

**ENTRENAMIENTO DE RED NEURONAL FEED-FORWARD PARA LA
IDENTIFICACIÓN DE ANOMALÍAS EN EL CAMPO MAGNÉTICO Y SU
CORRELACIÓN CON EVENTOS SISMOLÓGICOS CON MAGNITUD SUPERIOR
E IGUAL A 6.0 Mw EN EL PERIODO 2002-2014.**

Autor:

Andrés Felipe Gómez Gómez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Automatización Industrial

Director:

Ph.D. Eduardo Antonio Cano Plata, UN

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Manizales, Colombia

2016

**FEED-FORWARD NEURAL NETWORK TRAINING FOR MAGNETIC
FIELD ANOMALIES IDENTIFICATION AND THEIR CORRELATION FOR
6.0M_w SEISMOLOGICAL EVENTS IN 2002-2014 PERIOD.**

Author:

Andrés Felipe Gómez Gómez

Thesis Presented as partial requirement for the degree of:

M.Eng. – Industrial Automation

Director:

Ph.D. Eduardo Antonio Cano Plata

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

Faculty of Engineering and Architecture

Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering

Manizales, Colombia

2016

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, directivos y profesores por el excelente ambiente académico y profesional que me brindaron a lo largo del desarrollo de mis estudios de maestría.

Los resultados de esta tesis de grado son gracias a la adquisición de datos del Observatorio Magnético Huancayo. Así mismo, al Instituto Geofísico del Perú, por el soporte en esta producción y a INTERMAGNET por promover prácticas de altos estándares de los observatorios magnéticos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	6
ABSTRACT	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 <i>Introducción al capítulo</i>	<i>9</i>
1.2 <i>Motivación.....</i>	<i>9</i>
1.3 <i>Definición del problema</i>	<i>12</i>
1.4 <i>Hipótesis.....</i>	<i>13</i>
1.5 <i>Objetivos.....</i>	<i>13</i>
1.6 <i>Conclusión del capítulo.....</i>	<i>14</i>
2. FUNDAMENTOS Y DEFINICIONES.....	15
2.1 <i>Introducción al capítulo</i>	<i>15</i>
2.2 <i>Ecuaciones de Maxwell para campo magnético</i>	<i>15</i>
2.3 <i>Campo magnético terrestre.....</i>	<i>17</i>
2.4 <i>Anomalías en el campo magnético terrestre</i>	<i>20</i>
2.5 <i>Sismología</i>	<i>22</i>
2.6 <i>Entropía.....</i>	<i>24</i>
2.7 <i>Redes Neuronales.....</i>	<i>25</i>
2.8 <i>Definición de entrenamiento de la red neuronal.....</i>	<i>26</i>
2.9 <i>Entrenamiento y generalización</i>	<i>29</i>
2.10 <i>Conclusión del capítulo</i>	<i>32</i>
3. METODOLOGÍA	33
3.1 <i>Introducción al capítulo</i>	<i>33</i>
3.2 <i>Etapa 1: Revisión bibliográfica</i>	<i>33</i>
3.3 <i>Etapa 2: Bases de datos</i>	<i>34</i>

3.4	<i>Etapa 3: Entrenamiento de la Red Neuronal Artificial</i>	34
3.5	<i>Etapa 4: Verificación de la Red Neuronal artificial</i>	35
3.6	<i>Cronograma</i>	35
3.7	<i>Conclusión del capítulo</i>	36
4.	MARCO EXPERIMENTAL	37
4.1	<i>Introducción al capítulo</i>	37
4.2	<i>Implementación</i>	37
4.3	<i>Experimentos</i>	50
4.4	<i>Conclusión del capítulo</i>	55
5.	RESULTADOS	56
5.1	<i>Introducción al capítulo</i>	56
5.2	<i>Espectro de magnitud</i>	56
5.3	<i>Entropía</i>	57
5.4	<i>Conclusión del capítulo</i>	59
6.	VERIFICACIÓN DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL	60
6.1	<i>Introducción al capítulo</i>	60
6.2	<i>Salidas de la Red Neuronal Artificial</i>	60
6.3	<i>Conclusión del capítulo</i>	67
7.	CONCLUSIONES	68
8.	APÉNDICE A	69
8.1	<i>Proyecto Intermagnet</i>	69
8.2	<i>Herramienta Computacional</i>	71
9.	APÉNDICE B	74
9.1	<i>Código fuente de la Red Neuronal Artificial</i>	74
10.	TABLA DE FIGURAS	76

RESUMEN

En el desarrollo de la Maestría en Ingeniería Automatización Industrial se realizó la investigación de correlación entre eventos sismológicos y anomalías en el campo magnético terrestre, lo cual ha sido reportado en múltiples estudios utilizando varias técnicas y modelos de procesamiento de tal manera que a futuro permita identificar y caracterizar este tipo de anomalías para que sea posible evidenciar el potencial de un evento sismológico de magnitud importante, lo cual para este estudio se consideró 6.0 Mw o mayor.

Esta investigación se realizó haciendo uso de los datos del Observatorio Magnético de Huancayo Perú ubicado en las coordenadas 12.041 S, 75.320 W, el cual hace parte del proyecto INTERMAGNET, dicho proyecto reglamenta estándares de medición, precisión y transmisión de los datos, así como el almacenamiento y publicación de los mismos en su portal web para descarga y disposición de investigadores que consideren de utilidad este tipo de información; Para esta investigación se consideraron relevantes los datos con muestreos cada minuto para los años comprendidos desde el 2004 al 2014.

La información de eventos sismológicos importantes se obtuvo a través del portal web del USGS (United States Geological Survey), el cual cuenta con una base de datos de eventos sismológicos a nivel mundial y además permite varios parámetros de consulta, entre ellos magnitud mínima y máxima de consulta así como permitir introducir latitud y longitud superior e inferior, de tal manera que es posible tener un área de interés para la consulta, dicha área fue enmarcada desde el norte de Colombia hasta el norte de Chile y océano Pacífico hasta el oeste de Brasil.

Con la información anteriormente relacionada se entrenó una red neuronal feed-forward con el objetivo de identificar la correlación en los patrones de la señal de campo magnético terrestre y sus variaciones anómalas con eventos sísmológicos importantes y su posible uso para la identificación de potenciales eventos a futuro.

Palabras clave: Anomalías de campo magnético, sismo, red neuronal artificial, feed-forward, intermagnet.

ABSTRACT

In the development of the Master of Engineering Industrial Automation research was conducted correlation between seismic events and anomalies in the Earth's magnetic field, which has been reported in multiple studies using various techniques and processing models so that in the future to identify and characterize such anomalies to be possible to demonstrate the potential of a significant magnitude seismic event, which was considered for this study Mw 6.0 or higher.

This research was conducted using data from the Magnetic Observatory of Huancayo Peru located at coordinates 12.041 S, 75.320 W, which is part of INTERMAGNET project, the project regulates measurement standards, accuracy and data transmission as well as Save and publish them on its website for download and available to researchers consider such useful information; For this research data with sampling every minute on the years from 2004 to 2014 were considered relevant.

The major seismic events information was obtained through the web portal of the USGS (United States Geological Survey), which has a database of seismic events worldwide and allows multiple faces of consultation, including minimum and maximum magnitude Reference also allow entering latitude and upper and lower length, so it is possible to have an area of interest for consultation, this area was framed from northern Colombia to northern Chile and the Pacific Ocean to the west of Brazil.

With the above related information feedforward neural network with the aim of identifying the correlation signal patterns of Earth's magnetic field and anomalous variations with significant seismic events and their possible use for the identification of potential future events trained.

Keywords: magnetic field anomalies, earthquake, artificial neural network, feed-forward, INTERMAGNET

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción al capítulo

En el presente documento se relacionan las motivaciones, procedimientos y resultados obtenidos en el entrenamiento de una red neuronal Feed-Forward bajo el algoritmo de Back-Propagation en modo supervisado; Para ello se requirió desarrollar el proyecto en múltiples etapas, una de ellas y muy importante correspondió a la búsqueda de bases de datos que cumplan con estándares de medición, precisión, transmisión de datos en tiempo real, así como el almacenamiento tanto para las mediciones de campo magnético terrestre como eventos sismológicos registrados en el área de interés.

Los datos de campo magnético terrestre bajo los estándares requeridos se encontraron en el proyecto Intermagnet, y se identificó el observatorio magnético de Huancayo; así dicha área de interés se fijó desde el norte de sur américa hasta el norte de Chile, de tal manera que este observatorio se ubicara aproximadamente en el centro de esta área. Y la base de datos de eventos sismológicos fueron filtrados para el área de interés y magnitudes superiores a 6.0 Mw, obtenidos del USGS.

1.2 Motivación

La cordillera de los Andes recorre Sur América desde los 11° latitud Norte hasta 56° latitud Sur, la cual tiene aproximadamente 7300 km de longitud y comprende los países de Argentina, Chile, Perú, Bolivia, Ecuador, Colombia y Venezuela; es por ello que es una de las cadenas montañosas de mayor importancia y hace parte del llamado cinturón de fuego del pacífico, véase Figura 1; ya que debido a su alta actividad sísmica y volcánica; “El origen de la cordillera es el resultado de la permanente convergencia de las placas Sudamericana, caribe y de Nazca” [1]. De tal manera que en esta cordillera se encuentran gran cantidad fenómenos asociados al continuo cambio geofísico como respuesta de los

continuos desplazamientos y esfuerzos que realizan las placas tectónicas presentes en esta parte del globo.



Figura 1: Cinturón de fuego

Como se puede apreciar en la Figura 2, la cantidad de eventos sísmicos con magnitud mayor a 6.0 Mw y a su vez en la Figura 3 la cantidad de víctimas fatales relacionadas a estos eventos.

Como se puede interpretar de la Figura 2, en el año 2007 se presentaron 178 eventos sismológicos de magnitudes entre 6.0 y 6.9 Mw, 14 eventos entre 7.0 y 7.9 Mw y 4 con magnitudes entre 8.0 y 9.9 Mw siendo el año en el que más eventos importantes se presentaron, sin embargo como se aprecia en la Figura 3, el año de 2004 se presentó la mayor cantidad de muertes a causa de este fenómeno principalmente en el evento presentado en las costas de la isla de Sumatra Indonesia, el cual genero un tsunami con olas de hasta 30 metros de altura.

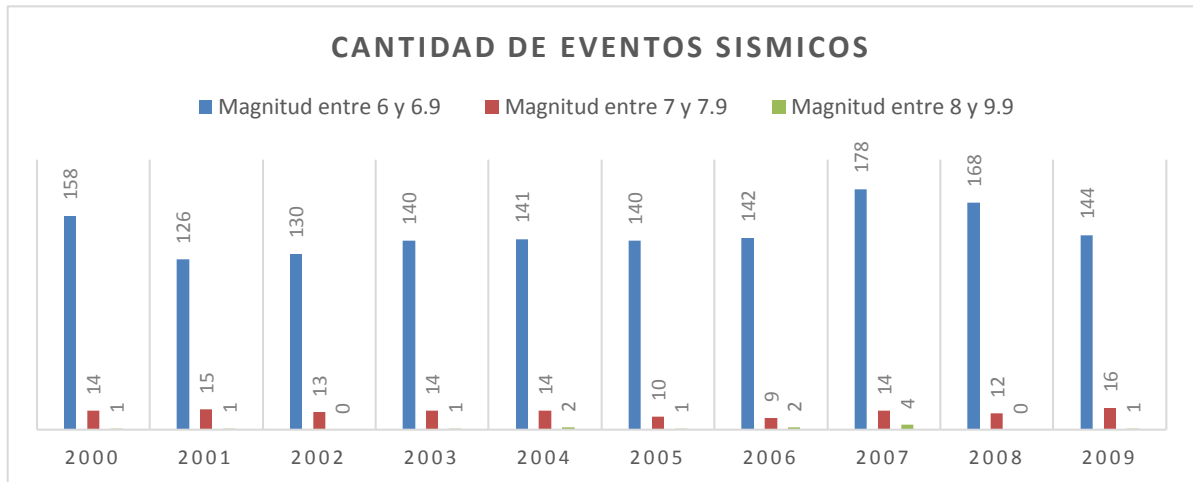


Figura 2: Datos tomados del centro nacional de sismos (USGS).

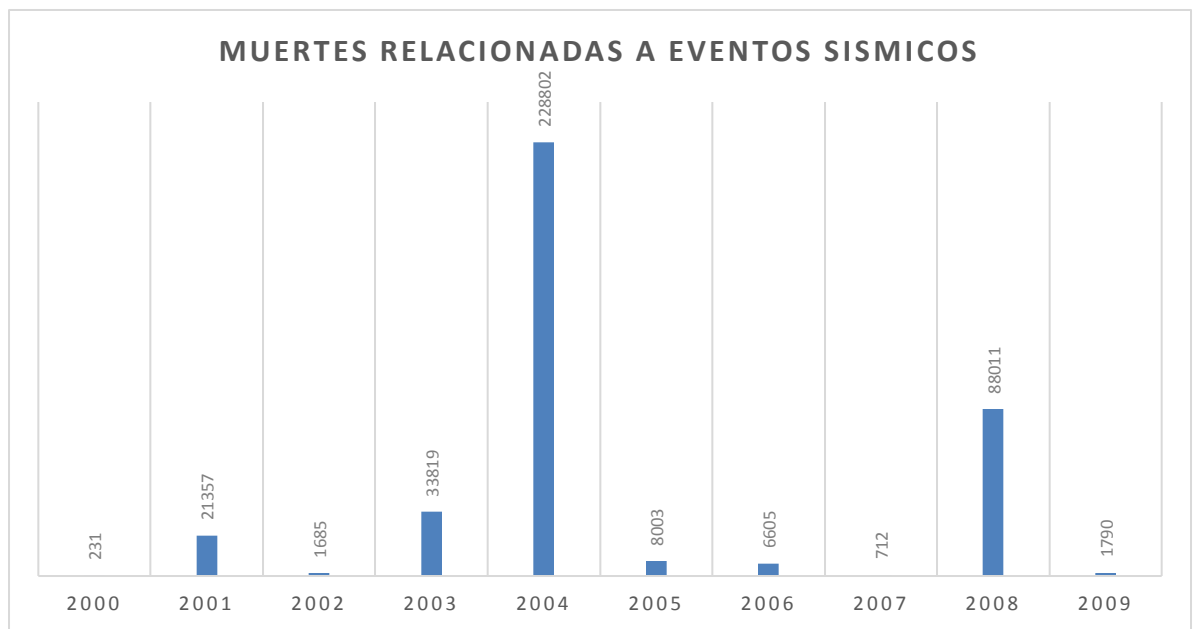


Figura 3: Datos tomados del centro nacional de sismos (USGS).

“Además de los efectos directos producidos por un terremoto y dependiendo localización, magnitud y profundidad, este puede desencadenar otros fenómenos como tsunamis, deslizamientos que afectan el medio ambiente y la seguridad de edificaciones, producen pérdidas y por ende impactan la calidad de vida de miles de personas” [2].

En los últimos años, el registro continuo de emisiones electromagnéticas por los observatorios han reconocido patrones de fluctuación para algunos de los mayores eventos sísmicos [3]. Por lo cual es pertinente el estudio de estos eventos teniendo en cuenta la amplia vulnerabilidad que tiene el territorio de América del Sur a este tipo de fenómenos debido a su trayectoria a lo largo de los tiempos y especialmente cuando la mayoría de las ciudades densamente pobladas se encuentran en situación de riesgo sísmológico.

Los fenómenos de terremotos son una fractura a gran escala en la heterogénea corteza terrestre, la ocurrencia de estos se da de manera repentina como una agitación violenta de la superficie terrestre. Sin embargo, los procesos envuelven la preparación a un evento sísmológico complejo y no fácil de monitorear de manera directa [3].

1.3 Definición del problema

¿Es posible entrenar una red neuronal con señales de campo magnético e identificar anomalías correlacionadas con eventos sísmicos?

En la literatura científica se reportan varios eventos sísmológicos de magnitud importante, y que específicamente han tenido tanto consecuencias materiales como vidas humanas y así mismo la calidad de vida de las personas en cuyos eventos se ha identificado una correlación con algún fenómeno anómalo en el campo magnético terrestre medido bien sea con instrumentos en tierra o satelitales.

En muchos estudios relacionados con variaciones del campo magnético terrestre anómalas y eventos sísmológicos se han realizado con la base de datos del satélite francés DEMETER.

Estos estudios se han realizado de manera posterior al evento sísmológico correlacionando diferentes tipos de anomalías en el campo magnético terrestre con la ocurrencia del sismo, muchos de ellos hacen alusión a cambios en la intensidad

del campo magnético, otros mencionan cambios sustanciales en múltiples bandas de frecuencia. Sin embargo, ningún artículo de la revisión bibliográfica realizada menciona la banda por debajo de ELF, como tampoco hacen mención al entrenamiento de una red neuronal artificial que identifique los patrones de dichas anomalías con el fin de correlacionarlas de manera directa con sismos de magnitud superior e igual a 6.0Mw.

1.4 Hipótesis

La magnitud del campo magnético terrestre en la banda por debajo de ELF es un patrón identificable de un evento sísmológico superior a 6.0 Mw. Estas señales pueden ser usadas en el entrenamiento de una red neuronal artificial.

1.5 Objetivos

Objetivo general

Entrenar y verificar una red neuronal que identifique anomalías generadas en el campo magnético previo a un evento sísmico de magnitud importante.

Objetivos específicos

- Obtener una base de datos confiable y con altos estándares de calidad de campo magnético en función del tiempo para la zona de América del Sur.
- Migrar datos de campo magnético y eventos sísmológicos a MySQL.
- Realizar el procesamiento de datos.
- Entrenar una red neuronal.
- Verificar la red neuronal.

1.6 Conclusión del capítulo

El capítulo de Introducción justifica la motivación principal por la cual se realizó la presente investigación y como el fruto de la misma presenta esta tesis de maestría; y como desde la elaboración de una hipótesis se da solución al tema planteado en la definición del problema a través de la solución de los objetivos específicos.

2. FUNDAMENTOS Y DEFINICIONES

2.1 Introducción al capítulo

El capítulo de Fundamentos y definiciones presenta la fundamentación teórica del campo magnético terrestre y la ley de Gauss para campo magnético con el fin de hacer una descripción de este fenómeno, así como las anomalías que presenta el mismo; También se presenta el modelo de entrenamiento de una red neuronal artificial de topología Back-Propagation bajo el algoritmo Feed-Forward.

2.2 Ecuaciones de Maxwell para campo magnético

Ley de Gauss

La ley de Gauss para campo magnético describe que las líneas del campo magnético son cerradas, esto indica que no existe forma de encerrar únicamente el lugar donde comienza o termina el campo magnético, por lo que no existe un solo polo o mono polo magnético, en otras palabras siempre se encontrara tanto la parte norte como sur; en la Figura 4 se aprecia como las líneas de campo magnético describen evoluciones cerradas.

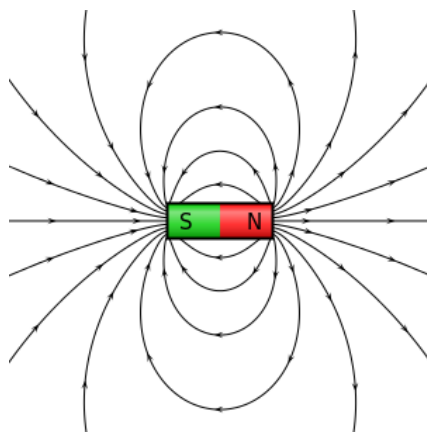


Figura 4: Líneas de campo magnético.

Esta ley se describe a través de la ecuación (1) en su forma integral y (2) en forma diferencial, en la cual se infiere que el campo magnético en una superficie cerrada es igual a cero.

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

Para el caso del vacío absoluto, B y H son iguales, pero al estar en un ambiente que presenta una permeabilidad magnética, la relación se muestra en la ecuación (3).

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (3)$$

Ley de Ampere

La ley de modelada por André-Marie Ampere permite comprender el campo magnético constante generado por una corriente constante que circula por conductor teóricamente infinito; Este campo magnético es ortogonal a la dirección de la corriente, la cual se puede visualizar a través de la Figura 5 y explicar mediante la ecuación (4), la cual se encuentra en forma integral y (5) en forma integral.

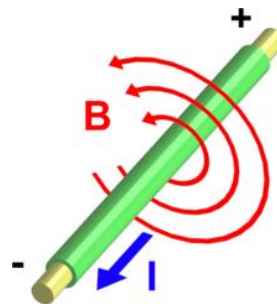


Figura 5: Campo magnético generado por una corriente.

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (5)$$

Teniendo así, la ecuación de campo magnético en función de la corriente I y la distancia entre el conductor y el punto.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (6)$$

2.3 Campo magnético terrestre

La tierra misma es un imán, lo cual es la razón por la que el polo norte de la aguja de una brújula señala el norte terrestre. El eje magnético de nuestro planeta no es del todo paralelo al eje geográfico (eje de rotación), así que la lectura de una brújula se desvía un poco del norte geográfico. Tal desviación, que varía con la ubicación se llama declinación magnética. [4], En la Figura 6 se aprecia el ángulo entre el eje de rotación, así como el eje magnético de la tierra; sin embargo dicho ángulo ha tenido una fluctuación a lo largo de las décadas.

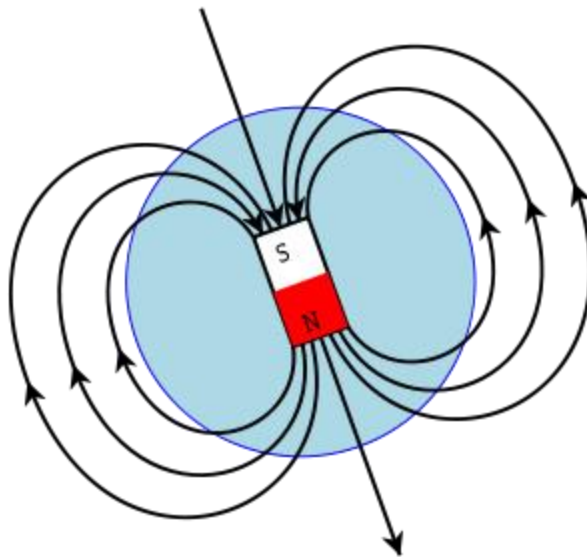


Figura 6: Campo magnético terrestre.

Desde más de 3.7 billones de años, el planeta tierra tiene un campo magnético significativo. Este es generado mayormente por el más externo de los fluidos del núcleo en el interior de nuestro planeta, y varia en diferentes escalas, millones de años y segundos. Las variaciones a largo plazo se deben a cambios en la región dinamo de la tierra, mientras que aquellas de corto plazo tienen su origen en corrientes eléctricas sobre la atmosfera y magnetosfera sin embargo existen diferentes procesos involucrados, algunos de ellos no muy comprendidos aun. [5].

El campo geomagnético es vectorial, el cual puede ser descrito sobre la corteza terrestre por tres (3) componentes ortogonales los cuales son X, el cual corresponde o apunta en dirección al Norte geográfico, Y que apunta al Este y Z que apunta hacia abajo.

Las componentes horizontales X y Y pueden ser combinadas produciendo un componente $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$, el cual está alineado con el norte magnético terrestre. Adicionando la componente vertical Z, la intensidad total del campo como se muestra en la ecuación (7).

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (7)$$

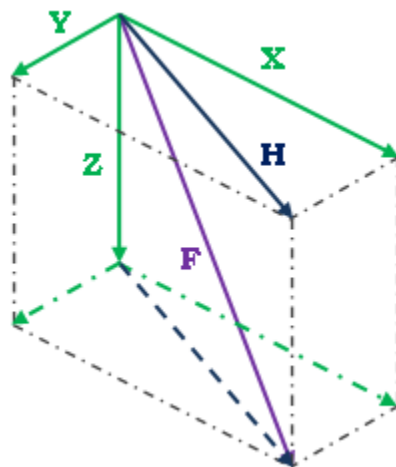


Figura 7: Componentes ortogonales del campo magnético.

El ángulo conformado entre la componente X y la resultante H se conoce como declinación magnética e inclinación al ángulo conformado entre la resultante H y F, como se afirma en [4] estas varían según la ubicación geográfica y como es mencionado por [6] y [5], el campo magnético es horizontal en el Ecuador y Vertical en los polos magnéticos tal como se puede apreciar en la Figura 7, esta inclinación está asociada de manera general a la latitud φ como se define en la ecuación (8).

$$\tan I = 2 \tan \varphi \quad (8)$$

Sin embargo, la intensidad del campo magnético en la superficie, así como la declinación presenta muchas irregularidades, las cuales se debe mayormente a causa de la distribución dispar de los elementos magnéticos en la corteza terrestre y parcialmente a las corrientes en la atmosfera.

Las intensidades de campo magnético en las componentes X y Y, las cuales corresponden a la intensidad horizontal se presentan en la Figura 8, de la cual se puede interpretar que la intensidad horizontal decrece a medida que se acerca a los polos magnéticos, esto ya que en los polos, las componentes de dicho campo tiene una componente mayormente vertical, mientras que cerca de la línea del Ecuador las componentes son más horizontales; sin embargo, las intensidades no se encuentran similares a lo largo de esta línea del Ecuador terrestre.

US/UK World Magnetic Model - Epoch 2015.0 Main Field Total Intensity (F)

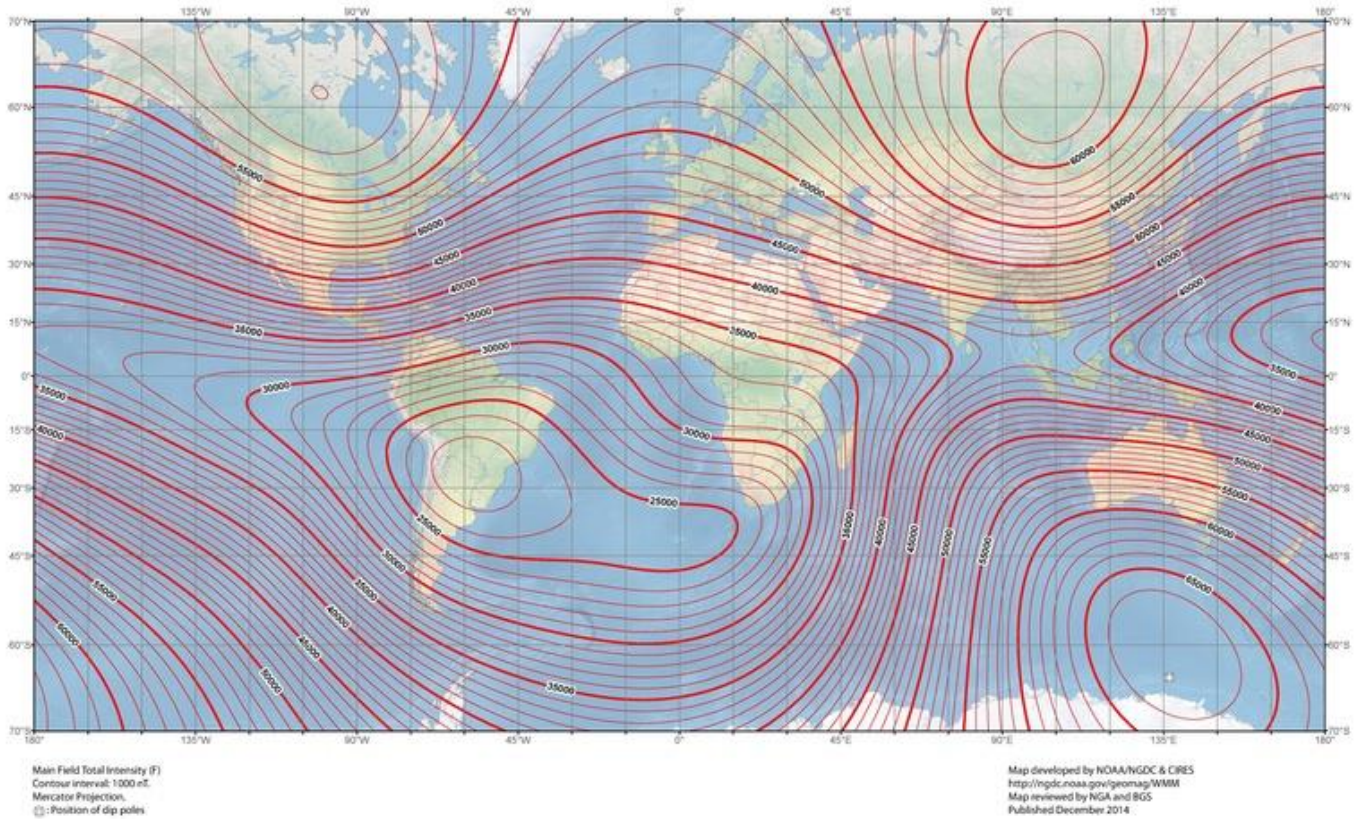


Figura 8: Modelo de intensidades de campo magnético terrestre para el año 2015 (NOAA).

2.4 Anomalías en el campo magnético terrestre

El campo magnético terrestre variable es tan solo una pequeña porción del mismo, aproximadamente el 6% de la intensidad total del campo magnético terrestre y es producido en mayor medida por el movimiento de las partículas cargadas de electricidad en la atmosfera y que se superponen al campo magnético terrestre permanente [7].

Existen variaciones diarias, las cuales están asociadas al efecto del día y la noche y variaciones que tienen un periodo entre 5 y 100 segundos que aún no se encuentran bien relacionadas con algún fenómeno, reciben el nombre de pulsaciones y tienen mayor incidencia en el hemisferio sur donde modifica los bordes y el área de la gran anomalía del Atlántico sur [7].

“Varias investigaciones (e.g Hayakawa et al.,2007; Uyeda et al.,2009 Hayakawa and Hobara, 2010) afirman que el proceso de preparación de un sismo fuerte puede generar señales electromagnéticas y sugieren que la investigación de estos precursores son la más prometedora aproximación hacia la predicción de sismos en el corto plazo” [8].

Mediante la técnica de análisis de relación de polarización, la cual considera que señales de ULF en el campo geomagnético permite la detección de posibles eventos sismológicos [8]; mediante dicha técnica se relacionan nueve eventos sismológicos, en los cuales se tuvo de manera acertada una identificación de manera supervisada de la variación de la banda de frecuencias en ULF, así mismo en muchos casos se han reportado anomalías en la amplitud del campo geomagnético en esta misma banda asociada a grandes sismos como el de Spitak en 1988 (Armenia), Loma-Preita en 1989 (USA). Algunos experimentos realizados explican la generación y propagación de emisiones de campo magnético, particularmente con microfracturas en las rocas; para el caso de grandes fracturas que producen los sismos, estas emisiones pueden penetrar la corteza y propagarse a través de la ionósfera y magnetósfera [9].

También se relacionan investigaciones de anomalías en el campo magnético correlacionados con eventos sismológicos en la región de Vracea (Rumania) y magnitudes superiores a Mw 3.7 en el periodo comprendido entre Diciembre de 1997 y 2004; dichos datos de campo magnético fueron proporcionados por el observatorio geomagnético de Muntele Rosu [10].

Algunos esfuerzos se han realizado para determinar la dirección de la emisión de la señal haciendo uso de la banda ULF del campo geomagnético [9].

2.5 Sismología

La sismología es el estudio de las ondas sísmicas y su propagación por un medio elástico, para el caso particular de la tierra, corresponde a varios medios que incluyen la corteza, el manto y el núcleo. Las ondas sísmicas son causadas por la liberación de energía de manera repentina debido a una fractura o rompimiento de la roca en el interior de la tierra, esta energía viaja alrededor de la tierra, y en ocasiones solo puede ser percibidos por los instrumentos instalados para dicho fin llamados sismómetros, los cuales son los encargados de registrar hasta las vibraciones más sutiles de la superficie.

Existen 2 tipos de ondas sísmicas, ondas internas y superficiales teniendo cada uno de estos tipos ciertas particularidades.

Ondas internas: Son aquellas que se propagan desde el hipocentro, el lugar exacto donde se produce la fractura y liberación de energía hasta la superficie de la tierra, teniendo este tipo de ondas dos tipos principales de propagación.

Ondas P: Son las primeras ondas que arriban a la corteza, este tipo de propagación pueden transportarse por medios sólidos y líquidos, siendo su movimiento característico compresión y dilatación, su analogía más cercana es como se transporta el sonido, el cual genera unos cambios de presiones en el medio [11].

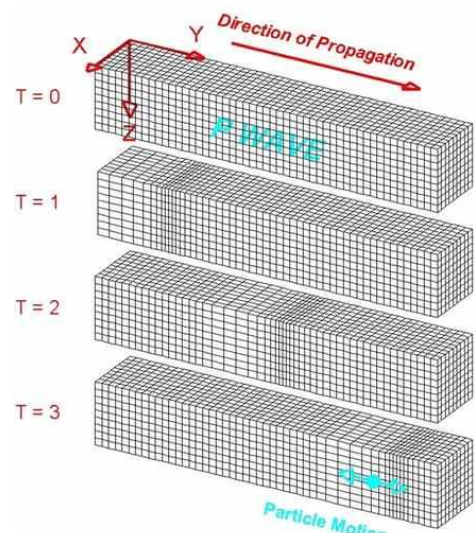


Figura 9: Onda P

Onda S: Este tipo de onda es la segunda onda que arriba y por ende, la segunda en ser percibida durante un sismo debido que su propagación es más lenta que la onda P y solo lo puede hacer a través de medios sólidos, moviendo las partículas de las rocas de manera perpendicular a la dirección de propagación en sentido vertical [11].

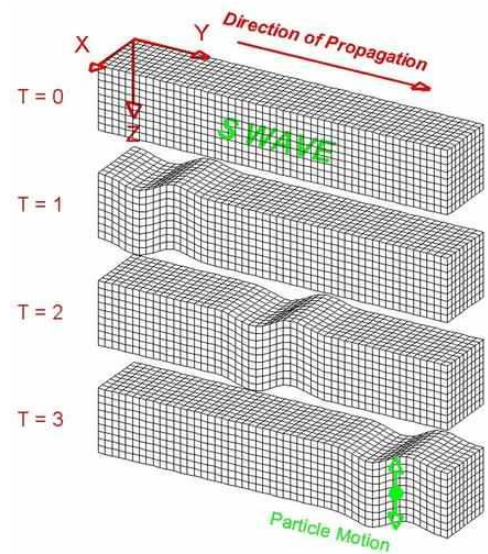


Figura 10: Onda S

Ondas superficiales:

Este tipo de ondas se propagan por la corteza terrestre arribando después de las ondas internas y tienen una frecuencia inferior, siendo así las responsables de la mayoría de los daños y destrucción asociada a un terremoto.

Ondas Love: Esta es la onda superficial que cuenta con una propagación más rápida y moviendo las partículas de manera perpendicular a la dirección de propagación, siendo este movimiento enteramente horizontal. Nombrada así en honor al matemático Británico que trabajo en el modelo matemático de este tipo de onda en 1911 [11].

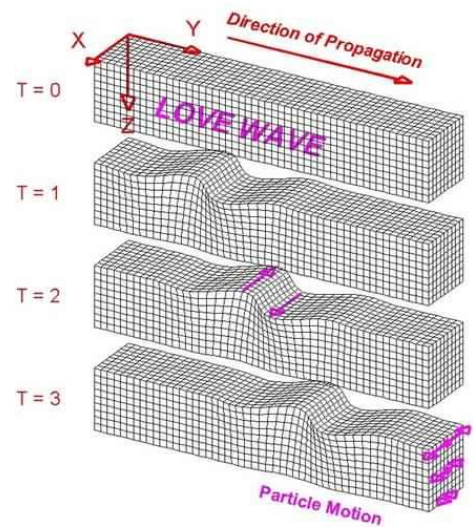


Figura 11: Onda Love

Onda Rayleigh: Este tipo de onda se propaga en forma de rollos de manera similar a la propagación de las olas en el océano. Moviéndose así la tierra en la componente vertical y al mismo tiempo en la dirección de propagación. Este tipo de onda es movimiento que más se percibe a causa de un sismo. Nombrada en honor a los matemáticos John W. Strutt y Lord Rayleigh, quienes predijeron en 1885 la existencia de este movimiento [11].

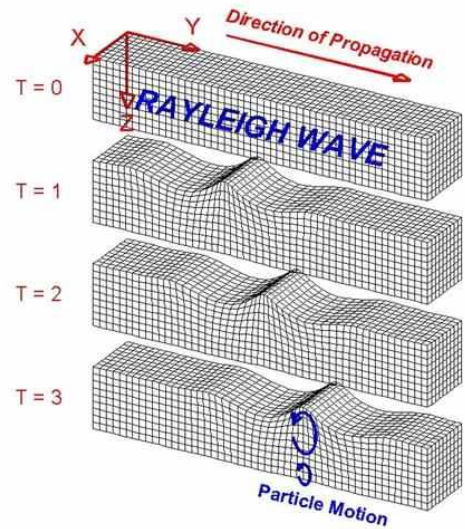


Figura 12: Onda Rayleigh

2.6 Entropía

La palabra entropía apareció inicialmente en la termodinámica clásica, esta trataba las variables de estado que pertenecían a un sistema como volumen, presión y temperatura de un gas. Además, la medición directa de estas variables, hay unos estados internos que deben ser inferidos, como la Entropía y la Entalpía. Surgen como imposición de la ley de la conservación de la energía y describe el estado interno del sistema [12]; sin embargo esta fue adaptada y desarrollada para variables aleatorias y procesos por Claude Shannon, Matemático e Ingeniero Estadounidense que proporciono los inicios de la teoría de la información, La ecuación que describe la entropía de Shannon se puede apreciar en (9).

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p(i) \log_2 \left(\frac{1}{p(i)} \right) \quad (9)$$

En la teoría de la información usualmente se utiliza el logaritmo en base 2, ya que este hace alusión a su representación binaria; y básicamente determina el promedio de información que tiene estado o símbolo, así los símbolos o estados

con menor probabilidad de aparición son los que brindan mayor información; a manera de ejemplo, en el lenguaje castellano, la letra “e” es la más utilizada, esto indica que en un texto, esta letra tiene una gran incertidumbre, sin embargo la letra “ñ” es de las que menor probabilidad de aparición tiene por lo que tiene una incertidumbre menor por lo que ofrece mucha información el que esta se encuentre presente en una palabra.

2.7 Redes Neuronales

Las redes neuronales son redes que procesan elementos llamadas “neuronas”, las cuales operan con su información local y comunicándola con otros elementos; el diseño de las redes neuronales fueron inspirados por la estructura del cerebro real, sin embargo el procesamiento de los elementos y su arquitectura están lejos de su inspiración biológica [13].

Existen muchos tipos de redes neuronales, sin embargo el principio de estas es similar. Cada neurona es capaz de recibir una señal de entrada para procesarla y enviar una señal de salida; cada una de estas neuronas se encuentra conectada al menos con otra neurona y esta conexión es evaluada por un número real llamado “coeficiente de peso”, el cual refleja la importancia de esta conexión [13].

La principal ventaja de una red neuronal es que son capaz de usar información desconocida que se encuentra escondida en los datos; Tomar esta información se conoce como “aprendizaje o entrenamiento de la red neuronal”, lo cual en el formalismo matemático significa ajustar los coeficientes de pesos.

Los proceso de entrenamiento son principalmente dos, supervisado y no supervisado; Un entrenamiento supervisado de una red neuronal multi-capa feed-forward (MLF) por sus siglas en inglés (Multi-layer Feed-Forward) significa la red neuronal conoce la señal de salida y ajusta los pesos de los coeficientes de tal manera que estos son ajustados tan cerca como sea posible a la señal de salida; por lo contrario, una entrenamiento no supervisado no conoce la señal de salida,

es sistema es provisto de un grupo de patrones [13], de tal manera el mismo ajusta los coeficientes que determinar su entrenamiento.

2.8 Definición de entrenamiento de la red neuronal

Las redes neuronales multi-capa entrenadas con el algoritmo de aprendizaje Back-Propagación son las más populares. Estas consisten en neuronas que están ordenadas en capas, véase Figura 13. La primera capa es la capa de entrada, la última es la de salida y las que se encuentran en el medio son las capas ocultas [13].

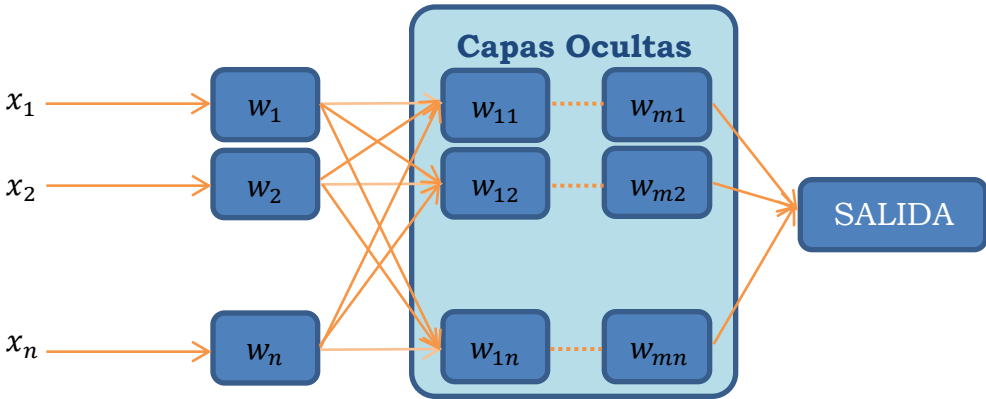


Figura 13: Esquema de capas para una red neuronal Feed-Forward

Para describir formal de las neuronas, se puede utilizar la función Γ , la cual se le asigna a cada neurona i , así $\Gamma(i) \subseteq V$ los cuales corresponden a los antepasados de la neurona y $\Gamma^{-1}(i) \subseteq V$ corresponde a los predecesores de esta misma neurona. Cada neurona en una capa particular se encuentra conectada con todas las neuronas de la siguiente capa a través de un coeficiente ω_{ij} y un coeficiente limite ϑ_i . El peso del coeficiente refleja el grado de importancia de la conexión; El valor de salida está determinado por las ecuaciones (10) y (11).

$$x_i = f(\xi_i) \quad (10)$$

$$\xi_i = \vartheta_i + \sum_{j \in \Gamma_i^{-1}} \omega_{ij} x_j \quad (11)$$

Donde ξ_i es el potencial de la i -ésima neurona y $f(\xi_i)$ es la función de transferencia. La sumatoria de la ecuación (11) transfiere la señal a través de todas las capas. El coeficiente límite puede entenderse como el peso del coeficiente de la conexión cuando formalmente se ha adicionado la neurona j .

$$f(\xi) = \frac{1}{1+e^{-\xi}} \quad (12)$$

El proceso de adaptación supervisado varía los coeficientes límite ϑ_i y los coeficientes de peso ω_{ij} en orden de minimizar la suma de la diferencia cuadrada entre la salida calculada y la requerida, Esta se encuentra descrita en la ecuación (13).

$$E = \sum_o \frac{1}{2} (x_o - \hat{x}_o)^2 \quad (13)$$

Donde x_o y \hat{x}_o son vectores compuestos los valores calculados y requeridos de las neuronas de salida.

Para el entrenamiento de la red neuronal bajo el algoritmo Back-Propagation se presentan las ecuaciones (14) y (15), las cuales ajustan los coeficientes de peso y de umbral.

$$\omega_{ij}^{(k+1)} = \omega_{ij}^k - \lambda \left(\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} \right)^k \quad (14)$$

$$\vartheta_i^{(k+1)} = \vartheta_i^k - \lambda \left(\frac{\partial E}{\partial \vartheta_i} \right)^k \quad (15)$$

Donde λ es la relación de aprendizaje de la red neuronal; el principal problema es el cálculo de las derivadas $\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}}$ y $\frac{\partial E}{\partial \vartheta_i}$, este cálculo se realiza siguiendo los siguientes pasos:

$$E = \frac{1}{2} (x_o - \hat{x}_o)^2 = \frac{1}{2} \sum_k g_k^2 \quad (16)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial \omega_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial x_i} \frac{\partial f(\xi_i)}{\partial \omega_{ij}}$$

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial x_i} \frac{\partial f(\xi_i)}{\partial \xi_i} \frac{\partial \xi_i}{\partial \omega_{ij}}$$

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial x_i} f'(\xi_i) \frac{\partial (\vartheta_i + \sum_{j \in \Gamma_i^{-1}} \omega_{ij} x_j)}{\partial \omega_{ij}}$$

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial x_i} f'(\xi_i) x_j \quad (17)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \vartheta_i} = \frac{\partial E}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial \vartheta_i} = \frac{\partial E}{\partial x_i} f'(\xi_i) \cdot l \quad (18)$$

De las ecuaciones (17) y (18) resulta la relación que se muestra en la ecuación (15).

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial \vartheta_i} \cdot x_j \quad (19)$$

Es siguiente computo solo requiere el cálculo de la expresión $\frac{\partial E}{\partial \vartheta_i}$.

$$\frac{\partial E}{\partial x_i} = g_i \quad (20)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x_i} = \sum_{l \in \Gamma_i} \frac{\partial E}{\partial x_l} \frac{\partial x_l}{\partial x_i} = \sum_{l \in \Gamma_i} \frac{\partial E}{\partial x_l} \frac{\partial f(\xi_i)}{\partial x_i}$$

$$\frac{\partial E}{\partial x_i} = \sum_{l \in \Gamma_i} \frac{\partial E}{\partial x_l} \frac{\partial f(\xi_l)}{\partial \xi_l} \frac{\partial \xi_l}{\partial x_i} = \sum_{l \in \Gamma_i} \frac{\partial E}{\partial x_l} f'(\xi_l) \omega_{lj}$$

$$\frac{\partial E}{\partial x_i} = \sum_{l \in \Gamma_i} \frac{\partial E}{\partial \vartheta_i} \omega_{li} \quad (21)$$

Esto ya que $\frac{\partial E}{\partial x_l} f'(\xi_l) = \frac{\partial E}{\partial \vartheta_i}$ como se evidencia en la ecuación (21). Basado en la aproximación de la función de salida y así las capas ocultas pueden ser calculadas de mediante recursividad. Este algoritmo es llamado Back-propagación, ya que el error de salida es propagado a través de las capas ocultas hasta la capa de entrada.

2.9 Entrenamiento y generalización

Las redes neuronales multi-capas feed-forward operan en dos modos: entrenamiento y predicción. El modo de entrenamiento empieza con valores arbitrarios para los coeficientes, estos deben ser incluso aleatorios y se procede con las iteraciones que permitan su ajuste. Cada una de estas iteraciones completas son llamadas epoch, así en cada iteración se reduce el error en la salida de manera gradual de tal manera que esta converja a los valores óptimos.

En el modo de predicción, la información pasa desde la capa de entrada a través de las capas de ocultas hasta la salida, la red procesa una señal a la vez con el fin de estimar la salida de acuerdo a la esta. El error resultante es usado para estimar la calidad de la predicción de la red neuronal entrenada.

EJEMPLO DE CAMPO MAGNÉTICO:

Se propone como ejemplo de campo magnético, calcular el campo magnético generado a 10 centímetros de un conductor rectilíneo, por este circula una corriente de 2 amperios en un medio con permisividad magnética $12.6 \mu\text{T.m/A}$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (22)$$

$$\vec{B} = \frac{(12.6 * 10^{-6})(2)}{(2\pi)(0.1)}$$

$$\vec{B} = \frac{25.2 * 10^{-6}}{(2\pi)(0.1)}$$

$$\vec{B} = \frac{25.2 * 10^{-6}}{0.62832}$$

$$\vec{B} = 40.1 \mu\text{T}$$

Como se puede apreciar en la ecuación (22) la intensidad de campo es directamente proporcional a la corriente que circula por el conductor e inversamente proporcional a la distancia entre punto y el conductor.

EJEMPLO DE RED NEURONAL ARTIFICIAL:

Se propone como ejemplo de una red neuronal artificial, entrenar una red neuronal que identifique los caracteres A, B, C, D, el cual se visualiza a través de una matriz de puntos de 14 filas y 10 columnas, estas se aprecian en la Figura 14, Si la topología de la Red neuronal artificial es Feed-Forward, la capa de entrada debe contar con 140 elementos y para el caso particular del ejemplo, 4 salidas en las cuales se mostrara la correlación que tiene con cada uno de los caracteres, indicando cuantitativamente que tan similar es con cada una.

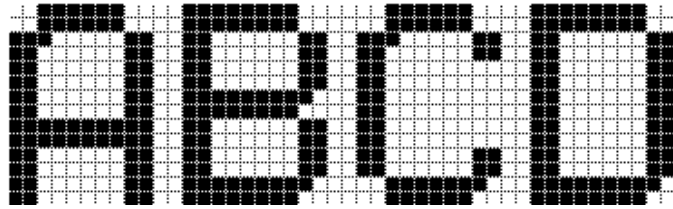


Figura 14: Matriz de caracteres

Así, mismo se requiere definir el número de capas ocultas y neuronas en las mismas con el fin de proporcionar un óptimo entrenamiento de la Red Neuronal Artificial con el fin de tener las salidas más aproximadas a la realidad.

Asumiendo que el número de capas ocultas fuese 2, cada una de ellas con 10 neuronas el proceso de entrenamiento fijara tanto el peso de cada neurona como sus enlaces con las demas según el algoritmo de entrenamiento Back-Propagation, el cual se presenta en el proceso de entrenamiento las salidas para cada una de las entradas.

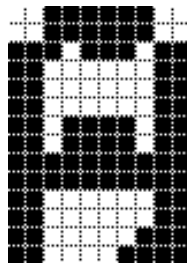


Figura 15: Carácter de entrada.

Una vez entrenada la red neuronal, se pone en la capa de entrada de la red neuronal el carácter que se encuentra en la Figura 15, la cual bajo nuestros patrones de identificación la vemos similar a la letra A, sin embargo para la red neuronal artificial en principio solo corresponde a una matriz de puntos activos y otros no, y que según el entrenamiento que se le dio asignara una correlación con cada uno de los caracteres, estos se pueden apreciar en la Tabla 1. Allí podemos interpretar que la correlación de salida para la red neuronal artificial entrenada es mayor para la Letra A.

	LETRA A	LETRA B	LETRA C	LETRA D
CORRELACIÓN	0.9101	0.2231	0.1020	0.2542

Tabla 1: Salidas de la red neuronal artificial.

2.10 Conclusión del capítulo

En el capítulo de fundamentos y definiciones se plantea la argumentación de la presente tesis de maestría desde la ciencia y la ingeniería, evidenciando los procesos físicos del campo magnético terrestre mediante las leyes generalizadas de Maxwell, la topología de la red neuronal artificial Back-Propagation y su entrenamiento bajo el algoritmo Feed-Forward, además de la teoría de la información requerida para este proceso con el fin de realizar una selección objetiva de los patrones de entrenamiento.

3. METODOLOGÍA

3.1 Introducción al capítulo

Dado el interés y motivación de realización de la presente tesis de grado de Maestría en Ingeniería en Automatización Industrial, ateniendo el objetivo general de la misma y en función de dar solución al problema que compete, se realizaron las etapas a continuación se describen con el fin de evidenciar la importancia de los objetivos específicos planteados.

3.2 Etapa 1: Revisión bibliográfica

La primera de las etapas para el desarrollo de la presente tesis se inició una revisión bibliográfica, Así, la literatura que permitiera la comprensión del fenómeno de campo magnético terrestre, con lo cual se encontró información importante al respecto como su principio físico y cambios que ha tenido con las diferentes eras geológicas. Posterior a su comprensión se realizó una búsqueda de revistas indexadas con el fin de tener información de investigaciones correspondiente a las variaciones y anomalías en el campo magnético terrestre, así como sus posibles causales, entre ellas especialmente las investigaciones relacionadas con las anomalías de dicho campo y eventos sismológicos, donde se pudo obtener información relevante en cuanto anchos de banda en los que se presentan las anomalías, variaciones en amplitud, ordenes de magnitud entre otras; Toda esta información de revistas indexadas se realizó gracias a los convenios que tiene la Universidad Nacional de Colombia con dichas revistas a través de la página web del sistema nacional de bibliotecas.

Posterior a dicha revisión bibliográfica relacionado con el campo magnético terrestre, se realizaron consultas teóricas de redes neuronales artificiales, así como sus topologías y tipos de entrenamiento; además de manuales y tutoriales de Scilab y cómo hacer uso de los módulos (*Toolbox*) con los que cuenta para tal fin.

3.3 Etapa 2: Bases de datos

Posterior a la revisión bibliográfica, se requiera una base de datos confiable que permitiera entrenar la red neuronal artificial, especialmente si esta contaba con datos de la región que se describió como de particular interés, si se encontró la base de datos gratuita llamada proyecto Intermagnet, el cual cuenta con estaciones de medición de campo magnético dispersas en todo el globo.

Una vez se contó con dicha base de datos se realizó una búsqueda de sismos importantes, con magnitudes mayores o iguales a 6.0Mw, esta información se encontró en el portal web del USGS para la región noroccidental de Sur América.

Toda esta información fue migrada a MySQL con el fin de hacer uso de sus ventajas del motor de búsqueda e indexado de información, esta información fue migrada a través de diferentes rutinas en PHP y volcado en modo (*bulk*).

3.4 Etapa 3: Entrenamiento de la Red Neuronal Artificial

Para el entrenamiento de la red neuronal artificial, se optó por hacer uso del software de análisis numérico Scilab, ya que esta cuenta con excelentes prestaciones, además de ser de uso totalmente libre bajo el licenciamiento GNU.

Así, se tomó la información de la base de datos para realizar el entrenamiento de la red neuronal artificial con topología Back-Propagation y un entrenamiento Feed-Forward, dicho entrenamiento fue en modo supervisado.

Teniendo presente la fecha de los eventos sismológicos importantes, se realizó el entrenamiento para eventos positivos, y para el caso de los eventos sismológicos negativos se utilizaron algunas fechas de “silencio sísmico”, dicha información fue depurada de manera manual según la base de datos descargada del USGS.

3.5 Etapa 4: Verificación de la Red Neuronal artificial

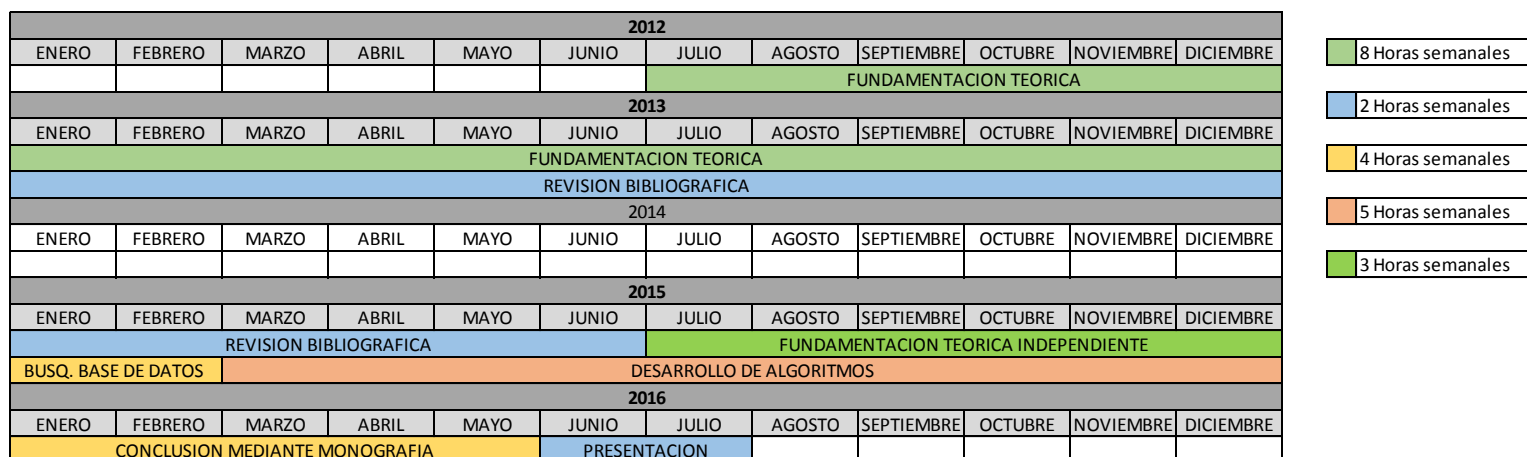
La realización de la verificación de la red neuronal artificial se realizó tomando los 117 eventos sismológicos con magnitud mayor e igual a 6.0 Mw registrados desde el 2004 y 2014, incluyendo los eventos con los cuales fue entrenada la red neuronal artificial, con dicha verificación se permitió evidenciar que la salida para eventos positivos correspondiera a una correlación por encima de 0.8 y para eventos negativos cercanos a 0.0, teniendo así un doble parámetro de verificación.

Para el caso de verificación de falsa, en las fechas en las cuales se dio un “silencio sísmico”, se seleccionaron de manera arbitraria y manual 25 fechas, las cuales fueron ingresadas y evaluadas por la red neuronal artificial mostrando una correlación de salida en eventos positivos cercana a 0.0 y para el caso de eventos negativos una correlación superior a 0.8, excepto por dos casos particulares que se describen claramente en el capítulo de verificación.

Teniendo así, altas correlaciones en las salidas de la red neuronal artificial con respecto a la ocurrencia de eventos sismológicos o no.

Para mayor información de procedimientos y particularidades a cerca de la Metodología, favor referirse al apéndice A.

3.6 Cronograma



3.7 Conclusión del capítulo

En el presente capítulo, el cual describe someramente la metodología que se realizó por etapas en orden de atender no solo el objetivo general sino los objetivos específicos teniendo así, desde la revisión bibliográfica sobre fundamentos esenciales del campo magnético terrestre y como las anomalías registradas por científicos en el mundo se encuentran relacionadas con eventos sismológicos de magnitud importante; hasta el entrenamiento y verificación de la red neuronal artificial. Lo anterior permitió realizar una etapa tras otra el proyecto de tesis con el fin de llegar a un feliz término la misma.

4. MARCO EXPERIMENTAL

4.1 Introducción al capítulo

La implementación del presente proyecto de tesis se realizó teniendo como insumo dos bases de datos, una de campo magnético con un periodo de muestreo de 1 minuto que se obtuvo a través del proyecto Intermagnet, y la segunda de eventos sismológicos importantes a través de USGS; Ambas se descargaron mediante las plataformas web dispuestas para ello de manera gratuita.

La información de campo magnético en función del tiempo se utilizó para obtener el espectro de magnitud, haciendo uso de estos se entrenó una red neuronal que identificara anomalías y correlacionar estas con eventos sismológicos de magnitudes importantes.

A continuación, se presenta la manera como fue estructurado el proyecto de tesis, la información básica del proyecto Intermagnet, migración de datos descargados a una base de datos conjunta, identificación de anomalías de campo y entrenamiento de la red neuronal.

4.2 Implementación

Teniendo en cuenta que la hipótesis de la presente tesis de grado correlaciona el campo magnético terrestre con eventos sismológicos importantes, se requirió en primera medida obtener los datos de equipos sensibles al campo magnético terrestre y cuyos datos cumplan con estándares metrológicos que permitan tener una precisión de cambios de este parámetro del orden de los microTesla [μT] y que además un registro continuo en el tiempo de por lo menos 10 años con el fin de tener un histórico que permita evidenciar el comportamiento del campo magnético terrestre en la región de interés, la cual corresponde al norte de Sur América y Sur de Centro América.

El Observatorio Magnético de Huancayo (HUA) se encuentra ubicado en Latitud 12.05° S Longitud 75.33° W en la ciudad de Huancayo Perú, el cual hace parte del proyecto INTERMAGNET, el cual estandariza además de dicho observatorio, más de 140 en todo el mundo, de tal manera que todos estos equipos no solo tengan un registro con niveles de precisión sino formatos de almacenamiento que permiten su descarga e implementación libre y gratuita en el portal web <http://www.intermagnet.org>. De tal manera que se optó por dicha base de datos por las ya mencionadas ventajas que estas tiene por sobre otras bases de datos, sin embargo, el formato de descarga de dicha información se realizó en el formato IAGA2002; El cual solo permite su descarga desde el portal web INTERMAGNET por un periodo máximo de un año y dicha información es descargada en aproximadamente 365 ficheros por año, el cual contiene además de los datos magnéticos información de la estación de la cual fueron tomados estos datos; de tal manera que se hizo necesario la implementación de una rutina que unificara todos estos datos bajo una sola plataforma.

Teniendo en cuenta que tener los datos en ficheros no es una opción computacionalmente efectiva ya que el acceso a estos no es de fácil y la información se encuentra segmentada se implementa una base de datos en MySQL.

Las ventajas que ofrece MySQL son que permite diseñar e implementar una base de datos a la medida de la información que se descarga de la página web de INTERMAGNET, la cual permite tener acceso haciendo uso de los eficientes motores de búsqueda e indexados con los que cuenta esta plataforma, así realizar una búsqueda de datos teniendo por parámetros de búsqueda como niveles más altos históricos de campo magnético terrestre total, declinación magnética tanto diferentes horas del día como fechas y días julianos del año que permitan crear relaciones entre sí, aspecto de importancia a la hora de entrenar una red neuronal.

Para realizar la migración de los datos de los 6107 ficheros correspondiente los años comprendidos entre el 2002 y el 2014 se requirió el desarrollo de una

aplicación en el lenguaje de programación PHP de consola de tal manera que este abre cada uno de los ficheros e ir ubicado cada uno de los campos medidos por el Observatorio Magnético del Huancayo en los campos dispuestos para tal fin en la tabla de la base de datos implementada y almacenar toda esta información; se optó por el desarrollo en este lenguaje ya que cuenta con múltiples herramientas de acceso a bases de datos MySQL, teniendo así un total de 6.837.352 de registros los cuales corresponden a los datos continuos en el tiempo con una tasa de muestreo de 1 minuto de los años antes mencionados ubicados en un solo medio de gestión. En la Figura 16 se puede evidenciar el modelo de migración de datos de formato IAGA2002 a la base de datos.

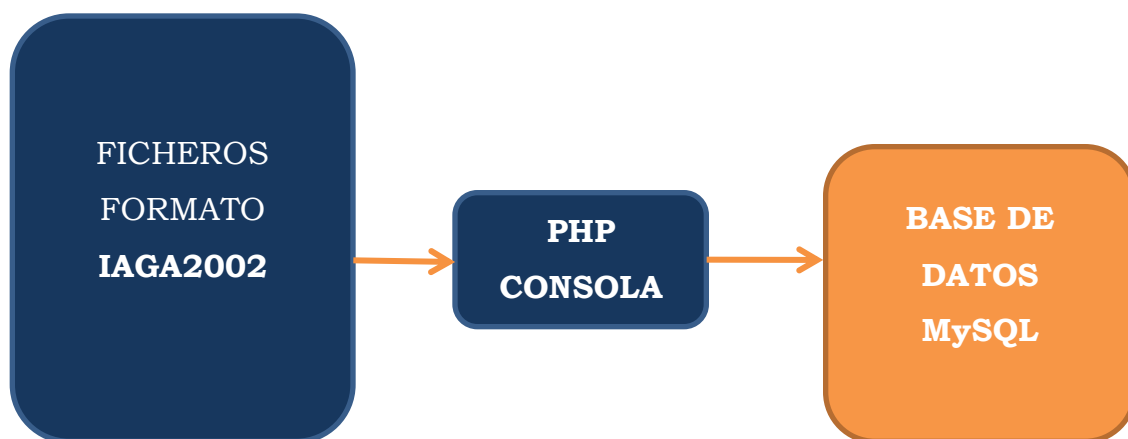


Figura 16: Modelo de migración de datos IAGA2002 a MySQL

Además de realizar la búsqueda de una base de datos confiable de mediciones magnetométricas, también se requería tener información de eventos sismológicos igualmente confiable y que además permitiera filtrar la información a consultar para la zona de interés para el presente estudio, es por esto que se identificó al USGS (*United States Geological Survey*) como una fuente que permitía obtener dicha información de manera fácil a través de su portal web ingresando además de un cuadro con las coordenadas la magnitud mínima de dichos eventos,

por cuanto el interés de este estudio corresponde a la correlación de anomalías del campo magnético previo a un evento sísmológico de magnitud importante.

Así, se descarga la información de eventos sísmológicos de magnitudes iguales o superiores a 6.0 Mw para las coordenadas comprendidas en latitud 8.78N, 29.67S y longitud 67.0W y 85.42W; teniendo en cuenta que el Observatorio Magnético de Huancayo se encuentre en esta zona, teniendo así un total de 117 eventos sísmológicos, véase Figura 17 en la cual el área contenida por el recuadro naranja corresponde al área de interés.

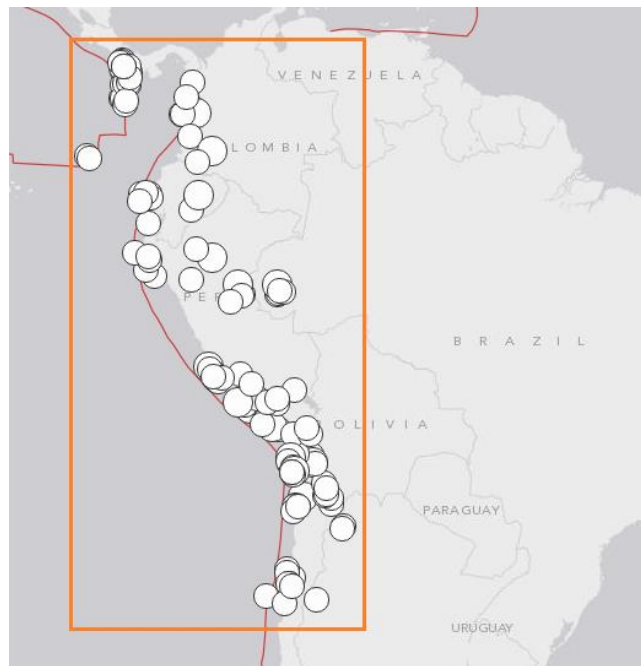


Figura 17: Mapa de zona de interés, tomada de USGS.

Para ello, una vez descargado el fichero, el cual se encontraba en formato CSV (*Comma Separated Values*) y cuenta con información como fecha, hora, latitud, profundidad, magnitud, tipo de magnitud, gap y lugar; se volcó en crudo a una tabla de MySQL dispuesta para tal fin, la cual contaba con las columnas indicadas haciendo uso de la interface de consola con la que cuenta MySQL.

Una vez toda la información se encuentra ubicada en un solo medio y además cuenta con las ventajas que proporciona MySQL, se procede realizar algunas graficas en el dominio del tiempo y espectro para la amplitud del campo magnético H, y en el tiempo para declinación magnética D con el fin de evidenciar patrones desde por lo menos 6 días previo a un evento sismológico importante además graficar también estas mismas en fechas en las cuales no se presentaron evento, de tal manera que se pudiera fijar una línea base de comportamiento; estas fueron realizadas haciendo uso de Scilab, para lo cual se requirió tener presente el modelo de acceso a la información en la base de datos MySQL que se muestra en la Figura 18.

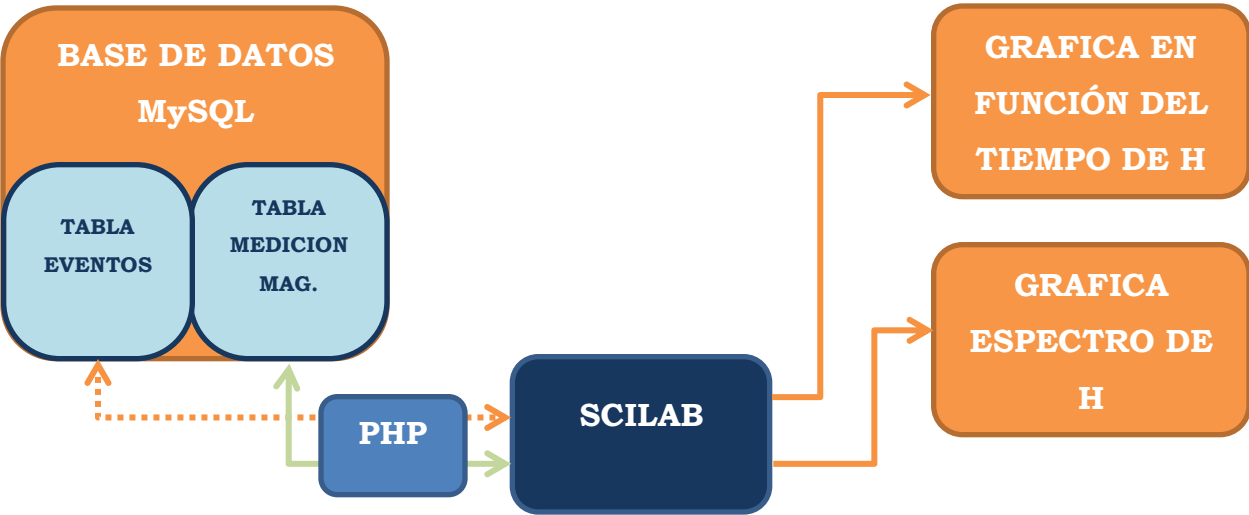


Figura 18: Modelo de acceso a la información y gráficas.

Como se puede apreciar en las Figura 19, Figura 20, Figura 21 y Figura 22 la amplitud de campo magnético H en función del tiempo y así mismo su espectro de amplitud de los 6 días previos a las fechas en las cuales se registraron eventos sismológicos en la zona de interés; a su vez en las Figura 23, Figura 24 y Figura 25 la línea base tanto de H en función del tiempo como en frecuencia, con lo cual se puede evidenciar que en las figuras que hacen alusión a eventos sismológicos

se presenta una señal de más alta frecuencia de lo usual, sin embargo, estas también se encuentran por debajo de la banda ELF.

Debido al truncamiento de los datos en función del tiempo de manera abrupta para solo 6 días, se asume esto a una ventana cuadrada de los datos para la obtención del espectro de magnitud, teniendo esto particular sus consecuencias en el fenómeno de Gibbs resultante del truncamiento, sin embargo estarán más allá de las frecuencias que pueden ser muestreadas y de interés particular del estudio.

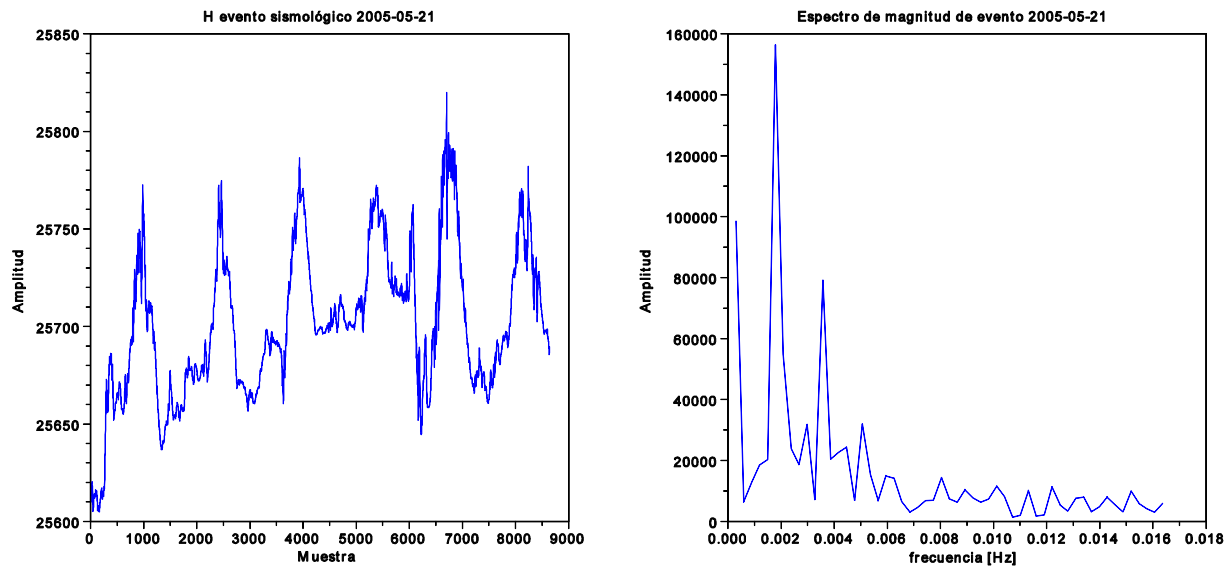


Figura 19: Campo magnético previo al evento sísmológico del 2005-05-21.

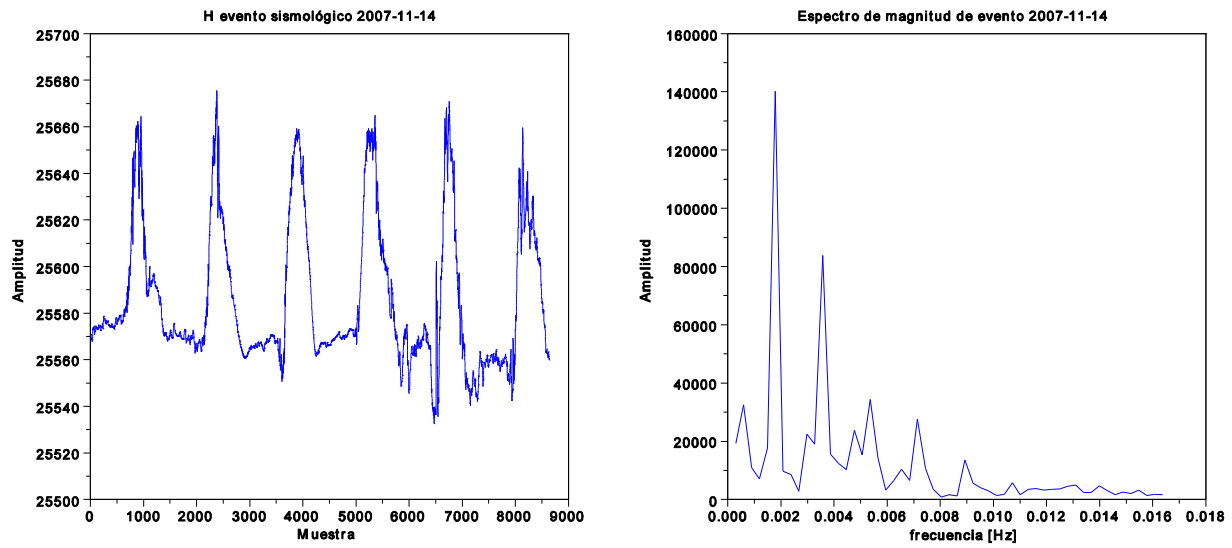


Figura 20: Campo magnético previo al evento sísmológico del 2007-11-14.

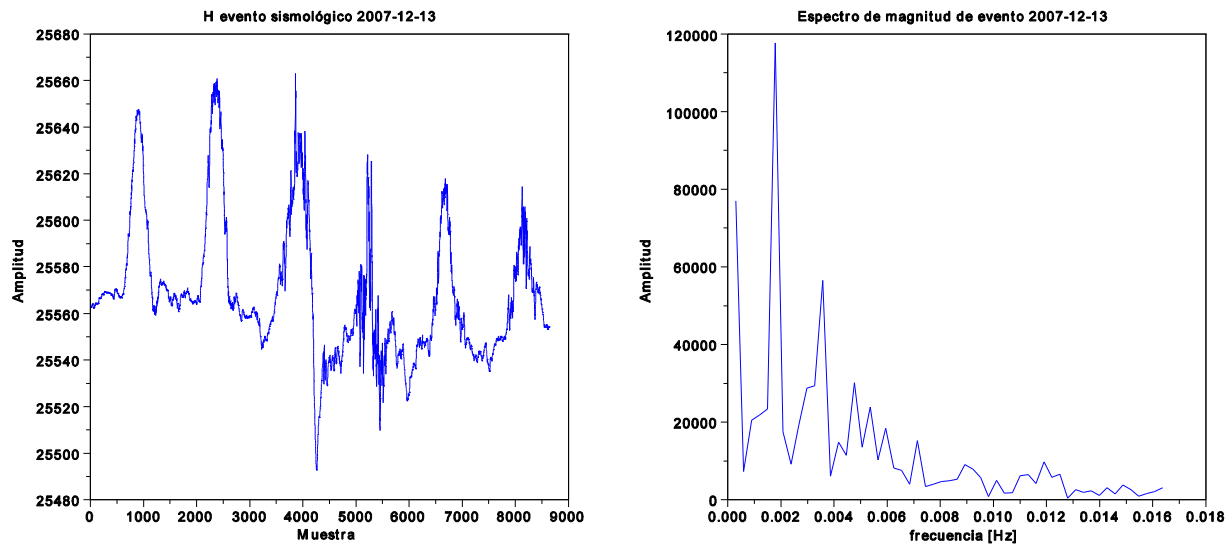


Figura 21: Campo magnético previo a evento sísmológico del 2007-12-13.

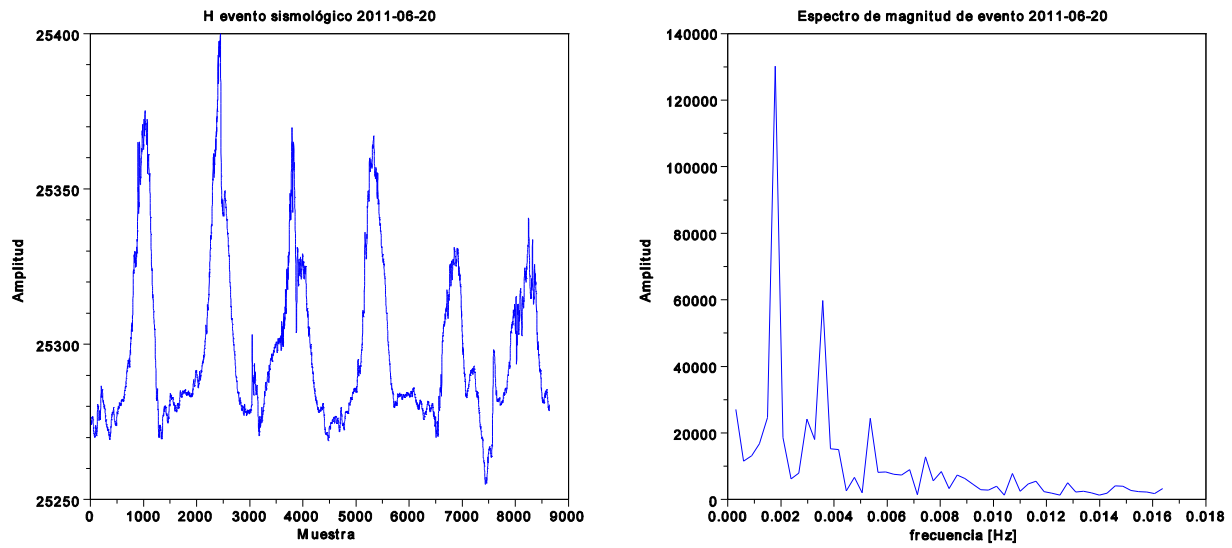


Figura 22: Campo magnético de evento sísmológico del 2011-06-20.

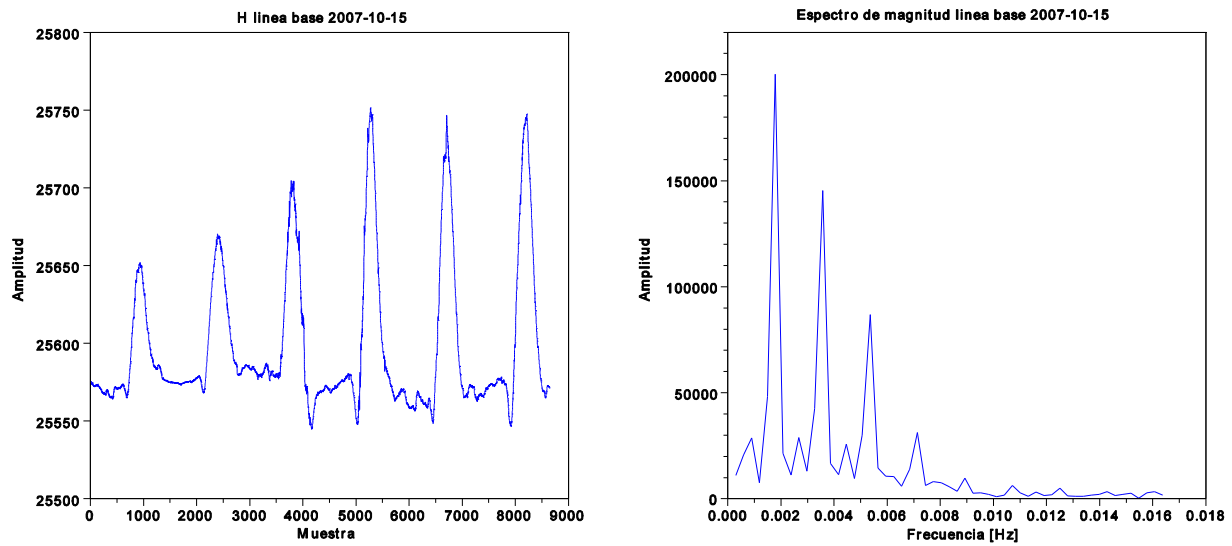


Figura 23: Campo magnético de referencia 2007-10-15.

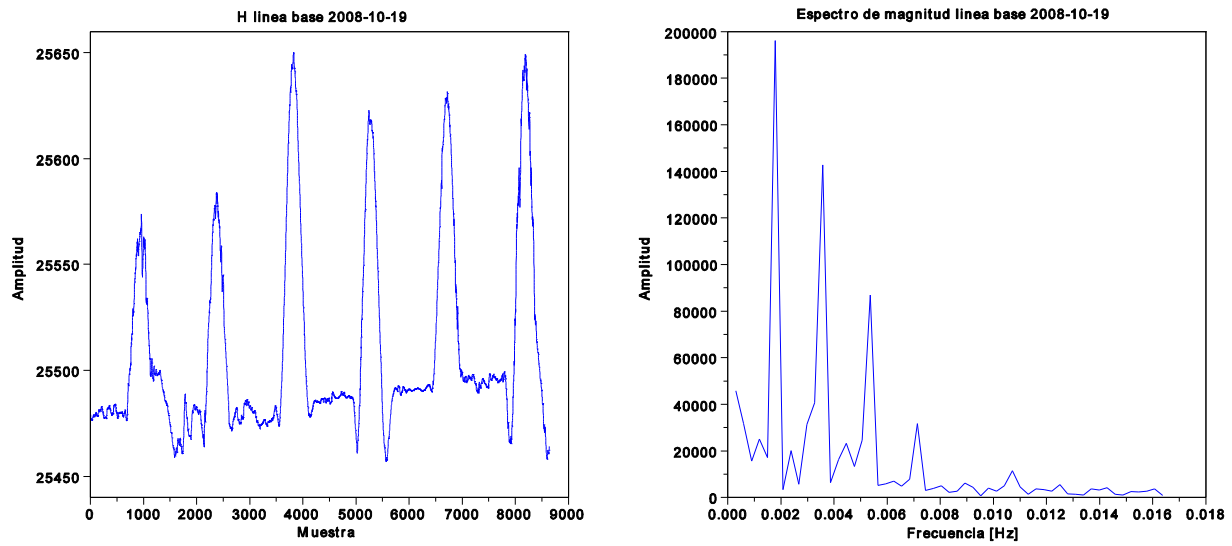


Figura 24: Campo magnético de referencia 2010-10-19.

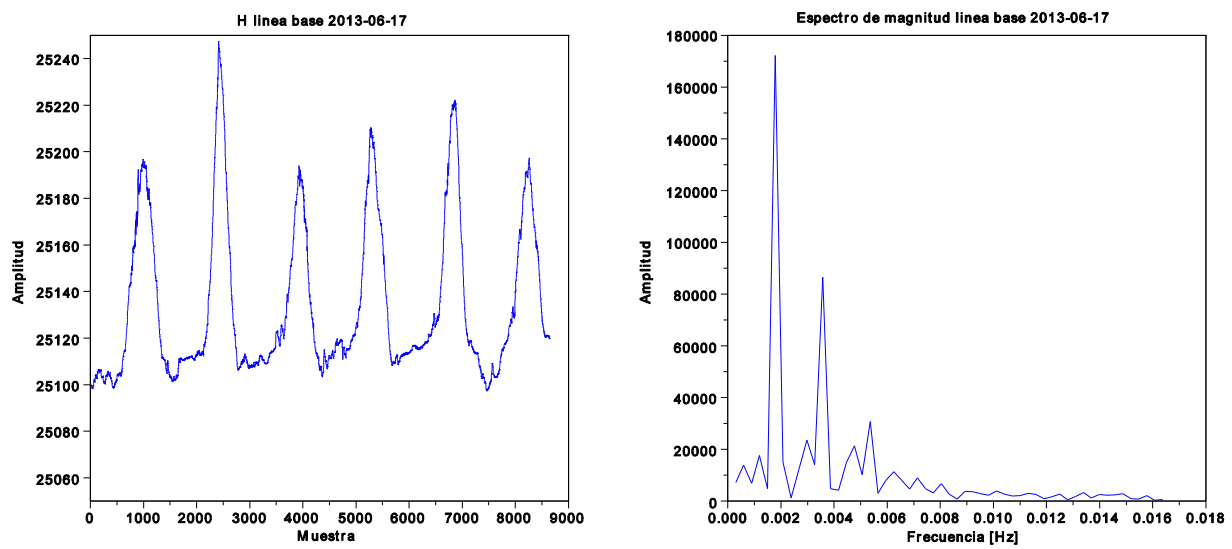


Figura 25: Campo magnético de referencia 2013-06-17

Así entonces, se tiene que el espectro tiene potencial de procesamiento que permita entrenar la red neuronal ya que contiene la información de interés, además se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Debido al muestreo de 1 minuto, en un día se tienen 1.440 registros, teniendo un total de 8.640 correspondientes a los 6 días previos al evento.
- Teniendo en cuenta el anterior periodo de muestreo se puede inferir que $f_s = \frac{1}{T_s}$ donde $T_s = 60s$ teniendo así que $f_s = 0.016Hz$.
- Al hacer uso del espectro de magnitud se tiene una ventaja considerable en tiempo de computo al entrenar la red neuronal, ya que, por la ley de simetría del espectro de magnitud, de entrada, es posible no tomar la mitad de los datos, así mismo, ya que la frecuencia de muestreo corresponde a 0.016Hz, es posible truncar los datos hasta esta frecuencia, pasando de procesar 8.640 registros a tan solo 54 de estos por evento.

Teniendo en cuenta lo anterior, realizar el procesamiento haciendo uso de la señal en función de la frecuencia permite tener menos nodos en las capas ocultas de la red neuronal por lo que a su vez el tiempo de cómputo es menor; Y a su vez las iteraciones de entrenamiento son menores.

Así, entonces se realiza un truncamiento de las mediciones en función del tiempo por el periodo de interés previo al evento sismológico por cuanto se toma la ventana de 6 días antes del mismo para obtener el espectro de magnitud haciendo uso del valor absoluto de la transformada discreta de Fourier (DFT) a través de la (FFT) para algunos de los eventos sismológicos presentados en la zona de influencia del Observatorio Magnético de Huancayo.

En la Tabla 2, se indican las fechas de los eventos sismológicos y de línea base utilizada para entrenar la red neuronal con la FFT de los 6 días previos al evento sismológico de magnitud mayor o igual a 6.0Mw para la zona de interés.

Fecha AAAA-MM-DD	Magnitud [Mw]	Profundidad[km]	Lugar
2003-06-20	7.0	553	Brasil
2004-02-04	6.1	19	Panamá-Costa Rica
2005-01-21	6.0	11	Costa Ecuador
2005-06-02	6.0	189	Argentina
2005-12-30	6.1	30	Sur Panamá
2007-03-18	6.2	8	Sur Panamá
2007-12-16	6.7	45	Chile
2008-02-04	6.3	35	Chile
2009-11-13	6.5	27	Chile
2011-06-20	6.4	128	Chile
2012-06-07	6.1	110	Sur Perú
2012-11-14	6.1	63	Chile
2013-07-17	6.0	7	Perú
2005-10-23	NO EVENTO	NA	NA
2007-10-15	NO EVENTO	NA	NA
2007-10-14	NO EVENTO	NA	NA
2008-10-19	NO EVENTO	NA	NA
2009-09-22	NO EVENTO	NA	NA
2010-04-19	NO EVENTO	NA	NA
2011-03-30	NO EVENTO	NA	NA
2013-06-17	NO EVENTO	NA	NA
2014-02-14	NO EVENTO	NA	NA

Tabla 2: Eventos de entrenamiento de la Red Neuronal

De acuerdo con los eventos sismológicos relacionados en la Tabla 2, se tiene en cuenta el esquema que se muestra en la Figura 26, el cual describe el modelo de adquisición y procesamiento hasta finalmente obtener la matriz de salida de la red neuronal.

Ya que toda la información se encuentra en la base de datos, esta se adquiere a través de un módulo dispuesto para tal fin, el cual genera la consulta de los registros de los 6 días anteriores al evento sismológico importando dichos registros a un arreglo, posterior a ello en el módulo de Pre procesamiento se obtiene el valor absoluto de la FFT y se trunca está a solo 55 muestras, por lo cual, el espectro de magnitud va de 0 a 0.016 Hz; teniendo en cuenta que el registro en función del tiempo cuenta con un nivel DC, el primer registro de la FFT es muy alto, por lo cual también es truncado.

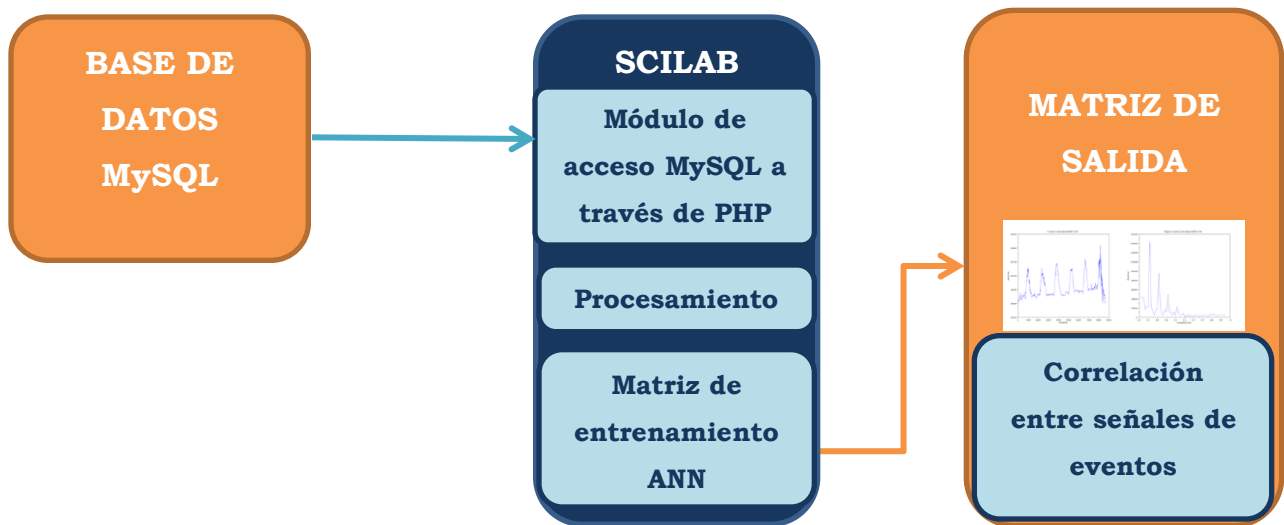


Figura 26: Modelo de funcionamiento

Para la implementación de la red neuronal artificial en Scilab, se requirió hacer la descarga del correspondiente paquete o toolbox a través de la consola de Scilab; este corresponde con la versión ANN Toolbox 0.4.2.4, el cual cuenta con múltiples modelos de redes neuronales artificiales.

Teniendo en cuenta que el modelo de red neuronal artificial Feed-Forward, y que esta corresponde a una red neuronal de aprendizaje supervisado, se requiere conocer tanto la entrada como la salida durante la fase de entrenamiento.

La arquitectura o modelo de la red neuronal corresponde a la *Feed-Forward* y entrenada a través del algoritmo *Back-Propagation*. Teniendo en cuenta que cada registro cuenta con 54 unidades, así mismo debe ser el número de neuronas en la entrada de la red neuronal artificial y en cada una de las capas.

Para ajustar el número de capas ocultas que debe tener la red neuronal artificial para un error del 0.01, se opta por iterar este valor desde 1 hasta 10 y se pone a prueba con un registro de un evento sísmológico positivo correspondiente al sismo del 2014-03-23 con magnitud 6.3 Mw localizado en Chile, es de anotar que como se muestra en la Tabla 2, este evento no fue utilizado para entrenar la red neuronal artificial, la gráfica de este proceso de iteración se puede apreciar en la Figura 27. El número de salidas de la red neuronal corresponde a dos, las cuales

presentan la correlación existente entre la señal de entrada y las señales con las cuales se entrenó la red neuronal, así entonces, la primera salida corresponde a un evento positivo y la segunda a uno negativo; lo cual permite inferir la posible ocurrencia de un evento de magnitud importante.

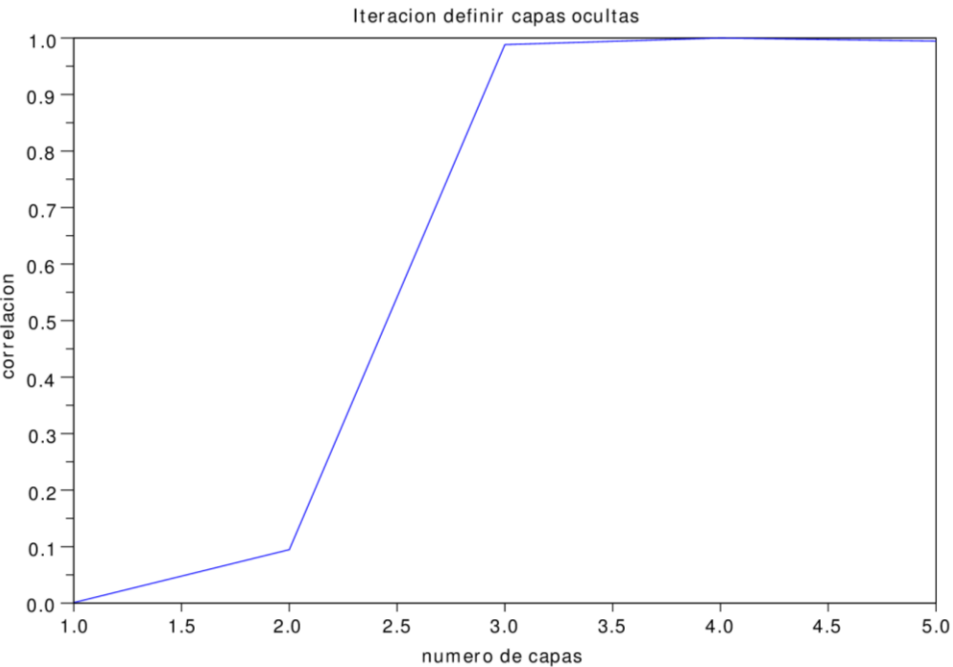


Figura 27: Iteración de capas para buscar valor óptimo.

Así entonces, se tiene que los valores óptimos de capas ocultas puede ser tres o cuatro, para los cuales se obtuvieron en la salida 1 0.985 y 0.995 respectivamente, con lo cual podemos indicar que para el caso de esta red neuronal a partir de 3 capas se tiene una mayor correlación, todo lo contrario también se puede inferir de la Figura 27, para el caso de una y dos capas, la salida tiene 0.007 y 0.09 respectivamente con lo cual no es posible tener una correlación significativa, por lo que se toma el número de capas óptimo de cuatro.

4.3 Experimentos

Experimento 1:

Objetivo: Instalar PHP y MySQL en sistemas operativos Linux con arquitectura Debían.

Introducción: El presente experimento tiene como objetivo mostrar los comandos básicos de instalación de paquetes de programación como PHP y servicios como MySQL a través del terminal de sistemas operativos Linux con arquitectura Debían.

Desarrollo: La instalación de cualquier paquete en los sistemas operativos Linux con arquitectura Debian se realizan de manera fácil haciendo uso del comando “apt-get”, este cuenta con una gran variedad de paquetes, sin embargo, estos siempre están cambiando de versiones y servidores de descarga, por lo que se recomienda iniciar actualizando las fuentes.

Nota: Siempre que se hace uso del prefijo sudo, el computador solicita la contraseña de usuario, esto con el fin de acreditarse y asignar permisos de usuario.

```
felipe@tesis-pc:~/ sudo apt-get update
felipe@tesis-pc:~/ sudo apt-get install php5 mysql-server mysql-client
```

Inmediatamente se iniciará la descarga e instalación automática de todos los paquetes que se enunciaron después del parámetro *install*.

Para acceder a la base de datos, se puede realizar a través del terminal con el siguiente comando y posterior a ello se navega haciendo uso de los comandos MySQL.

```
mysql -u root -p
```

Posterior a este comando deberá insertar la contraseña que se asignó durante el proceso de instalación del servidor MySQL.

También es posible acceder a la base de datos a través de phpmyadmin y apache, estos paquetes deben ser instalados desde el terminal a través del comando:

```
sudo apt-get install phpmyadmin apache2
```

Posterior a la instalación de los paquetes, se accede a través del navegador web con la URL *localhost/phpmyadmin*, si la consulta se va a realizar en otro computador, se debe ingresar en lugar de *localhost* la dirección IP del servidor MySQL.

Conclusión del experimento 1: El anterior experimento tiene como objetivo presentar el cómo se realiza la instalación de paquetes MySQL en las versiones de cliente y servidor, así como PHP, el cual fue utilizado para hacer la migración de datos del formato IAGA2002 y almacenar de manera más ordenada en una base de datos MySQL; adicional a ello a través de este comando es posible instalar gran variedad de software.

Experimento 2:

Objetivo: *Instalación y ejecución de Scilab y complementos en sistema operativo Linux con arquitectura Debían.*

Introducción: *El presente experimento explica como instalar Scilab desde la descarga a través del terminal, sin hacer uso de la interface de Centro de Software, la cual es una interface muy útil, sin embargo, cuando se tiene un sistema operativo sin interface gráfica se permite correr Scilab en modo CLI, con lo cual se optimizan recursos y hacer uso de ellos en mejorar los tiempos de computo.*

Desarrollo: *Para la descarga e instalación de Scilab, es necesario abrir un terminal en el sistema operativo y seguir los comandos indicados:*

```
felipe@tesis-pc:~/ sudo mkdir scilab_prog
felipe@tesis-pc:~/ cd scilab_prog
felipe@tesis-pc:~/ scilab_prog$ sudo wget http://www.scilab.org/download/5.5.2/scilab-5.5.2.bin.linux-i686.tar.gz
```

Inmediatamente se iniciará la descarga apareciendo lo siguiente y hasta que termine la descarga, en la barra inferior se mostrará el porcentaje de descarga.

```
--2016-05-10 19:44:46-- http://www.scilab.org/download/5.5.2/scilab-5.5.2.bin.linux-
i686.tar.gz
Resolviendo www.scilab.org (www.scilab.org)... 193.51.192.152
Conectando con www.scilab.org (www.scilab.org) [193.51.192.152]:80... conectado.
Petición HTTP enviada, esperando respuesta... 200 OK
Longitud: 199957265 (191M) [application/x-gzip]
Grabando a: "scilab-5.5.2.bin.linux-i686.tar.gz"

65% [=====] 130.677.359 140,3K/s T.E. 11m 03s
```

Cuando finaliza la descarga, es momento de realizar la instalación, esta se realiza haciendo uso del comando tar con los parámetros xvfz, el cual descomprime el archivo.

```
felipe@tesis-pc:~/ sudo tar xvfz scilab-5.5.2.bin.linux-i686.tar.gz
```

Una vez instalado Scilab, ya se puede ejecutar con los siguientes comandos en el terminal:

```
felipe@tesis-pc:~/ cd scilab-5.5.2/
felipe@tesis-pc:~/ cd bin
felipe@tesis-pc:~/ ./scilab
```

Una vez ejecutado el último comando, se abrirá la interface gráfica de Scilab; Teniendo en cuenta que debemos entrenar una red neuronal, se requiere instalar paquetes adicionales haciendo uso de su consola, estos no vienen en la versión general de Scilab, y por el contrario instalar solo los paquetes que son necesarios, para esto se debe ingresar mediante teclado los siguientes comandos:

```
--> atomsInstall('ANN_Toolbox')
```

Una vez finalizada cada una de las descargas automáticamente se instalan, y es posible hacer uso de estos complementos de manera inmediata.

Conclusión del experimento 2: *A través del anterior experimento se puede tener el paso a paso para la instalación de un programa científico de cálculo numérico tanto para computadores con interface gráfica o como solo de consola.*

Experimento 3:

Objetivo: Consultar bases de datos desde PHP

Introducción: El presente experimento pretende mostrar cómo se realiza una consulta de base de datos estructurada en MySQL desde PHP, el cual imprime en pantalla los datos de fecha, magnitud y lugar donde se presentaron los 117 eventos disponibles en la tabla dispuesta para esta información en la base de datos “Eq_tb”.

Desarrollo: El desarrollo de una aplicación en el lenguaje de programación inicia con los caracteres “<?php” y finaliza con “?>”, estos caracteres delimitan el programa.

El código además requiere proveer información necesaria para la conexión con el servidor MySQL, como lo es la dirección IP, usuario y contraseña, lo cual permite acreditarse en el servidor, posterior a ello se debe acceder a la base de datos de interés, que para este caso es “tesisDB”, la cual contiene varias tablas.

Para obtener la información necesaria de una tabla, esto se realiza con el comando “select” seguido de las columnas de interés, si se desea consultar todas las columnas en lugar de los nombres se pone “*” y seguido por el comando “from” y posterior a ello el nombre de la tabla.

Posterior a la solicitud y consulta de datos, esta información se requiere acondicionar de tal manera que sea fácil de mostrar en pantalla, por lo que se hace necesario ordenarla de manera vectorial.

```
<?php
$sqlserver="localhost"; //-----dirección ip servidor mysql
$user="root";           //-----usuario
$pass="root";          //-----contraseña
//-----
$link = mysql_connect($sqlserver,$user,$pass); //---solicitud de conexión al servidor
select_db("tesisDB"); //---selección de base de datos
$C_co = mysql_query("select date,magnitud,place from Eq_tb;");//----selección de consulta
```

```

while ($ssh = mysql_fetch_assoc($C_co)) {                                     //-Organiza la información
    echo $ssh['date']." ".$ssh['magnitud']." ".$ssh['place']."\n";//-imprime en pantalla
}
?>

```

Presentando así en pantalla solo la información solicitada y ordenada como se ubicó después del comando “*echo*” de los 117 eventos disponibles en la tabla, sin embargo han sido omitidos algunos con la finalidad de solo presentar el ejemplo de impresión en pantalla.

```

2014-12-08 6.6 Panama
2014-12-06 6 Panama
2014-08-24 6.8 Peru
2014-05-13 6.5 Panama
2014-04-11 6.2 Chile
2014-04-04 6.3 Chile
2014-04-03 6.4 Chile
2014-04-03 7.7 Chile
2014-04-03 6.5 Chile
2014-04-02 6 Panama
2014-04-01 6.9 Chile
2014-04-01 8.2 Chile
2014-03-23 6.3 Chile
2014-03-22 6.2 Chile
2014-03-17 6.4 Chile
2014-03-16 6.7 Chile
2014-03-15 6.3 Peru
.....
.....
2005-05-05 6.5 south of Panama
2005-04-11 6 northern Peru
2005-01-28 6 off the coast of Ecuador
2005-01-24 6.1 near the coast of Ecuador
2005-01-21 6 near the coast of Ecuador
2004-11-15 7.2 near the west coast of Colombia
2004-02-04 6.1 Panama-Costa Rica border region
2003-12-25 6.5 Panama-Costa Rica border region
2003-06-20 7 Brazil
2003-04-11 6.1 south of Panama
2002-10-12 6.8 Brazil
2002-07-31 6.5 south of Panama
2002-06-16 6.4 Costa Rica
2002-04-18 6.6 Chile
2002-04-01 6.3 Chile
2002-03-28 6.5 Chile

```

Conclusión del experimento 3: El lenguaje de programación PHP es una plataforma estable idealmente desarrollada para la manipulación de bases de datos en MySQL y otros tipos de almacenamiento de información, además de ser

fácilmente ejecutable desde el terminal así como desde servidores web Apache, y manipulación de las mismas bases de datos de manera fácil a través de la plataforma “*phpmyadmin*”;

4.4 Conclusión del capítulo

El capítulo de marco experimental permite evidenciar no solo los pasos de selección de topología y tipo de entrenamiento que se le da a la red neuronal artificial, sino que permite evidenciar los diferentes requerimientos que tiene la misma, desde evidenciar los patrones para su entrenamiento así como el número de iteraciones con el fin de tener un valor óptimo para el mismo, lo cual se realizó de manera cuantitativa y teniendo un evento positivo de manera supervisada.

5. RESULTADOS

5.1 Introducción al capítulo

El capítulo de resultados evidencia los cambios en el espectro de magnitud y la entropía para cada uno de los elementos truncados del mismo, mostrando la recurrencia de la información, de tal manera que esta pueda ser vista como un patrón para cada uno de los casos, un evento positivo y uno negativo, Así se presenta la entropía individual para cada uno de los elementos en ambos casos de interés.

5.2 Espectro de magnitud

En la Figura 28 se presenta el espectro de magnitud de todas las señales utilizadas para el entrenamiento de la red neuronal, en ella se puede apreciar en color rojo los espectros de eventos negativos, es decir cuando no se presentaron eventos sísmológicos importantes, y en color azul los espectros de los eventos positivos, estos corresponden a la información con la cual se entrenó la red neuronal. Si bien en ellas se puede apreciar una tendencia similar, sin embargo en la mayoría de los espectros de eventos positivos se puede ver particularidades como la mínima frecuencia registrada es mayor que en los eventos negativos, y así mismo para las máximas frecuencias registradas.

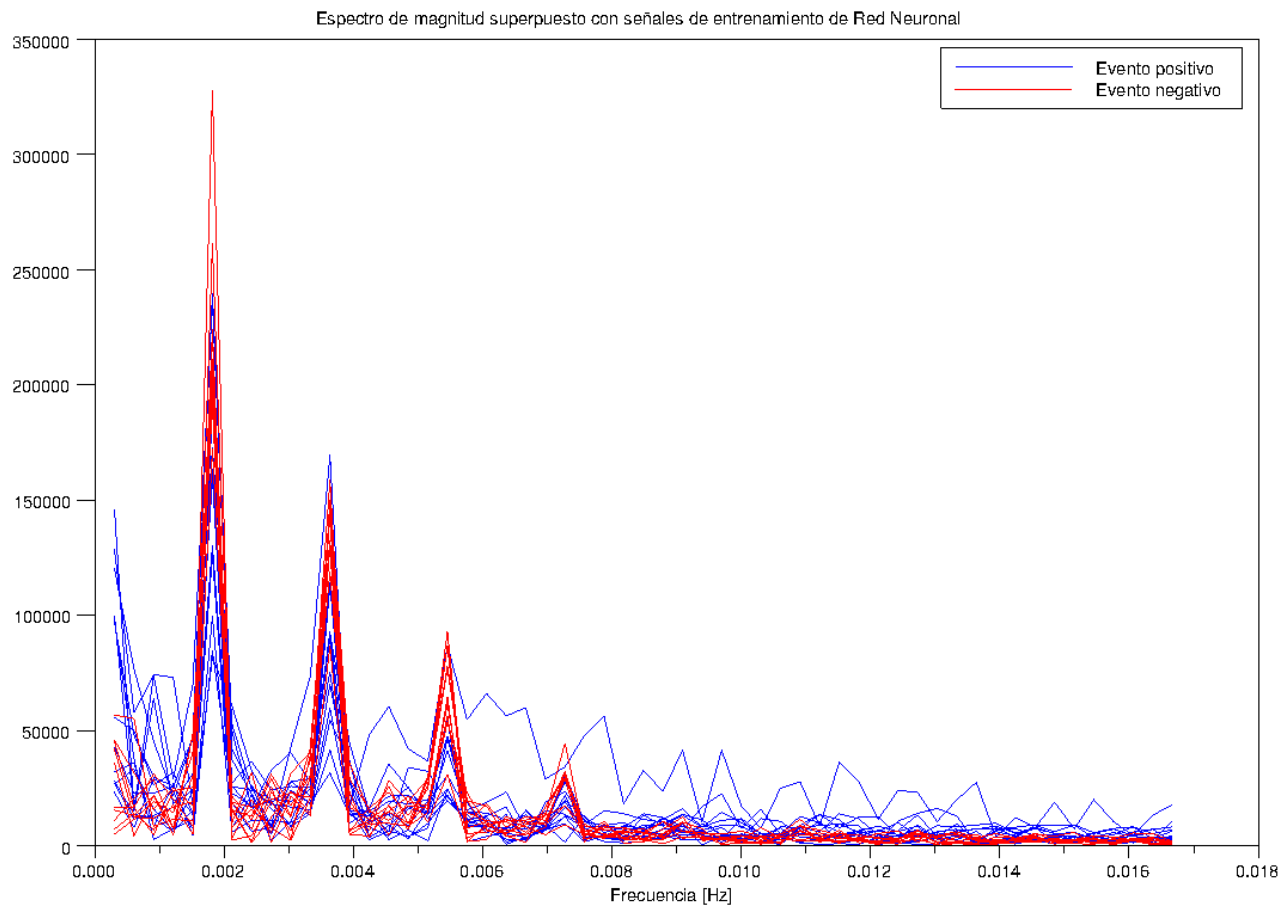


Figura 28: Espectros de magnitud de eventos usados en el entrenamiento de la red neuronal.

5.3 Entropía

En la Figura 29, se encuentran graficadas las entropías para los dos casos que de importancia en el presente estudio, uno de los casos corresponde a la entropía de las señales en las cuales hubo eventos sísmológicos positivos y a su vez negativos, esto ya que al entrenar la red neuronal se debe discriminar cada uno de los eventos, adicional a ello, el modo de entrada a la red neuronal artificial corresponde a los elementos que se encuentran en el espectro, en total 56, la entropía se calculó para cada uno de estos elementos con el fin de determinar cuál de estos aportan mayor información al entrenamiento de la red.

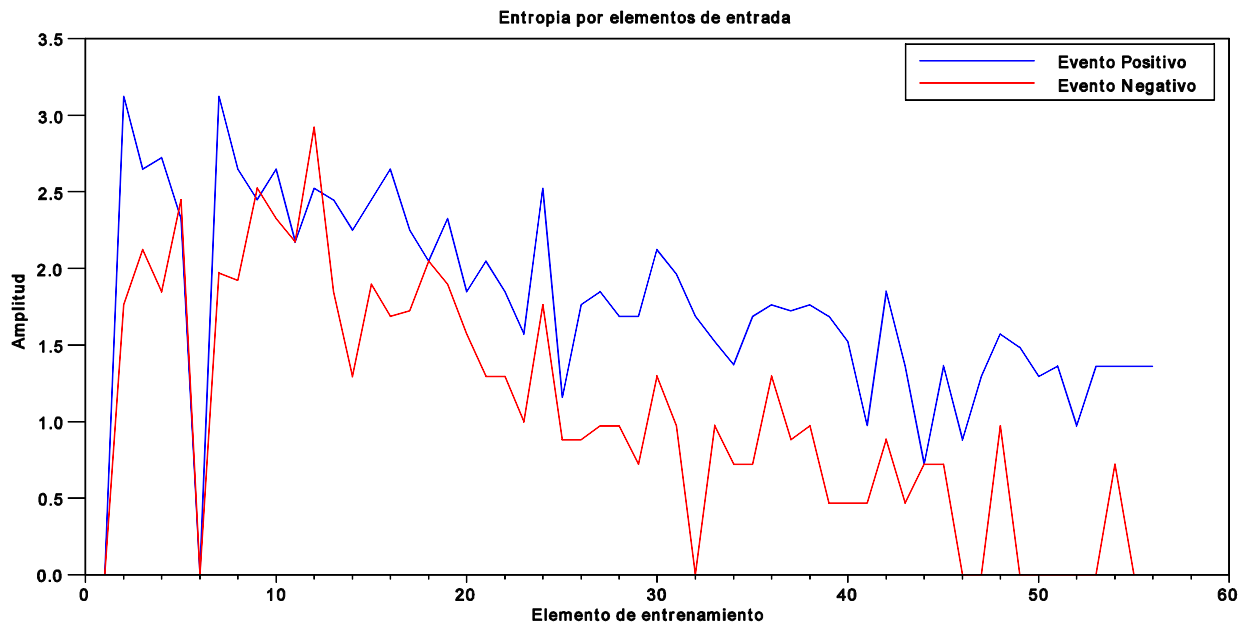


Figura 29: Entropía de las señales por elementos

Como se puede visualizar en la Figura 29, algunos elementos tienen una entropía similar en ambos casos, sin embargo, el espectro de magnitud para el caso de un evento negativo tiene una menor entropía en los elementos superiores a 30, y lo contrario en los elementos de los casos de eventos positivos, en los cuales se aprecia una mayor entropía, lo cual significa una mayor regularidad de los datos en el caso de eventos negativos, en términos coloquiales “menos desordenados” que el caso de eventos positivos, teniendo así una menor incertidumbre en la fuente de información.

Debido a que en la red neuronal los elementos no entran de manera sucesiva a través de una sola entrada, sino por el contrario todos los elementos del espectro truncado entran cada uno de ellos a través de una entrada diferente, la entropía debe ser calculada para cada uno de los elementos, con el fin de determinar cuáles de ellos son los más recurrentes para el caso de eventos positivos y negativos de manera independiente mostrando así cuales son los elementos con mayor

incertidumbre y para el caso del entrenamiento de la Red Neuronal Artificial cuales son aquellos que tienen mayor información para su entrenamiento.

5.4 Conclusión del capítulo

En el capítulo de resultados se permite concluir que aunque el espectro de magnitud cuenta con valores similares en amplitud para los casos de eventos positivos y negativos en muchos de los elementos, en otros no ocurre así; En la Figura 29 se evidencia como la entropía para cada uno de los casos, en la mayoría de los elementos cuentan con una mayor recurrencia o con una menor entropía para el caso de un evento negativo que para el caso de eventos positivos, lo cual permite evidenciar que previo a un evento sísmológico positivo la entropía o incertidumbre de la fuente es mayor; así se muestra que para el caso de un evento negativo hay un patrón con una menor incertidumbre.

6. VERIFICACIÓN DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL

6.1 Introducción al capítulo

El capítulo de verificación de la red neuronal artificial, muestra la manera de verificación del funcionamiento de la misma, así como el método utilizado para esto fue tomar los 117 eventos incluyendo con los cuales fue entrenada la red neuronal. Para ello se presentan las dos salidas de la red neuronal, tanto la salida de correlación con un evento positivo como negativo; así mismo las salidas para fechas en las cuales no se presentaron eventos sismológicos de magnitud superiores e iguales a 6.0 Mw con el fin de hacer una verificación de doble vía.

6.2 Salidas de la Red Neuronal Artificial

En la Tabla 3, se muestra las correspondientes salidas de la red neuronal ya entrenada, de tal manera que se insertó en esta cada una de las señales de campo magnético terrestre previo a los eventos sismológicos de magnitud importante, teniendo así las dos salidas que se describieron en el capítulo anterior.

La salida 1 corresponde a la correlación con un evento positivo, es decir que la señal después de pasar por las capas de la red neuronal tiene una alta correlación con las señales de entrenamiento para una ocurrencia de un sismo de magnitud importante, así mismo, la salida 2 corresponde a la correlación de la señal con un evento negativo, es decir la correlación de la señal con respecto a las señales con las cuales se entrenó la red neuronal teniendo en cuenta que para esas señales no se registraron eventos de magnitud importante.

En la Tabla 3, se presenta la fecha del evento, magnitud en escala Mw, así como el país en el cual ocurrió el evento, así como ambas salidas de la red neuronal, lo cual permite concluir que en el caso de una alta correlación en la salida 1, de manera recíproca la salida 2 corresponde a una baja correlación, lo

cual permite validar ambas salidas son independientes y que no hay una solución ambigua.

ID	Fecha AAAA-MM-DD	Magnitud Mw	País de ocurrencia	Salida 1 evento positivo	Salida 2 evento negativo
1	2014-12-08	6.6	Panamá	0.9945	0.0030
2	2014-12-06	6	Panamá	0.9935	0.0131
3	2014-08-24	6.8	Perú	0.9804	0.0567
4	2014-05-13	6.5	Panamá	0.9918	0.0087
5	2014-04-11	6.2	Chile	0.9960	0.0068
6	2014-04-04	6.3	Chile	0.9835	0.0196
7	2014-04-03	6.4	Chile	0.9912	0.0100
8	2014-04-03	7.7	Chile	0.9912	0.0100
9	2014-04-03	6.5	Chile	0.9912	0.0100
10	2014-04-02	6	Panamá	0.9912	0.0100
11	2014-04-01	6.9	Chile	0.9952	0.0238
12	2014-04-01	8.2	Chile	0.9952	0.0238
13	2014-03-23	6.3	Chile	0.9954	0.0102
14	2014-03-22	6.2	Chile	0.9882	0.0167
15	2014-03-17	6.4	Chile	0.9959	0.0230
16	2014-03-16	6.7	Chile	0.9929	0.0114
17	2014-03-15	6.3	Perú	0.9896	0.0372
18	2014-03-15	6.1	Perú	0.9896	0.0372
19	2013-09-25	7.1	Perú	0.9879	0.0473
20	2013-08-13	6.7	Colombia ¹	0.9835	0.0119
21	2013-08-12	6.2	Perú	0.9865	0.0222
22	2013-07-17	6	Perú	0.9942	0.0207

¹ Evento sísmológico con epicentro registrado en el norte del Océano Pacífico Colombiano [28].

23	2013-02-09	6.9	Colombia ²	0.9985	0.0162
24	2013-01-30	6.8	Chile	0.9812	0.0303
25	2012-11-14	6.1	Chile	0.9650	0.0531
26	2012-11-10	6	Perú	0.9876	0.0099
27	2012-09-30	7.3	Colombia ³	0.9853	0.0124
28	2012-08-02	6.1	Perú	0.9886	0.0395
29	2012-06-07	6.1	Perú	0.9982	0.0171
30	2012-06-04	6.3	Panamá	0.9974	0.0551
31	2012-06-04	6.3	Panamá	0.9974	0.0551
32	2012-05-14	6.2	Chile	0.9843	0.0073
33	2012-01-30	6.4	Perú	0.9961	0.0249
34	2011-12-07	6.1	Chile	0.9833	0.0238
35	2011-11-17	6	Ecuador	0.9898	0.0112
36	2011-10-28	6.9	Perú	0.9898	0.0403
37	2011-08-24	7	Perú	0.9962	0.0223
38	2011-06-20	6.4	Chile	0.9851	0.0800
39	2011-04-30	6.1	Panamá	0.9867	0.0734
40	2011-03-06	6.3	Chile	0.9787	0.0326
41	2010-08-12	7.1	Ecuador	0.9928	0.0309
42	2010-07-12	6.3	Chile	0.9909	0.0392
43	2010-05-24	6.5	Brasil	0.9881	0.0318
44	2010-05-23	6.1	Perú	0.9908	0.0411
45	2010-05-19	6	Perú	0.9981	0.0870
46	2010-05-06	6.2	Chile	0.8885	0.0773
47	2010-03-26	6.3	Chile	0.9923	0.0594
48	2010-03-04	6.3	Chile	0.9946	0.0219
49	2009-11-13	6.5	Chile	0.9910	0.0216

² Evento sísmológico con epicentro registrado en el municipio de Guaitarilla - Nariño [29].

³ Evento sísmológico con epicentro registrado en el municipio de La Vega - Cauca [30].

50	2009-10-22	6	Panamá	0.9909	0.0230
51	2009-07-12	6.1	Perú	0.9924	0.0128
52	2009-05-10	6.1	Ecuador	0.9923	0.0124
53	2009-04-17	6.1	Chile	0.9926	0.0853
54	2009-03-12	6.3	Panamá	0.9965	0.0352
55	2009-02-15	6.1	Perú	0.9951	0.1001
56	2009-02-09	6	Perú	0.9523	0.0489
57	2009-02-02	6	Perú	0.9961	0.3099
58	2008-11-19	6.3	Panamá-Costa Rica	0.9952	0.0485
59	2008-08-26	6.4	Perú	0.9543	0.0179
60	2008-07-08	6.2	Perú	0.9853	0.0156
61	2008-03-24	6.2	Chile	0.9924	0.1760
62	2008-02-16	6.1	Chile	0.9993	0.0884
63	2008-02-04	6.3	Chile	0.8527	0.1386
64	2007-12-16	6.7	Chile	0.9351	0.0554
65	2007-12-13	6.2	Chile	0.9970	0.0510
66	2007-12-13	6	Chile	0.9970	0.0510
67	2007-11-20	6.1	Chile	0.4691	0.3223
68	2007-11-16	6.8	Perú-Ecuador	0.9949	0.0312
69	2007-11-15	6.8	Chile	0.9949	0.0312
70	2007-11-15	6.3	Chile	0.9949	0.0312
71	2007-11-14	7.7	Chile	0.9915	0.0857
72	2007-09-10	6.8	Colombia ⁴	0.9488	0.0922
73	2007-08-18	6	Perú	0.9958	0.0176
74	2007-08-16	6	Perú	0.9816	0.0186
75	2007-08-16	6	Perú	0.9816	0.0186
76	2007-08-16	6.4	Perú	0.9816	0.0186
77	2007-08-15	8	Perú	0.9975	0.0061

⁴ Evento sísmológico con epicentro registrado en el Océano Pacífico Colombiano [31].

78	2007-07-21	6	Brasil	0.9987	0.0460
79	2007-07-12	6	Perú	0.9878	0.0229
80	2007-03-18	6.2	Panamá	0.9920	0.0509
81	2007-03-17	6	Panamá	0.9949	0.0458
82	2007-02-24	6.3	Perú	0.9770	0.0138
83	2006-10-26	6	Perú	0.9959	0.0504
84	2006-10-20	6.7	Perú	0.9982	0.0171
85	2006-09-30	6	Perú	0.9951	0.0530
86	2006-08-25	6.6	Argentina	0.9679	0.0090
87	2006-07-16	6.2	Chile	0.9919	0.0586
88	2006-05-21	6	Ecuador	0.9967	0.0120
89	2006-04-30	6.5	Chile	0.9986	0.0481
90	2006-04-30	6.6	Chile	0.9986	0.0481
91	2006-04-15	6	Chile	0.9923	0.1963
92	2006-01-23	6.2	Colombia ⁵	0.9457	0.2073
93	2006-01-06	6	Panamá	0.9950	0.0544
94	2005-12-30	6.1	Panamá	0.9892	0.0786
95	2005-12-23	6.1	Ecuador	0.9975	0.1835
96	2005-11-17	6.8	Chile	0.9827	0.0514
97	2005-09-26	7.5	Perú	0.9803	0.0941
98	2005-08-27	6	Panamá	0.9304	0.0450
99	2005-06-13	7.8	Chile	0.9586	0.0640
100	2005-06-02	6	Argentina	0.9898	0.0481
101	2005-05-21	6.3	Perú-Ecuador	0.8793	0.0346
102	2005-05-05	6.5	Panamá	0.9673	0.0135
103	2005-04-11	6	Perú	0.9962	0.0393
104	2005-01-28	6	Ecuador	0.9917	0.0249
105	2005-01-24	6.1	Ecuador	0.9109	0.0380

⁵ Evento sísmológico con epicentro registrado en el Océano Pacífico Colombiano [32].

106	2005-01-21	6	Ecuador	0.9943	0.0175
107	2004-11-15	7.2	Colombia ⁶	0.8808	0.0460
108	2004-02-04	6.1	Panamá-Costa Rica	0.9960	0.0063
109	2003-12-25	6.5	Panamá-Costa Rica	0.9962	0.0189
110	2003-06-20	7	Brasil	0.9878	0.0229
111	2003-04-11	6.1	Panamá	0.9950	0.1355
112	2002-10-12	6.8	Brasil	0.9954	0.0150
113	2002-07-31	6.5	Panamá	0.9989	0.0538
114	2002-06-16	6.4	Costa Rica	0.9822	0.0214
115	2002-04-18	6.6	Chile	0.9938	0.0120
116	2002-04-01	6.3	Chile	0.9969	0.0214
117	2002-03-28	6.5	Chile	0.9957	0.0111

Tabla 3: Salidas de la Red Neuronal para 117 eventos en la región.

La Tabla 4 muestra las salidas de la red neuronal para fechas en las que no se registraron eventos de magnitud importante, estos fueron ingresados de manera arbitraria, excepto porque solo se comparó con la información descargada del USGS para los eventos sísmológicos localizados en el área y magnitudes de interés, teniendo así que la Salida 2 es la que tiene las más altas correlaciones y la salida 1 las menores, lo que permite inferir que la red neuronal se encuentra bien entrenada no solo para tener altas correlaciones en caso de eventos positivos, sino también que permita evidenciar cuando la señal de entrada tiene una alta correlación con eventos negativos, lo cual quiere decir que no se presentan anomalías en la banda por debajo de ELF asociadas con sismos.

ID	Fecha AAAA-MM-DD	Salida 1 Evento positivo	Salida 2 Evento negativo
1	2014-07-24	0.0061	0.9799
2	2014-04-18	0.0260	0.9594

⁶ Evento sísmológico con epicentro registrado en el Océano Pacífico Colombiano [33].

3	2013-08-25 ⁷	0.1480	0.5994
4	2012-09-15	0.0118	0.9184
5	2012-04-14	0.0120	0.9555
6	2011-11-27	0.0309	0.9824
7	2011-03-30	0.0472	0.9702
8	2010-04-19	0.0096	0.9469
9	2010-02-04	0.0236	0.9524
10	2009-06-12	0.0418	0.9865
11	2009-01-15	0.0096	0.9469
12	2008-10-19	0.0861	0.9813
13	2008-02-24	0.0453	0.9686
14	2007-10-14	0.0369	0.9722
15	2007-06-15	0.0453	0.9686
16	2007-04-18	0.0513	0.9847
17	2007-01-24 ⁸	0.0588	0.6816
18	2006-06-16	0.0176	0.9813
19	2006-03-15	0.0083	0.9846
20	2005-07-27	0.0167	0.9681
21	2005-02-05	0.0550	0.9666
22	2005-01-05	0.0248	0.9958
23	2004-01-04	0.0083	0.9846
24	2003-05-20	0.0227	0.9754
25	2003-03-11	0.0017	0.9880

Tabla 4: Salida de la red neuronal en fechas que no se registraron eventos

⁷ 2013-08-23 08:34 UTC evento sísmológico 5.8 Mw Calama – Chile.

⁸ 2007-01-23 07:02 UTC evento sísmológico 4.9 Mw Centro – Perú.

6.3 Conclusión del capítulo

En el capítulo de verificación de la red neuronal artificial se concluye que el campo magnético terrestre presenta patrones de anomalías, con los cuales puede ser entrenada una red neuronal artificial con el fin de evidenciar las correlaciones, para el caso de eventos de magnitud superiores e iguales a 6.0Mw.

7. CONCLUSIONES

- Previo a un evento sísmológico importante se presentan anomalías en el campo magnético terrestre, las cuales tienen fluctuaciones por debajo de la banda ELF, estas se pueden identificar en el espectro de magnitud de las señales de campo magnético.
- Como se pudo evidenciar en la Tabla 3 y Tabla 4, se presentan altas correlaciones directas tanto para el caso de 117 eventos positivos así como para los casos en los que no se registraron eventos sísmológicos en el área de interés con magnitudes iguales o superiores a 6.0 Mw.
- Como se determinó de manera experimental, es posible entrenar una Red Neuronal Artificial que identifique anomalías en el campo magnético terrestre previo a un evento sísmológico de magnitud importante con altas correlaciones directas.
- Al tener dos salidas la Red Neuronal Artificial permite visualizar la correlación de un evento tanto positivo como negativo, lo cual permite realizar un análisis para ambos casos, verificación de doble vía mejorando así la interpretación de las salidas.
- El entrenamiento de la Red Neuronal Artificial es computacionalmente más eficiente al hacerlo con el espectro de magnitud truncado, ya que permite realizar este proceso con una menor cantidad de datos.
- Para el caso del Observatorio Magnético de Huancayo, ya que este se encuentra relativamente cerca de la línea del Ecuador, las componentes de campo horizontal son de una magnitud superior que la componente vertical; Por lo que se hace necesario entrenar una red neuronal artificial para cada zona de estudio.
- Los sistemas operativos, aplicaciones y programas con licenciamiento GNL (*General Public License*) cuentan con grandes prestaciones para el procesamiento científico y de bases de datos además de sus ya conocidas ventajas económicas.

8. APÉNDICE A

8.1 Proyecto Intermagnet

Esta tesis de grado utiliza una metodología de diseño a partir de las bases de datos de señales de campo magnético terrestre Intermagnet, el cual se encuentra en el portal www.intermagnet.org, cuenta con una base de datos de una red global de observatorios magnéticos además fijar estándares de medición, precisión y transmisión de datos en tiempo real cercano.

Intermagnet tiene sus raíces en las discusiones sostenidas en el taller sobre instrumentación de observatorios magnéticos realizados en Ottawa, Canadá (agosto 1986) y la reunión de comparación nórdica en La Foret, Francia (Mayo 1987).

Intermagnet cuenta con una plataforma intuitiva para la descarga de datos así como la opción de graficar un periodo de tiempo para la estación deseada, que para el caso del presente proyecto de tesis se tomó la estación de Huancayo del Instituto geofísico del Perú. La mayoría de los observatorios magnéticos del proyecto intermagnet cuentan con transmisión de datos vía satélite, ya que generalmente los magnetómetros se encuentran instalados en lugares apartados, con el fin de tener una buena calidad de los datos, esto implica que en la mayoría de estos lugares no exista un medio de comunicación robusto para garantizar que los datos sean transmitidos de manera exitosa, además de ello el sistema de transmisión satelital cuenta con una disponibilidad muy alta comparada con otros sistemas de telecomunicación; en la Figura 30 se puede apreciar el esquema general de transmisión de los observatorios magnéticos a nivel mundial.

Para la transmisión efectiva de estos datos de campo magnético, el proyecto intermagnet cuenta con 5 nodos de información geomagnética GIN por sus siglas en inglés (*Geomagnetic Information Nodes*), estos se encuentran ubicados en Edimburgo (UK), Paris (FR), Ottawa (CA), Golden (US) y Kioto (JP). La mayoría de los observatorios magnéticos se encuentran conectados con dichos nodos de

información geomagnética a través de 4 satélites los cuales son: GOES-W, GOES-E, METEOSAT y GMS, los cuales tienen las zonas de cobertura que se puede apreciar en Figura 31; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Figura 30: Esquema general de transmisión de datos.

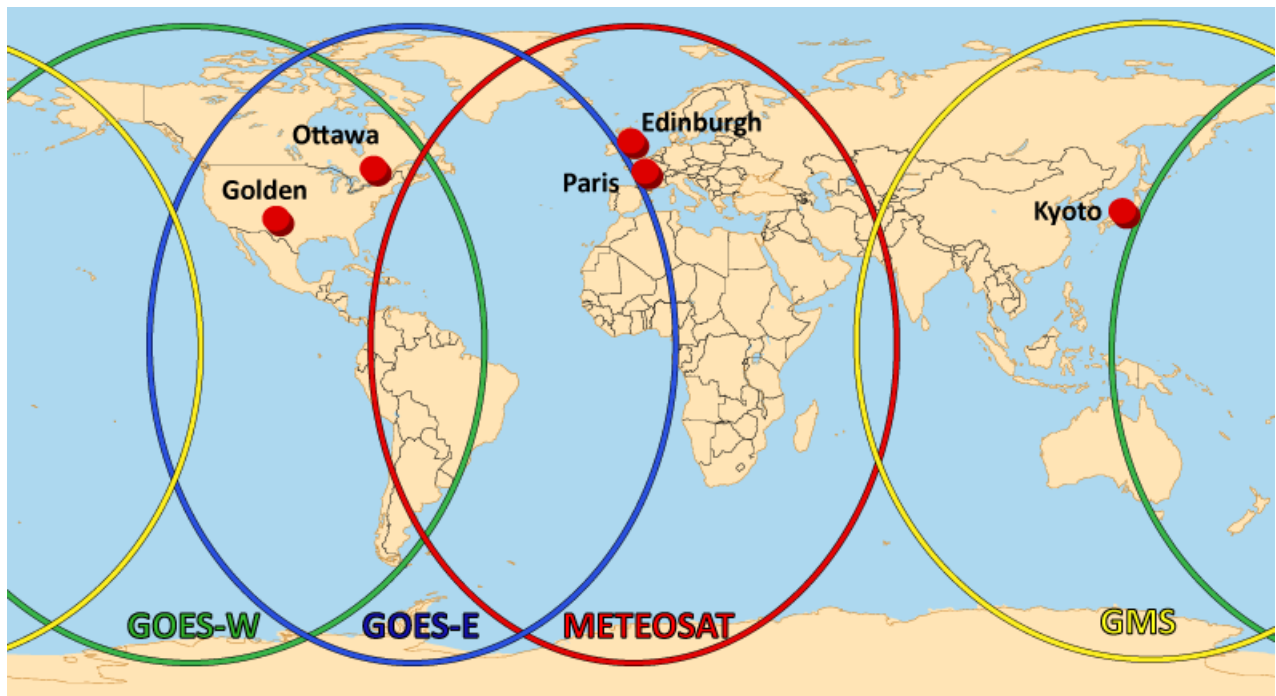


Figura 31: Cobertura satelital del proyecto Intermagnet.

El magnetómetro instalado el Observatorio Magnético de Huancayo cuenta con las especificaciones técnicas que se muestran en la Tabla 5.

Parámetro	
Tipo	<i>Proton Precession</i>
Sensibilidad	0.1 nT a muestreos => 2 segundos
Rango	20,000 a 90,000 nT
Resolución	0.1 nT
Precisión	0.5 nT

Tabla 5: Especificaciones técnicas del magnetómetro HUY.

8.2 Herramienta Computacional

Para el desarrollo del proyecto de tesis “ENTRENAMIENTO DE RED NEURONAL FEED-FORWARD PARA LA IDENTIFICACION DE ANOMALIAS EN EL CAMPO MAGNETICO Y SU CORRELACION CON EVENTOS SISMOLOGICOS” se requirió de unas herramientas computacionales que permitieran implementar la red neuronal.

Así, el desarrollo de esta se realizó enteramente en software libre con el fin de tener una aplicación de bajo costo y ningún licenciamiento, ya que esto encarece el alcance futuro que se pueda dar a esta investigación.

Para ello se implementó el proyecto en el sistema operativo Ubuntu 12.04.5 LTS; El cual es una versión derivada de Debian, es un sistema operativo de plataforma Linux. Este sistema operativo que no solo cuenta con la facilidad de obtener aplicaciones de ofimática, lenguajes de programación y programación científica, sino que cuenta con grandes prestaciones de servidor, lo cual permite implementar servicios de bases de datos.

MySQL es un sistema de gestión de bases de datos relacionales (RDBMS), el cual también opera bajo licenciamiento GPL (*General Public License*), lo cual

permite ser instalados sin notificaciones a los desarrolladores ni realizar pagos para su utilización y desarrollo.

El servicio MySQL permite entre muchos beneficios el tener la información de un servidor de manera ordenada e indexada, por lo que su motor de búsqueda es sumamente eficiente al realizar solicitudes que traigan de vuelta la información solicitada; además de ello se puede solicitar solo información requerida de una tabla. La versión de MySQL bajo la cual se desarrolló el presente proyecto de tesis correspondió a la versión MySQL 5.5.41, la cual se descargó de la librería de aplicaciones de Ubuntu.

Como software intermedio para la migración de datos y solicitud de la misma en MySQL, se realizaron aplicaciones en PHP de consola. Este programa permite de manera rápida realizar consulta, ingresar información y actualizarla muy ágilmente haciendo uso de sus funciones destinadas para tal fin, además permite la ejecución de operaciones matemáticas de mediana complejidad que permite calcular algunos variables de interés y gestionar su almacenamiento en la base de datos. Este se corrió bajo la versión PHP 5.3.10, la cual permite correr en consola las aplicaciones desarrolladas mejorando así los tiempos de cómputo.

Para la implementación de la red neuronal, se requería un software de computación numérica y que además cuente con librerías de redes neuronales, para lo cual se optó por Scilab, dicho software cuenta con un licenciamiento GPL al igual que MySQL y PHP.

Scilab es una alternativa gratuita de software de computación numérica que permite visualizar gráficas, descargar paquetes adicionales y realizar cálculos complejos mediante su consola además de permitir la programación fácil a través de una plataforma intuitiva que permite guardar estos programas. Este se corrió con la versión Scilab 5.3.3.

Esta versión cuenta con paquetes de visualización, sin embargo, Scilab también cuenta con versiones de solo consola, lo que permite optimizar los

recursos computacionales y tener un tiempo de procesamiento más reducido que la versión en la cual se desarrolló el presente proyecto de tesis.

En la Tabla 6 se relaciona el resumen de versiones de software utilizados para el desarrollo del presente proyecto de tesis.

SOFTWARE	DESCRIPCIÓN	VERSIÓN
UBUNTU	Sistema Operativo	12.04.5 LTS
MySQL	Manejo de Bases de Datos	5.5.41
PHP	Programación de recursos	5.3.10
SCILAB	Computación numérica	5.5.2
ANN Toolbox	Paquete de Redes Neuronales	0.4.2.4

Tabla 6: Versión de software utilizado.

En cuanto a Hardware, se contó con un computador DELL INSPIRON 1545 con las siguientes especificaciones técnicas.

PROCESADOR	PENTIUM(R) Dual-Core CPU T4200 @2.0GHz X 2
MEMORIA RAM	DDR2 4 Gb @ 800MHz
DISCO DURO	Western Digital SATA 250 Gb @ 7400 RPM

Tabla 7: Especificaciones técnicas de Hardware.

9. APÉNDICE B

9.1 Código fuente de la Red Neuronal Artificial

```
clear;
clc;
path="/home/felipe/Tesis/FFT/";
eq_da="dates_ann"
no_eq_da="no_dates_ann"
k=0;
i=0;
da_leng=0;
dates=read_csv(path+eq_da);
no_dates=read_csv(path+no_eq_da);
da_leng=size(dates);
no_da_leng=size(no_dates);
Total_dates=da_leng(1,2)+no_da_leng(1,2);
M_ft=zeros(Total_dates,54);
M_tg=zeros(Total_dates,2);
for(i=1:da_leng(1,2))
    query=path+"FFT"+dates(i)+".dat";
    ft=read_csv(query);
    [r,c]=size(ft);
    FT=zeros(1,c-1);
    for(j=1:c-1)
        FT(j)=strtod(ft(1,j));
    end
    M_ft(i,:)=FT(2:55);
    M_tg(i,1)=1;
end

p=i;
for(i=1:no_da_leng(1,2))
    query=path+"noFFT"+no_dates(i)+".dat";
    ft=read_csv(query);
    [r,c]=size(ft);
    FT=zeros(1,c-1);
    for(j=1:c-1)
        FT(j)=strtod(ft(1,j));
    end
    M_ft(i+p,:)=FT;
    M_tg(i+p,2)=1;
end
M_P=M_ft';
it=4;
err=0.01;
N=[54,54,2];
lp=[1,err];
W=ann_FF_init(N);
W=ann_FF_Std_online(M_P,M_tg',N,W,lp,it);
```

```

out=ann_FF_run(M_P,N,W)
//-----prueba de la red neuronal
no_prue=read_csv(path+"pruebaNO");
outNO=zeros(2,25)
for(i=1:25)
    query=path+"noFFT"+no_prue(i)+".dat";
    ft_p=read_csv(query);
    [r,c]=size(ft_p);
    FT_p=zeros(1,c-1);
    for(j=1:c-1)
        FT_p(j)=strtod(ft_p(1,j));
    end
    Mno=zeros(1,54);
    Mno=FT_p(:)
    outno=ann_FF_run(Mno,N,W)
    outNO(:,i)=outno(:)
end
si_prue=read_csv(path+"pruebaSI");
outSI=zeros(2,21)
for(i=1:21)
    query=path+"FFT"+si_prue(i)+".dat";
    ft_psi=read_csv(query);
    [r,c]=size(ft_psi);
    FT_psi=zeros(1,c-1);
    for(j=1:c-1)
        FT_psi(j)=strtod(ft_psi(1,j));
    end
    Msi=zeros(1,54);
    Msi=FT_psi(2:55) '
    outsi=ann_FF_run(Msi,N,W);
    outSI(:,i)=outsi(:)
end

```

10. TABLA DE FIGURAS

Figura 1: Cinturón de fuego	10
Figura 2: Datos tomados del centro nacional de sismos (USGS).	11
Figura 3: Datos tomados del centro nacional de sismos (USGS).	11
Figura 4: Líneas de campo magnético.	15
Figura 5: Campo magnético generado por una corriente.	16
Figura 6: Campo magnético terrestre.	17
Figura 7: Componentes ortogonales del campo magnético.	18
Figura 9: Onda P.....	22
Figura 10: Onda S.....	23
Figura 11: Onda Love.....	23
Figura 12: Onda Rayleigh.....	24
Figura 13: Esquema de capas para una red neuronal Feed-Forward	26
Figura 14: Matriz de caracteres	31
Figura 15: Carácter de entrada.	31
Figura 16: Modelo de migración de datos IAGA2002 a MySQL.....	39
Figura 17: Mapa de zona de interés, tomada de USGS.....	40
Figura 18: Modelo de acceso a la información y gráficas.	41
Figura 19: Campo magnético previo al evento sismológico del 2005-05-21.....	42
Figura 20: Campo magnético previo al evento sismológico del 2007-11-14.....	43
Figura 21: Campo magnético previo a evento sismológico del 2007-12-13.....	43
Figura 22: Campo magnético de evento sismológico del 2011-06-20.....	44
Figura 23: Campo magnético de referencia 2007-10-15.....	44
Figura 24: Campo magnético de referencia 2010-10-19.....	45
Figura 25: Campo magnético de referencia 2013-06-17.....	45
Figura 26: Modelo de funcionamiento	48
Figura 27: Iteración de capas para buscar valor óptimo.....	49
Figura 28: Espectros de magnitud de eventos usados en el entrenamiento de la red neuronal.	57

Figura 29: Entropía de las señales por elementos	58
Figura 30: Esquema general de transmisión de datos.	70
Figura 31: Cobertura satelital del proyecto Intermagnet.	70

REFERENTES BIBLIOGRÁFICOS

- [1] M. khamis y C. Osorio, «AMERICA DEL SUR: Una vision regional de la situacion de riesgo de desastres,» Oficina de las Naciones Unidas para la Reduccion del Riesgo de Desastres (UNISDR), Washinton, 2013.
- [2] SGC, «Historia de la Red Sismológica Nacional de Colombia del SGC - RSNC,» Bogota, 2014.
- [3] R. Donner y e. al, «Temporal correlation pattern in pre-seismic electromagnetic emissions reveal distinct complexity profiles prior to major earthquakes,» *Physics and Chemistry of the Earth*, 2015.
- [4] Y. D. Hung y R. A. Freedman, Fisica Universitaria Vol. 2, Mexico D.F.: Pearson Educación, 2009.
- [5] K. Glaßmeier y e. al, Geomagnetic Field Variations, Berlin: Springer, 2009.
- [6] A. L. Reimann, Fisica-Electricidad, Magnetismo y Optica Vol. 2, Mexico D.F.: Compañia Editorial Continental, 1975.
- [7] Ecured, «Ecured, Conocimiento con todos y para todos,» Ecured, [En línea]. Available: http://www.ecured.cu/Anomal%C3%ADas_magn%C3%A9ticas_terrestres. [Último acceso: 28 01 2016].
- [8] F. Masci, «On the seismogenic increase of the ratio of the ULF geomagnetic field components,» *ELSEVIER*, pp. 19-31, 2011.
- [9] V. Kushwah y e. al., «Ultra low frequency (ULF) amplitude anomalies observed at Agra (India) and their association with regional earthquakes,» *Physics and Chemistry of the Earth*, n° 34, pp. 367-372, 2009.

- [10] D. Enescu, «Possible association between some geomagnetic anomalies and Vrancea (Romania) significant earthquake occurred in the year 2005,» *Earth Physics*, vol. 51, n° 9, pp. 1011-1014, 2006.
- [11] Michigan Tech, «UPSeis,» Michigan Tech, [En línea]. Available: <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html>. [Último acceso: 30 04 2016].
- [12] R. Hamming, *The art of Probability for Scientists and Engineers*, New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [13] D. Svozil y e. al., «Introduction to multi-layer feed-forward neural networks,» *Chemometric and intelligent laboratory system*, n° 39, pp. 43-62, 1997.
- [14] J. Stix, M. L. Calvache V. y S. Williams, «Galeras volcano, Colombia Interdisciplinary Study of a Decade Volcano.,» *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1997.
- [15] B. Voight, «The 1985 Nevado del Ruiz Volcano Catastrophe,» *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, pp. 349-386, 1990.
- [16] W. H. Campbell, *Introduction to Geomagnetic Fields*, Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [17] J. F. McCoy, «Colombia,» de *Geo-Data: The world Geographical Encyclopedia*, Detroit, Gale, 2003, pp. 122-126.
- [18] USGS, «Earthquake Facts and Statistics,» 2015.
- [19] E. Skordas y N. Sarlis, «On the anomalous changes of seismicity and geomagnetic field prior to the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake,» *ELSEVIER Journal of Asian Earth Sciences*, pp. 161-165, 2013.

- [20] V. Surkov y M. Hayakawa, «ULF geomagnetic perturbations due to seismic noise produced by rock fracture and crack formation treated as a stochastic process,» *ELSEVIER Physics and Chemistry of the Earth*, pp. 273-279, 2006.
- [21] T. Grabowska y G. Bojdys, «Analysis of geomagnetic field along seismic profile P4 of the international project POLONAISE'97,» *ELSEVIER Tectonophysics*, pp. 1-14, 2004.
- [22] F. Masci, «On the seismogenic increase of the ratio of the ULF geomagnetic field components,» *Physics of the earth and planetary interiors*, n° 187, pp. 19-32, 2011.
- [23] D. Kerridge, «www.intermagnet.org,» British Geological Survey, Edinburg, 2009.
- [24] R. Gray, *Entropy and information theory*, New York: Springer Science, 1990.
- [25] V. Sorokin y O. Pokhotelov, «Model for the VLF/LF radio signal anomalies formation associated with earthquakes,» *Advance in Space Research*, n° 54, pp. 2532-2539, 2014.
- [26] J. Machta, «Entropy, information and computation,» *American Asociation of Physics Teachers*, vol. 67, n° 12, pp. 1074-1077, 1999.
- [27] G. Cortés, «Observatorios Vulcanologicos en Colombia: 25 años de vigilancia ininterrumpida,» *Ingeominas al dia*, pp. 12-25, 2011.
- [28] Servicio Geológico Colombiano - Red Sismológica Nacional de Colombia, «Boletín de sismos, Agosto de 2013,» SGC, Bogotá, 2013.
- [29] Servicio Geológico Colombiano - Red Sismológica Nacional de Colombia, «Boletín de sismos, Febrero de 2013,» SGC, Bogotá, 2013.

- [30] Servicio Geológico Colombiano - Red Sismológica Nacional de Colombia, «Boletín de sismos, Septiembre de 2012,» SGC, Bogotá, 2012.
- [31] Ingeominas - Red Sismologica Nacional de Colombia, «Boletín de sismos, Septiembre de 2007,» Ingeominas, Bogotá, 2007.
- [32] Ingeominas - Red Sismológica Nacional de Colombia, «Boletín de sismos, Enero de 2006,» Ingeominas, Bogotá, 2006.
- [33] Ingeominas - Red Sismológica Nacional de Colombia, «Boletín de sismos, Noviembre de 2004,» Ingeominas, Bogotá, 2004.
- [34] T. Cover y J. Thomas, Elements of information Theory, Second Edition, New York: Wiley, 2006.
- [35] Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, «Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica,» [En línea]. Available: <http://www.smis.org.mx/>. [Último acceso: 30 04 2016].
- [36] D. Gubbins y e. al, «Correlation of Earth's magnetic field with lower mantle thermal and seismic structure,» *ELSEVIER Physics of the earth and planetary interiors*, pp. 256-259, 2007.
- [37] H. John, Exploration of a ship's magnetic field signatures, San Rafael: Morgan & Claypool, 2006.
- [38] D. Minakshi y e. al, «Earthquake induced dynamics at the ionosphere in presence of magnetic storm,» *ELSEVIER*, pp. 609-619, 2013.
- [39] O. Novik y e. al, «Theory and detection scheme of seismic EM signals transferred into the atmosphere from the oceanic an continental lithosphere,» *ELSEVIER*, pp. 168-183, 2014.

- [40] Y. Sasai, M. Uyeshima y e. al, «Magnetic and electric field observations during the 200 activity of Miyake-jima volcano, Central Japan,» *Earth and Planetary Science Letters*, pp. 769-777, 2002.
- [41] M. R. y e. al, *The magnetic field of the earth*, New York: Academic Press, 1998.
- [42] J. Zlotnicki y e. al, «Electromagnetic and geochemical methods applied to investigations of hydrothermal/volcanic unrests,» *Physics and Chemistry of the Earth*, p. 394–408, 2009.
- [43] C. L. Córtes, «Aplicaciones de la teoría de la distancia Debye al estudio del circuito eléctrico global - See more at: <http://www.bdigital.unal.edu.co/47223/#sthash.jzOeNqAg.dpuf>,» UNAL, Manizales, 2014.
- [44] J. H. Estrada, «Aplicación de la entrópia y esfera Debye al estudio de precursores sísmicos y calidad de la energía eléctrica,» UNAL, Manizales, 2013.
- [45] Y. Chen y e. al, «Classification of hard red wheat by Feed-forward back-propagation neural networks,» *Cereal Chemists Inc.*, vol. 3, n° 72, pp. 317-319, 1995.