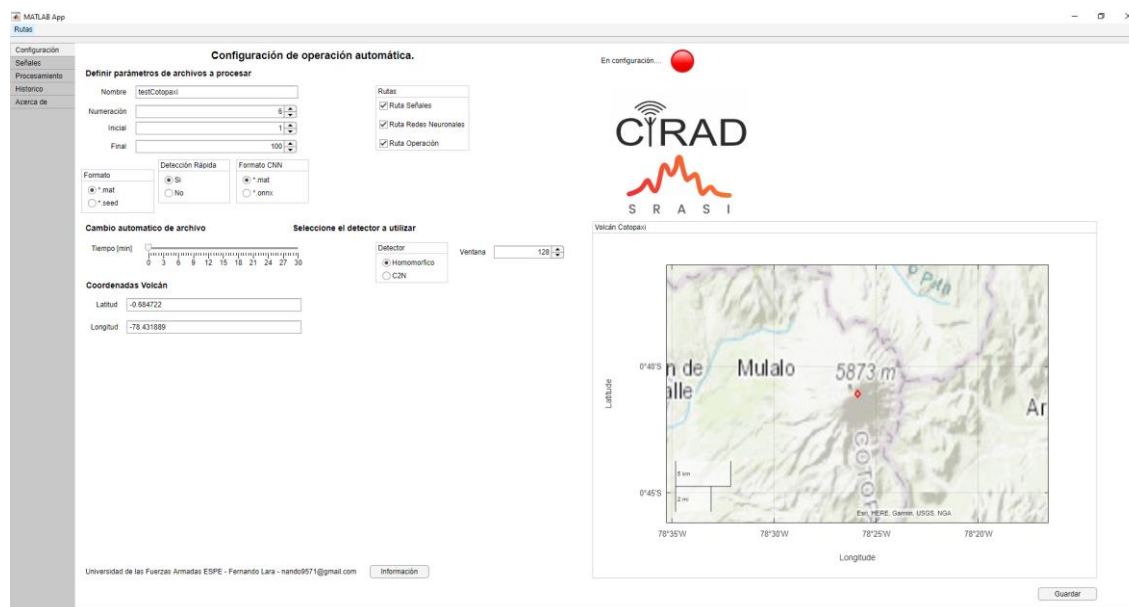


Figura 72

Pestaña de ruta de detección de señales.

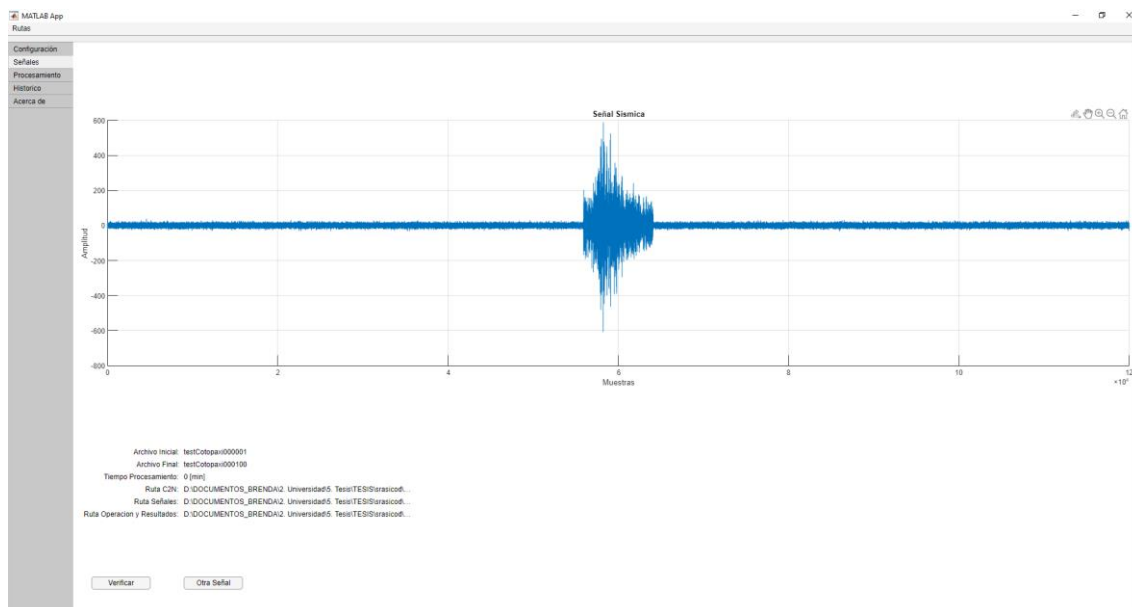


Figura 73

Pestaña de procesamiento de detección y clasificación de señales micro-sísmicas.

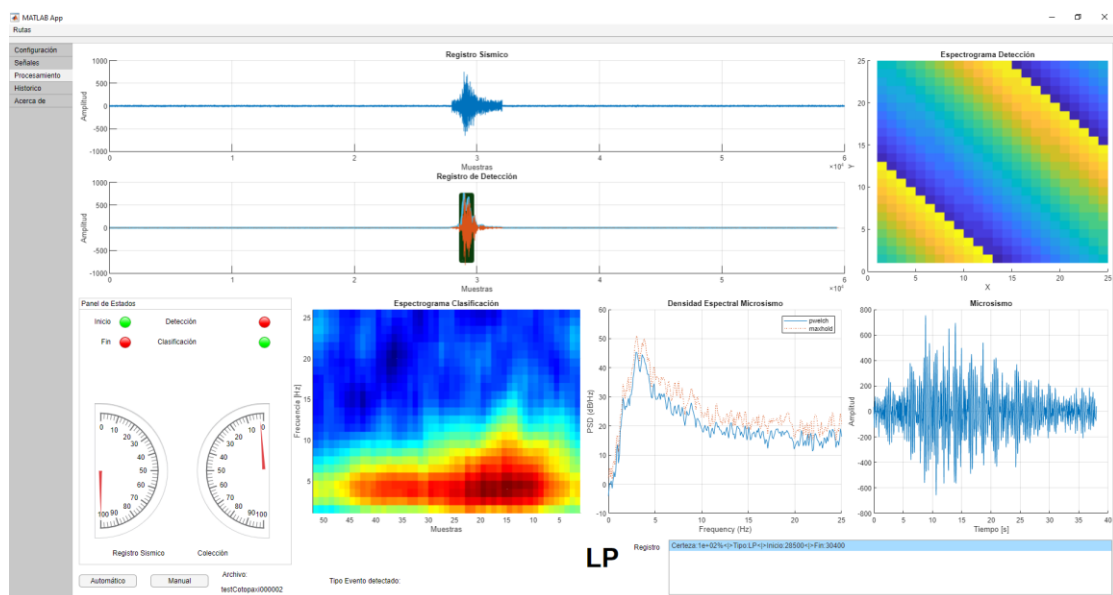


Figura 74

Pestaña del registro histórico de las señales procesadas, indica puntos de inicio, fin, tipo, duración, nombre del archivo y número de detecciones.

Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
21100	29800	ND	34	testCotqpa-i000000	1
628400	630100	LP	34	testCotqpa-i000011	1
688200	689900	LP	34	testCotqpa-i000012	1
748300	750200	LP	36	testCotqpa-i000013	1
808500	810300	LP	34	testCotqpa-i000014	1
868300	870100	LP	36	testCotqpa-i000015	1
928300	929900	LP	32	testCotqpa-i000016	1
988600	990500	LP	36	testCotqpa-i000017	1
1048400	1050300	LP	36	testCotqpa-i000018	1
1108100	1110000	LP	36	testCotqpa-i000019	1
1168300	1170100	LP	36	testCotqpa-i000020	1
1228400	1230100	LP	34	testCotqpa-i000021	1
28500	30200	LP	34	testCotqpa-i000001	1
88500	90400	LP	36	testCotqpa-i000002	1
148500	150300	LP	36	testCotqpa-i000003	1

Resultados de Detección y Clasificación de Evento LP.

Las pruebas se realizaron con 100 señales semisintéticas y 100 señales sintéticas para evaluar la detección y la clasificación de las señales micro-sísmicas.

Resultados de Detección y Clasificación de Señales Semisintéticas.

Se evaluaron 100 señales semisintéticas, los resultados se muestran a continuación en la Figura 75, Figura 76 y Figura 77.

Figura 75

Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 1 a la 36.

Configuración						
Datos de microsimos reconocidos						
Señales	Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
Historico	0	0	ND	0	NA	0
Acarica de	28500	30200	LP	34	testCotpaq-000001	1
	65500	90400	LP	38	testCotpaq-000002	1
	148500	150300	LP	36	testCotpaq-000003	1
	208400	210200	LP	38	testCotpaq-000004	1
	268400	270400	LP	40	testCotpaq-000005	1
	328300	330000	LP	34	testCotpaq-000006	1
	388300	390100	LP	36	testCotpaq-000007	1
	448300	450200	LP	38	testCotpaq-000008	1
	508100	509000	LP	34	testCotpaq-000009	1
	623400	630100	LP	34	testCotpaq-000011	1
	688200	689900	LP	34	testCotpaq-000012	1
	748300	750200	LP	38	testCotpaq-000013	1
	808600	810300	LP	34	testCotpaq-000014	1
	868300	870100	LP	36	testCotpaq-000015	1
	928300	929900	LP	32	testCotpaq-000016	1
	988600	990500	LP	38	testCotpaq-000017	1
	1048400	1050300	LP	38	testCotpaq-000018	1
	1108100	1110000	LP	38	testCotpaq-000019	1
	1168300	1170100	LP	36	testCotpaq-000020	1
	1228400	1230100	LP	34	testCotpaq-000021	1
	1288300	1290100	LP	36	testCotpaq-000022	1
	1348100	1350000	LP	38	testCotpaq-000023	1
	1408100	1409700	LP	32	testCotpaq-000024	1
	1468500	1470400	LP	38	testCotpaq-000025	1
	1528480	1530380	LP	38	testCotpaq-000026	1
	1588200	1590000	LP	36	testCotpaq-000027	1
	1648900	1650700	LP	36	testCotpaq-000028	1
	1708300	1710500	LP	44	testCotpaq-000029	1
	1768300	1770100	LP	36	testCotpaq-000030	1
	1828300	1830400	LP	42	testCotpaq-000031	1
	1888300	1890200	LP	38	testCotpaq-000032	1
	1948400	1950200	LP	36	testCotpaq-000033	1
	2008400	2010400	LP	40	testCotpaq-000034	1
	2068300	2070000	LP	34	testCotpaq-000035	1
	2128500	2130400	LP	38	testCotpaq-000036	1

Figura 76

Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 36 a la 73.

Configuración						
Datos de microsimos reconocidos						
Señales	Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
Historico	2128500	2130400	LP	38	testCotpaq-000036	1
Acarica de	2188200	2190400	LP	44	testCotpaq-000037	1
	2248300	2250200	LP	38	testCotpaq-000038	1
	2308300	2310100	LP	38	testCotpaq-000039	1
	2368400	2370300	LP	38	testCotpaq-000040	1
	2428200	2430200	LP	40	testCotpaq-000041	1
	2488200	2490000	LP	36	testCotpaq-000042	1
	2548200	2550100	LP	38	testCotpaq-000043	1
	2608300	2610100	LP	38	testCotpaq-000044	1
	2668400	2670400	LP	40	testCotpaq-000045	1
	2728400	2730100	LP	34	testCotpaq-000046	1
	2788400	2790200	LP	36	testCotpaq-000047	1
	2848100	2849900	LP	36	testCotpaq-000048	1
	2908000	2910500	LP	38	testCotpaq-000049	1
	2968400	2970200	LP	36	testCotpaq-000050	1
	3029100	3030700	LP	32	testCotpaq-000051	1
	3089500	3091100	LP	32	testCotpaq-000052	1
	3149400	3151000	LP	32	testCotpaq-000053	1
	3209500	3211100	LP	32	testCotpaq-000054	1
	3269100	3270800	LP	34	testCotpaq-000055	1
	3329100	3330700	LP	32	testCotpaq-000056	1
	3389300	3390900	LP	32	testCotpaq-000057	1
	3449400	3451100	LP	34	testCotpaq-000058	1
	3509100	3510700	LP	32	testCotpaq-000059	1
	3569400	3571100	LP	34	testCotpaq-000060	1
	3629200	3630700	LP	30	testCotpaq-000061	1
	3749400	3751100	LP	34	testCotpaq-000063	1
	3809000	3810900	LP	38	testCotpaq-000064	1
	3869100	3870800	LP	34	testCotpaq-000065	1
	3929300	3930900	LP	32	testCotpaq-000066	1
	3989300	3990900	LP	32	testCotpaq-000067	1
	4049400	4051000	LP	32	testCotpaq-000068	1
	4109300	4110800	LP	30	testCotpaq-000069	1
	4169300	4170900	LP	32	testCotpaq-000070	1
	4229500	4231100	LP	32	testCotpaq-000071	1
	4289500	4291100	LP	32	testCotpaq-000072	1
	4349300	4351000	LP	34	testCotpaq-000073	1

Figura 77

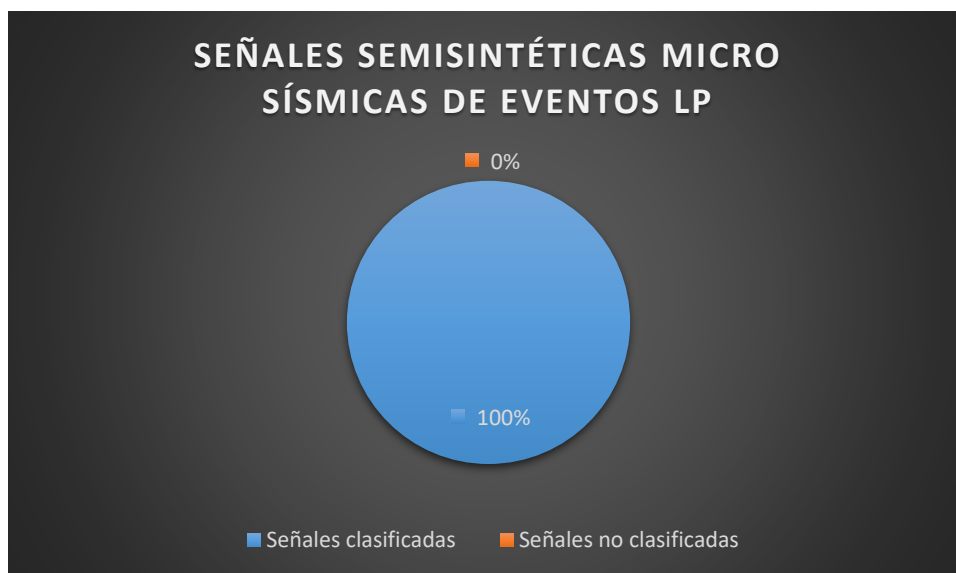
Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 64 a la 100.

Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
3809000	3810000	LP	38	testCotepan-000064	1
3809100	3870000	LP	34	testCotepan-000065	1
3929300	3920900	LP	32	testCotepan-000066	1
3969300	3990900	LP	32	testCotepan-000067	1
4049400	4051000	LP	32	testCotepan-000068	1
4109300	4110800	LP	30	testCotepan-000069	1
4169300	4170900	LP	32	testCotepan-000070	1
4229500	4231100	LP	32	testCotepan-000071	1
4289500	4291100	LP	32	testCotepan-000072	1
4349300	4351000	LP	34	testCotepan-000073	1
4409000	4410800	LP	36	testCotepan-000074	1
4469400	4471000	LP	32	testCotepan-000075	1
4529500	4531100	LP	32	testCotepan-000076	1
4589000	4590800	LP	36	testCotepan-000077	1
4649500	4651000	LP	30	testCotepan-000078	1
4709500	4711100	LP	32	testCotepan-000079	1
4769100	4770800	LP	34	testCotepan-000080	1
4829400	4831000	LP	32	testCotepan-000081	1
4889400	4891000	LP	32	testCotepan-000082	1
4949300	4950900	LP	32	testCotepan-000083	1
5009300	5010800	LP	30	testCotepan-000084	1
5069100	5070700	LP	32	testCotepan-000085	1
5129100	5130700	LP	32	testCotepan-000086	1
5189400	5191000	LP	32	testCotepan-000087	1
5249400	5251000	LP	32	testCotepan-000088	1
5309000	5310800	LP	36	testCotepan-000089	1
5369000	5370700	LP	34	testCotepan-000090	1
5429400	5431000	LP	32	testCotepan-000091	1
5489100	5490700	LP	32	testCotepan-000092	1
5549400	5551000	LP	32	testCotepan-000093	1
5609300	5610800	LP	30	testCotepan-000094	1
5669500	5671000	LP	30	testCotepan-000095	1
5729500	5731200	LP	34	testCotepan-000096	1
5789300	5791000	LP	34	testCotepan-000097	1
5849000	5850800	LP	36	testCotepan-000098	1
5909300	5911000	LP	34	testCotepan-000099	1
5969300	5971100	LP	36	testCotepan-000100	1

El resultado de la detección y reconocimiento de las 100 señales semisintéticas de eventos LP se presenta en la Figura 78, donde se observan que son la detección y reconocimiento es de un 100% de las señales semi sintéticas.

Figura 78

Resultados de la clasificación de las señales semisintéticas.



Resultados de Detección y Clasificación de Señales Sintéticas.

Se evaluaron 100 señales sintéticas, los resultados se muestran a continuación en la Figura 79, Figura 80, Figura 81 y Figura 82:

Figura 79

Ruta y nombre de los archivos de las señales sísmicas.

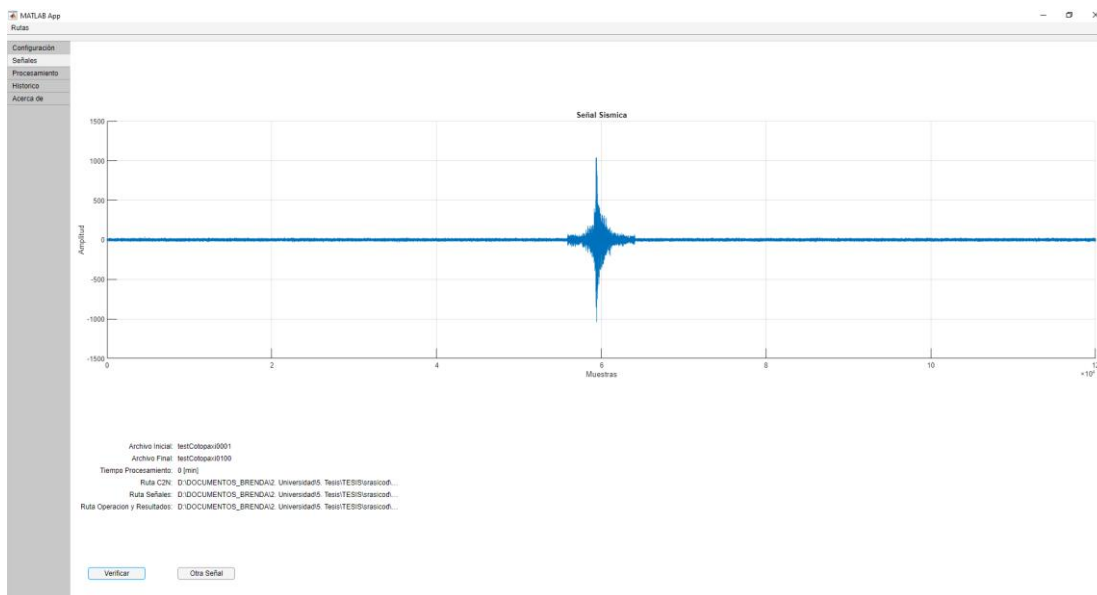


Figura 80

Resultados de las señales sintéticas evaluadas de la 1 a la 42.

Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
29200	30800	LP	32	testCotopaxi0001	1
89500	91100	LP	32	testCotopaxi0002	1
149400	151000	LP	32	testCotopaxi0003	1
209100	270800	LP	34	testCotopaxi0005	1
329100	330700	LP	32	testCotopaxi0006	1
389200	391000	LP	34	testCotopaxi0007	1
449400	451100	LP	34	testCotopaxi0008	1
509200	510700	LP	30	testCotopaxi0009	1
569400	571000	LP	32	testCotopaxi0010	1
629200	630800	LP	32	testCotopaxi0011	1
689500	691100	LP	32	testCotopaxi0012	1
749400	751000	LP	32	testCotopaxi0013	1
809200	810800	LP	32	testCotopaxi0014	1
869000	870600	LP	36	testCotopaxi0015	1
929300	931000	LP	34	testCotopaxi0016	1
989300	991000	LP	34	testCotopaxi0017	1
1049400	1051100	LP	34	testCotopaxi0018	1
1109300	1110800	LP	30	testCotopaxi0019	1
1169300	1170800	LP	32	testCotopaxi0020	1
1229500	1231100	LP	32	testCotopaxi0022	1
1339400	1351100	LP	34	testCotopaxi0023	1
1409100	1410800	LP	34	testCotopaxi0024	1
1469400	1471000	LP	32	testCotopaxi0025	1
1529500	1531100	LP	32	testCotopaxi0026	1
1589100	1590800	LP	34	testCotopaxi0027	1
1759100	177000	LP	34	testCotopaxi0030	1
1829400	1831000	LP	32	testCotopaxi0031	1
1849300	1951000	LP	34	testCotopaxi0033	1
2099300	2010800	LP	30	testCotopaxi0034	1
2099100	2070800	LP	34	testCotopaxi0035	1
2129100	2130800	LP	34	testCotopaxi0036	1
2189400	2191000	LP	32	testCotopaxi0037	1
2249400	2251000	LP	32	testCotopaxi0038	1
2309100	2310800	LP	34	testCotopaxi0039	1
2369100	2370800	LP	34	testCotopaxi0040	1
2429400	2431000	LP	32	testCotopaxi0041	1
2489500	2490800	LP	36	testCotopaxi0042	1

Figura 81

Resultados de las señales sintéticas evaluadas de la 38 a la 77.

Datos de microsegundos reconocidos

Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
2248400	2251000	LP	32	testCotopaxi0038	1
2309100	2310800	LP	34	testCotopaxi0039	1
2369100	2370800	LP	34	testCotopaxi0040	1
2429400	2431000	LP	32	testCotopaxi0041	1
2489500	2490500	LP	36	testCotopaxi0042	1
2548400	2551000	LP	32	testCotopaxi0043	1
2609300	2610800	LP	30	testCotopaxi0044	1
2669500	2671000	LP	30	testCotopaxi0045	1
2729500	2731000	LP	32	testCotopaxi0046	1
2789300	2791000	LP	34	testCotopaxi0047	1
2849000	2850800	LP	36	testCotopaxi0048	1
2909300	2910900	LP	32	testCotopaxi0049	1
2969300	2971000	LP	34	testCotopaxi0050	1
3029300	3031000	LP	34	testCotopaxi0051	1
3149300	3150800	LP	30	testCotopaxi0052	1
3209500	3211000	LP	32	testCotopaxi0054	1
3269100	3270800	LP	34	testCotopaxi0055	1
3329300	3330900	LP	32	testCotopaxi0056	1
3389100	3390800	LP	34	testCotopaxi0057	1
3449100	3450800	LP	34	testCotopaxi0058	1
3509500	3511000	LP	30	testCotopaxi0059	1
3569400	3571100	LP	34	testCotopaxi0060	1
3629300	3630800	LP	30	testCotopaxi0061	1
3689500	3691100	LP	32	testCotopaxi0062	1
3749400	3751000	LP	32	testCotopaxi0063	1
3809500	3811000	LP	32	testCotopaxi0064	1
3829400	3831000	LP	32	testCotopaxi0066	1
3889400	3891000	LP	32	testCotopaxi0067	1
4049300	4051000	LP	34	testCotopaxi0068	1
4109400	4111000	LP	32	testCotopaxi0069	1
4169500	4171000	LP	30	testCotopaxi0070	1
4229400	4231000	LP	32	testCotopaxi0071	1
4289400	4291000	LP	32	testCotopaxi0072	1
4349100	4350800	LP	34	testCotopaxi0073	1
4409100	4410800	LP	34	testCotopaxi0074	1
4529500	4531100	LP	32	testCotopaxi0076	1
4589300	4590800	LP	30	testCotopaxi0077	1

Estado ● Almacenar

Figura 82

Resultados de las señales sintéticas evaluadas de la 60 a la 100.

Datos de microsegundos reconocidos

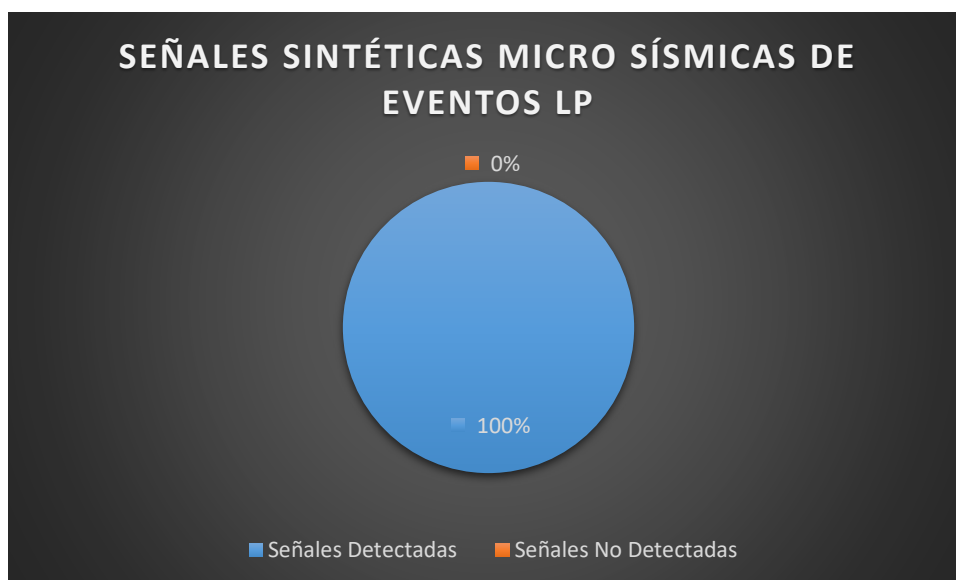
Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
3568400	3571100	LP	34	testCotopaxi0060	1
3629300	3630800	LP	30	testCotopaxi0061	1
3689500	3691100	LP	32	testCotopaxi0062	1
3748400	3751000	LP	32	testCotopaxi0063	1
3809500	3811000	LP	32	testCotopaxi0064	1
3829400	3831000	LP	32	testCotopaxi0066	1
3889400	3891000	LP	32	testCotopaxi0067	1
4049300	4051000	LP	34	testCotopaxi0068	1
4109500	4110000	LP	30	testCotopaxi0070	1
4229400	4231000	LP	32	testCotopaxi0071	1
4289400	4291000	LP	32	testCotopaxi0072	1
4349100	4350800	LP	34	testCotopaxi0073	1
4409100	4410800	LP	34	testCotopaxi0074	1
4529500	4531100	LP	32	testCotopaxi0076	1
4589300	4590800	LP	30	testCotopaxi0077	1
4649300	4651000	LP	34	testCotopaxi0078	1
4709300	4710900	LP	32	testCotopaxi0079	1
4769500	4771000	LP	30	testCotopaxi0080	1
4829500	4830800	LP	36	testCotopaxi0081	1
4889300	4890800	LP	30	testCotopaxi0082	1
4949400	4951000	LP	32	testCotopaxi0083	1
5009500	5010900	LP	28	testCotopaxi0084	1
5069300	5071000	LP	34	testCotopaxi0085	1
5129300	5130800	LP	30	testCotopaxi0086	1
5189100	5190700	LP	32	testCotopaxi0087	1
5249100	5250700	LP	32	testCotopaxi0088	1
5309300	5310800	LP	30	testCotopaxi0089	1
5369400	5371100	LP	34	testCotopaxi0090	1
5429500	5431000	LP	34	testCotopaxi0091	1
5489400	5491000	LP	32	testCotopaxi0092	1
5549100	5550800	LP	34	testCotopaxi0093	1
5609500	5611000	LP	32	testCotopaxi0094	1
5669300	5670900	LP	32	testCotopaxi0095	1
5729500	5731100	LP	32	testCotopaxi0096	1
5789300	5791000	LP	34	testCotopaxi0097	1
5849300	5851100	LP	36	testCotopaxi0099	1

Estado ● Almacenar

El resultado de la detección y reconocimiento de las 100 señales sintéticas de eventos LP se presenta en la Figura 83, donde se observa que son la detección y reconocimiento es de un 100% de las señales sintéticas.

Figura 83

Resultados de la clasificación de las señales sintéticas.



Resultados de Detección y Clasificación de Evento VT.

Las pruebas se realizaron con 100 señales semisintéticas y 100 señales sintéticas para evaluar la detección y la clasificación de las señales micro-sísmicas.

Resultados de Detección y Clasificación de Señales Semisintéticas.

Se evaluaron 100 señales semisintéticas, los resultados se muestran a continuación en la Figura 84, Figura 85, Figura 86, Figura 87 y Figura 88.

Figura 84

Ruta y nombre de los archivos de las señales sísmicas.

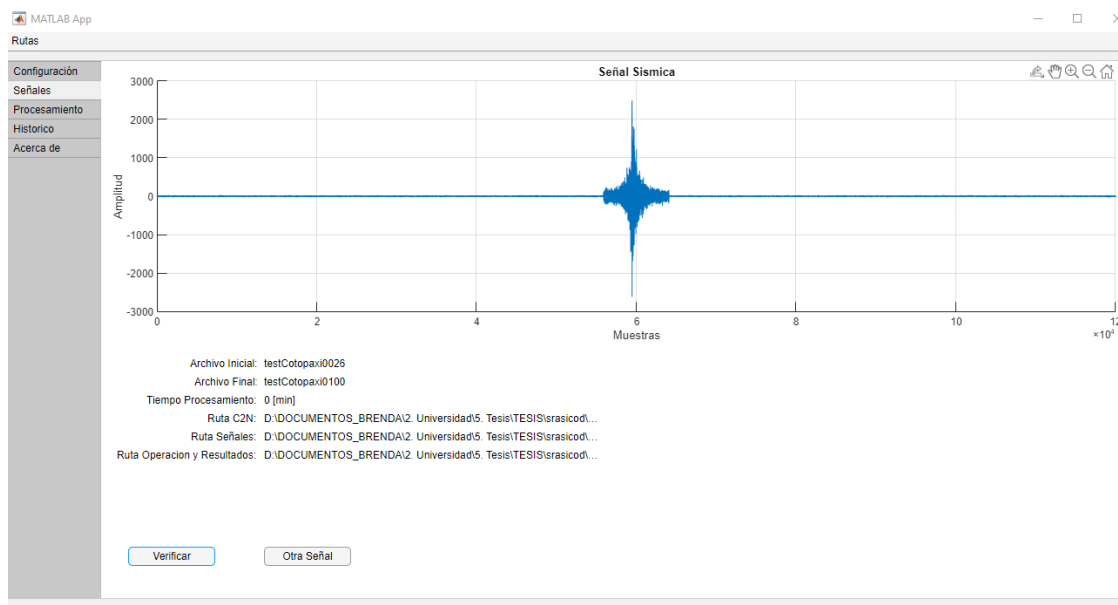


Figura 85

Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 1 a la 9.

The screenshot shows the MATLAB App interface displaying a table titled "Datos de microsismos reconocidos". The table contains the following data:

Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
0	0	ND	0	NA	0
28100	29900	LP	36	testCotopaxi000001	1
68100	90100	VT	40	testCotopaxi000002	1
148100	150100	LP	40	testCotopaxi000003	1
208000	209800	LP	36	testCotopaxi000004	1
268100	269900	VT	36	testCotopaxi000005	1
328000	329800	LP	36	testCotopaxi000006	1
388100	390100	VT	36	testCotopaxi000007	1
448100	449800	VT	36	testCotopaxi000008	1
508000	509800	VT	36	testCotopaxi000009	1

Figura 86

Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 11 a la 45.

Configuración		Datos de microsismos reconocidos				
Señales						
Procesamiento	Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
Historico	628100	630000	VT	38	testCotopaei000011	1
Acerca de	688200	690100	VT	35	testCotopaei000012	1
	748100	750200	LP	42	testCotopaei000013	1
	808100	809900	VT	36	testCotopaei000014	1
	868100	870000	VT	38	testCotopaei000015	1
	928100	930100	VT	40	testCotopaei000016	1
	988200	990300	VT	42	testCotopaei000017	1
	1048000	1050100	VT	42	testCotopaei000018	1
	1108100	1110000	VT	38	testCotopaei000019	1
	1168000	1170000	LP	40	testCotopaei000020	1
	1228100	1229900	VT	36	testCotopaei000021	1
	1288100	1290100	LP	38	testCotopaei000022	1
	1348100	1350000	VT	38	testCotopaei000023	1
	1408100	1410000	LP	38	testCotopaei000024	1
	1468100	1470000	LP	38	testCotopaei000025	1
	1528200	1530100	LP	38	testCotopaei000026	1
	1588200	1589900	VT	34	testCotopaei000027	1
	1648000	1650000	VT	28	testCotopaei000027	2
	1648100	1649800	VT	34	testCotopaei000028	1
	1649000	1650500	VT	30	testCotopaei000028	2
	1767900	1769800	VT	38	testCotopaei000030	1
	1828100	1829900	LP	36	testCotopaei000031	1
	1888000	1889900	VT	38	testCotopaei000032	1
	1948100	1949900	VT	36	testCotopaei000033	1
	2008100	2010100	VT	40	testCotopaei000034	1
	2068100	2070100	VT	40	testCotopaei000035	1
	2128000	2130000	VT	40	testCotopaei000036	1
	2187900	2189800	VT	34	testCotopaei000037	1
	2247900	2249500	VT	38	testCotopaei000038	1
	2307700	2309400	VT	34	testCotopaei000039	1
	2367700	2369600	VT	38	testCotopaei000040	1
	2427800	2429500	VT	36	testCotopaei000041	1
	2487700	2489400	VT	34	testCotopaei000042	1
	2547700	2549300	VT	32	testCotopaei000043	1
	2607700	2609400	VT	34	testCotopaei000044	1
	2667800	2669700	VT	38	testCotopaei000045	1

Figura 87

Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 44 a la 79.

Configuración		Datos de microsismos reconocidos				
Señales						
Procesamiento	Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
Historico	2607700	2609400	VT	34	testCotopaei000044	1
Acerca de	2667800	2669700	VT	38	testCotopaei000045	1
	2727900	2729500	VT	34	testCotopaei000046	1
	2787700	2789400	VT	34	testCotopaei000047	1
	2847700	2849400	VT	34	testCotopaei000048	1
	2907700	2909300	VT	32	testCotopaei000048	1
	2967800	2969400	VT	32	testCotopaei000050	1
	3029000	3030800	VT	36	testCotopaei000051	1
	3089500	3091000	VT	30	testCotopaei000052	1
	3149200	3150900	LP	34	testCotopaei000053	1
	3209100	3210500	VT	34	testCotopaei000054	1
	3269200	3270800	LP	32	testCotopaei000055	1
	3329100	3330700	VT	32	testCotopaei000056	1
	3389000	3390700	LP	34	testCotopaei000057	1
	3449100	3450700	VT	32	testCotopaei000058	1
	3509400	3511000	VT	32	testCotopaei000059	1
	3569200	3570800	VT	32	testCotopaei000060	1
	3629400	3631000	LP	32	testCotopaei000061	1
	3689200	3690900	VT	34	testCotopaei000062	1
	3749100	3750700	VT	32	testCotopaei000063	1
	3809500	3811000	VT	30	testCotopaei000064	1
	3869100	3870800	LP	34	testCotopaei000065	1
	3929300	3930800	VT	30	testCotopaei000066	1
	3989300	3990800	LP	30	testCotopaei000067	1
	4049200	4050900	VT	34	testCotopaei000068	1
	4109000	4110700	LP	34	testCotopaei000069	1
	4169200	4170900	VT	32	testCotopaei000070	1
	4229200	4230900	VT	34	testCotopaei000071	1
	4289100	4290800	LP	34	testCotopaei000072	1
	4349000	4350700	VT	34	testCotopaei000073	1
	4409100	4410700	VT	32	testCotopaei000074	1
	4469100	4470800	VT	34	testCotopaei000075	1
	4529100	4530700	VT	32	testCotopaei000076	1
	4589200	4591100	VT	38	testCotopaei000077	1
	4649200	4650800	VT	32	testCotopaei000078	1
	4709500	4711100	VT	32	testCotopaei000079	1

Figura 88

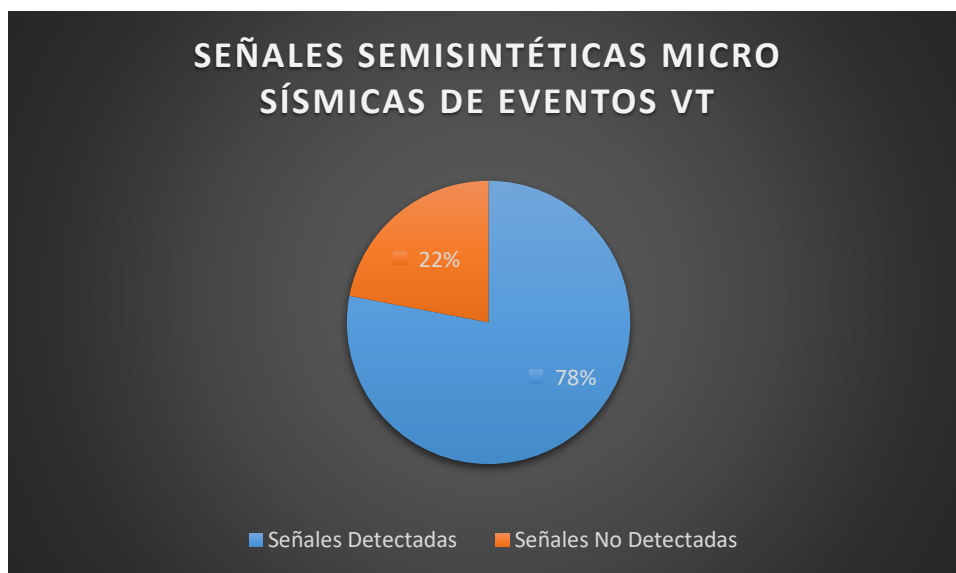
Resultados de las señales semisintéticas evaluadas de la 64 a la 100.

Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
3809000	3811000	VT	30	testCotopaxi0000094	1
3809100	3810000	LP	34	testCotopaxi0000095	1
3829300	3830000	VT	30	testCotopaxi0000096	1
3889300	3890000	LP	30	testCotopaxi0000097	1
4049200	4050000	VT	34	testCotopaxi0000098	1
4109000	4110700	LP	34	testCotopaxi0000099	1
4189300	4179000	VT	32	testCotopaxi0000100	1
4229200	4230000	VT	34	testCotopaxi0000101	1
4289100	4290000	LP	34	testCotopaxi0000102	1
4349000	4350700	VT	34	testCotopaxi0000103	1
4409100	4410700	VT	32	testCotopaxi0000104	1
4469100	4470000	VT	34	testCotopaxi0000105	1
4529100	4530700	VT	32	testCotopaxi0000106	1
4589200	4591000	VT	36	testCotopaxi0000107	1
4649200	4650000	VT	32	testCotopaxi0000108	1
4709500	4711100	VT	32	testCotopaxi0000109	1
4769100	4771000	VT	36	testCotopaxi0000110	1
4829500	4831100	LP	32	testCotopaxi0000111	1
4889400	4891000	LP	32	testCotopaxi0000112	1
4949200	4950000	LP	32	testCotopaxi0000113	1
5009300	5010000	VT	32	testCotopaxi0000114	1
5069100	5070700	VT	32	testCotopaxi0000115	1
5129200	5131000	VT	36	testCotopaxi0000116	1
5189500	5191100	VT	32	testCotopaxi0000117	1
5249200	5250700	VT	30	testCotopaxi0000118	1
5309200	5311100	VT	36	testCotopaxi0000119	1
5369400	5371100	VT	34	testCotopaxi0000120	1
5429300	5431000	VT	34	testCotopaxi0000121	1
5489500	5491100	VT	32	testCotopaxi0000122	1
5549100	5550000	VT	34	testCotopaxi0000123	1
5609100	5610700	VT	32	testCotopaxi0000124	1
5669200	5670000	VT	34	testCotopaxi0000125	1
5729100	5730000	VT	34	testCotopaxi0000126	1
5789100	5790700	VT	32	testCotopaxi0000127	1
5849200	5850700	VT	30	testCotopaxi0000128	1
5909200	5910000	VT	36	testCotopaxi0000129	1

El resultado de la clasificación de 100 señales semisintéticas de eventos VT se presenta en la Figura 89, donde se observa que se la detección y clasificación es de un 78% de las señales semisintéticas de eventos VT y un 22% no fueron detectadas como eventos de tipo VT pero sí como eventos de tipo LP.

Figura 89

Resultados de la clasificación de las señales semisintéticas.



Resultados de Detección y Clasificación de Señales Sintéticas.

Se evaluaron 100 señales sintéticas, los resultados se muestran a continuación en la Figura 90, Figura 91, Figura 92 y Figura 93.

Figura 90

Ruta y nombre de los archivos de las señales sísmicas.

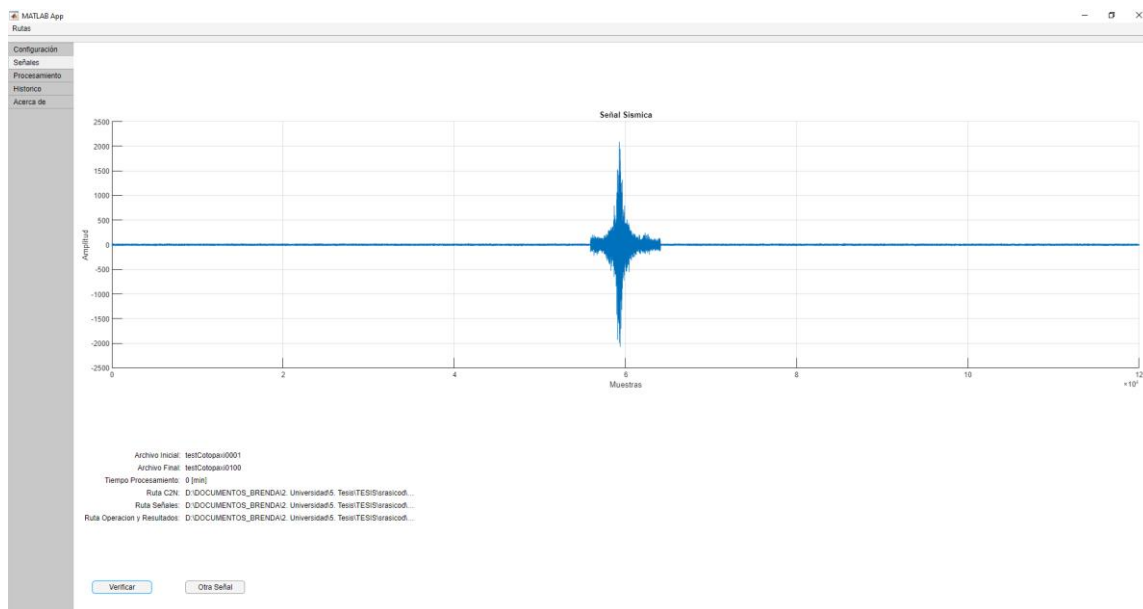


Figura 91

Resultados de las señales sintéticas evaluadas de la 1 a la 36.

Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
29100	30700	VT	32	testCotopaxi0001	1
69500	91000	LP	30	testCotopaxi0002	1
148900	150700	VT	36	testCotopaxi0003	1
209000	210700	VT	34	testCotopaxi0004	1
269100	272000	VT	34	testCotopaxi0005	1
329100	330800	LP	34	testCotopaxi0006	1
389100	390800	LP	34	testCotopaxi0007	1
449200	450800	LP	32	testCotopaxi0008	1
509300	510800	LP	36	testCotopaxi0009	1
609400	610700	VT	34	testCotopaxi0010	1
629500	630700	VT	34	testCotopaxi0011	1
689600	691100	VT	32	testCotopaxi0012	1
749700	751000	VT	30	testCotopaxi0013	1
809800	810700	VT	32	testCotopaxi0014	1
869900	870800	LP	34	testCotopaxi0015	1
930000	930800	LP	32	testCotopaxi0016	1
990100	990800	VT	30	testCotopaxi0017	1
1049100	1050700	VT	32	testCotopaxi0018	1
1109200	1110900	LP	34	testCotopaxi0019	1
1169300	1170800	VT	32	testCotopaxi0020	1
1229400	1230800	VT	30	testCotopaxi0021	1
1289500	1290800	LP	30	testCotopaxi0022	1
1349600	1351000	VT	30	testCotopaxi0023	1
1409700	1410800	LP	34	testCotopaxi0024	1
1469800	1471000	VT	30	testCotopaxi0025	1
1529900	1530900	VT	32	testCotopaxi0026	1
1580000	1590800	VT	30	testCotopaxi0027	1
1640100	1650700	VT	32	testCotopaxi0028	1
1700200	1710700	LP	32	testCotopaxi0029	1
1760300	1770800	LP	34	testCotopaxi0030	1
1820400	1830700	VT	34	testCotopaxi0031	1
1880500	1890800	VT	32	testCotopaxi0032	1
1940600	1950800	LP	32	testCotopaxi0033	1
2000700	2010700	LP	34	testCotopaxi0034	1
2060800	2070800	LP	32	testCotopaxi0035	1
2120900	2131100	VT	32	testCotopaxi0036	1

Figura 92

Resultados de las señales sintéticas evaluadas de la 36 a la 71.

Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
2126500	2131100	VT	52	testCotopaxi0036	1
2189500	2191100	VT	32	testCotopaxi0037	1
2249200	2250800	VT	32	testCotopaxi0038	1
2309100	2310800	VT	34	testCotopaxi0039	1
2369200	2370800	VT	32	testCotopaxi0040	1
2429000	2430700	VT	34	testCotopaxi0041	1
2489300	2490800	VT	30	testCotopaxi0042	1
2549200	2550800	VT	32	testCotopaxi0043	1
2609000	2610700	LP	34	testCotopaxi0044	1
2669100	2670800	VT	34	testCotopaxi0045	1
2729100	2730700	VT	32	testCotopaxi0046	1
2789100	2790800	LP	34	testCotopaxi0047	1
2849100	2850800	LP	34	testCotopaxi0048	1
2909100	2910800	LP	34	testCotopaxi0049	1
2969000	2970700	LP	34	testCotopaxi0050	1
3029000	3030700	VT	34	testCotopaxi0051	1
3089100	3090700	VT	32	testCotopaxi0052	1
3149500	3151000	VT	30	testCotopaxi0053	1
3209100	3210800	LP	34	testCotopaxi0054	1
3269500	3271000	VT	30	testCotopaxi0055	1
3329100	3330800	VT	34	testCotopaxi0056	1
3389100	3390700	VT	32	testCotopaxi0057	1
3449500	3451000	VT	30	testCotopaxi0058	1
3509100	3510700	VT	32	testCotopaxi0059	1
3569000	3570700	VT	34	testCotopaxi0060	1
3629500	3631100	VT	32	testCotopaxi0061	1
3689100	3690800	LP	34	testCotopaxi0062	1
3749500	3750800	VT	30	testCotopaxi0063	1
3809100	3810800	LP	34	testCotopaxi0064	1
3869300	3870800	VT	30	testCotopaxi0065	1
3929100	3930800	LP	34	testCotopaxi0066	1
3989500	3991100	VT	32	testCotopaxi0067	1
4049500	4051100	VT	32	testCotopaxi0068	1
4109500	4111000	VT	32	testCotopaxi0069	1
4169100	4170700	VT	32	testCotopaxi0070	1
4229300	4230900	VT	32	testCotopaxi0071	1

Figura 93

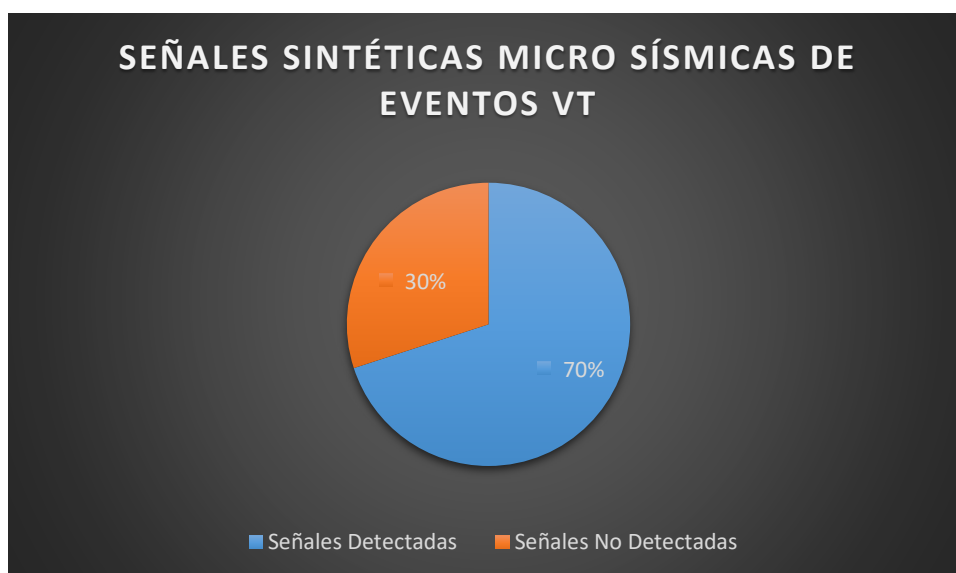
Resultados de las señales sintéticas evaluadas de la 64 a la 100.

Inicio	Fin	Tipo	Duración	Archivo	Número
3869300	3870800	VT	30	testCotopaxi0065	1
3929100	3930800	LP	34	testCotopaxi0066	1
3989500	3991100	VT	32	testCotopaxi0067	1
4049500	4051100	VT	32	testCotopaxi0068	1
4109500	4111000	VT	32	testCotopaxi0069	1
4169100	4170700	VT	32	testCotopaxi0070	1
4229300	4230900	VT	32	testCotopaxi0071	1
4289100	4290800	LP	34	testCotopaxi0072	1
4348900	4350700	VT	36	testCotopaxi0073	1
4409300	4410800	VT	30	testCotopaxi0074	1
4469100	4470800	LP	34	testCotopaxi0075	1
4529100	4530800	VT	34	testCotopaxi0076	1
4589100	4590800	VT	34	testCotopaxi0077	1
4649200	4650800	VT	32	testCotopaxi0078	1
4709000	4710700	VT	34	testCotopaxi0079	1
4829500	4831000	VT	30	testCotopaxi0081	1
4889000	4890700	VT	34	testCotopaxi0082	1
4949500	4951000	VT	30	testCotopaxi0083	1
5009100	5010800	LP	34	testCotopaxi0084	1
5069100	5070700	VT	32	testCotopaxi0085	1
5129100	5130700	VT	32	testCotopaxi0086	1
5189200	5190800	VT	32	testCotopaxi0087	1
5249000	5250800	VT	36	testCotopaxi0088	1
5309500	5311000	VT	30	testCotopaxi0089	1
5369300	5370900	VT	32	testCotopaxi0090	1
5429100	5430700	VT	32	testCotopaxi0091	1
5489100	5490800	LP	34	testCotopaxi0092	1
5549500	5551100	VT	32	testCotopaxi0093	1
5609300	5610900	LP	32	testCotopaxi0094	1
5669500	5671000	VT	30	testCotopaxi0095	1
5729500	5731000	VT	30	testCotopaxi0096	1
5789100	5790800	LP	34	testCotopaxi0097	1
5848200	5850000	VT	32	testCotopaxi0098	1
5909200	5910800	VT	32	testCotopaxi0099	1
5969000	5970700	VT	34	testCotopaxi0100	1

El resultado de la clasificación de 100 señales sintéticas de eventos VT se presenta en la Figura 94, donde se observa que se la detección y clasificación es de un 70% de las señales sintéticas de eventos VT y un 30% no fueron detectadas como eventos de tipo VT pero sí como eventos de tipo LP.

Figura 94

Resultados de la clasificación de las señales sintéticas.



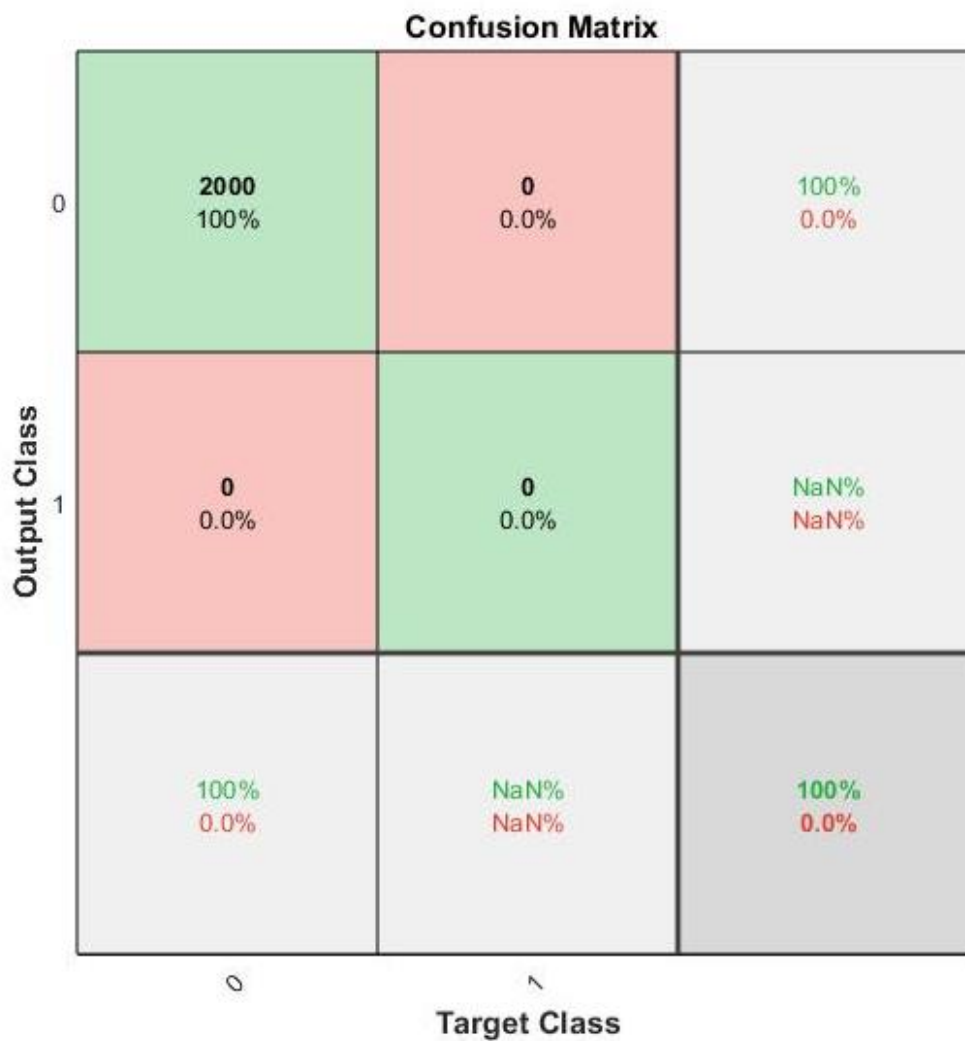
Clasificador de Eventos de Tipo LP Y VT

El clasificador es un trabajo de investigación que se basa en el uso de autoencoders con 257 características y presenta un 98% de éxito en la clasificación.

Se realiza el análisis en escenarios con 2000 señales sintéticas de eventos LP, 2000 señales sintéticas de eventos VT y una balanceada de 1000 señales sintéticas de eventos LP y 1000 de evento LP.

Figura 95

Resultados de clasificación de 2000 señales sintéticas de eventos LP.



El resultado de la clasificación de las 2000 señales sintéticas de eventos LP, tiene el resultado del 100% de efectividad como se muestra en la Figura 95.

Figura 96

Resultados de clasificación de 2000 señales sintéticas de eventos VT.

Confusion Matrix

Output Class	0	0 0.0%	91 4.5%	0.0% 100%
	1	0 0.0%	1909 95.5%	100% 0.0%
	0	NaN% NaN%	95.5% 4.5%	95.5% 4.5%
	1			
		0	1	
		Target Class		

El resultado de la clasificación de las 2000 señales sintéticas de eventos VT, tiene el resultado del 95.5% de efectividad, de las 2000 señales se clasifican como eventos VT 1909 señales como se muestra en la Figura 96.

Figura 97

Resultados de clasificación balanceada de 1000 señales sintéticas de eventos LP y 1000 señales sintéticas de eventos VT.

Confusion Matrix

Output Class	0	1	
	1000 50.0%	53 2.6%	95.0% 5.0%
1	0 0.0%	947 47.3%	100% 0.0%
	100% 0.0%	94.7% 5.3%	97.4% 2.6%
	0	1	Target Class

El resultado de la clasificación de señales balanceadas 1000 señales sintéticas de eventos LP y 1000 señales sintéticas de eventos VT, tiene el resultado del 97,4% de efectividad, donde clasificó todas las señales LP y presenta un margen de error de 53 señales en eventos VT como se muestra en la Figura 97.

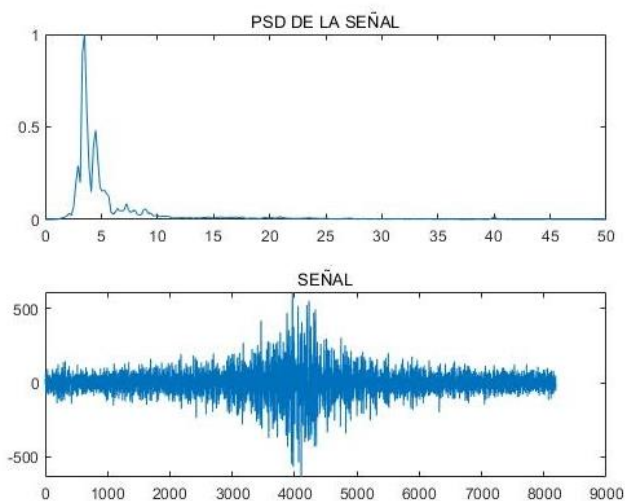
Evaluación de Señales Sintéticas y Semisintéticas Mediante Expertos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional

Mediante el uso de un formulario como se muestra en la Figura 98 que se realizó el 10 de enero del 2022, con la ayuda de 7 expertos del Geofísico, se analizaron 30 señales entre las cuales se encuentran 5 señales originales, 5 señales semi sintéticas y 5 señales sintéticas de eventos LP y VT, colocadas aleatoriamente.

Figura 98

Ejemplo de pregunta que consta el formulario.

EVENTO N. 001



El microsismo es: *

- LP Sintético
- LP Natural
- VT Sintético
- VT Natural

Los resultados se presentan a continuación en la Tabla 4 y en la Tabla 4, donde se analiza por separado las señales sintéticas y naturales en la Tabla 3 y la clasificación de las señales según su evento en la Tabla 4:

Tabla 3

Resultados del formulario sobre señales sintéticas y originales respondido por expertos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

N°	Respuestas	Sintético	Natural
	Señales		
1	LP NATURAL	28,6%	71,4%
2	VT SEMI-SINTETICA	71,4%	28,6%
3	VT SINTETICA	14,3%	85,7%
4	LP SEMI-SINTETICA	71,4%	28,6%
5	VT NATURAL	71,4%	28,6%
6	VT NATURAL	57,1%	42,9%
7	VT SEMI-SINTETICA	100%	0,00%
8	LP SEMI-SINTETICA	42,9%	57,1%
9	VT NATURAL	42,9%	57,1%
10	LP SINTETICA	42,9%	57,1%
11	LP NATURAL	42,9%	57,1%
12	LP SEMI-SINTETICA	42,9%	57,1%
13	VT SEMI-SINTETICA	28,6%	71,4%
14	LP SINTETICA	85,7%	14,3%
15	VT NATURAL	85,7%	14,3%
16	VT SINTETICA	28,6%	71,4%
17	VT SINTETICA	57,1%	42,9%

N°	Respuestas	Sintético	Natural
	Señales		
18	LP NATURAL	57,1%	42,9%
19	VT NATURAL	42,9%	57,1%
20	LP SEMI-SINTETICA	100%	0,00%
21	LP SINTETICA	71,4%	28,6%
22	VT SINTETICA	14,3%	85,7%
23	LP SINTETICA	100%	0,00%
24	LP SINTETICA	71,4%	28,6%
25	LP NATURAL	85,7%	14,3%
26	LP SEMI-SINTETICA	85,7%	14,3%
27	VT SEMI-SINTETICA	28,6%	71,4%
28	VT SINTETICA	42,9%	57,1%
29	VT SEMI-SINTETICA	71,4%	28,6%
30	LP NATURAL	71,4%	28,6%

Nota. Esta tabla muestra los resultados que se obtuvieron del formulario que resolvieron los expertos del Instituto Geofísico.

Los resultados que se obtuvieron en la Tabla 3, se analiza primero la clasificación entre señales naturales y sintéticas, presenta una clasificación de señales sintéticas en un porcentaje de 58,57% y las naturales en un 41,43%. Las señales sintéticas son más detectadas que las señales naturales.

Tabla 4

Resultados del formulario de clasificación de señales según su evento respondido por expertos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

N°	Respuestas	LP	VT
	Señales		
1	LP NATURAL	100%	0,00%
2	VT SEMI-SINTETICA	57,1%	42,9%
3	VT SINTETICA	71,4%	28,6%
4	LP SEMI-SINTETICA	100%	0,00%
5	VT NATURAL	14,3%	85,7%
6	VT NATURAL	0,00%	100%
7	VT SEMI-SINTETICA	0,00%	100%
8	LP SEMI-SINTETICA	100%	0,00%
9	VT NATURAL	0,00%	100%
10	LP SINTETICA	100%	0,00%
11	LP NATURAL	100%	0,00%
12	LP SEMI-SINTETICA	100%	0,00%
13	VT SEMI-SINTETICA	57,1%	42,9%
14	LP SINTETICA	100%	0,00%
15	VT NATURAL	28,6%	71,4%
16	VT SINTETICA	42,9%	57,1%
17	VT SINTETICA	0,00%	100%
18	LP NATURAL	100%	0,00%
19	VT NATURAL	71,4%	28,6%
20	LP SEMI-SINTETICA	100%	0,00%
21	LP SINTETICA	100%	0,00%

N°	Respuestas	LP	VT
	Señales		
22	VT SINTETICA	57,1%	42,9%
23	LP SINTETICA	100%	0,00%
24	LP SINTETICA	100%	0,00%
25	LP NATURAL	100%	0,00%
26	LP SEMI-SINTETICA	100%	0,00%
27	VT SEMI-SINTETICA	28,6%	71,4%
28	VT SINTETICA	28,6%	71,4%
29	VT SEMI-SINTETICA	0,00%	100%
30	LP NATURAL	100%	0,00%

Nota. Esta tabla muestra los resultados que se obtuvieron del formulario que resolvieron los expertos del Instituto Geofísico.

Los resultados que se obtuvieron en la Tabla 4, presentan un alto índice de éxito en la clasificación de las señales según el evento, las señales de eventos LP son clasificadas en un porcentaje de 65,23% y de eventos VT un 34,77%, como las señales eran balanceadas en el número de eventos, la identificación de señales de eventos LP fue mayor que las de eventos VT.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

El uso de señales conocidas como lo son las señales sinusoidales, al conocer su forma, sus puntos de frecuencia y amplitud, presentan una ventaja en este trabajo porque al momento de aplicar el método de *Bootstrap* se pueden diferenciar sus características en las señales sintéticas generadas, por este motivo con la ayuda de estas señales se verificó el correcto funcionamiento de remuestreo usado y se obtienen bases de datos sintéticas a partir de estas señales que cumplen con las características de las señales sinusoidales originales.

Las señales sintéticas sinusoidales se analizaron en sus componentes de amplitud, cortes de frecuencia, forma y nivel de ruido, con las figuras de las señales se verificó que al aplicar la transformada de Fourier los componentes como los cortes de frecuencia se mantienen en los mismos puntos y al regresar a la señal con la transformada inversa de Fourier presenta la forma original de la señal, con esto se concluye que al aplicar la transformada de Fourier y su inversa no se pierde información.

Con el uso del método de *Bootstrap* y la transformada de Fourier, donde su correcto funcionamiento fue comprobado con las señales sinusoidales y procesos ya descritos en el capítulo 3, la generación de señales sintéticas de eventos microsísmicos fue posible y finalmente se obtienen bases de datos sintéticas balanceadas de señales sismo-volcánicas que mantienen sus características tanto en fase como en magnitud de las señales originales.

En el proceso de la generación de señales sintéticas de eventos microsísmicos, se evaluaron los componentes en magnitud y fase, al analizar estos componentes por separado, como lo es la fase, se identifica que contiene la información de la envolvente de la señal, si la fase sintética presenta una inadecuada forma afecta la señal sintética y es similar a una señal de solo ruido.

En el análisis de resultados, el uso de detectores y clasificadores con una alta tasa de efectividad que va del 97% al 98%, trabajan solo con eventos de tipo LP y VT, con los cuales se realizó las respectivas pruebas, los resultados presentados indican una clasificación del 100% en eventos LP y 95% en eventos VT, resultados favorables que indican que las señales sintéticas presentan gran exactitud en su clasificación.

Además, la evaluación de las señales mediante los expertos del IGEPN, brindaron resultados favorables al indicar que las señales sintéticas no fueron totalmente identificadas mediante los expertos en un porcentaje del 58,57% y en las señales naturales en un 41,43%, lo que indica que las señales sintéticas son identificadas como señales originales, con ello se cumple el objetivo que las características de las señales originales se mantienen y se presentan en las señales sintéticas.

Cada base de datos presenta características propias, las cuales se deben evaluar para la generación de bases de datos sintéticas, también es necesario evaluar las técnicas y métodos a utilizarse, en este trabajo el uso del método de *Bootstrap* mantiene las propiedades de las señales originales en sus réplicas, por este motivo el uso de este método presenta un alto índice de éxito en la generación de las señales sintéticas.

Finalmente se concluye, que las bases de datos sintéticas presentan una solución al problema de la adquisición de estas, y brindan la información acorde a las necesidades del investigador. Y que un sistema de generación de señales sintéticas de eventos sismo-volcánicos es posible y presenta resultados en clasificación de eventos LP del 100% y en eventos VT del 95% en los clasificadores usados, por lo que brinda la seguridad de realizar estudios sin la limitación de las bases de datos de eventos sismo-volcánicos.

Recomendaciones

El uso de detectores y clasificadores con un alto índice de éxito es indispensable para el desarrollo de las pruebas de las bases de datos sintéticas, se recomienda usar la mayor cantidad de estas herramientas para presentar una mejor calidad de exactitud en las bases sintéticas.

Antes de utilizar un método de generación de datos, se recomienda analizar las propiedades de los datos utilizados para poder utilizar la mejor información y que las bases de datos sintéticas presenten las mejores características y propiedades originales, así se puede presentar una mejor similitud en los datos sintéticos.

Es recomendable usar la mayor cantidad de información para poder analizar el proceso adecuado para escoger los mejores datos, los cuales presenten la información y las señales adecuadas que serán escogidas para la generación de datos sintéticos, con este motivo se pueden obtener las propiedades más significativas o todas y que las bases sintéticas puedan ser utilizadas

Trabajos Futuros

Buscar otros métodos de generación de datos sintéticos como lo es el método de *Bootstrap*, y aplicar a la generación de datos sintéticos de señales micro-sísmicas y

evaluarlos para verificar que método es mejor.

Desarrollar algoritmos para la detección y clasificación de señales micro-sísmicas de los otros eventos que se encuentran en las bases de datos, dado que las existentes trabajan solo con eventos de tipo LP y VT.

Utilizar otros métodos de transformación para el desarrollo de señales micro-sísmicas como análisis con el uso de la densidad espectral de potencia, entre otros métodos de análisis de señales.

Bibliografía

- Alvarez, M., Henao, R., & Duque, E. (01 de Agosto de 2007). CLASIFICACIÓN DE EVENTOS SÍSMICOS EMPLEANDO PROCESOS GAUSSIANOS. *Scientia Et Technica*, 1(35), 145-150. Obtenido de <https://doi.org/10.22517/23447214.5385>
- Andrews, D. (2000). Inconsistency of the bootstrap when a parameter is on the boundary of the parameter space. *Econometrica*, 68(2), 399-405.
doi:<https://doi.org/10.1111/1468-0262.00114>
- Bobadilla, J., Gómez, P., & Bernal, J. (1999). LA TRANSFORMADA DE FOURIER. UNA VISIÓN PEDAGÓGICA. *Estudios de fonética experimental*, 10, 41-74.
- Duoandikoetxea, J. (2003). *LECCIONES SOBRE LAS SERIES Y TRANSFORMADAS DE FOURIER*. UNAN-MANAGUA.
- Espinosa Guaita, A. M. (2017). Caracterización de un sistema de microonda en la banda "X", mediante software de simulación y un radioenlace punto-punto en ambiente de laboratorio. . Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones.
- Flores López, F. A., & Ayes Zamudio, J. C. (2018). Generación de acelerogramas sintéticos mediante el uso de wavelets, orientados a aplicaciones geotécnico-estructurales. *Ingeniería sísmica*(98), 1-24. doi:
<https://doi.org/10.18867/ris.98.480>
- Frasch, J. V., Lodwich, A., Shafait, F., & Breuel, T. (1 de August de 2011). A bayes-truedata generator for evaluation of supervised and unsupervised learning methods. *Pattern Recognition Letters*, 32(11), 1523-1531.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.patrec.2011.04.010>
- García Cantalapiedra, A. (02 de Febrero de 2017). *UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR*. Recuperado el 15 de Junio de

2021, de Repositorio:

https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/677568/garcia_cantalapiedra_adrian_tfm.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hesterberg, T., Monaghan, S., Moore, D., Clipson, A., & Epstein, R. (2003). *The Practice of Business Statistics: Using Data for Decisions*. New York: W. H. Freeman.

Lara Cueva, R. A., Paillacho, V., & Villalva, M. (2016). Detección de eventos del Volcán Cotopaxi empleando clasificación supervisada.

Revista Iberoamericana de las Ciencias Computacionales e Informática, 5(9), 123-143. Obtenido de <https://www.reci.org.mx/index.php/reci/article/view/52>

Lara Cueva, R., Benítez, D. S., Carrera, E. V., Ruiz, M., & Rojo Álvarez, J. L. (2016).

Feature selection of seismic waveforms for long period event detection at.

Journal of Volcanology and Geothermal Research, 34-49.

doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.02.022>

Ledesma, R. (2008). Introducción al Bootstrap. Desarrollo de un ejemplo acompañado de software de aplicación. *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 4(2), 51-60. doi:10.20982/tqmp.04.2.p051

León F., F. J., Rodríguez Lozano, A., Cubero Fernández, J. M., & Palomares, O. J.

(2019). SysGpr: Sistema de generación de señales sintéticas pseudo-realistas.

Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 369-379.

doi:<https://doi.org/10.4995/riai.2019.10025>

MathWorks. (2021). *MathWorks*. Obtenido de

<https://la.mathworks.com/products/matlab.html>

Peng, T., & Hanke, F. (2016). Towards a Synthetic Data Generator for Matching

Decision Trees. *Proceedings of the 18th International Conference on Enterprise*

Information Systems, 1, 135-141. doi:10.5220/0005829001350141

Pérez, N., Benítez, D., Grijalva, F., Lara Cueva, R., Ruiz, M., & Aguilar, J. (2020).

ESeismic: Towards an Ecuadorian volcano seismic repository. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 396. doi:106855

Ramírez, I. C., Barrera, C. J., & Correa, J. C. (2013). Efecto del tamaño de muestra y el número de réplicas bootstrap. *Ingeniería y Competitividad*, 15(1), 93-101. doi:<https://doi.org/10.25100/iyc.v15i1.2623>

Secretaría de Gestión de Riesgos. (03 de Septiembre de 2015). PLAN DE CONTINGENCIA AMENAZA DE ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI. *AMENAZA DE ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI*. Cotopaxi, Tungurahua, Ecuador. Obtenido de Gestión de Riesgos.

Theodoridis, Y., Jefferson, R. O., & Silva, M. A. (25 de June de 1999). On the Generation of Spatiotemporal Datasets. *Advances in Spatial Databases*, 1651, 147-164. doi:https://doi.org/10.1007/3-540-48482-5_11

Toapaxi, J., Torres, C., Hamad, K., Vera, P., & Méndez, J. (Agosto de 2019). Actualización de la Modelación Numérica del Flujo de Escombros Producto de una Erupción del Volcán Cotopaxi – Flanco Norte. *Revista Politécnica*, 44(1), 7-14. Obtenido de <https://doi.org/10.33333/rp.vol44n1.01>

Vallejo Seco, G., Ato García, M., Fernández García, M., & Livacic Rojas, P. E. (2013). Multilevel bootstrap analysis with assumptions violated. *Psicothema*, 25(4), 520-528. doi:10.7334/psicothema2013.58