



$$i_p = \inf \{i \in N \mid STA(i) / LTA(i) > C_3\}, \quad (5)$$

Siendo C_3 el umbral de decisión.

Función Rectilínea F. Esta mide el grado de polarización lineal de una señal sísmica de tres componentes, la cual aumenta si la energía sísmica se concentra en una dirección principal. La onda-p está generalmente polarizada de forma lineal, de esta forma se espera el máximo valor de F en el tiempo de arribo de la onda-p [8].

$$F = 1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}, \quad (6)$$

donde λ_1 es el mayor valor propio y λ_2 es el segundo mayor valor propio de la matriz de covarianza:

$$M = \begin{bmatrix} Var(x_1) & Cov(x_1, x_2) & Cov(x_1, x_3) \\ Cov(x_1, x_2) & Var(x_2) & Cov(x_2, x_3) \\ Cov(x_1, x_3) & Cov(x_2, x_3) & Var(x_3) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

donde x_1 , x_2 y x_3 son series de tiempo correspondientes a los tres componentes de una señal sísmica. $Var(x_1)$ es la varianza de x_1 y $Cov(x_1, x_2)$ es la covarianza entre x_1 y x_2 :

$$Cov(x_1, x_2) = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} (x_1(i) - \mu_1)(x_2(i) - \mu_2), \quad (8)$$

donde μ_1 y μ_2 son los valores medios de x_1 y x_2 respectivamente y N_t es el número de muestras. La función rectilínea F es igual a uno cuando una onda está totalmente polarizada de forma lineal (arribo de la onda-p) y a cero cuando no existe polarización.

Función Grado de Polarización DOP. Mide el grado de polarización de una señal de tres componentes:

$$DOP = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 + (\lambda_2 - \lambda_3)^2 + (\lambda_3 - \lambda_1)^2}{2(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)^2}, \quad (9)$$

donde λ_1 , λ_2 , λ_3 son los valores propios de la matriz de covarianza M . Esta función característica puede ser usada para detectar ondas-p y ondas-s debido a que estas poseen alto grado de polarización [12].

Función valor absoluto. Definida de la siguiente forma:

$$F_{abs} = \text{abs}\{x(i)\}, \forall i = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

donde N es el número de muestras y x es una señal sísmica. Esta función tiene alta fidelidad y velocidad de proceso [5].



Función envolvente analítica compleja. Usada ampliamente en sistemas de detección con el algoritmo de STA/LTA y está definida como [1]:

$$E(t) = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)}, \quad (11)$$

donde $\tilde{x}(t)$ es la Transformada Hilbert de la señal sísmica $x(t)$.

Función de planaridad. Registra el grado de polarización de una señal de tres componentes en un plano y esta definida por [12]:

$$P = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 - 2\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (12)$$

donde $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, son los valores propios de la matriz de covarianza M . La onda-s está polarizada de tal forma que el movimiento de sus partículas está confinado a un plano, por lo tanto se espera el máximo valor de P en el tiempo de arribo de esta onda.

3.2 Topología de la RN

La función valor absoluto tiene alta fidelidad y velocidad de proceso [6], mientras la función rectilínea (6) y el grado de polarización (DOP) (9) son medidas discriminantes debido a que miden el grado de polarización de una serie de tiempo y la onda- p es una onda compresional que generalmente está polarizada de forma lineal. De esta forma el espacio de entrada lo conforman la función valor absoluto, la función rectilínea y la función DOP .

Número de neuronas de entrada. Está determinado por el número de muestras de la ventana correspondiente a la función valor absoluto, la función rectilínea y la función DOP . El número de muestras de la ventana es determinado a través de la función rectilínea y la norma *varimax* [8]:



Figura 3 Norma Varimax promedio

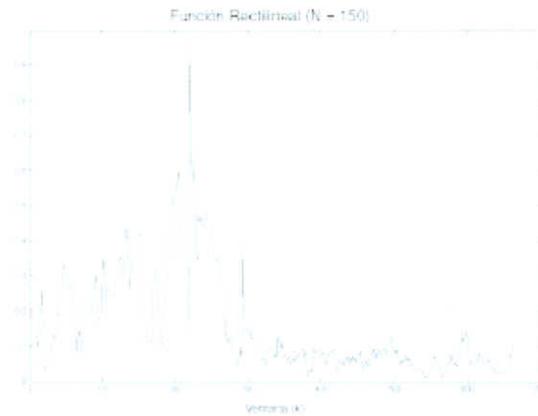


Figura 4. Ejemplo de función rectilínea

$$V_c = \frac{\sum_i x(i)^4}{\left(\sum_i x(i)^2\right)^2}, \quad (13)$$

donde x es la serie de tiempo correspondiente a la función rectilínea para ventanas deslizantes de M muestras, $M = 2, 3, 4, \dots, M_{MAX}$. La idea es obtener el valor óptimo de M para que la función rectilínea tenga solo un pico prominente que corresponde a la ventana donde está la onda- p , es decir minimizar la entropía de la función rectilínea. La norma varimax mide la entropía de una serie de tiempo, mientras más alta es, menor número de picos tiene la señal. Se determinó que el valor óptimo promedio de M es de 150 muestras en cada ventana como se muestra en la figura 3, por tanto el número de neuronas de entradas es 150 para la función valor absoluto, una para la función rectilínea y otra para la función DOP , en total el número de neuronas de entrada es 152.

En las figuras 4 y 5 se muestra la función rectilínea y la función DOP respectivamente de la señal de tres componentes de la figura 6 para una ventana de 150 muestras con 5 de traslape. El máximo de las funciones corresponde a la ventana que contiene el tiempo de arribo de la onda- p .

Número de capas ocultas. Cualquier espacio de decisión arbitrario puede ser aproximado por una red neuronal de perceptrones multicapa con una capa oculta de neuronas no-lineales [14]. De esta forma es necesaria sólo una capa oculta para separar el espacio de entrada que corresponde al conjunto de entrenamiento, pero esto no implica que sea el valor óptimo en el sentido de generalización.

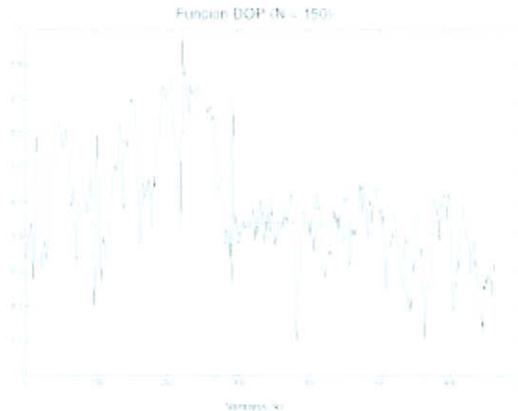


Figura 5. Ejemplo de función DOP.

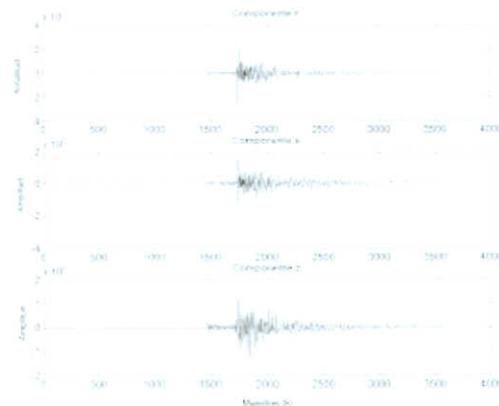


Figura 6. Señal de prueba de 3 componentes

Número de neuronas ocultas. Este número determina la cantidad de hiperplanos que van a formar el espacio de decisión. En general la cantidad de neuronas ocultas debe ser la mínima posible para evitar sobreentrenamiento y mala generalización. Se realizaron pruebas empezando con dos neuronas ocultas y entrenando con el algoritmo de *Levenberg-Marquardt* y el criterio de *Early Stopping* [14], los resultados mostraron que el número mínimo de neuronas para obtener una buena generalización fue de 5 neuronas en la capa oculta.

Conjunto de entrenamiento. Inicialmente se utilizaron conjuntos pequeños de entrenamiento correspondientes a 10 datos de onda- p y 10 datos de ruido. El desempeño del sistema fue pobre, con una elevada tasa de falsas alarmas y falso rechazo. Posteriormente, se aumentó de forma significativa el número de patrones de ruido. Finalmente, el sistema fue entrenado con 465 patrones de ruido y 13 patrones de onda- p .