

DISEÑO DE UN PROTOTIPO PARA SELECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES SÍSMICAS

Chile es un país sísmico y, como tal, requiere crear y desarrollar sistemas automáticos que permitan analizar señales sísmicas. Contar con información oportuna, para manejar contingencias, permite asegurar la cadena de mando en poco tiempo. El problema surge, principalmente es la alta curva de aprendizaje para las personas que no son especialistas en el campo sísmico debido a la complejidad del problema. Por esta razón, trabajamos en la creación de dos prototipos: El primero es para la Selección y Procesamiento de Señales Sísmicas y el segundo es una interfaz para ver el origen de un evento con una estación sísmica. Ambos están desarrollados aprovechando las habilidades y especialistas del Programa de Riesgo Sísmico, dirigido por el Departamento de Geofísica de la Universidad de la Universidad de Chile.

KEYWORDS: Geophysic; Python; Signal Processing.

La Tierra no es un cuerpo estático sino que ha estado y está sujeta a una actividad continua, es decir, nuestro planeta es un sistema dinámico. Esto se debe a la interacción de las fuerzas geológicas del interior de la tierra.

Las fuentes naturales o artificiales de energía pueden producir ondas sísmicas. Las ondas de un movimiento telúrico viajan a través de la corteza terrestre, la que no es regular. Las ondas sísmicas se reflejan parcialmente al chocar con un medio más denso, se refractan al pasar de un tipo de corteza a otro y se interfieren entre sí. Además, aumenta la distorsión de las ondas en la medida que se alejan de su punto de origen. Esta distorsión tiene como consecuencia que los sensores no siempre sean capaces de captar nítidamente el fenómeno.

La deformación del terreno, y la acumulación de tensiones en la superficie de la tierra, está vinculada a la dinámica de la litosfera y, más en concreto, a la teoría de la tectónica de las placas (La litosfera está dividida en un conjunto de placas independientes que se desplazan arrastradas por las corrientes de convección de la atmósfera, con velocidades relativas de unos pocos centímetros al año). En el mundo se pueden distinguir 17 placas, de las que 6 se consideran principales [1].

En Chile la sismicidad se caracteriza por tres factores: La frecuencia con que ocurre, su magnitud y la gran diversidad de ambientes tectónicos [2]. Recordemos que Chile tiene una ubicación en el mundo que lo hace un lugar ideal para estudiar este tipo de fenómenos (Placa de Nazca).

1.1 INTRODUCCIÓN A LOS MOVIMIENTOS SÍSMICOS

Como producto de la interacción entre placas, se producen los sismos, que consisten en el movimiento de la tierra debido a las ondas sísmicas. Estas ondas sísmicas pueden ser de varios tipos, siendo las principales las ondas P y S. Las ondas P o primarias son ondas de compresión y longitudinales. Las ondas S (o secundarias) son ondas transversales o de cizalla [2] [3].

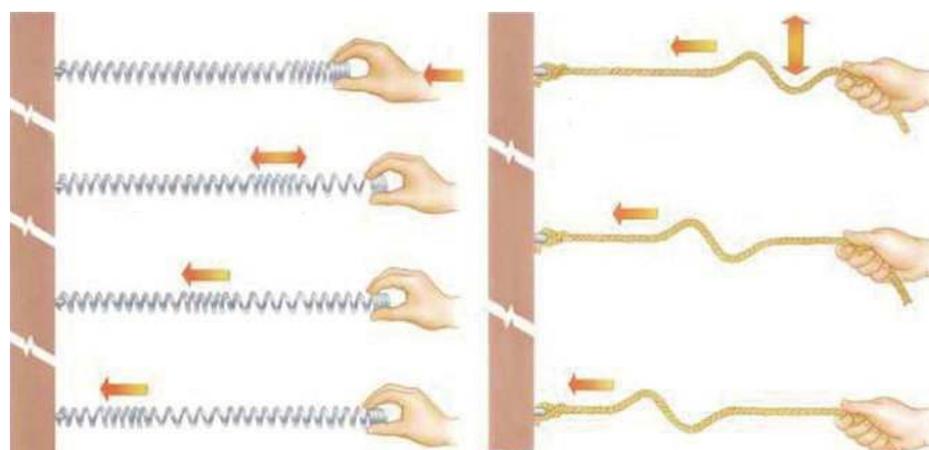
En la Fig. 1 se observan dos de las ondas más características de un sismo. La presencia de estas son detectadas por instrumentos llamados sismógrafos, que consisten en un sistema masa resorte y amortiguador (un sistema de segundo orden) y un sistema de

grabación de datos, ya sea en un medio analógico (aguja sobre tambor con papel ahumado) o mediante un medio digital (computador con convertidor analógico digital). [4][5][6].

Conociendo los tiempos de llegada de las ondas P y S, y la duración del sismo, es posible calcular la localización del epicentro, la magnitud y el tiempo origen del terremoto, teniendo 3 estaciones sísmicas como mínimo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este proyecto, los registros de señales sísmicas fueron proporcionados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y corresponden a información registrada de acelerómetros de banda ancha e instrumentos de perio-



EL RESORTE SE MUEVE PARALELO A LA DIRECCIÓN DE LA ONDA

LA CUERDA SE MUEVE PERPENDICULAR A LA DIRECCIÓN DE LA ONDA

FIGURA 1

Ejemplo del movimiento de una Onda P y una Onda S respectivamente.

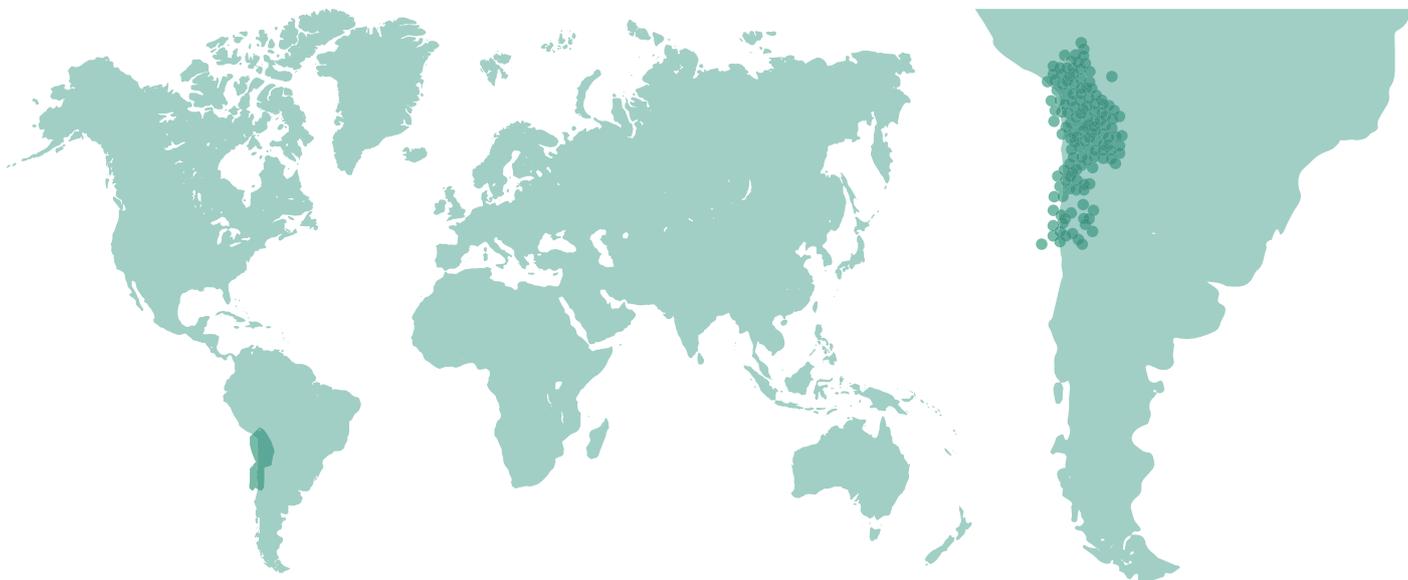


FIGURA 2

Sismos etiquetados e identificados desde el CSV, por el departamento de geofísica.

do corto, en las tres componentes o canales (vertical, norte-sur, este-oeste). Contienen información de cada una de las estaciones de la red sísmológica desde La Serena hacia el norte, abarcando el período del 30 de marzo al 5 de abril de 2014. Los archivos están en formato miniSEED, con cortes de un día por cada canal.

Además de entregar el registro de la señales (archivos MiniSeed), el Departamento de Geofísica hizo entrega de un documento en formato CSV que contiene las etiquetas, es decir, los tiempos en donde se identifica la llegada de las ondas P y S de cada sismo.

La información contenida en estos archivos se ha graficado utilizando el lenguaje de programación Python. En la Fig. 2 se observa en color rojo todos los eventos identificados en la data entregada.

2.1 Herramientas utilizadas

2.1.1 Python

Es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en una sintaxis que favorece un código legible. Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. Es un lenguaje interpretado, usa tipeado dinámico y es multiplataforma. Es administrado por la Python Software Foundation. Posee una licencia de código abierto, denominada Python Software Foundation License, que es compatible con la Licencia pública general de GNU.

2.1.2 Obspy

Es un proyecto de código abierto dedicado al procesamiento de datos sísmológicos en Python. Proporciona programas de análisis para los formatos de archivo comunes, clientes de acceso a los centros de datos y rutinas de procesamiento de señales que permiten la manipulación de series de tiempo sísmológicas. El objetivo del proyecto ObsPy, es facilitar el desarrollo rápido de aplicaciones para la sismología.

2.1.3 Matplotlib

Es una biblioteca para la generación de gráficos a partir de datos contenidos en listas o arrays en el lenguaje de programación Python y su extensión matemática NumPy. Proporciona una API, pylab, diseñada para trabajar con comandos similares a los que se trabaja en MATLAB.

2.1.4 Numpy

Es una extensión de Python, que le agrega a este lenguaje un mayor soporte para vectores y matrices, constituyendo una biblioteca de funciones de alto nivel para operar con cualquier tipo de problema matemático.

3. RESULTADOS

3.1 Selección de la muestra y tipos de Sensores Sísmológicos

Como ya se mencionó, el departamento de Geofísica hizo entrega de una semana de registros de 37 sismógrafos en total. De estos, se seleccionaron 10 acelerómetros para trabajar. En total se obtuvieron 21 archivos por estación, equivalentes a los días de registros (21/3= 7 días de registros, 210 archivos en total).

3.2 Limpieza de la muestra y señales íntegras

Los archivos MiniSeed contienen registros grabados continuamente. Pero en algunos archivos el registro está cortado debido a dificultades técnicas. A razón de esto es que se procedió a verificar cuantas trazas tenían los archivos.

ESTACIONES	ARCHIVOS	DÍAS
C.G001	21	7
C.G002	21	7
C.G003	3	1
C.G004	21	7
C1.AC02	6	2
C.G001	18	6
C.G002	3	1
C.G003	18	6
C.G004	21	7
C1.AC02	21	7
C1.AC02	153	51

TABLA 1

Resumen de estaciones con archivos limpios: una traza.

3.3 Tratamiento y normalización de la señal

Durante la ocurrencia de un sismo es frecuente que el sensor, ubicado en el extremo de un resorte, esté en una posición distinta a la de reposo durante parte de la duración del sismo. Esto ocurre por una razón muy simple: el primer desplazamiento de energía del sismo mueve el sensor y este aún no ha vuelto a su posición original cuando llega un segundo o tercer desplazamiento de energía. Esto provoca una alteración en las mediciones, en la Fig. 3 se observa la forma de una señal sin normalizar, puesto que el sensor no se encuentra siempre en el punto de reposo, los gráficos se alejan

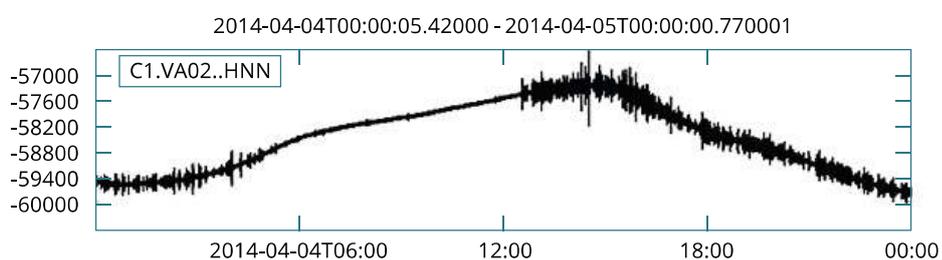


FIGURA 3

Gráfica de una señal sin normalizar.

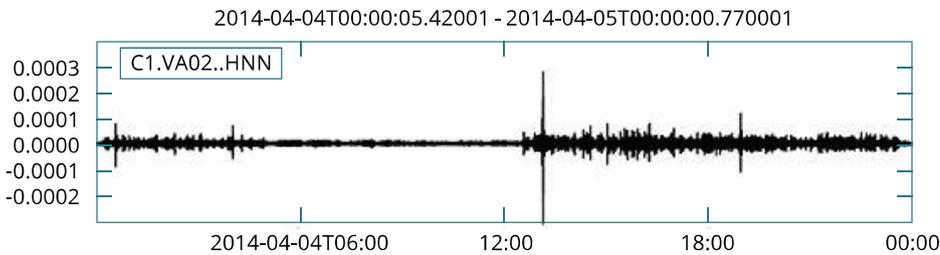


FIGURA 4
Gráfica de una señal normalizada.

del eje cero. Para esto se ha desarrollado un algoritmo que reduce o anula esta distorsión, en la Fig. 4 se observa la señal normalizada.

3.4 Identificación de la señal P y S, corte según etiquetas

Tal como ya se mencionó, el archivo CSV contiene información con el tiempo de ocurrencia del sismo en cada registro entregado. En base a esta identificación (etiquetas) realizada por expertos, se procedió a cortar los archivos identificando en ellos el intervalo de tiempo en que, se calcula que llegó el sismo a los sismómetros. Este cálculo corresponde a: el inicio del corte está definido por la llegada de la onda P, la cual se calcula con:

$$T_p = T_e + \frac{\sqrt{(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2 + (z_e - z_s)^2}}{V_p} \quad (1)$$

Y el fin del corte está dado por la llegada de la onda S, la cual está dada por:

$$T_s = T_e + \frac{\sqrt{(x_e - x_s)^2 + (y_e - y_s)^2 + (z_e - z_s)^2}}{V_s} \quad (2)$$

Donde:

- T_e : Tiempo de ocurrencia del evento (sismo).
- $x_e - x_s$: La distancia en el "eje x" del sismo al sismómetro.
- $y_e - y_s$: La distancia en el "eje y" del sismo al sismómetro.
- $z_e - z_s$: La distancia en el "eje z" del sismo al sismómetro.
- V_p : Velocidad de la onda P (se deja a 6000m/s).
- V_s : Velocidad de la onda S (se deja a 3500m/s).

De un total de 897 archivos se logró separar 299 registros de sismos con magnitud de 4 a 4.9 (se eligió este rango de magnitud, debido a que son los eventos que ocurren con más frecuencia). De todos estos eventos sísmicos identificados, se observaron seis registros de sismos superpuestos en la Fig. 5 se puede observar un evento sísmico superpuesto y un evento sísmico único respectivamente.

En la Fig. 6 se puede observar un registro con sus tres componentes, en donde la componente este tiene ruido y no permite la identificación de un sismo.

De los 299 registros de sismos, se identificaron 65 de estos con claridad, que no necesitaban un tratamiento de filtros para eliminación de ruido y en donde se podían identificar con claridad los eventos sísmicos.

3.5 Matriz de covarianza

Como las señales sísmicas se pueden modelar como procesos aleatorios de tres componentes, la matriz de covarianza asociada permite determinar las relaciones de variación que existen entre las tres componentes y con ello encontrar la dirección desde donde proviene la onda. Para diseñar un programa que calcule la matriz de covarianza, se deben tener en cuenta distintos aspectos que se detallarán a continuación. [7][8]

Sea la función que representa las componentes de un sismo, definida por:

$$\begin{aligned} X_1 &= x(t) \\ X_2 &= y(t) \\ X_3 &= z(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde x_1, x_2, x_3 son tres vectores ortogonales, cuyas componentes son la serie temporal radial, transversal y vertical. Estas series se obtienen de la rotación de las señales originales, provenientes de los sismómetros, mediante el método de los vectores propios de Jurkevics.

Si se considera una pequeña ventana de tiempo T , desde t_1 a t_2 , a partir de una grabación digital de muestras de la señal S , el número de muestras en esta ventana de tiempo se denota por N , entonces:

$$N = \frac{(t_2 - t_1)}{S + 1} \quad (2)$$

Si la trayectoria se considera como un conjunto de puntos de coordenadas, se obtiene una matriz de datos, donde x_{ij} es la i -ésima muestra del componente j -ésimo, N es el

número de muestras y m_j los valores medios del canal j -ésimo.

$$x_j = [x_{ij} - m_j] = [x'_{ij}] \quad (3)$$

($i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, 3$)

La covarianza m_{jk} se evalúa como:

$$m_{jk} = x_j^T x_{k/N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N x_{ij} x_{ik} \quad (4)$$

Donde T denota la transposición.

La matriz de covarianza M_c es la matriz de 3×3 , real y simétrica formada por los elementos m_{jk} . Explícitamente, los términos de M_c , corresponden a las varianzas y covarianzas de las tres componentes del movimiento.

$$M_c = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

La matriz de covarianza siempre es positiva, lo que significa que los valores propios son reales y no negativos (algunos pueden ser cero). Esta matriz es, de hecho, la matriz asociada con una forma cuadrática, es decir, un elipsoide, obteniéndose cuando se calcula la energía de la nube de puntos en relación con los tres planos de coordenadas. Este elipsoide se llama el elipsoide de covarianza.

Para el desarrollo del programa en Python se incluyeron todos los conceptos matemáticos mencionados con anterioridad. El programa lee un archivo sísmico y los procesa en tres aspectos:

- El primero, es lograr la gráfica de la señal sísmica en un instante de tiempo, sin manipulaciones.
- El segundo, utilizando las librerías de `Obspy`, es lograr aplicarle un filtro básico (band pass) a la señal leída, con el fin de poder visualizar su comportamiento.
- Por último, programar los aspectos matemáticos que logren generar una matriz de covarianza, con el fin de graficar el compor-

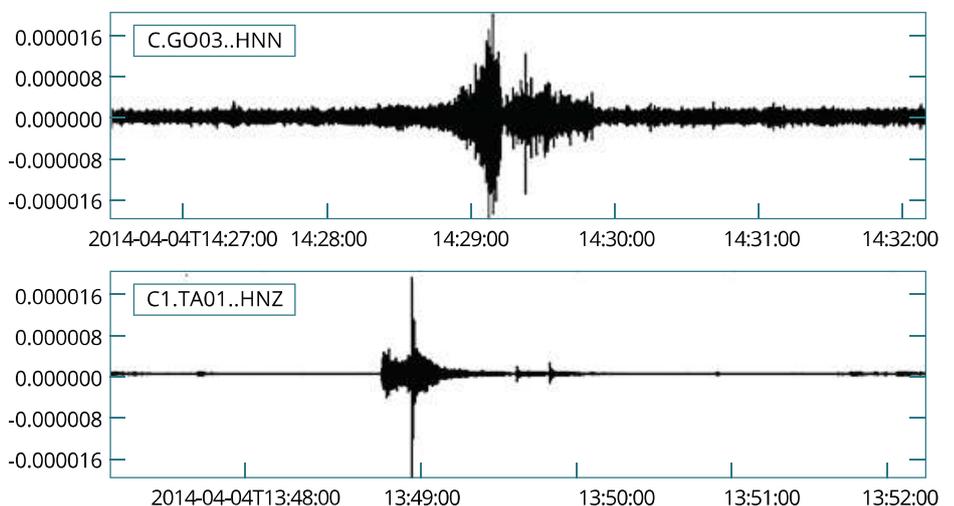


FIGURA 5
Ejemplo de un sismo superpuesto en comparación un sismo simple.

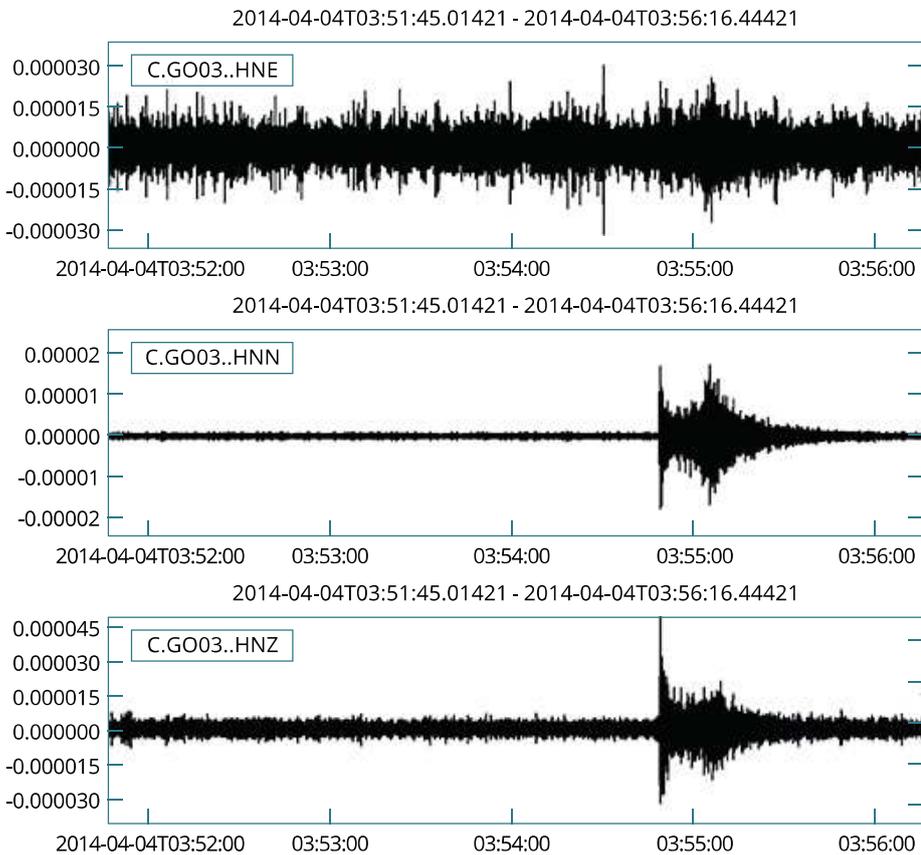


FIGURA 6

Registro con Ruido en la componente Este.

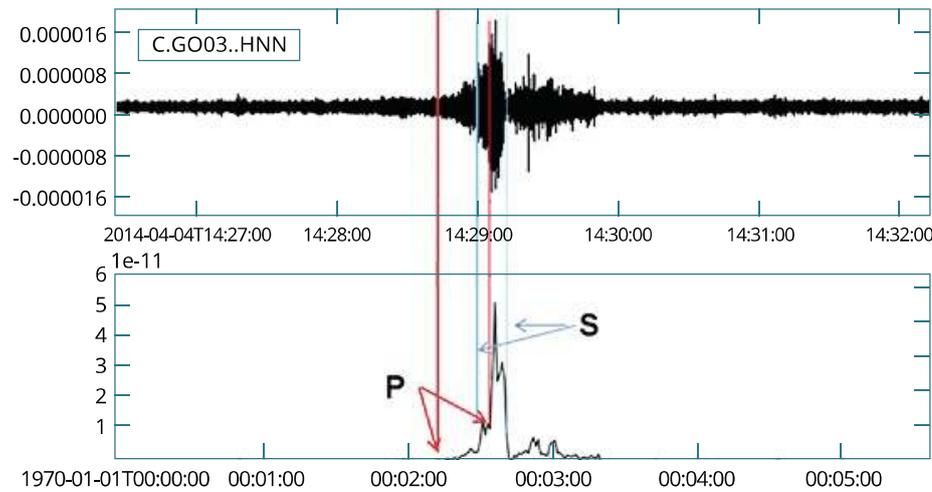


FIGURA 10

Resultado del filtro de polarización a través de la matriz de covarianza utilizando un registro con señales superpuestas. En ella se puede visualizar el comportamiento de la covarianza (segunda gráfica) y la señal filtrada (primera gráfica).

tamiento de su diagonal principal en un determinado intervalo de muestreo.

Finalizando este proceso, se logró representar gráficamente estos tres aspectos, dando como resultado una señal normal, filtrada y el comportamiento de la diagonal principal de la matriz de covarianzas.

En la gráfica de covarianza que muestra el programa, se puede observar que la línea sufre cambios, representados en formas de picos, en los mismos instantes de tiempo en donde se debería hallar la señal P y S del sismo, tal como se observa en la Fig. 7.

Finalmente, de los 65 registros se calculó y graficó la covarianza y en todos ellos se puede observar una forma similar a la Fig. 7 (sismos simples) y/o Fig. 8 (Sismos superpuestos).

3.6 Movimiento de una partícula

Para el desarrollo de esta investigación, se programó en Python una nueva aplicación capaz de estudiar un sismo de tres componentes y lograr visualizar el comportamiento de las partículas ovidas por las ondas sísmicas.

Dicho software logra reagrupar los conceptos destacados de los programas anteriores, tratando de conservar la interacción con el usuario sin la necesidad de recurrir a instrucciones por consola de comandos.

En la Fig. 9 se observa la interfaz de diseño del programa desarrollado. En esta se pueden cargar las señales en cada una de sus componentes. Recordemos que para lograr representar el movimiento de una partícula, es necesario considerar que se deben componer vectorialmente dos señales sísmicas en un mismo instante de tiempo. Para ello, se ha tomado la señal ESTE – OESTE (X) de un sismo y la señal NORTE – SUR (Y) para luego componerlas vectorialmente, graficando así, punto por punto, los movimiento que se tienen en X e Y, correspondientes a los puntos cardinales Norte, Sur, Este y Oeste del plano de La Tierra.[9]

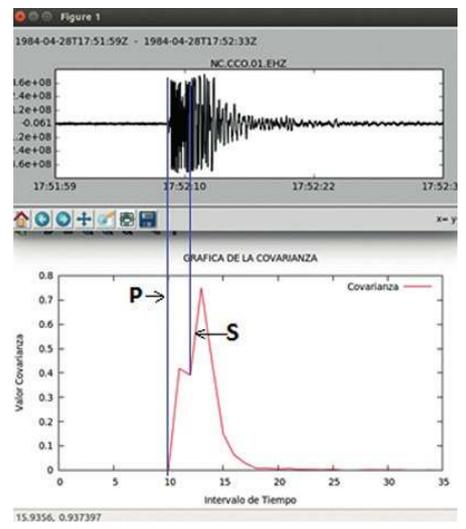


FIGURA 7

Resultado del filtro de polarización a través de la matriz de covarianza. En ella se puede visualizar el comportamiento de la covarianza (segunda gráfica) y la señal filtrada (primera gráfica). (Ver Anexo: gráfica Covarianza).



FIGURA 9

Tablero de herramientas de la aplicación, en ella se puede abrir las tres componentes de un sismo, graficarlas, asignar un intervalo de muestreo para el movimiento de la partícula y hacer un seguimiento de éste.

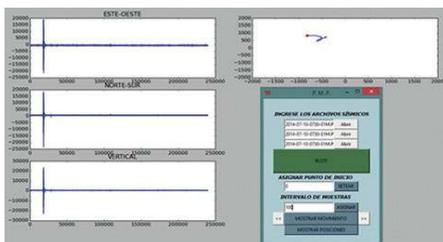


FIGURA 10

Programa que muestra el movimiento de una partícula en los ejes X e Y (sismo Simple). En ella se puede observar las tres componentes del sismo (izquierda) y el movimiento (derecha).

En la Fig. 10 Se observa la interfaz del programa desarrollado, donde es posible observar el comportamiento de la partícula en el momento exacto cuando llega la señal P del sismo, mostrando que si la partícula sube en el eje Y y se desplaza hacia la derecha en el eje X, estamos frente a la dirección del movimiento, que para efectos de este ejemplo, sería una dirección NORESTE en el plano horizontal de la tierra.[9]

4. DISCUSIÓN

Se ha presentado el trabajo dividido en varias etapas. Primero: Pre-procesamiento de datos que se compuso de dos subfases: Selección de la muestra (definición las estaciones de la red sismológica desde La Serena hacia el norte, período del 30 de marzo al 5 de abril de 2014) y Limpieza de Datos (verificación de Trazas completas y eliminación de registros con saturación por ruido). La limpieza de datos fue realizada varias veces y fue evaluada por expertos pertenecientes al Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Segundo: Desarrollo del software prototipo: Matriz de Covarianza y Movimiento de una partícula. Se logró representar gráficamente una señal normal, filtrada y el comportamiento de la diagonal principal de la matriz de covarianza.

Este tipo de análisis no se había realizado anteriormente, y es un avance importante en el estudio de las ondas sísmicas, que permitirá refinar la información relativa a los sismos de modo que los futuros investigadores tengan una metodología de contraste de información adicional a las ya existentes en lo respecta a la identificación de un evento.

Además, queremos destacar que esta investigación ha tenido impactos positivos en el equipo de la Escuela de Computación e Informática de la Universidad Central, pudiendo destacarse la creación de una línea de investigación en el área de las Ciencias de la Tierra, Desarrollo de aplicaciones, Interpretación y comprensión de archivos con registros de eventos sísmicos y obtención de resultados y lo más importante es el interés creciente de estudiantes de la Escuela en esta línea, donde ya se están desarrollando memorias relacionadas a esta área y nuevas postulaciones a fondos. El prototipo diseñado no es revolucionario, pero contribuye a una pieza clave: la extracción de información y es un paso en la dirección correcta.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] José Antonio Pelaez, "Sobre las escalas de magnitud, Enseñanza de las Ciencias de la Tierra", 2011 (19.3), pp 267-275.
- [2] Filomena González, Rubén Solís, Mercedes Sánchez, "Ciencias de la naturaleza 2º E.S.O", 2012.
- [3] Jiangping Liu, Xiangzhi Zeng, Jiamghai Xia, Mao Mao, "The Separation Of P - An S -Wave Component From Three-Component Crosswell Seismic Data", *Journal applied Geophysics* 82 (2012) 163-170.
- [4] Andreas Kohler, Matthias Ohnberger and Frank Scherbaum, "Unsupervised pattern recognition in continuous seismic wavefield records using Self-Organizing Maps" *Geophys. J. Int* (2010) 182, 1619-1630.
- [5] D. Vargas, E. Rodriguez, J Otero, "Alternativas Para La Detección Y Monitoreo De Amenazas Sísmicas Basadas En Arduino" 2013.
- [6] Dixon, T. H., Jiang, Y., Malservisi, R., Mccaffrey, R., Voss, N., Protti, M., & Gonzalez, V. (2014). *Earthquake and tsunami forecasts: Relation of slow slip events to subsequent earthquake rupture. Proceedings Of the National Academy of Sciences Proc Natl Acad Sci USA*, 111(48), 17039-17044.
- [7] Milton J. Porsani¹, Fredy A.V. Artola², Michelangelo G. da Silva¹ e Paulo E.M. de Melo¹, "Filtragem Svd Aplicada `A Melhoria Do Rastreamento De Horizontes S'ísmicos", 2010.
- [8] Rubén Luque, Nuri Hurtado y Asdrual Ovalles, "Implementación de un Filtro de Polarización Basado en la Descomposición del Valor Singular (SVD)", *Tribuna del Investigador*, Vol. 12, N° 2, 24-27, 2011.
- [9] Stan E. Dosso, "Three-dimensional Acoustic Localization in the Arctic using an Ice-mounted Geophone" 2013.

AUTORES:

M.V. Tombolini Echeverría^a
H. Marambio Echeverría^a, E. Fischer Angulo^a, F. Alarcón Pontigo^a, D. Silva Munita^a

^aEscuela de Ingeniería en Computación e Informática, Facultad de Ingeniería Universidad Central de Chile.

Corresponding author:
mtombolinie@ucentral.cl ✉

TEXTO ORIGINAL

Tombolini, V; Marambio, H; Alarcón F; Silva D; Fischer E. (2016). "Design of a Prototype for Selection and Processing Earthquake Signals." *IEEE Latin America Transactions* 14(6): 2618-2622.