

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Clasificación de eventos sísmicos del volcán Cotopaxi mediante un
banco de filtros polifase**

**Dayana Ivanova León Gallardo
Alex Xavier Masaquiza Masaquiza**

Ingeniería Electrónica

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Electrónico

Quito, 19 de mayo de 2021

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Clasificación de eventos sísmicos del volcán Cotopaxi mediante un banco
de filtros polifase**

Dayana Ivanova León Gallardo

Alex Xavier Masaquiza Masaquiza

Nombre del profesor, Título académico

Digo Benítez, Ph.D.

Quito, 19 de mayo de 2021

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Dayana Ivanova León Gallardo

Código: 00138532

Cédula de identidad: 0502650625

Nombres y apellidos: Alex Xavier Masaquiza Masaquiza

Código: 132920

Cédula de identidad: 2000104584

Lugar y fecha: Quito, 19 de mayo de 2021

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

La clasificación de eventos sísmicos se ha convertido en un tópico de interés para sistemas de alarma temprano de actividades volcánicas, estos sistemas permiten preservar la vida humana y disminuir las pérdidas materiales. Nuestro trabajo propone un nuevo enfoque para la clasificación de eventos sísmicos de eventos de largo Periodo (LP) y Vulcano Tectónico (VT) del volcán Cotopaxi mediante la aplicación de un banco de filtros polifase.

El método propuesto, trabaja mediante este banco de filtros, mismo que selecciona las bandas de interés en el dominio de frecuencia y con el cual se clasifican los tipos de eventos mediante toma de decisiones dependiendo del umbral de amplitud seleccionado para cada banda.

Los mejores resultados se obtienen aplicando 14 parámetros de frecuencias características de interés en una señal con una frecuencia de muestreo de 100 Hz, dando una efectividad del 97.9% de exactitud en la clasificación de los distintos tipos de eventos de la base de datos utilizada (MicSigV1_1) compuesta por: 426 eventos de largo periodo (LP), 54 Vulcano Tectónicos (VT) y 1 evento regional.

Palabras clave: Largo periodo (LP), Vulcano Tectónico (VT), Frecuencias características, Eventos sísmico, Filtro polifase, Filtro FIR.

ABSTRACT

The classification of seismic events has become a topic of interest for early warning systems related to volcanic activities, these systems allow to preserve human life and reduce material losses. Our work proposes a new classification approach based on the classification of Long Period (LP) and Volcano Tectonic (VT) seismic events of the Cotopaxi volcano through the application of a polyphase filter bank.

The proposed method works through this bank of filters, which selects the bands of interest in the frequency domain with and classify the events by making decisions depending on the threshold selected of each band.

The best results were obtained by applying 14 parameters in the key frequencies of interest in signals with a sampling frequency of 100 Hz, giving a 98.54% of accuracy in the classification of the different types of events from the MicSigV1_1 database, which is composed by: 426 long period (LP), 54 Volcano Tectonic (VT) and 1 Regional events.

Key words: Long period (LP), Volcano Tectonic (VT), Characteristic frequencies, Seismic events, Polyphase filter, FIR filter.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	11
Métodos estudiados hasta ahora	15
Filtro FIR.....	17
Orden del filtro	18
Diezmador por un factor D.....	18
Interpolación por un factor I.....	20
Frecuencia de muestreo transformada por un factor racional I/D.	23
Estructura de forma directa	24
Estructura de Filtro Polifase.....	26
Base de datos.....	28
Desarrollo del Tema.....	30
Introducción de la data set en Matlab.....	30
Diseño del Filtro	31
Casos del Filtro.....	33
Threshold o Umbral	36
Interfaz.....	43
Verificación del filtro polifase para la clasificación de eventos.....	46
Conclusiones.....	49
Bibliografía.....	51
Anexo A: Eventos donde el filtro presenta errores de reconocimiento	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de ventanas del filtro FIR	18
Tabla 2: Frecuencias Importantes	34
Tabla 3: Banda superior e inferior para cada filtro.	35
Tabla 4: Thresolds para cada caso dentro del filtro polifase, determinación del tipo de evento si el máximo en cada caso es inferior al asignado.....	40
Tabla 5: Matriz de confusión que permite visualizar el desempeño del algoritmo propuesto.	46
Tabla 6: Comparación del método propuesto con diferentes métodos estudiados hasta la actualidad.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evento sísmico típico de largo periodo (LP) de la base de datos MicSingV1_1.	13
Figura 2: Evento sísmico típico Volcano Tectónico (VT) de la base de datos MicSingV1_1.	14
Figura 3: Un elemento de submuestreo	19
Figura 4: Diezmador ideal por un factor D.....	20
Figura 5: Un elemento de muestreo ascendente	21
Figura 6: Interpolador ideal por un factor I	23
Figura 7: Estructura en cascada para el interpolador y diezmador	23
Figura 8: Método para transformar la frecuencia de muestreo por un factor I/D	24
Figura 9: Estructura de forma directa para la frecuencia de muestreo de un factor I/D.	25
Figura 10: Relación de dualidad para el diezmador.....	25
Figura 11: Relación de dualidad para el interpolador.....	26
Figura 12: Filtro FIR estructura de forma directa en interpolación con un factor I.....	26
Figura 13: Interpolación por el uso de filtro polifase	27
Figura 14: Red de monitoreo del volcán Cotopaxi (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2015).....	28
Figura 15: Información obtenida de la base de datos, Estación VC! y etiqueta evento LP.....	30

Figura 16: Diagrama del filtro polifase que permite la clasificación de los tipos de eventos sísmicos.	31
Figura 17: Verificación del funcionamiento del filtro 4	32
Figura 18: (a) Sección del filtro donde la señal procesa solo se observa en un rango de [8.3 - 8.5] Hz, (b) señal original que será procesará y (c) salida de la señal extraída.	36
Figura 19: Diagrama de dispersión para los picos máximos del caso 1 obtenidos después de pasar por el filtro polifase. La línea entrecortada indica el threshold, por encima de esta se aprecia el intervalo de confianza para el tipo de evento LP, mientras que en la parte inferior de la línea se aprecia el intervalo de confianza para el tipo de evento VT.	39
Figura 20: Evento 2 registrado en la base de datos, salida del filtro polifase, etiqueta por la base de datos, número de coincidencias del tipo de evento y etiqueta proporcionada por el filtro.	42
Figura 21: Señal reconstruida en base a las frecuencias características seleccionadas en el filtro para la identificación del tipo de evento sísmicos.	43
Figura 22: Interfaz y sus partes	44
Figura 23: Botones para correr el programa	44
Figura 24: Selector para filtrar caso.....	45
Figura 25: Ejemplo de la interfaz con información del evento 10.....	46

INTRODUCCIÓN

Los bancos de filtros polifase han sido utilizados con el fin de remuestrear información, detectar eventos sísmicos, hidroacústicos, entre otros. Una aplicación se dio en el paper “Digital filter bank implementation in hydroacoustic monitoring tasks” (Kaplun, Klionskiy, Voznesenskiy, & Gulvanskiy, 2015), donde se analizó la implementación de un banco de filtros digitales polifase usando la modificación del algoritmo de superposición-adición ponderada, WOLA por sus siglas en inglés, para el procesamiento de señales multicanal. Esto se implementó en la monitorización hidroacústica. Se comparó el rendimiento en un CPU (Central Processing Unit) y un CUDA (Compute Unified Device Architecture), donde se obtuvo que el CUDA proporciona ventaja para el filtro. Otra implementación del filtro polifase se da en el paper “Performance characteristic of indigenously developed 24-bit seismic data recorder for earthquake seismology” (Kumar Pandey, Kumar, Sharma, & Shamsi, 2007). En este paper se describe un desempeño a largo plazo de la adquisición de datos sísmicos desarrollados por CSIO (Central Scientific Instruments Organization) probadas en terremotos locales, regionales y a distancia; en comparación con un sistema de adquisición de datos importados. Se consideraron dos grandes terremotos para el procedimiento de correlación cruzada, se aplicó el filtro para re-muestrear la data de uno de ellos se pasó de 100 muestras por segundos a 60 muestras por segundos, esto se implementó en MATLAB. Con esto se desarrolló un recopilador de datos de 24 bits.

Los sistemas de monitoreo de volcanes se han desarrollado con el fin de mitigar riesgos. Mediante el pronósticos y clasificación de eventos sísmicos, se pretende evaluar los peligros

con el fin de salvaguardar vidas y recursos. Ecuador se encuentra en el denominado cinturón de fuego del Pacífico, por ende, posee altas probabilidades de sufrir riesgos naturales con pérdidas tanto humanitarias como económicas a gran escala (Gallegos, 2013). Las actividades sísmicas de los volcanes se presentan en formas de ondas que son procesadas por los distintos sismómetros o geófonos de la red monitorizada, donde esta señal captada puede ser clasificada en distintos eventos sísmicos por expertos. Dado que el comportamiento de los volcanes es único, podemos dividir los sucesos en cinco principales eventos: long period events (LP), volcano-tectonic (VT) earthquakes, hybrid events (HYB), lightning (LGH), and tremor events (TRE), TRE es la descarga de energía en largos periodos relacionado con el “magma degassing”. Otros eventos que se presentan de acuerdo a Pérez, et. al (2020) son explosiones como magma, ceniza y extrusión de gas.

Nuestro caso de estudio está centrado en dos tipos de eventos sísmicos principales, los cuales están trabajados en el dominio de frecuencia para la clasificación de actividad sísmica. El primer evento es de tipo largo periodo (LP), el cual presenta frecuencias características importantes en un rango de [1-10] Hz con una frecuencia de mayor amplitud alrededor de 3.5 Hz, este tipo de evento indica la existencia de movimientos de fluidos en el interior del volcán.

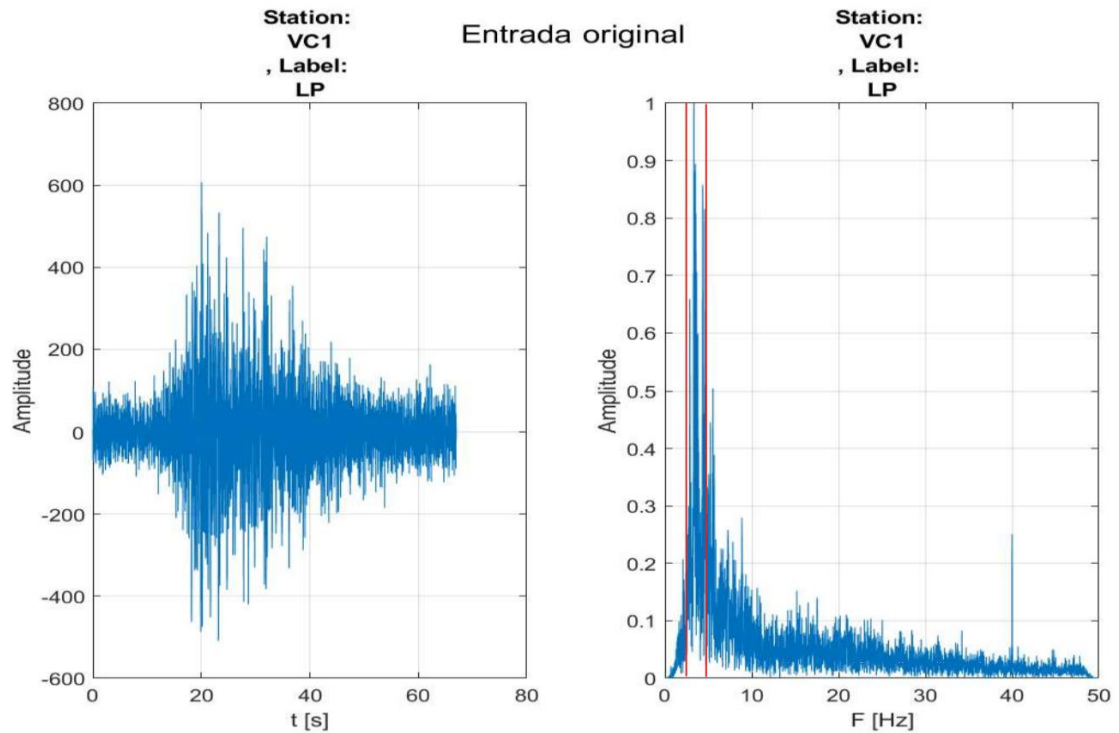


Figura 1: Evento sísmico típico de largo periodo (LP) de la base de datos MicSingV1_1.

En la figura 1 se muestra un ejemplo de la señal correspondiente a un evento de tipo LP tanto en el dominio de tiempo como su equivalente en frecuencia normalizada por su valor absoluto, tal como se observa dentro de la franja roja se concentran las frecuencias con una mayor amplitud alrededor de 3.5 Hz.

El segundo evento de interés es el denominado volcanso tectónico (VT), el cual presenta frecuencias características principales en un rango de [2-25] Hz con una frecuencia de mayor amplitud alrededor 6Hz, estos eventos son precursores sísmicos que incrementan su presencia ante una actividad sísmica elevada y que pueden asociarse con una erupción volcánica.

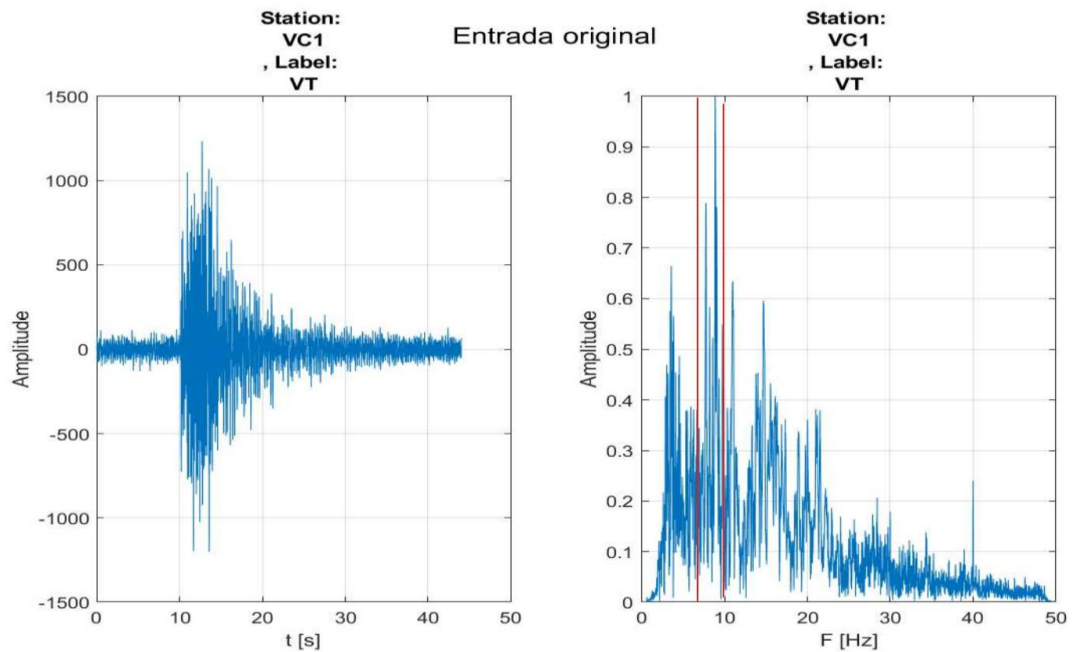


Figura 2: Evento sísmico típico Volcano Tectónico (VT) de la base de datos MicSingV1_1.

En la figura 2 se muestra la señal típica de un evento de tipo VT tanto en el dominio del tiempo como su equivalente en frecuencia normalizada por su valor absoluto, tal como se observa dentro de la franja roja se concentran las frecuencias con una mayor amplitud alrededor de 6 Hz.

Hasta la actualidad se han desarrollado varias técnicas con la finalidad de contribuir en la clasificación de eventos sísmicos, ya que tradicionalmente la clasificación depende de un analista a cargo y como consecuencia requiere de tiempo, el cual es muy ineficiente para un sistema de alerta temprano ante catástrofes naturales. Varias técnicas de aprendizaje de maquina tales como K-Nearest Neighbors Algorithm , Decision Trees (DT), Neural Network, deep learning entre otros, son métodos que se basan en la extracción de características relacionadas con el evento sísmico (en tiempo y/o frecuencia) y mediante la ocurrencia de

eventos en las diferentes bandas, mediante estas características principales clasifican los distintos eventos sísmicos con sus respectivas etiquetas.

Un filtro polifase es una descomposición paralela de un filtro digital FIR, está se basa en la descomposición del filtro en múltiples potencias de Z . Las ventajas de usar este filtro es la eficiencia computacional en diezmado o interpolación para señales de tiempo discreto (Winser & Cranos, 2017).

Esta investigación está enfocada en la implementación de un banco de filtros polifase donde mediante un análisis en el dominio de la frecuencia se clasifiquen los eventos de manera correcta.

MÉTODOS ESTUDIADOS HASTA AHORA

Considerando el paper “A new volcanic seismic signal descriptor and its application to a data set from the Cotopaxi volcano.” (Pérez, Venegas, Benítez, Lara-Cueva, & Ruiz, 2020), se determinan características estadísticas para describir el comportamiento de la información como una distribución, mientras que, en el caso del dominio de la frecuencia y escala, se consideraron niveles de amplitud en ciertas bandas de frecuencia de forma que se las relacionó con la energía o entropía de las señales. Otras características analizadas fueron la forma del evento, como lo sería el radio de los valores asociados con la señal.

Además, se consideró el paper “On finding possible frequencies for recognizing microearthquakes at Cotopaxi volcano: A machine learning based approach.” (Lara-Cueva, et al., 2020) en el que se consideran eventos VT y LP para analizarlos y clasificarlos usando estimaciones de la densidad del espectro de potencia (PSD) basado en métodos paramétricos como el de Yule-Walker y Burg y en métodos no paramétricos como el Welch y multitaper con el fin de estimar una verdadera PSD de una señal estocástica. Usando estos estimadores

PSD y machine learning, se obtuvieron las frecuencias claves para analizar las diferencias entre los dos eventos mencionados.

Como resultado del método aplicado en dicho trabajo se obtuvieron las siguientes frecuencias características (2.0 Hz, 2.7 Hz, 6.0 Hz, 8.2 Hz, 8.4 Hz, 9.5 Hz, 11.1 Hz, 13.4 Hz, 15.6 Hz, 41.8 Hz) que son de interés para aplicar en nuestro banco de filtros polifase debido a que se demostró que en esos valores se presentan diferencias entre los eventos LP y VT. De igual forma, se extrajo el orden del filtro que fue de orden 128.

Además, se considerarán los artículos “Automatic Recognition of Long Period Events From Volcano Tectonic Earthquakes at Cotopaxi Volcano” (Lara-Cueva, Benítez, Carrera, Rojo-Álvarez, & Rojo-Álvarez, 2016) y “On the use of Multiple-class Support Vector Machines for Classification of Seismic Signals at Cotopaxi Volcano” (Lara-Cueva, Benítez, Paillacho, Villalva, & Rojo-Álvarez, 2016). Como punto clave de estos trabajos se obtuvieron también las siguientes frecuencias características importantes (18.5 Hz, 19.3 Hz, 20.8 Hz, 22.3Hz) que serán implementadas en nuestra propuesta, basados en la ocurrencia de los eventos en el dominio de frecuencia, no solo en las bandas bajas sino también en las bandas media-altas entre 15-25Hz. Esto permite considerar las frecuencias mencionadas anteriormente para la propuesta mencionada, elevando considerablemente la efectividad de clasificación de eventos del filtro polifase (Lara-Cueva, Benítez, Paillacho, Villalva, & Rojo-Álvarez, 2016).

FILTRO FIR

De acuerdo a Ingle y Proakis (2010) se denomina FIR a un filtro digital de respuesta finita, por sus siglas en inglés (finite-duration impulse response filter), se describe a este sistema como:

$$H(z) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{M-1}z^{1-M} = \sum_{n=0}^{M-1} b_n z^{-n}$$

La respuesta al impulso $h(n)$ es:

$$h(n) = \begin{cases} b_n, & 0 \leq n \leq M - 1 \\ 0, & \text{otro} \end{cases}$$

En este caso, el orden del filtro es $M - 1$ y longitud de M .

La estructura en este caso es siempre estable y es relativamente simple en comparación con filtros de tipo respuesta infinita IIR (infinite-duration impulse response filter).

Se usa la técnica de diseño de ventana para implementar el filtro, la idea principal es elegir un filtro selectivo de frecuencia ideal adecuado, luego seleccionar una ventana donde se trunque su respuesta al impulso para obtener una fase lineal y causal dentro del filtro FIR (Ingle & Proakis, 2010, p. 322). En otras palabras, con este método se selecciona una función de ventana apropiada y un filtro ideal apropiado. De acuerdo a Ingle y Proakis (2010), tenemos los siguientes tipos de ventanas:

Nombre de la ventana	Ancho de transición		Min. Atenuación stopband
	Aproximado	Valor Exacto	
Rectangular	$\frac{4\pi}{M}$	$\frac{1.8\pi}{M}$	21 dB
Bartlett	$\frac{8\pi}{M}$	$\frac{6.1\pi}{M}$	25 dB
Hann	$\frac{8\pi}{M}$	$\frac{6.2\pi}{M}$	44 dB
Hamming	$\frac{8\pi}{M}$	$\frac{6.6\pi}{M}$	53 dB
Blackman	$\frac{12\pi}{M}$	$\frac{11\pi}{M}$	74 dB

Tabla 1: Comparación de ventanas del filtro FIR

En el diseño se usó una ventana de Hamming, la cual es parecida a una ventana de Han (ventana de función coseno elevada), la diferencia es que esta tiene una pequeña cantidad de discontinuidad. Está dada por:

$$w(n) = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right), & 0 \leq n \leq M-1 \\ 0 & \text{otro} \end{cases}$$

Donde M es la longitud del filtro.

Orden del filtro

Es el orden del polinomio dado por la función de transferencia del filtro, que para un filtro FIR son solo los coeficientes con potencias crecientes de z^{-1} .

Diezmador por un factor D

La operación básica en el diezmado es el submuestreo (down-sampling) de una señal $x(n)$ de alta frecuencia en una señal de baja frecuencia $y(m)$. La señal sub-muestreada $y(m)$ se obtiene al seleccionar una de D muestras de $x(n)$ y dejando aparte el resto de $(D-1)$ muestras, por ejemplo:

$$y(m) = x(n)|_{n=mD} = x(mD); \quad n, m, D \in \mathbb{Z}$$

El siguiente diagrama de bloques representa a la ecuación previa:

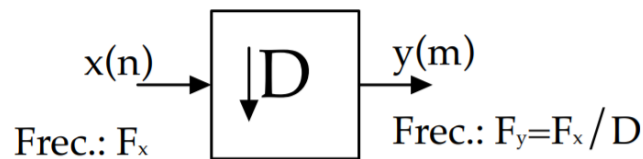


Figura 3: Un elemento de submuestreo

En el diezmador ideal para evitar el aliasing se reduce el ancho de banda de $x(n)$ considerando

$$F_{x,max} = \frac{F_x}{2D}$$

Que es equivalente a

$$w_{x,max} = \frac{\pi}{D}$$

El proceso considera una entrada $x(n)$ la cual pasa a través de un filtro pasabajos, caracterizado por la respuesta al impulso $h(n)$ y una respuesta en frecuencia $H_D(w_x)$ la cual de forma ideal satisface la siguiente condición:

$$H_D(w_x) = \begin{cases} 1, & |w_x| \leq \pi/D \\ 0, & \text{otro} \end{cases}$$

La salida del filtro es una secuencia de $v(n)$, está dada por:

$$v(n) \triangleq \sum_{k=0}^{\infty} h(k)x(n-k)$$

Después esto es sub-muestreada por un factor D para obtener $y(m)$:

$$y(m) = v(mD) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k)x(mD-k)$$

A pesar de que la operación de filtrado en $x(n)$ es lineal e invariante en el tiempo, el submuestreo en combinación con el filtrado resulta en un sistema variante en el tiempo.

Este diezmador ideal se aprecia en el siguiente diagrama de bloques:

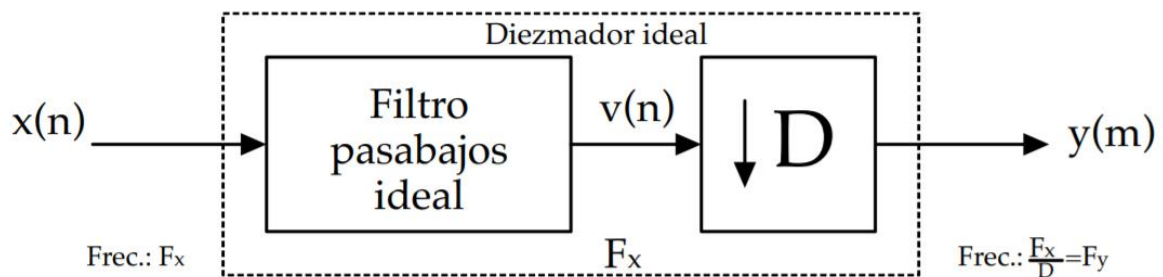


Figura 4: Diezmador ideal por un factor D

Interpolación por un factor I

Un aumento de la frecuencia de muestreo por un factor entero de I puede darse al interpolar $I-1$ muestras nuevas entre valores sucesivos de la señal.

El proceso de interpolación que se describe a continuación preserva la figura espectral de la señal de la secuencia $x(n)$, consta de dos pasos. Primero, se crea una señal intermedia a una frecuencia alta F_y entrelazando ceros entre muestras con valores distintos de cero en una operación denominada muestreo ascendente (upsampling). El segundo paso es filtrar la señal

intermedia para “llenar” muestras entrelazadas con ceros para crear una señal interpolada de alta frecuencia.

Para un muestreo ascendente consideramos $v(m)$ como la secuencia intermedia con una frecuencia $F_y = IF_x$, que se obtiene de $x(n)$ al añadir $I-1$ ceros entre valores sucesivos de $x(n)$, entonces $v(m)$ se escribe como:

$$v(m) = \begin{cases} x\left(\frac{m}{I}\right) & m = 0, \pm I, \pm 2I, \dots \\ 0 & \text{otro} \end{cases}$$

El diagrama de bloques que describe este sistema es el siguiente:



Figura 5: Un elemento de muestreo ascendente

Para el interpolador ideal se consideran los componentes de frecuencias en el rango $0 \leq w_y \leq \frac{\pi}{I}$, son únicas, por lo que las imágenes de $X(w)$ sobre $w_y = \frac{\pi}{I}$ se rechazan cuando la secuencia $v(m)$ pasa por un filtro pasabajos con una respuesta de frecuencia $H_I(w_y)$ que idealmente posee las siguientes características:

$$H_I(w_y) = \begin{cases} C, & 0 \leq |w_y| \leq \frac{\pi}{I} \\ 0, & \text{otro} \end{cases}$$

Donde C es un factor de escala requerido para normalizar la secuencia de salida $y(m)$, entonces el espectro de salida es:

$$Y(w_y) = \begin{cases} CX(w_y I), & 0 \leq |w_y| \leq \frac{\pi}{I} \\ 0, & \text{otro} \end{cases}$$

Este factor C se selecciona de forma que se cumpla la relación

$$y(m) = x\left(\frac{m}{I}\right)$$

Donde, $m = 0, \pm I, \pm 2I, \dots$

Por conveniencia matemática se considera $m=0$, entonces tenemos la siguiente ecuación:

$$y(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} Y(w_y) dw_y = \frac{C}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{I}}^{\frac{\pi}{I}} X(w_y I) dw_y$$

Consideramos $w_y = \frac{w_x}{I}$, entonces $y(0)$ se representa como:

$$y(0) = \frac{C}{I} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(w_x) dw_x = \frac{C}{I} x(0)$$

Entonces el factor de normalización deseado es $C=I$.

La secuencia de salida $y(m)$ se puede expresar como convolución de la secuencia $v(n)$ con la unidad de respuesta $h(n)$ de un filtro pasabajo, entonces:

$$y(m) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(m-k)v(k)$$

Como $v(k)=0$ excepto para múltiplos de I , donde $v(kI) = x(k)$, entonces $y(m)$ queda como:

$$y(m) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(m-kI)v(k)$$

Esto se aprecia en el siguiente diagrama de bloques:

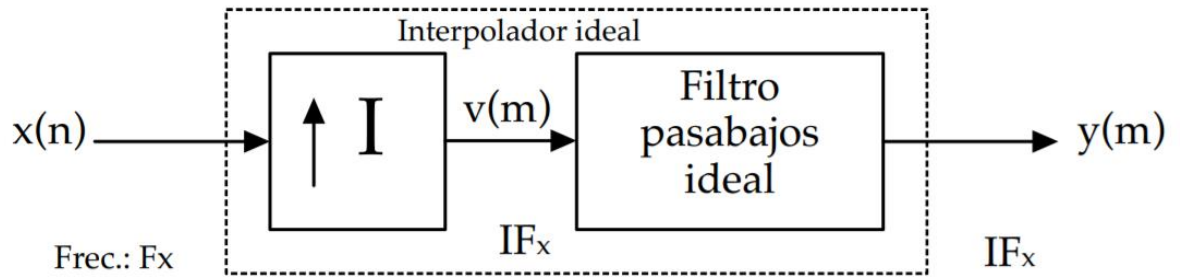


Figura 6: Interpolador ideal por un factor I

Frecuencia de muestreo transformada por un factor racional I/D .

Ahora se considera el caso donde se une la interpolación con el diezmado, es decir el factor racional I/D . Un punto importante a recalcar es que primero se debe hacer el proceso de interpolación y luego el proceso de diezmado. De forma ideal el filtro se vería de la siguiente forma:

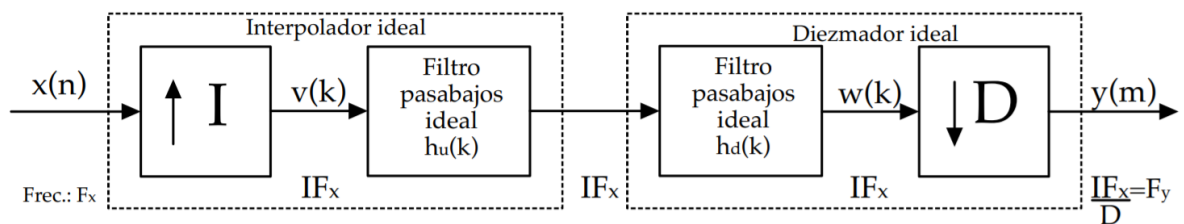


Figura 7: Estructura en cascada para el interpolador y diezmador

La respuesta en frecuencia está dada por $H(w_v)$, la cual combina las operaciones de ambos de la siguiente forma:

$$H(w_v) = \begin{cases} I, & 0 \leq |w_v| \leq \min\left(\frac{\pi}{D}, \frac{\pi}{I}\right) \\ 0, & \text{otro} \end{cases}$$

Donde

$$w_v = \frac{2\pi F}{F_v} = \frac{2\pi F}{IF_x} = \frac{w_x}{I}$$

Entonces, el remuestreador ideal se describe por el siguiente diagrama de bloques:

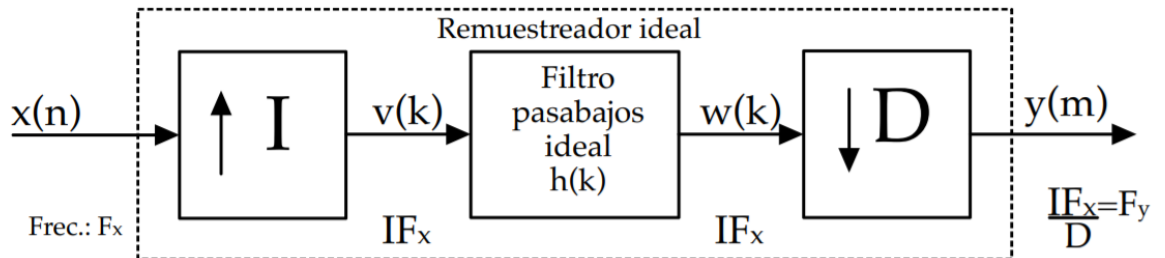


Figura 8: Método para transformar la frecuencia de muestreo por un factor I/D

El factor de transformación I/D se puede aplicar a un filtro FIR en dos estructuras, la más simple es la estructura de forma directa y la otra es la estructura polifase, la cual se usa para la implementación de las funciones “resample” y “upfirdn” en MATLAB.

Estructura de forma directa

La ecuación que describe a este sistema de forma simple es:

$$H(z) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k)z^{-k}$$

Donde $h(k)$ es la respuesta de muestra unitaria de un filtro FIR, este parámetro permite implementar de forma directa el filtro FIR como se observa a continuación:

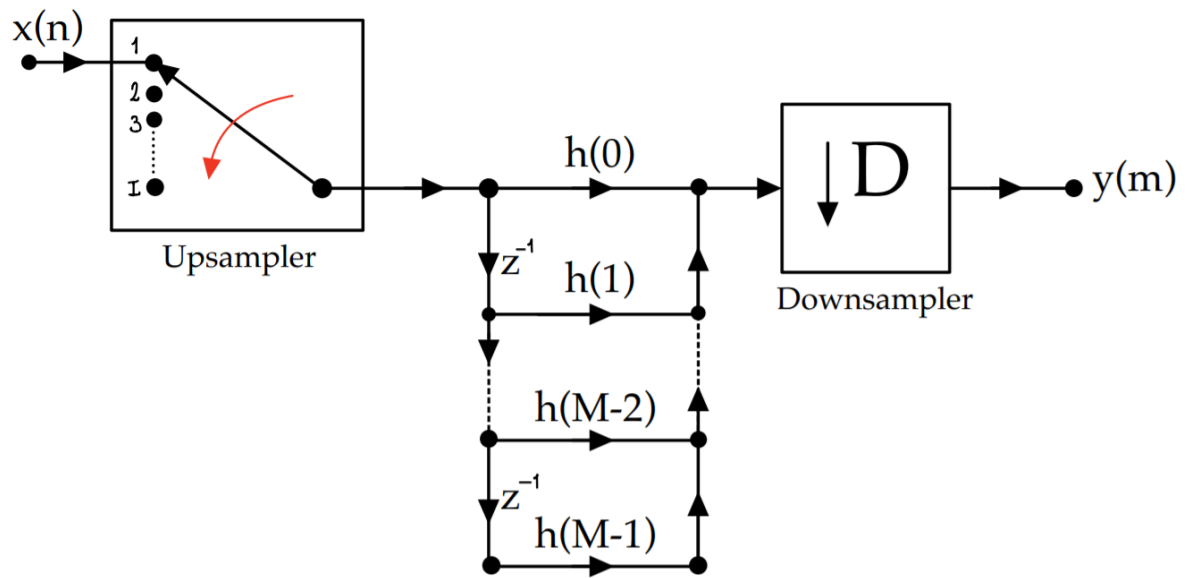


Figura 9: Estructura de forma directa para la frecuencia de muestreo de un factor I/D .

La figura ilustrada en la parte superior es muy ineficiente, esto se debe a que en el proceso del muestreo ascendente se introducen $I-1$ ceros entre puntos sucesivos de la señal de entrada. Si I es grande, la mayoría de los componentes en el filtro FIR se hacen 0, como resultado cualquier suma y multiplicación dentro del filtro resultan como cero.

Para hacer la estructura más eficiente se implementa un diezmador que reduce la frecuencia de muestreo un factor D . Luego se implementa un interpolador con frecuencia de muestreo de factor I . Se presenta la siguiente relación al hacer la transpuesta para el diezmador:

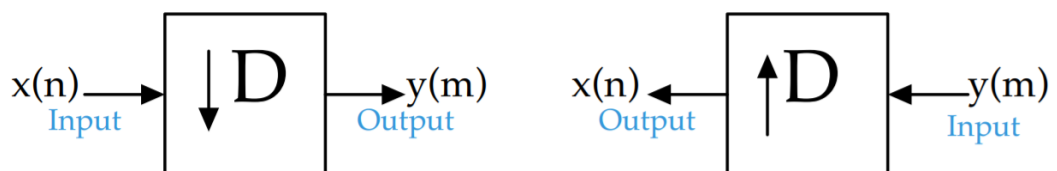


Figura 10: Relación de dualidad para el diezmador

En el caso del interpolador al hacer la transpuesta se obtiene la siguiente relación:

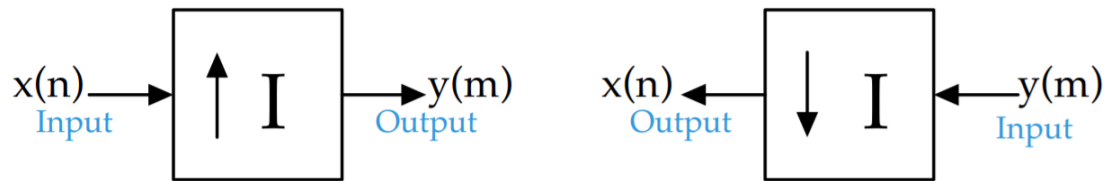


Figura 11: Relación de dualidad para el interpolador

Aplicando estas relaciones el filtro de forma directa más eficiente queda como:

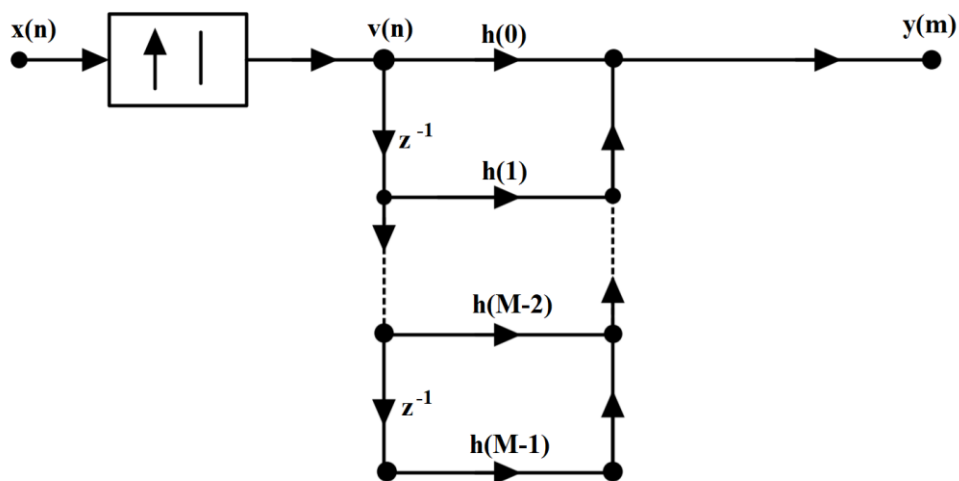


Figura 12: Filtro FIR estructura de forma directa en interpolación con un factor I

Estructura de Filtro Polifase

Un filtro polifase es la descomposición paralela de un filtro FIR. La ventaja de usar una estructura polifase es que la eficiencia computacional se logra al reducir el largo de un filtro FIR de longitud M en un pequeño set de filtros $K = \frac{M}{I}$. Esto se demuestra de la siguiente forma. Consideremos la estructura del interpolador de la figura 12, Como el proceso de desmuestreo introduce $I-1$ ceros entre valores sucesivos de $x(n)$, solo K de M entradas almacenadas en el filtro FIR en cualquier momento son distintos de cero. En un instante de tiempo, estos valores distintos de cero coinciden y son multiplicados por los coeficientes del filtro

$h(0), h(I), h(2I), \dots, h(M - I)$. En el instante de tiempo siguiente, los valores distintos de ceros coinciden y son multiplicados por los coeficientes del filtro $h(1), h(I + 1), h(2I + 1)$, etc (Ingle & Proakis, 2010).

Esto nos lleva a definir un set de pequeños filtros, denominados filtros polifase, los cuales tienen como respuesta:

$$p_k(n) = h(k + nI); \quad k = 0, 1, \dots, I - 1 \quad n = 0, 1, \dots, K - 1$$

Donde, $K = \frac{M}{I}$ es un entero.

A partir de este punto se dice que un set de I filtros polifase puede organizarse de forma paralela y que la salida de cada filtro puede seleccionarse mediante un conmutador, como se aprecia en la siguiente figura:

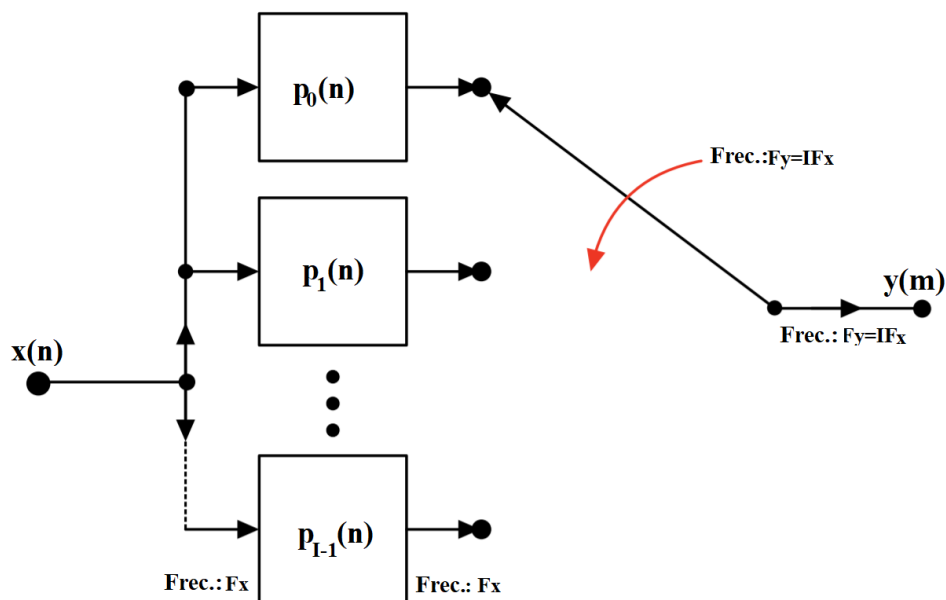


Figura 13: Interpolación por el uso de filtro polifase

La rotación del conmutador es en contra de las manecillas del reloj, comenzando en el punto $m=0$. Entonces, los filtros polifase realizan el cálculo a una baja frecuencia de muestreo F_x , y la conversión de frecuencia resulta del hecho de que se generan muestras de salida, una de cada uno de los filtros, para cada muestra de entrada.

La descomposición de $\{h(k)\}$ en sets de I subfiltros con respuesta al impulso $p_k(n)$, $k = 0, 1, \dots, I - 1$ es consistente con que la señal de entrada fue filtrada por un filtro lineal periódicamente variante que tiene como respuesta al impulso:

$$g(n, m) = h(nI + (mD)I)$$

Donde $D=I$ en el caso del interpolador.

BASE DE DATOS

RED DE MONITOREO DEL VOLCÁN COTOPAXI INSTITUTO GEOFÍSICO DE LA EPN

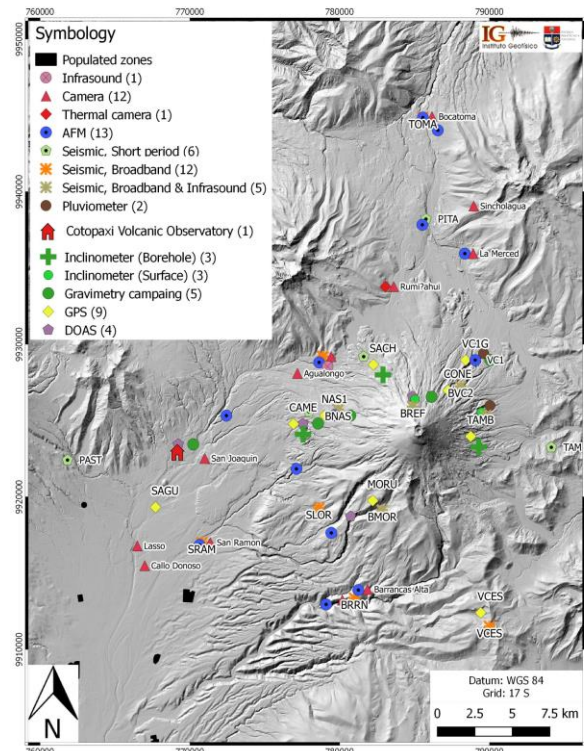


Figura 14: Red de monitoreo del volcán Cotopaxi (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2015)

La ubicación de las estaciones de monitoreo se aprecia en la imagen superior.

La base de datos de ventos sísmicos utilizada en esta investigación es la E seismic¹, la cual contiene eventos ocurridos en el volcán Cotopaxi, mismo que se encuentra en el denominado cinturón de fuego del pacífico y está ubicado en la zona centro del Ecuador a una latitud de 00°41'04" y longitud 78°25'54.8", dada su ubicación los daños que podría ocasionar serían a gran escala ante una posible actividad volcánica. En la figura 14 se pudo observar la red de monitoreo alrededor del volcán Cotopaxi implementada en puntos estratégicos que permiten optimizar la detección de eventos sísmicos con gran precisión por la Institución mencionada, donde las estaciones VC2, REF, NAS, TAM, MORU y VCES son de banda ancha con respuesta en frecuencia en el rango de 0.1 a 50 Hz y las estaciones PITA, NAS1, VC1, REF, CAMI y TAM son de periodo corto con una respuesta de frecuencia en el rango de 1 a 50 HZ.

Para nuestro caso de estudio, se emplearon los datos de la estación de corto periodo VC1, los cuales se obtuvieron de la base de datos MicSigV1 provisto por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), que están muestreados a 100Hz, donde se han registrado 481 eventos sísmicos, distribuidos en 426 de tipo LP, 54 de tipo VT y 1 evento REGIONAL. Los eventos registrados en esta base de datos proveen información del intervalo de tiempo en el cual ocurre, además del tipo de evento al que pertenece acorde al analista encargado.

¹ El repositorio ESeismic fue proporcionado por cortesía del IGEPN y colaboradores. Está disponible en http://www.igepn.edu.ec/eseismic_web_site/index.php donde debe registrarse y llenar un descargo de responsabilidad para obtener la data.

DESARROLLO DEL TEMA

Introducción de la data set en Matlab

La base de datos contiene a detalle información crucial, para extraer la información de MicSigV1 se usó el siguiente comando

```
load('MicSigV1_v1_1.mat')
```

El cual carga la información que contiene el archivo a Matlab, luego con el idx se extrae la información para cada evento registrado. Un ejemplo de la señal obtenida de la base de datos se aprecia en la imagen a continuación.

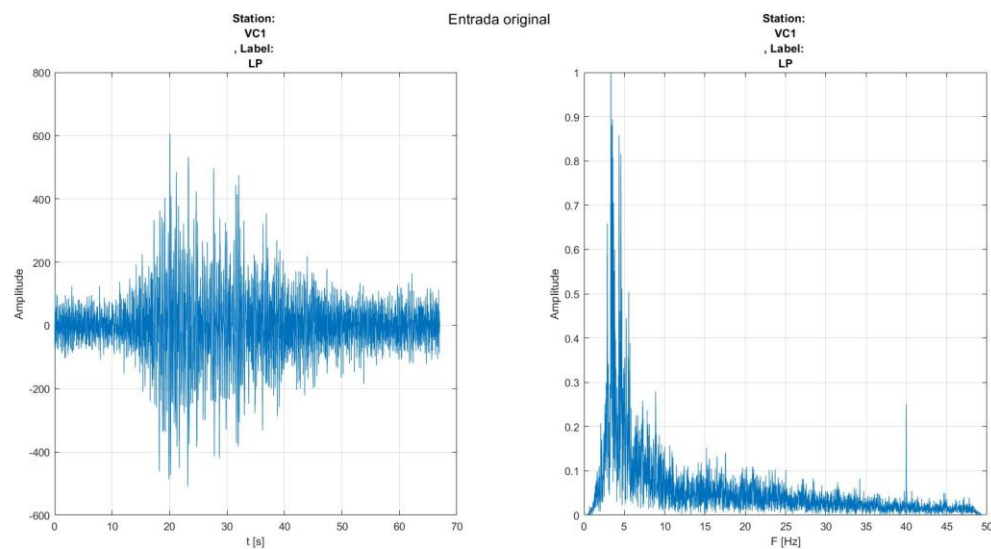


Figura 15: Información obtenida de la base de datos, Estación VC1 y etiqueta evento LP

En la figura 15 se aprecia la estación de donde sale la información y el tipo de evento al que pertenece.

Diseño del Filtro

Se aprecia el diagrama de bloque del funcionamiento del algoritmo propuesto en la figura 16, donde inicialmente la señal ingresa en el dominio de tiempo como está registrada en la base de datos, como nuestro algoritmo trabaja en el dominio de frecuencia esta señal es procesada al dominio adecuado, esta señal es filtrada por el banco de filtro polifase donde se divide en las 14 bandas de análisis mencionadas anteriormente, estos casos son analizados para la identificación del tipo de evento al que pertenecen cada uno de estos, finalmente en la salida del filtro se obtiene la suma de todos los caso analizados e identificando a que evento pertenece la señal de entrada, este proceso de suma se menciona en la sección de threshold.

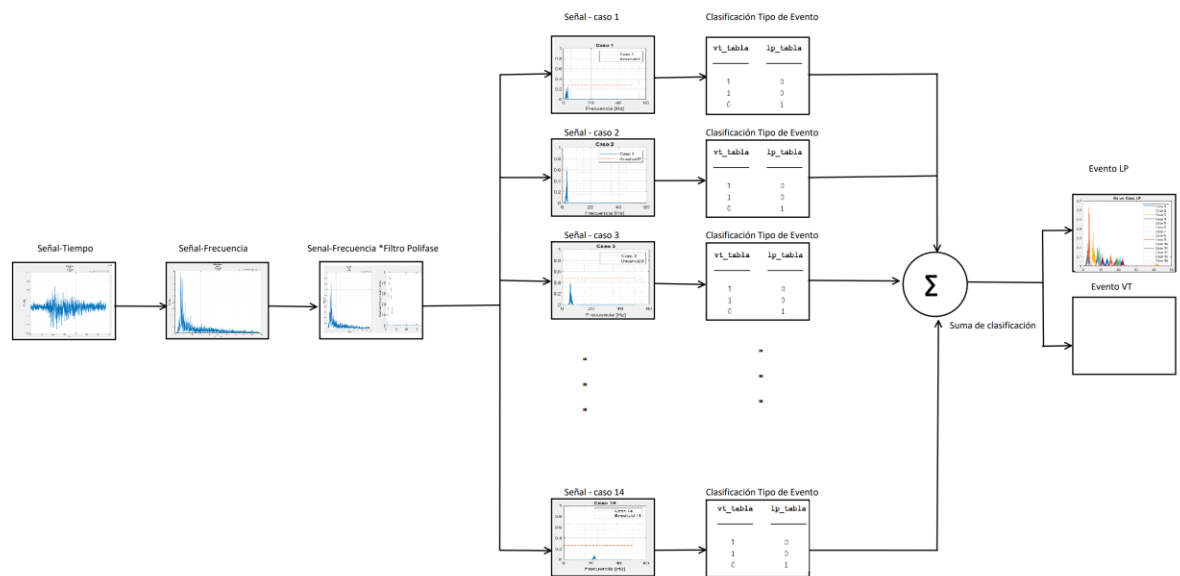


Figura 16: Diagrama del filtro polifase que permite la clasificación de los tipos de eventos sísmicos.

Para implementar el banco de filtros polifase se desarrollaron distintos filtros FIR pasabanda usando la función “fir1” en Matlab, siguiendo la siguiente estructura:

$$\text{fir1}(\text{orden}_{\text{del filtro}}, [\text{banda}_{\text{inferior}}, \text{banda}_{\text{superior}}])$$

Cabe recalcar que tanto la banda inferior como la superior se normalizaron con respecto a la mitad de la frecuencia de muestreo antes de ingresarlas como datos en el filtro, para ello se siguió la siguiente ecuación:

$$\text{Frecuencia Normalizada} = \frac{\text{Frecuencia sin normalizar}}{\frac{\text{Frecuencia de muestreo}}{2}}$$

Para comprobar el correcto funcionamiento del filtro se utilizó la función “freqz”, un ejemplo de la respuesta obtenida se aprecia en la figura a continuación:

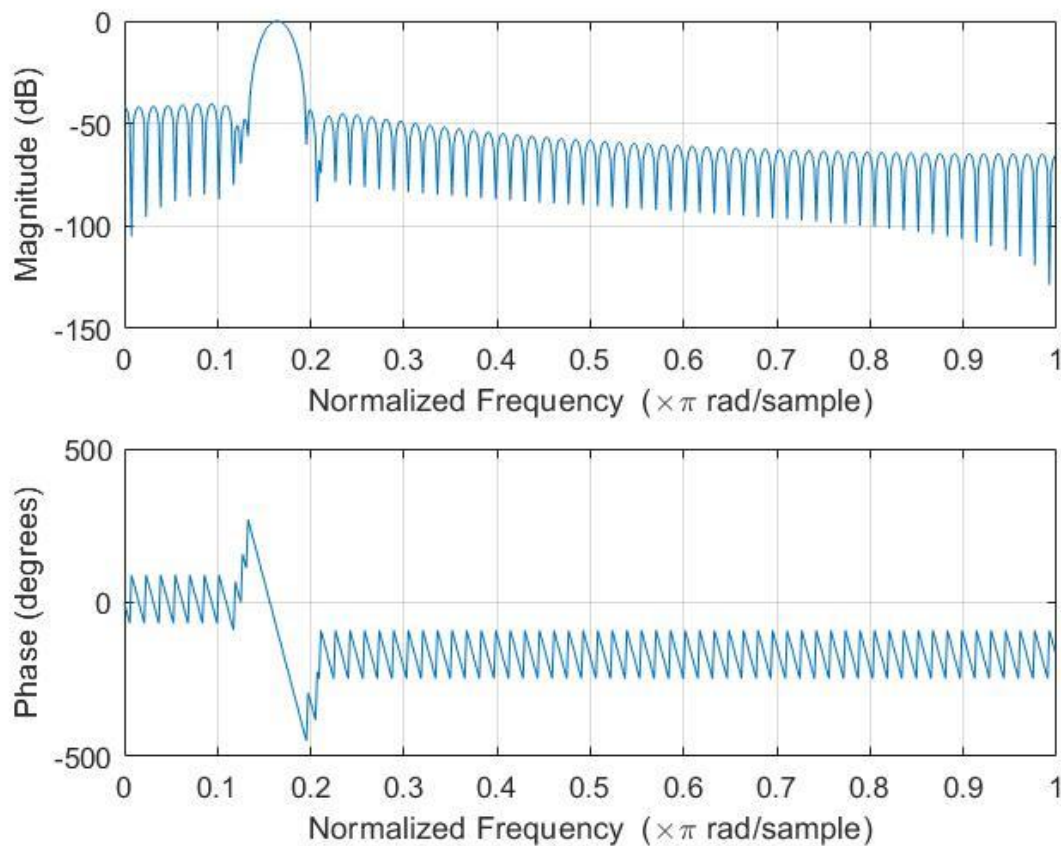


Figura 17: Verificación del funcionamiento del filtro 4

Como se puede apreciar la respuesta en frecuencia de la figura 17, muestra una ventana de 0.1620 hasta 0.1660 Hz, esto es correcto debido a que el filtro pasabanda permite el paso de señal entre los valores escogidos, mientras que para el resto de las frecuencias no se permite el paso de ningún valor. Por otra parte, la respuesta en fase muestra un cambio en el mismo set de frecuencias que la magnitud. En otras palabras, el filtro se comporta con una fase lineal en la banda pasante.

Para separar los casos se empleó la transformada de Fourier del filtro con la cantidad de puntos de la señal, siguiendo la siguiente estructura:

$$\text{caso [HZ]} = \text{fft}(\text{evento [s]}, \quad \text{longitud de la señal})$$

Para aplicar el filtro en el caso se multiplicó cada uno por la señal del filtro, luego se normalizó considerando la siguiente ecuación:

$$\text{caso normalizado} = \text{abs} \left(\frac{\text{evento [Hz]}}{\max(\text{señal [Hz]})} \right)$$

Casos del Filtro

El filtro polifase se divide en varios subfiltros, a los cuales denominamos como casos. En cada caso se aplica un filtro FIR en un rango de bandas.

Las frecuencias de interés seleccionadas para cada caso fueron:

	Caso	Frecuencias [Hz]
Fase 1	1	2
	2	2.7
	3	6
	4	8.2
	5	8.4
	6	9.5
	7	11.1
	8	13.4
	9	15.6
	10	41.8
Fase 2	11	18.5
	12	19.3
	13	20.8
	14	22.3

Tabla 2: Frecuencias Importantes

Las bandas se definieron considerando la frecuencia y considerando un intervalo de confianza de ± 0.1 , estas bandas corresponden a donde se encuentran los picos máximos analizados.

	Caso	Banda Inferior [Hz]	Banda Superior [Hz]
Fase 1	1	1.9	2.1
	2	2.6	2.8
	3	5.9	6.1
	4	8.1	8.3
	5	8.3	8.5
	6	9.4	9.6
	7	11	11.2
	8	13.3	13.5
	9	15.5	15.7
	10	41.7	41.9
Fase 2	11	18.4	18.6
	12	19.2	19.4
	13	20.7	20.9
	14	22.2	22.4

Tabla 3: Banda superior e inferior para cada filtro.

A continuación, en la figura 18, se aprecia la sección que escoge el filtro FIR, la señal de entrada y la señal de salida en el caso 5.

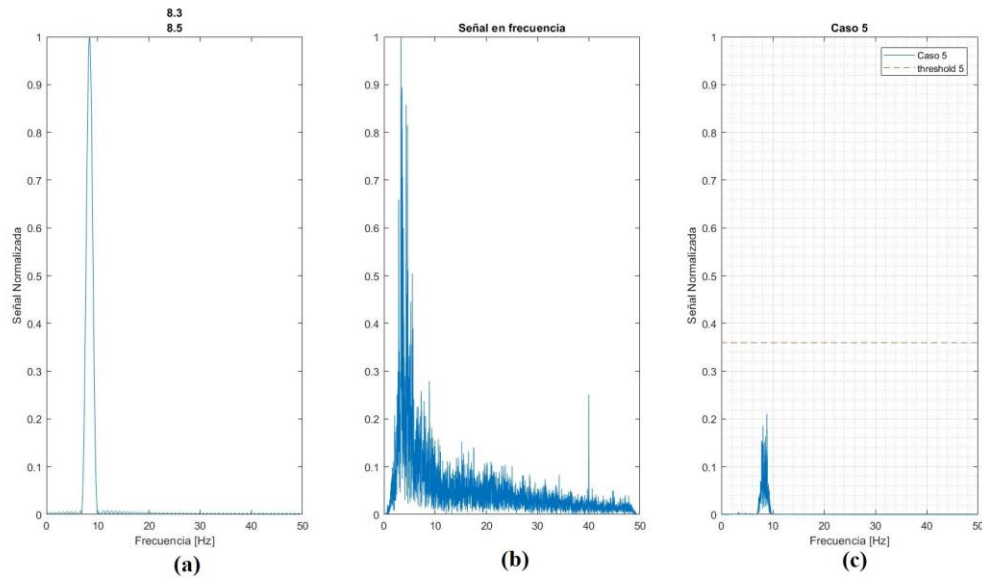


Figura 18: (a) Sección del filtro donde la señal procesa solo se observa en un rango de [8.3 - 8.5] Hz, (b) señal original que será procesará y (c) salida de la señal extraída.

Cabe recalcar que en la salida del filtro se aprecia con línea entrecortada el valor del umbral para este caso, la determinación del tipo de evento al que pertenece este caso se basa en el valor del máximo calculado en la banda de frecuencia con relación al valor de umbral (threshold), este proceso se explica a detalle en la sección de Threshold.

Threshold o Umbral

La determinación del threshold para los 14 casos que se deben analizar se basa en el siguiente algoritmo:

1. Para las 54 señales de eventos de tipo VT de la base de datos, cada una de estas señales pasa por el banco de filtros polifase, donde se van determinando los picos máximos en cada caso, para cada señal tenemos 14 picos máximos para cada señal del tipo VT, que posteriormente serán analizados.

2. Se saca el promedio de los picos máximos de la señal VT para cada caso (es decir para cada banda de frecuencia).
3. De manera similar, se seleccionan las 426 señales perteneciente a los eventos de tipo LP, de forma análoga se determinan los picos máximos en cada señal por medio del banco de filtros polifase.
4. Se saca el promedio de los picos máximos de la señal LP para cada caso.
5. Con la información obtenida en el punto 2 y 3, se procede a graficar un diagrama de dispersión, donde se determina la variación estacionaria para cada tipo de evento.
 - a. Por ejemplo, para el caso 1 (banda de frecuencia entre 1.9 y 2.1 Hz) los picos máximos de los eventos de tipo VT se encuentran en un rango entre [0.0414, 0.3170] de amplitud y los del tipo LP se encuentran en un rango entre [0.2356, 1] de amplitud. El diagrama de dispersión se aprecia en la figura 19.
6. Finalmente, se determina nuestra línea de threshold, la cual se obtuvo al promediar el valor máximo de los picos máximos obtenidos para un tipo de evento con el valor mínimo de los picos máximos de otro tipo de evento. Se puede encontrar el threshold con una desviación de ± 0.001 . Mediante un test de prueba y error se determina el valor más acertado para la clasificación de los eventos para todas las 480 señal.
 - a. Continuando con el ejemplo del caso 1, En el empleo el valor máximo del evento VT fue 0.3170, mientras que el valor mínimo fue de 0.2356, entonces, el threshold debe estar en el intervalo entre [0.2356 , 0.3170]

de amplitud, determinando así que la línea de threshold debe estar en 0.2690 en el eje de amplitud. Esta línea de threshold se aprecia en la figura 19 de color rojo y entrecortada.

7. Ya definido nuestra línea de threshold se genera nuestro intervalo de confianza para el evento. Este va de 0 hasta el threshold para un evento y desde el threshold hasta 1 para el otro tipo de evento.
 - a. En el caso 1 nuestro intervalo (rango) de confianza estará limitada por la línea threshold, por lo tanto, definimos nuestro intervalo de confianza para un evento tipo VT en el rango $[0, 0.2690]$ de amplitud como se observa en la figura 19, esto quiere decir si el pico máximo se encuentra dentro de este rango se denomina que este caso 1 pertenece a un evento VT, caso contrario si cae en un intervalo de $[0.2691, 1]$ de amplitud se clasifica que el caso 1 pertenece al evento LP.
 - b. Como se menciona nuestro intervalo de confianza es donde se encuentren los picos máximos en cada caso, existen dos intervalos de confianza en cada uno de ellos que pertenece al tipo VT y otro al LP, cuando se calcula el pico máximo de la señal de entrada, este pico estará en cualquiera de estos intervalos, con lo que se puede diferenciar de a qué tipo de evento pertenece.

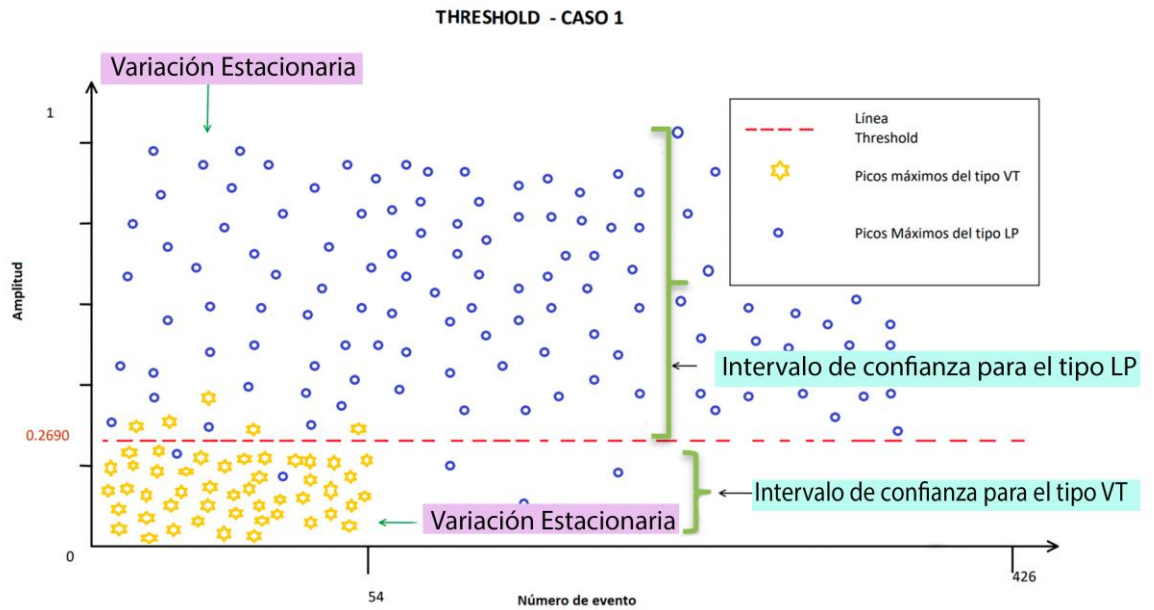


Figura 19: Diagrama de dispersión para los picos máximos del caso 1 obtenidos después de pasar por el filtro polifase. La línea entrecortada indica el threshold, por encima de esta se aprecia el intervalo de confianza para el tipo de evento LP, mientras que en la parte inferior de la línea se aprecia el intervalo de confianza para el tipo de evento VT.

Mediante el proceso mencionado anteriormente para la determinación del threshold para todos los casos, se puede determinar todos los threshold y el tipo de evento al que pertenecerá cada caso si es menor o mayor a este valor calculado, estos valores se pueden observar en la siguiente tabla.

Caso	Frecuencia característica	Threshold (límite para diferenciar un evento del otro)	SÍ el pico máximo se encuentra en un intervalo de [0, th)	SÍ el pico máximo se encuentra en un intervalo de [th, 1]
1	2	0.2690	VT	LP
2	2.7	0.6400	VT	LP
3	6	0.4837	LP	VT
4	8.2	0.3602	LP	VT
5	8.4	0.3594	LP	VT
6	9.5	0.3718	LP	VT
7	11.1	0.2595	LP	VT
8	13.4	0.2235	LP	VT
9	15.6	0.4680	LP	VT
10	41.8	0.0500	LP	VT
11	18.5	0.2078	LP	VT
12	19.3	0.2558	LP	VT
13	20.8	0.2528	LP	VT
14	22.3	0.2595	LP	VT

Tabla 4: Thresholds para cada caso dentro del filtro polifase, determinación del tipo de evento si el máximo en cada caso es inferior al asignado.

Como resultado final se suman los casos identificados en una variable para el tipo VT (variable vt_tot) y en otra para el tipo LP (variable lp_tot), cada caso fue analizado e identificado a qué tipo de evento pertenece mediante una condición basado en la línea de threshold mencionada anteriormente, donde si el caso se identifica como un tipo VT se le suma un valor de 1 a la suma total de eventos VT, en el código está como variable vt_tot, y se suma un 0 a la variable que no pertenece este caso, es decir, a la suma total de eventos LP, en el

código esto se da en la variable lp_tot . Cuando se tiene un tipo LP se suma un 1 a la variable lp_tot , mientras que a la variable vt_tot no se le suma nada. Luego se toma la decisión del tipo de evento dependiendo de que variable sea mayor que la otra, por ejemplo, si la variable vt_tot tiene una suma de 8 la señal de salida será etiquetada como un evento VT con una coincidencia de 8/14.

Al tener una cantidad de casos pares puede darse el caso en el que las coincidencias sean 7 de 14, en este caso se sigue el siguiente algoritmo:

1. Se considera el caso 1, 7, y del 10 al 14, porque es aquí donde hay mayor precisión para obtener una clasificación correcta para el VT. Desde el caso 2 al 6 la precisión es inferior, por lo que puede causar un error en el resultado.
2. Si hay un mínimo de tres coincidencias en los casos analizados se considera que es un evento VT.
 - a. Lo que se hace es reajustar el resultado sumando una unidad a la variable vt_tot y restando una unidad a la variable lp_tot .
3. Si no cumple con el mínimo de coincidencias se considera que es un evento LP.
 - a. Lo que se hace es reajustar el resultado sumando una unidad a la variable lp_tot y restando una unidad a la variable vt_tot

A esta suma se la denomina coincidencias lo cual permite definir la etiqueta en la señal de salida. Este proceso se aprecia de forma visual en la siguiente figura:

```

idx =

    2

Label_DataSet =

    "LP"

comparacion =

14x5 table

    Frec_caracteristica  threshold  max_caso  vt_tabla  lp_tabla
    _____  _____  _____  _____  _____
         2           0.269    0.23176     1         0
        2.7           0.64    0.63342     1         0
         6           0.4837    0.38098     0         1
        8.2           0.3602    0.20404     0         1
        8.4           0.3594    0.21061     0         1
        9.5           0.3718    0.17526     0         1
       11.1           0.2595    0.13725     0         1
       13.4           0.2235    0.093595    0         1
       15.6           0.468     0.12694     0         1
       41.8            0.05    0.036853    0         1
       18.5           0.2078    0.090998    0         1
       19.3           0.2558    0.089615    0         1
       20.8           0.2528    0.10878     0         1
       22.3           0.2595    0.082336    0         1

Coincidencia =

1x3 string array

    "La coincidencia es de"    "12"    "de 14 Casos"

Label_Filtro_polyphase =

    'Es un evento LP'

```

Figura 20: Evento 2 registrado en la base de datos, salida del filtro polifase, etiqueta por la base de datos, número de coincidencias del tipo de evento y etiqueta proporcionada por el filtro.

En la figura 20, en la variable “comparación”, en las dos columnas del lado derecho se asigna un valor de “1” al evento que el filtro polifase dio como resultado después de analizar el threshold en todos los casos, es así como en la variable vt_tabla tenemos dos elementos con el valor de “1” y el resto con “0”, mientras que en la variable lp_tabla tenemos doce eventos con valor de “1”. Esta suma se aprecia en la variable coincidencias, donde se muestra el evento

que tuvo más coincidencias, esta variable permite etiquetar la señal a la salida del filtro indicando a qué tipo de evento sísmico pertenece.

Finalmente, la salida del filtro es la superposición o agregación de todos los casos identificados con su respectiva etiqueta, lo cual permite reconstruir la señal de entrada, sin embargo, esta señal no es completa debido a que solo se grafican las frecuencias características que son esenciales para la identificación del tipo de evento sísmicos, esto se observa de forma gráfica en la figura 21.

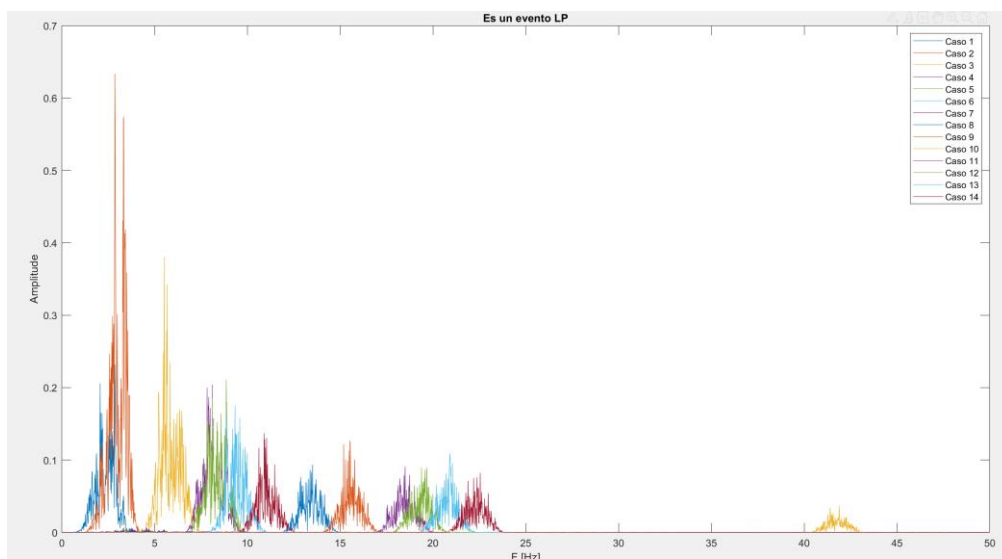


Figura 21: Señal reconstruida en base a las frecuencias características seleccionadas en el filtro para la identificación del tipo de evento sísmicos.

Interfaz

Se diseñó una interfaz usando el entorno GUI de Matlab para que el proyecto sea amigable con el usuario. La interfaz tiene la siguiente forma:

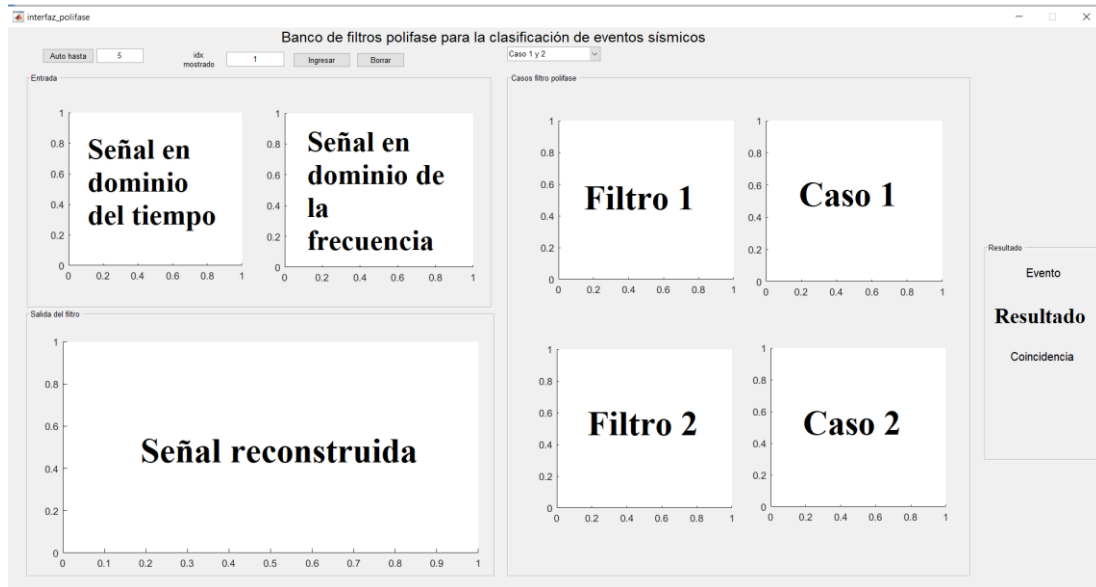


Figura 22: Interfaz y sus partes

La interfaz se divide en 4 paneles: En la parte izquierda superior se tiene el panel de “entrada” el cual muestra la señal de entrada en el dominio del tiempo y de la frecuencia; en la parte izquierda inferior se tiene el panel “salida del filtro” donde se aprecia la salida del filtro en el dominio de la frecuencia; en la parte central se tiene el panel “casos del filtro polifase” donde se muestra en el gráfico izquierdo la sección que se iba a tomar y del lado derecho la salida del sub filtro; finalmente, en la parte derecha se tiene el panel “resultado”, donde en texto se muestra que tipo de evento es y la coincidencia que tiene.

Para correr el programa se usa la siguiente parte:

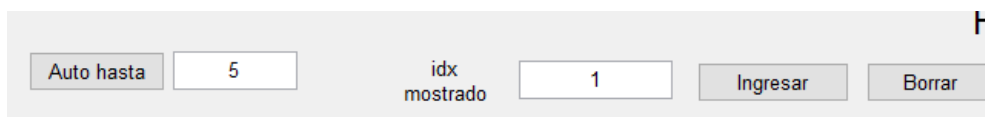


Figura 23: Botones para correr el programa

Para correr de forma automática en tiempo real se usa el botón “Auto que” el cual corre el código desde el idx mostrado, valor que se puede modificar, hasta la data ingresada a lado del botón, en este ejemplo sería 5.

Por otra parte, se puede correr de forma manual, esto es, analizar un solo un solo idx escogido por el usuario, para ello se ingresa el valor deseado a analizar en “idx mostrado” y se da clic en el botón “Ingresar”.

El botón “Borrar” borra la información en la pantalla y se queda vacío, como se ve en la imagen al principio de la sección.

Para seleccionar que caso se desea ver, se usa el selector, el cual muestra dos casos a la vez en la pantalla, las gráficas se mostraran en el panel “Casos filtro polifase”.

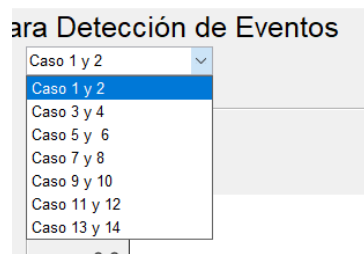


Figura 24: Selector para filtrar caso

La figura 25 muestra un ejemplo de cómo luce la interfaz para analizar el caso de un evento de tipo LP, desplegando la siguiente información:

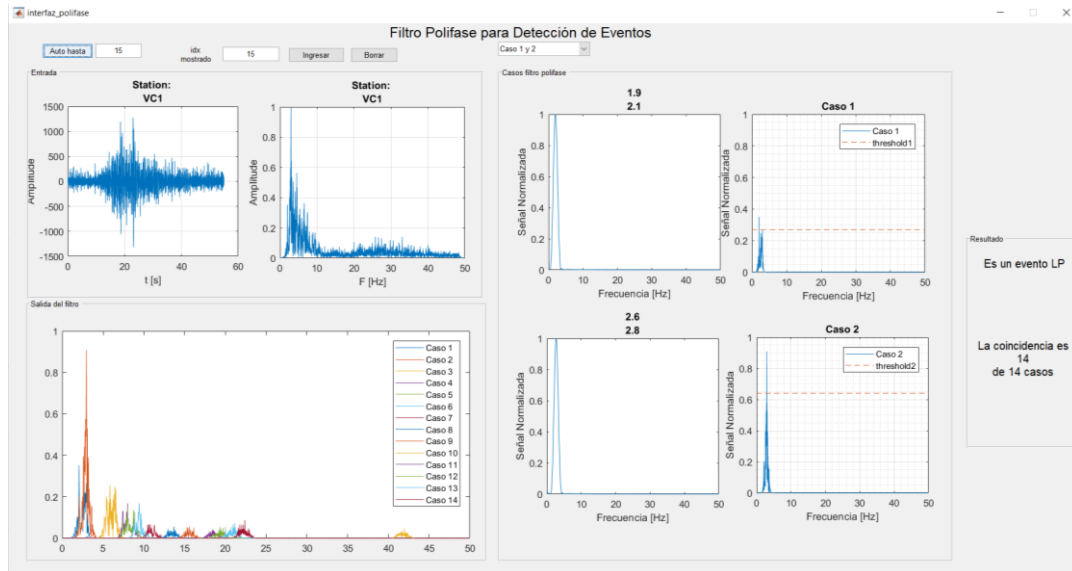


Figura 25: Ejemplo de la interfaz con información del evento 10.

Verificación del filtro polifase para la clasificación de eventos

Después de ajustar los thresholds para todos los casos del filtro polifase, se procedió a probarlo con la base de datos MicSingV1_1 del volcán Cotopaxi correspondiente a la estación VC1. Se comparó la etiqueta de la base de datos con la etiqueta arrojada por el algoritmo basado en el filtro polifase, obteniendo un error de 2.1 %, por lo que la efectividad del filtro es de 97.9%.

Número de eventos = 480		Valor Predicho	
		VT	LP
Valor real	VT	52	4
	LP	6	421

Tabla 5: Matriz de confusión que permite visualizar el desempeño del algoritmo propuesto.

La matriz de confusión nos permite visualizar el número de errores que contiene nuestro algoritmo para identificar cada tipo de evento en relación al número real de los distintos eventos sísmicos. Primero, tenemos 54 eventos sísmicos (valor real) de la base de datos que son identificados como VT, donde nuestro algoritmo está identificando 52 eventos como del tipo VT y 2 del tipo LP. Segundo, tenemos 426 eventos sísmicos identificados como eventos LP en la base de datos, donde el algoritmo identifica 421 como eventos del tipo LP y 5 del tipo VT. Estos 7 eventos identificados incorrectamente son donde el algoritmo tiene confusiones de reconocimiento, dándonos un error del 2.1 %.

Inicialmente, en la primera fase del proyecto solo se consideró el análisis de 10 casos (es decir 10 bandas de interés), considerando únicamente las 10 frecuencias principales obtenidas del paper “On finding possible frequencies for recognizing microearthquakes at Cotopaxi volcano: A machine learning based approach.” (Lara-Cueva, et al., 2020), donde se obtuvo una efectividad menor del filtro cercana al 94 %, por lo que se implementó una segunda fase, en la que se aumentaron 4 casos adicionales (es decir 4 bandas de frecuencia adicionales), basadas en frecuencias características encontradas en investigaciones previas con distintos métodos, por ejemplo en los papers “Automatic Recognition of Long Period Events From Volcano Tectonic Earthquakes at Cotopaxi Volcano” (Lara-Cueva, Benítez, Carrera, Rojo-Álvarez, & Rojo-Álvarez, 2016) y “On the use of Multiple-class Support Vector Machines for Classification of Seismic Signals at Cotopaxi Volcano” (Lara-Cueva, Benítez, Paillacho, Villalva, & Rojo-Álvarez, 2016), los cuales, permitieron aumentar a efectividad el filtro llegando a 97.9%. Esto se debe a que el comportamiento de los eventos sísmicos VT y LP registran frecuencias características importantes en las bandas medias-altas 15-25 Hz. Finalmente, el algoritmo que contiene el filtro general está basado en los 14 casos analizados,

este filtro identifica a qué tipo de evento corresponde la señal de entrada, para etiquetar la señal de salida y realizar la comparación con la etiqueta de la base de datos.

Previos estudios aplicados para la clasificación de eventos sísmicos en diferentes estaciones desplegadas alrededor de volcán Cotopaxi son comparables en base a su eficiencia para la obtención de mejores resultados, los cuales muestran una eficiencia similar a nuestro método propuesto. Además, de que estos consideran un mayor número de parámetros para la distinción de un evento del otro. Estas comparativas de distintos métodos y número de parámetros se puede apreciar en la siguiente tabla.

Método	N parámetros	Características/	Eficiencia [%]
Filtro Polyphase	14		97.9
Linear SVM	53		97
DT algorithm	25		93
DT algorithm	39		98

Tabla 6: Comparación del método propuesto con diferentes métodos estudiados hasta la actualidad.

CONCLUSIONES

El enfoque de nuestra propuesta en los eventos sísmicos VT y LP es fundamental para la detección de actividad volcánica. Los distintos métodos estudiados hasta la actualidad y nuestra propuesta son una herramienta que podrían trabajar conjuntamente con las diferentes estaciones de monitoreo desplegadas en el volcán Cotopaxi, permitiendo a los expertos detectar una secuencia de eventos sísmicos que podrían ser de gran utilidad para confirmar o descartar alguna actividad volcánica de riesgo potencial para las poblaciones aledañas, estas herramientas permiten lanzar una alerta para las distintas autoridades correspondientes para empezar una evacuación inmediata en caso de alguna actividad volcánica.

Nuestra propuesta se enfoca en la clasificación de los eventos sísmicos principales VT y LP en un tiempo muy corto, con una precisión del cercana al 98%, mediante una toma de decisión en distintos casos planteados. Al comparar nuestro clasificador de eventos sísmicos muestra una eficiencia superior en clasificación y requiere menor tiempo con relación a otros métodos estudiados anteriormente que llegan a una eficiencia cercana del 97%, además, en dichos métodos previos se consideran un mayor número de parámetros cercanas a 80, en nuestro estudio solamente se consideran 14 parámetros que permiten reducir el tiempo de espera para la detección de eventos sísmicos.

Como trabajos a futuro se puede implementar el algoritmo propuesto para la detección de eventos sísmicos como una etapa inicial previa a la clasificación de estos. Además, se debería probar el algoritmo propuesto en las diferentes estaciones de monitoreo desplegadas en el volcán Cotopaxi. Además, se podría trabajar en la clasificación de los distintos tipos de eventos sísmicos (hybrid events HYB), lightning events(LGH) y tremors (TRE)) que fueron excluidos en nuestro estudio. Debería ser posible mejorar la etapa de clasificación mediante el

reconocimiento de más frecuencias características, con las que se pueda reducir el porcentaje de error con la esperanza de que este error sea cercano a cero.

En el Anexo 1, se presentan ejemplos de los eventos que presentan inconsistencias al pasar por el filtro y ser comparados con la etiqueta de la base de datos. Cinco de estos eventos presentan patrones inconsistentes con los obtenidos al momento de realizar el threshold, lo que sugiere que podrían estar mal etiquetados en la base de datos, por lo que se debe validar las etiquetas de estos eventos; si la nueva etiqueta coincide con la de nuestro filtro, nuestra eficiencia del filtro aumentará considerablemente, en caso contrario se debería investigar más a fondo las posibles causas de este comportamiento.

De igual forma se puede trabajar con el ruido de la señal, de forma que se lo atenué para tener una información más clara, sin embargo, se debe analizar detenidamente esta parte ya que no se debe confundir las señales de los eventos con ruido.

BIBLIOGRAFÍA

- Cumbe, L. F. (2018). *Aplicación de métodos estadísticos para el análisis y predicción de perfiles de consumo de energía eléctrica*. Cuenca : Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- Gallegos, L. C. (2013). *“Simulación de lahares del volcán cotopaxi en sus drenajes del lado norte con el uso del programa hec-ras*. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Ingle, V. K., & Proakis, J. G. (2010). *Digital signal processing using matlab*. Stamford, Estados Unidos: Cengage Learning.
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (2015). *Red de monitoreo Cotopaxi*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/cotopaxi-red-de-monitoreo>
- Kaplun, D., Klionskiy, D., Voznesenskiy, A., & Gulvanskiy, V. (Febrero de 2015). *Digital filter bank implementation in hydroacoustic monitoring tasks*. doi:10.15199/48.2015.02.12
- Kumar Pandey, V., Kumar, S., Sharma, B. K., & Shamsi, M. A. (Abril de 2007). *Performance characteristic of indigenously developed 24-bit seismic data recorder for earthquake seismology*. Obtenido de <http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/1312/1/JSIR%2066%289%29%20%282007%29%20741-747.pdf>
- Lara-Cueva, R., Benítez, D. S., Carrera, E., Rojo-Álvarez, M. R., & Rojo-Álvarez, J. L. (2016). *Automatic Recognition of Long Period Events From Volcano Tectonic Earthquakes at*

Cotopaxi Volcano. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING.

Lara-Cueva, R., Benítez, D. S., Paillacho, V., Villalva, M., & Rojo-Álvarez, J. L. (2016). *On the use of multiple-class support vector machines for classification of seismic signals at Cotopaxi volcano*. Quito: IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING.

Lara-Cueva, R., Larco, J. C., Benítez, D. S., Pérez, N., Grijalva, F., & Ruiz, M. (21 de Octubre de 2020). On finding possible frequencies for recognizing microearthquakes at Cotopaxi volcano: A machine learning based approach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. ELSEVIER.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107092>

Pérez, N., Venegas, P., Benítez, D., Lara-Cueva, R., & Ruiz, M. (2020). *A new volcanic seismic signal descriptor and its application to a data set from the Cotopaxi volcano*. IEEE transactions on geoscience and remote sensing .

Pérez, N., Venegas, P., Benítez, D., Lara-Cueva, R., & Ruiz, M. (9 de Septiembre de 2020). A New Volcanic Seismic Signal Descriptor and Its Application to a Data Set From the Cotopaxi Volcano. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 58(9).

Winser, A., & Cranos, W. (2017). *Digital Signal Processing: Chapter 5 - Implementation of Discrete Time Systems*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804547-3.00005-X>

ANEXO A: EVENTOS DONDE EL FILTRO PRESENTA ERRORES DE RECONOCIMIENTO

# IDX	Evento	Evento Polyphase
131	LP	VT
148	LP	VT
150	VT	LP
152	VT	LP
191	LP	VT
230	LP	VT
231	LP	VT
5	VT	LP
183	VT	LP
286	VT	LP

Los eventos de la columna idx con celdas rellenas de color naranja presentan patrones con inconsistencias al comparar la etiqueta de nuestro filtro con la etiqueta proporcionada con la base de datos. Estos eventos serán enviados a reetiquetar para verificar si la etiqueta anterior es correcta. Si la nueva etiqueta coincide con la de nuestro filtro, nuestra eficiencia del filtro aumentará considerablemente.