



Universidad Central de Venezuela

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

**CORRELACIÓN DEL $\delta^{18}\text{O}$, SUSCEPTIBILIDAD
MAGNÉTICA Y COCIENTE S, EN EL POZO SALTARÍN 1A
(COLOMBIA), USANDO REDES NEURONALES DIFUSAS**

Realizado por

Ana Luisa Da Silva

Proyecto de Grado

Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela

Como requisito Parcial para optar al título de

Licenciado en Física

Caracas, Octubre de 2009



Universidad Central de Venezuela

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

**CORRELACIÓN DEL $\delta^{18}\text{O}$, SUSCEPTIBILIDAD
MAGNÉTICA Y COCIENTE S, EN EL POZO SALTARÍN 1A
(COLOMBIA), USANDO REDES NEURONALES DIFUSAS**

Realizado por

Ana Luisa Da Silva

Proyecto de Grado Presentado ante la Ilustre

Universidad Central de Venezuela

Como requisito Parcial para optar al título de Licenciado en Física

Realizado con la asesoría de:

Dra. Nuri Hurtado

Dr. Vincenzo Costanzo

Caracas, Octubre de 2009

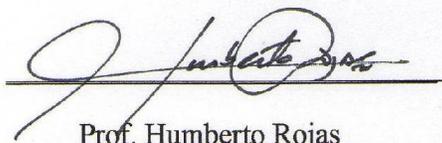
Universidad Central de Venezuela

Facultad de Ciencias

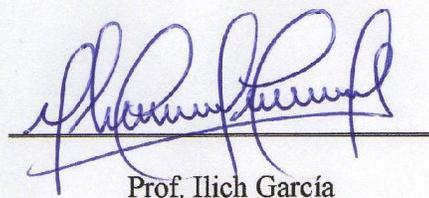
Escuela de Física

VEREDICTO

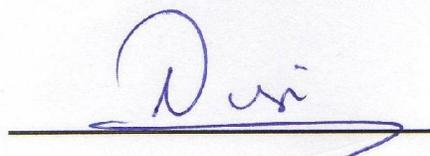
Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Física de la Facultad de Ciencias, en la sesión del día 21-09-09, para examinar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Br. **Ana Da Silva**, portadora de la cedula de identidad numero **V-16.087.531**, y titulado “*Correlación del $\delta^{18}O$, susceptibilidad magnética y cociente S, en el pozo Saltarín 1A (Colombia), usando redes neuronales difusas*”, el cual fue realizado bajo la tutoría de la Prof. Nuri Hurtado (UCV) y del Prof. Vincenzo Costanzo (USB), a los fines de cumplir el último requisito para optar al título de **Licenciado en Física, Mención Geofísica**, dejan constancia el día 28 del mes de Octubre del 2009, a las 3:00 p.m., el jurado deliberó en privado y por unanimidad decidió **Aprobar** el trabajo.



Prof. Humberto Rojas



Prof. Ilich García



Prof. Nuri Hurtado (UCV)
Tutora

RESUMEN

En el presente trabajo se busca establecer mediante el uso de la técnica computacional de redes neuronales difusas (RND), la posible relación entre los valores globales de $\delta^{18}\text{O}$ obtenidos de foraminíferas bénticas y los valores de dos parámetros magnéticos de cociente S (CS) y susceptibilidad magnética (χ) medidos a un número de muestras del pozo Saltarín 1A, ubicado en la Cuenca Sedimentaria de los Llanos Orientales de Colombia. Para llevar a cabo las pruebas computacionales debimos asociar los valores de CS, χ y $\delta^{18}\text{O}$, para esto se realizaron estudios bioestratigráficos entre los estudios que realizamos se encuentra el estudio de foraminíferos y palinología. Sin embargo, a partir de estos estudios no logramos establecer las edades de las muestras por lo que debimos asumir la hipótesis de una tasa de sedimentación constante entre dos amarres de edades disponibles, los cuales sitúan al tope del Mioceno Inferior a 305 metros y al tope del Mioceno Medio a 610 metros de profundidad aproximadamente. El sistema difuso fue construido considerando tres combinaciones de datos de entradas: $\delta^{18}\text{O} - \text{CS}$, $\delta^{18}\text{O} - \chi$, $\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$; esto se realizó con el fin de determinar la influencia de cada parámetro sobre los valores del $\delta^{18}\text{O}$ inferidos. Obteniéndose la mejor inferencia mediante la combinación de valores de entrada $\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$, con ecuaciones del tipo: $\delta^{18}\text{O} = a\text{CS} + b\chi + c$. Debido a que asumimos una tasa de sedimentación constante, decidimos dividir los datos en cuatro secciones de espesores iguales (en profundidad), con la finalidad de estimar cuán realista resulta esta consideración. Encontrándose que la inferencia desmejora a en la última sección, esto puede deberse a que en esta sección existe una gran densidad de superficies de erosión, indicándonos que gran parte de la continuidad en la secuencia estratigráfica se ha perdido. Resultando así inadecuada la hipótesis de una tasa de sedimentación constante, la cual podría estar influyendo negativamente en la inferencia.

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos.

Y a todas aquellas personas que han estado junto a mí apoyándome.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mis tutores, la Dra. Nuri Hurtado y el Dr. Vincenzo Costanzo, por haberme brindado la oportunidad de realizar este trabajo. Gracias por la confianza y el apoyo que me brindaron a lo largo de la realización de esta investigación.

También quisiera agradecer a todas aquellas que de una u otra forma colaboraron para hacer posible la realización de este proyecto de grado: al Dr. Germán Bayona (Corporación Geológica ARES, Colombia) y al Geólogo Alejandro Mora (HOCOL, Colombia) los cuales suministraron las muestras de roca utilizadas en este estudio. Al Dr. Carlos Jaramillo (Smithsonian Institute of Tropical Research, Panamá), quien suministro las edades geológicas de las muestras de roca. Al profesor Oswaldo Guzmán quien me brindo su colaboración en todo momento. A Glen Rodríguez del Laboratorio de Superficies del Departamento de Ciencia de los Materiales, Sección de Microscopía Electrónica de la Universidad Simón Bolívar, quien realizó los análisis de microscopía y espectrometría de las muestras.

A mis padres y mis hermanos por hacer posible todo lo que soy, por apoyarme siempre. A Juan Carlos, amor gracias por tu paciencia y tu ayuda todo este tiempo en la realización de este proyecto; y a todas aquellas personas que me han acompañado a lo largo de mi carrera universitaria.

Muchas Gracias...

INDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| RESUMEN..... | i |
| DEDICATORIA..... | ii |
| AGRADECIMIENTOS..... | iii |
| ÍNDICE GENERAL..... | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | xiv |
| | |
| CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| | |
| CAPÍTULO II: MARCO GEOLÓGICO..... | 4 |
| 2.1 Ubicación geográfica..... | 4 |
| 2.2 Descripción geológica..... | 5 |
| 2.2.1 Formación Guayabo..... | 6 |
| 2.2.2 Formación León..... | 7 |
| 2.2.3 Formación Carbonera..... | 7 |
| 2.3 Ambientes de acumulación..... | 8 |
| | |
| CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO..... | 10 |
| 3.1 Marco teórico experimental..... | 10 |
| Factores cíclicos a escala orbital: teoría astronómica de Milankovitch.... | 12 |
| Factores tectónicos: deriva continental..... | 13 |
| 3.1.1 Indicadores paleoclimaticos “proxy”..... | 13 |

| | | |
|---|--|----|
| 3.1.2 | Variación isotópica del oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$)..... | 15 |
| | Relación entre $\delta^{18}\text{O}$ con el clima..... | 16 |
| 3.1.3 | Bioestratigrafía..... | 18 |
| 3.1.4 | Parámetros magnéticos..... | 21 |
| | 3.1.4.1 Cociente S..... | 21 |
| | 3.1.4.2 Susceptibilidad magnética..... | 23 |
| | 3.1.4.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)..... | 25 |
| | 3.1.4.4 Espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDX)..... | 26 |
| 3.2 | Marco teórico computacional..... | 27 |
| | 3.2.1 Lógica difusa..... | 28 |
| | Conjunto difuso..... | 28 |
| | Funciones de pertenencia..... | 29 |
| | Reglas difusas..... | 32 |
| | 3.2.2 Redes neuronales artificiales..... | 33 |
| | 3.2.3 Redes neuronales difusas..... | 35 |
| | 3.2.4 ANFIS (Adaptative Neuro-Fuzzy Inference System)..... | 36 |
| | 3.2.4.1 Arquitectura de ANFIS..... | 37 |
| | 3.2.4.2 Aprendizaje de ANFIS..... | 40 |
| CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO EXPERIMENTAL..... | | 41 |
| 4.1 | Determinación de la naturaleza primaria o secundaria de las mineralogías magnéticas de las muestras del pozo Saltarín 1 A..... | 41 |
| 4.1.1 | Preparación de las muestras para estudios de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDX)..... | 43 |
| 4.2 | Preparación de las muestras para estudios de bioestratigrafía..... | 46 |
| 4.2.1 | Preparación de las muestras para estudios de foraminíferas..... | 48 |
| 4.2.2 | Preparación de las muestras para estudios de palinología..... | 50 |

| | |
|--|-----|
| CAPÍTULO V: MARCO METODOLÓGICO COMPUTACIONAL..... | 51 |
| 5.1 Entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS..... | 55 |
| 5.2 Entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ | 62 |
| 5.3 Entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ | 68 |
| | |
| CAPÍTULO VI: RESULTADOS Y ANÁLISIS EXPERIMENTALES..... | 72 |
| 6.1 Resultados y análisis del estudio de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDX)..... | 72 |
| 6.2 Resultados y análisis del estudio de microscopía óptica..... | 93 |
| 6.3 Resultados y análisis del estudio de foraminíferas..... | 94 |
| 6.4 Comparación entre los ciclos eustáticos y el cociente S..... | 95 |
| 6.5 Asociación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$, cociente S y susceptibilidad magnética.... | 96 |
| 6.6 Conclusiones de los resultados experimentales..... | 99 |
| | |
| CAPÍTULO VII: RESULTADOS Y ANÁLISIS COMPUTACIONALES..... | 101 |
| 7.1 Correlación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y los parámetros magnéticos cociente S (CS) y susceptibilidad magnética (χ), utilizando un método de regresión lineal..... | 102 |
| 7.2 Entrenamiento de la red neuronal..... | 102 |
| 7.2.1 Entrenando la red con $\delta^{18}\text{O}$ y cociente S (CS)..... | 103 |
| 7.2.2 Entrenando la red con $\delta^{18}\text{O}$ y susceptibilidad magnética (χ)..... | 106 |
| 7.2.3 Entrenando la red con $\delta^{18}\text{O}$ y las cantidades magnéticas de cociente S (CS) y susceptibilidad magnética (χ) simultáneamente..... | 109 |
| 7.3 Inferencia del $\delta^{18}\text{O}$ en las cuatro sub-secciones de los datos seleccionados..... | 114 |
| 7.4 Conclusiones de los resultados computacionales..... | 118 |
| | |
| CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES..... | 120 |

| | |
|---|-----|
| BIBLIOGRAFÍA..... | 123 |
| APÉNDICE..... | 127 |
| Apéndice 1. Valores experimentales de $\delta^{18}\text{O}$, cociente S (CS) y susceptibilidad magnética (χ), utilizados en el tratamiento computacional de redes neuronales difusas..... | 128 |
| Apéndice 2. Características de las mineralogías presentes en las muestras del pozo Saltarín 1A, analizadas mediante microscopía óptica..... | 130 |
| Apéndice 3. Errores reportados por el programa MatLab después de cada entrenamiento neuro difuso para las cuatros sub-secciones..... | 132 |
| Apéndice 4. Gráficos cruzados del $\delta^{18}\text{O}$ inferido vs. $\delta^{18}\text{O}$ experimental para las cuatro sub-secciones, entrenando la red con los conjuntos de entrada de: $\delta^{18}\text{O} - \text{CS}$, $\delta^{18}\text{O} - \chi$ y $\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$ | 133 |

INDICE DE FIGURAS

Capítulo II: Marco Geológico

| | |
|--|---|
| Figura 2.1.- Mapa de la ubicación geográfica del pozo petrolero Saltarín - 1A Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia..... | 5 |
| Figura 2.2.- Columna estratigráfica del pozo Saltarín 1A. (Tomado de Bayona et al, 2008)..... | 9 |

Capítulo III: Marco Teórico

| | |
|--|----|
| Figura 3.1.- Principales factores del cambio climático y sus escalas temporales de influencia (tomado de Moreno, 2002)..... | 11 |
| Figura 3.2.- Ciclos de Milankovitch. En la figura (I) se muestra las variaciones en los parámetros orbitales, (a) precesión; (b) oblicuidad y (c) excentricidad. En la figura (II) se muestra la duración en miles de años de estos ciclos (Modificado de Vera, 1994)..... | 12 |
| Figura 3.3.- Diferencias en las cantidades relativas de oxígeno-18 en el hielo continental y en el agua marina durante los períodos: (a) de calentamiento global (cálidos) y (b) glaciales (fríos)..... | 17 |
| Figura 3.4.- Variación isotópica del $\delta^{18}\text{O}$ para el Fanerozoico (Tomado de Wikipedia)... | 18 |
| Figura 3.5.- Aplicación de dos campos antiparalelos para la determinación del cociente S..... | 23 |
| Figura 3.6.- Conjuntos lógicos, (a) visión de la lógica clásica y (b) visión de la lógica difusa..... | 29 |
| Figura 3.7.- Tipos de funciones de pertenencia (membership function, mf). (a) trimf, (b) trapmf, (c) gbellmf, (d) gaussmf, (e) gaussmf2, (f) pimf, (g) dsigmf, (h) psifmf (Tomado de Fuzzy Logic Toolbox, The MathWorks Inc, 2000)..... | 30 |
| Figura 3.8.- Elementos que componen una neurona artificial..... | 34 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.9.- Red neural hibrida adaptable (Tomado de Moya, 2007)..... | 37 |
| Figura 3.10.- Mecanismo de razonamiento de ANFIS con dos reglas difusas..... | 38 |

Capítulo IV: Marco Metodológico Experimental

| | |
|--|----|
| Figura 4.1.- Perfil de susceptibilidad magnética para el pozo Saltarín-1A, Cuenca de los Llanos Orientales Colombia..... | 42 |
| Figura 4.2.- Equipo mediante el cual se recubrió de oro la muestra, marca Esputerin Hochspannung..... | 45 |
| Figura 4.3.- Microscopio electrónico de barrido marca JEOL JSM – 6390 y sonda de rayos X Oxford Instruments, modelo 7582..... | 45 |
| Figura 4.4.- Porta muestra sobre el cual es colocada la muestra a analizar para realizar los estudios de microscopía electrónica y espectroscopía de rayos X por dispersión de energía..... | 46 |
| Figura 4.5.- Perfiles de (a) $\delta^{18}\text{O}$ global graficado en función de edad geológica en Ma, (b) Cociente S experimental y (c) Susceptibilidad Magnética experimental, ambos graficados en función de la profundidad en metros..... | 47 |
| Figura 4.6.- Pasos a seguir en la técnica del levigado..... | 48 |

Capítulo V: Marco Metodológico Computacional

| | |
|--|----|
| Figura 5.1.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para la función de pertenencia gaussmf con: (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo A... 58 | 58 |
| Figura 5.2.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con | |

valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para la función de pertenencia gaussmf con: (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo B... 59

Figura 5.3.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para la función de pertenencia gaussmf con: (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo C... 60

Figura 5.4.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para la función de pertenencia gaussmf con: (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo D... 61

Figura 5.5.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para la función de pertenencia gaussmf con: (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo A... 64

Figura 5.6.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para la función de pertenencia gaussmf con: (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo B... 65

Figura 5.7.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para la función de pertenencia gaussmf con: (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo C... 66

Figura 5.8.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para la función de pertenencia gaussmf con: (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo D... 67

Figura 5.9.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con

valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ , para la función de pertenencia gaussmf para: (a) [CS χ] [2 1], (b) [CS χ] [1 2], (c) [CS χ] [3 1], (d) [CS χ] [1 3] y (e) [CS χ] [2 2]; para el modelo A..... 70

Figura 5.10.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ , para la función de pertenencia gaussmf para: (a) [CS χ] [2 1], (b) [CS χ] [1 2], (c) [CS χ] [3 1], (d) [CS χ] [1 3] y (e) [CS χ] [2 2]; para el modelo B₁..... 71

Capítulo VI: Resultados y Análisis Experimentales

| | |
|--|----|
| Figura 6.1.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 1a. Profundidad: 110.37 m..... | 74 |
| Figura 6.2.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 1b. Profundidad: 110.37 m..... | 75 |
| Figura 6.3.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 1c. Profundidad: 110.37 m..... | 76 |
| Figura 6.4.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 2a. Profundidad: 127.40 m..... | 77 |
| Figura 6.5.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 2b. Profundidad: 127.40 m..... | 78 |
| Figura 6.6.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 3a. Profundidad: 139.31 m..... | 79 |
| Figura 6.7.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 3b. Profundidad: 139.31 m..... | 80 |
| Figura 6.8.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 4a. Profundidad: 147.25 m..... | 81 |
| Figura 6.9.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 4b. Profundidad: 147.25 m..... | 82 |
| Figura 6.10.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 5a. Profundidad: 462.43 m..... | 83 |
| Figura 6.11.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 6a. Profundidad: 479.55 m..... | 84 |
| Figura 6.12.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 6b. Profundidad: 479.55 m..... | 85 |
| Figura 6.13.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 7a. Profundidad: 541.75 m..... | 86 |
| Figura 6.14.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 8a. Profundidad: 616.48 m..... | 87 |
| Figura 6.15.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 8b. Profundidad: 616.48 m..... | 88 |
| Figura 6.16.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 8c. Profundidad: 616.48 m..... | 89 |

| | |
|---|----|
| Figura 6.17.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 9a. Profundidad: 627.36 m..... | 90 |
| Figura 6.18.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 9b. Profundidad: 627.36 m..... | 91 |
| Figura 6.19.- Comparación entre el perfil de cociente S para el pozo Saltarín 1A (figura de la izquierda) y los ciclos eustáticos a nivel global (figura de la derecha), entre dos amarres de edades..... | 96 |
| Figura 6.20.- Medidas de: (a) Susceptibilidad Magnética, (b) Cociente S y (c) $\delta^{18}\text{O}$ globales (asumiendo una tasa de sedimentación constante entre los dos amarres de edades disponibles), graficados a profundidad en metros..... | 98 |

Capítulo VII: Resultados y Análisis Computacionales

| | |
|---|-----|
| Figura 7.1.- Gráficos cruzados de (a) cociente S experimental vs. $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos y (b) susceptibilidad magnética experimental vs. $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos, para toda la columna (305 – 610 m)..... | 102 |
| Figura 7.2.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros, así como los gráficos cruzados de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido, para toda la columna (305 – 610 m), entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS usando 4 reglas difusas, para: (a) Modelo A, (b) Modelo B, (c) Modelo C y (d) Modelo D..... | 104 |
| Figura 7.3.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros, así como los gráficos cruzados de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido, para toda la columna (305 – 610 m), entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS usando: (a) 2 reglas difusas, (b) 3 reglas difusas, y (c) 4 reglas difusas. Para el modelo A..... | 105 |
| Figura 7.4.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros, así como los gráficos cruzados de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido, para toda la columna (305 – | |

| | |
|---|-----|
| 610 m), entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ usando 4 reglas difusas, para: (a) Modelo A, (b) Modelo B, (c) Modelo C y (d) Modelo D..... | 107 |
| Figura 7.5.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros, así como los gráficos cruzados de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido, para toda la columna (305 – 610 m), entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ usando: (a) 2 reglas difusas, (b) 3 reglas difusas, y (c) 4 reglas difusas. Para el modelo B..... | 108 |
| Figura 7.6.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros, así como los gráficos cruzados de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido, para toda la columna (305 – 610 m), entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ ; usando [CS χ] [2 2], para: (a) Modelo A y (b) Modelo B ₁ | 112 |
| Figura 7.7.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros, así como los gráficos cruzados de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido, para toda la columna (305 – 610 m), entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ ; usando: (a) [CS χ] [1 2]; (b) [CS χ] [2 1] y (c) [CS χ] [2 2] reglas difusas. Para el Modelo A..... | 113 |
| Figura 7.8.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros para: (a) toda la columna (305 – 610 m) utilizando [CS χ] [2 2], (b) sección 1 utilizando [CS χ] [1 2], (c) sección 2 utilizando [CS χ] [2 1], (d) sección 3 utilizando [CS χ] [2 1] y (e) sección 4 utilizando [CS χ] [2 1]. Entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ ; para el Modelo A..... | 117 |

Apéndice

| | |
|---|-----|
| Apéndice 4. Gráficos cruzados del $\delta^{18}\text{O}$ inferido vs. $\delta^{18}\text{O}$ experimental para las cuatro subsecciones, entrenando la red con los conjuntos de entrada de: $\delta^{18}\text{O}$ – CS, $\delta^{18}\text{O}$ – χ y $\delta^{18}\text{O}$ – CS – χ | 133 |
|---|-----|

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo IV: Marco Metodológico Experimental

| | |
|---|----|
| Tabla 4.1. Muestras analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDX)..... | 43 |
|---|----|

Capítulo V: Marco Metodológico Computacional

| | |
|--|----|
| Tabla 5.1.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo A..... | 56 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Tabla 5.2.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo B..... | 56 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Tabla 5.3.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo C..... | 57 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Tabla 5.4.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo D..... | 57 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Tabla 5.5.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo A..... | 62 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Tabla 5.6.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo B..... | 62 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Tabla 5.7.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo C..... | 63 |
| Tabla 5.8.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo D..... | 63 |
| Tabla 5.9.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ , para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo A..... | 68 |
| Tabla 5.10.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ , para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo B ₁ | 68 |

Capítulo VI: Resultados y Análisis Experimentales

| | |
|---|----|
| Tabla 6.1.- Composición de la muestra 1a. Profundidad 110.37 m..... | 74 |
| Tabla 6.2.- Composición de la muestra 1b. Profundidad 110.37 m..... | 75 |
| Tabla 6.3.- Composición de la muestra 1c. Profundidad: 110.37 m..... | 76 |
| Tabla 6.4.- Composición de la muestra 2a. Profundidad: 127.40 m..... | 77 |
| Tabla 6.5.- Composición de la muestra 2a. Profundidad: 127.40 m..... | 78 |
| Tabla 6.6.- Composición de la muestra 3a. Profundidad: 139.31 m..... | 79 |
| Tabla 6.7.- Composición de la muestra 3b. Profundidad: 139.31 m..... | 80 |
| Tabla 6.8.- Composición de la muestra 4a. Profundidad: 147.25 m..... | 81 |
| Tabla 6.9.- Composición de la muestra 4b. Profundidad: 147.25 m..... | 82 |
| Tabla 6.10.- Composición de la muestra 5a. Profundidad: 462.43 m..... | 83 |
| Tabla 6.11.- Composición de la muestra 6a. Profundidad: 479.55 m..... | 84 |

| | |
|---|----|
| Tabla 6.12.- Composición de la muestra 6b. Profundidad: 479.55 m..... | 85 |
| Tabla 6.13.- Composición de la muestra 7a. Profundidad: 541.75 m..... | 86 |
| Tabla 6.14.- Composición de la muestra 8a. Profundidad: 616.48 m..... | 87 |
| Tabla 6.15.- Composición de la muestra 8b. Profundidad: 616.48 m..... | 88 |
| Tabla 6.16.- Composición de la muestra 8c. Profundidad: 616.48 m..... | 89 |
| Tabla 6.17.- Composición de la muestra 9a. Profundidad: 627.36 m..... | 90 |
| Tabla 6.18.- Composición de la muestra 9b. Profundidad: 627.36 m..... | 91 |

Capítulo VII: Resultados y Análisis Computacionales

| | |
|---|-----|
| Tabla 7.1.- Valores de R^2 y RMSE para el total de los datos en estudio (Tope Mioceno Medio/Tope Mioceno Inferior) y las cuatros sub-secciones..... | 118 |
|---|-----|

| | |
|-----------------------|-----|
| Apéndice | 127 |
|-----------------------|-----|

| | |
|---|-----|
| Apéndice 1. Valores experimentales de $\delta^{18}\text{O}$, cociente S (CS) y susceptibilidad magnética (χ), utilizados en el tratamiento computacional de redes neuronales difusas..... | 128 |
|---|-----|

| | |
|---|-----|
| Apéndice 2. Características de las mineralogías presentes en las muestras del pozo Saltarín 1A, analizadas mediante microscopía óptica..... | 130 |
|---|-----|

| | |
|--|-----|
| Apéndice 3. Errores reportados por el programa MatLab después de cada entrenamiento neuro difuso para las cuatros sub-secciones..... | 132 |
|--|-----|

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los métodos de regresión lineal simple han sido empleados ampliamente en la geofísica y la geología, para estudiar la relación entre dos parámetros. Sin embargo, en estas áreas, debido a las heterogeneidades de las variables involucradas, se da un incremento de la dispersión de los datos de tal forma que no existe una tendencia obvia entre los parámetros a tratar como para establecer una relación lineal entre ellos. En los últimos años este problema ha sido solventado mediante el uso de algoritmos computacionales en los cuales se divide el conjunto de datos a estudiar en sub-conjuntos. A cada uno de estos sub-conjuntos se le calcula una función de ajuste lineal, como es el caso del estudio realizado por Finol et al. (2001), en el cual se utiliza el algoritmo de lógica difusa para inferir valores de permeabilidad. En este algoritmo se dividen los datos en sub-unidades correspondientes a diferentes facies deposicionales y se calcula a cada sub-unidad una función local de ajuste.

El método computacional de Redes Neuronales Difusas (RND), es un algoritmo computacional que combina las bondades de la lógica difusa y de las redes neuronales artificiales, y en los últimos años ha sido utilizado para tratar problemas de naturaleza no lineal entre dos o más variables. Así por ejemplo, las RND se utilizan para la inferencia de parámetros de difícil adquisición y/o adquisición costosa a partir de parámetros cuya adquisición es relativamente más fácil, lo cual es una constante en el área de las geociencias. Tal es el caso del estudio llevado a cabo por Finol et al. (2002), donde a partir

de parámetros de fácil adquisición como lo son la porosidad y gamma ray infirió valores de permeabilidad.

La técnica de RND ha sido utilizada previamente por Hurtado et al. (2008), para inferir propiedades petrofísicas tales como permeabilidad a partir de valores experimentales de porosidad. En ésta se usaron diferentes técnicas, tales como: el modelo desarrollado por Pape et al. (1999) basado en la teoría fractal y en las ecuaciones de Kozeny–Carman, el modelo de regresión lineal para la ecuación empírica de Tixier y la técnica de redes neuronales difusas; para la predicción de la permeabilidad en un pozo ubicado en el Lago de Maracaibo. Los resultados de permeabilidad inferidos mediante RND, fueron comparados con valores de permeabilidad de núcleos previamente medidos en el área. Se encontró que el modelo dado por la red neuro difusa infiere mejor la permeabilidad que los otros modelos estudiados.

Otro de los trabajos realizados previamente que utiliza RND, es el realizado por López et al. (2009), en el cual por primera vez se aplica esta técnica a propiedades magnéticas. En este trabajo esta técnica es usada para inferir valores de cociente S a partir de datos experimentales de susceptibilidad magnética, medidos directamente en muestras pertenecientes al pozo Saltarín 1A encontrándose que las RND son una herramienta objetiva que permite hacer caracterizaciones estratigráficas de las diferentes litologías.

En trabajos anteriores se han establecido correlaciones numéricas similares a las que se busca hallar mediante este estudio, como es el caso de Harris et al. (2002), donde usando ajustes lineales simples se estableció la relación entre la tasa de acumulación de masa de sedimentos terrígenos (TMAR), $\delta^{18}\text{O}$ y cociente de goetita / goetita + hematita, en un núcleo del ODP (Ocean Drilling Program) perforado en el Atlántico tropical occidental.

En el presente trabajo y en el de Da Silva et al. (2009), se plantea por primera vez la posibilidad de establecer una relación matemática, entre los cambios climáticos y eustáticos globales, reflejados en el registro de foraminíferos béticos de $\delta^{18}\text{O}$, con dos parámetros magnéticos locales, como lo son el cociente S (CS) y la susceptibilidad magnética (χ)

medidos directamente en un número de muestras del pozo Saltarín 1A ubicado en la Cuenca Sedimentaria de los Llanos Orientales de Colombia mediante el uso de las Redes Neuronales Difusas (RND). En trabajos anteriores el registro fósil de la susceptibilidad magnética en rocas de una columna sedimentaria ha sido vinculado a cambios climáticos en el pasado (Shackleton et al., 1973; Kent, 1982; Walden et al., 1999; entre otros).

Si construimos un sistema neuro-difuso únicamente con datos de cociente S y $\delta^{18}\text{O}$, estamos partiendo de la hipótesis de que entre estos parámetros existe una relación unívoca. Sin embargo, estos valores de CS podrían verse afectados por eventos orogénicos, erosivos y climáticos, de carácter local y/o regional así como por procesos diagenéticos tardíos que hubiesen alterado las mineralogías magnéticas primarias. De esta manera, en aquellos intervalos en donde los CS estuviesen menos ligados a cambios globales, una correcta inferencia requeriría de la incorporación de otros parámetros magnéticos independientes como es el caso de los valores de χ . Por lo que esperamos que al construir un sistema difuso con valores de CS, χ y $\delta^{18}\text{O}$ obtengamos una buena inferencia.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 Ubicación Geográfica

Las muestras utilizadas en este estudio provienen del pozo petrolero Saltarín 1A, ubicado en el sector centro - oriental de la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales de Colombia (4,612°N; 70,495°W - X=1'397.795,3; Y=1'002.792,6, origen Bogotá). El pozo está localizado a aproximadamente 240 km al este del flanco oriental de la Cordillera Oriental, a 145 km al noroeste de las rocas del basamento que afloran en el Escudo de Guyana (figura 2.1).

Se dispone de 134 muestras, las cuales fueron suministradas por el Dr. Germán Bayona de la Corporación Geológica ARES (Bogotá, Colombia) y el Geólogo Alejandro Mora de HOCOL S.A. (Bogotá, Colombia). Las muestras disponibles abarcan aproximadamente 667 metros de profundidad, e interceptan las formaciones geológicas Guayabo, León y Carbonera, las cuales pertenecen a las edades geológicas de Mioceno Superior/Medio, Mioceno Medio, Mioceno Medio/Inferior, respectivamente.

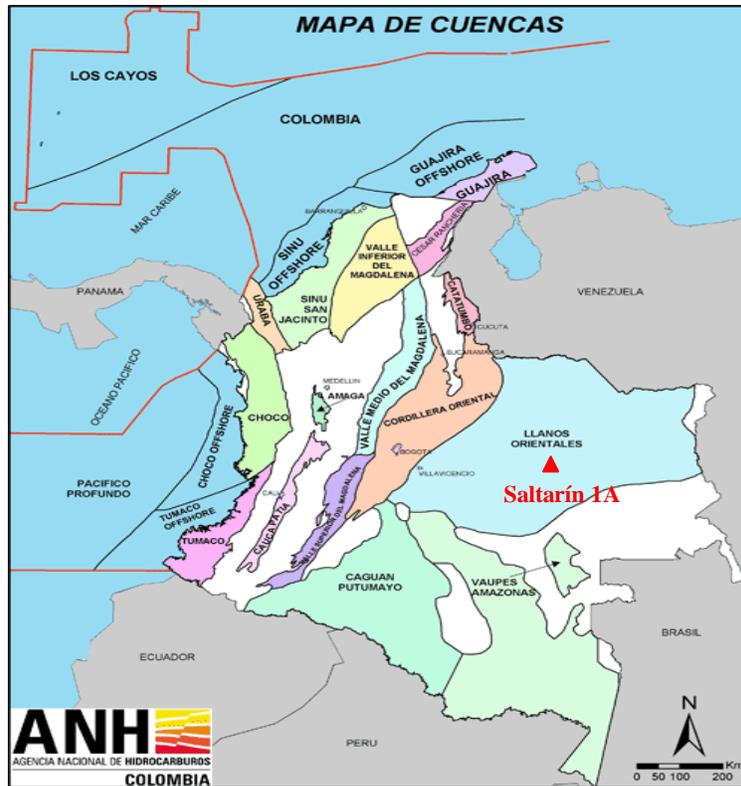


Figura 2.1.- Mapa de la ubicación geográfica del pozo petrolero Saltarín-1A Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia.

2.2 Descripción Geológica

El desarrollo de la cuenca de los Llanos Orientales Colombianos comenzó con una megasecuencia de “synrift” Triásica – Jurásica relacionada con la separación de Norte y Suramérica en el Caribe. El desarrollo de la cuenca continuó durante el Cretácico con una megasecuencia de “back-arc” en frente de la zona de subducción de los Andes. La sedimentación marina terminó abruptamente durante el Maestrichtiano temprano debido a la acreción final de la Cordillera Occidental. La acreción de la Cordillera Occidental dio origen a una megasecuencia pre-andina de antepaís (Paleoceno a Mioceno Inferior) la cual cubrió la Cuenca de los Llanos. Esta megasecuencia está dominada por sedimentos fluvio-deltaicos. La megasecuencia andina de antepaís también incluye la Formación Guayabo la cual es una clásica molasa proveniente de la erosión de la naciente Cordillera Oriental a

medida que la deformación se movió hacia el este en el piedemonte de los Llanos (Cooper, 1995).

A continuación se muestra una descripción geológica de cada una de las formaciones atravesadas por el pozo petrolero Saltarín 1A.

2.2.1 Formación Guayabo

De la Formación Guayabo se disponen 62 muestras, esta presenta un espesor de 441,8 m. Tiene un contacto inferior transicional muy gradual y se marca en la base de la primera secuencia granocreciente que suprayace la Formación León. La Formación Guayabo se depositó en un ambiente netamente continental, pasando de las facies deltáicas, hacia la base, a facies fluviales y llegando a facies aluviales. Las unidades intermedias tienen una composición de litoarenitas feldespáticas, con predominio de plagioclasa sobre feldespato potásico, líticos volcánicos, sedimentarios (algunos chert) y metamórficos, rocas sedimentarias (areniscas y rocas siliciclásticas), volcánicas (tobas), metamórficas (esquistos, filitas) e ígneas intrusivas (félsicas e intermedias) asociadas a rocas del Escudo de la Guyana ubicadas al sur-este del pozo Saltarín 1A. Los últimos 52 metros de la Formación Guayabo, están compuestos por cuarzoarenitas de grano medio con gránulos aislados.

Las rocas de la Formación Guayabo presentan una gran variedad de componentes mineralógicos como, cuarzo (monocristalino, policristalino foliado y de bordes difusos), feldespato potásico (microclina), plagioclasa, líticos (sedimentarios, volcánicos, metamórficos) y hornblenda. Estos componentes van aumentando de manera gradual en las muestras más superiores, es decir que hay un incremento en los minerales inestables hacia el tope y por lo tanto una mayor cercanía al área fuente.

2.2.2 Formación León

Se disponen de 62 muestras pertenecientes a la Formación León la cual presenta un espesor de 105,1 m. La transición de esta unidad con la unidad subyacente (Formación Carbonera) y suprayacente (Formación Guayabo), es muy gradual. Esta unidad es una secuencia homogénea de lodolitas laminadas verde claras, ocasionalmente verde oscuras y macizas, hacia la base gris verdosas y hacia el tope verde amarillentas. En los intervalos laminados son comunes los rasgos de bioperturbación vertical, horizontal y oblicua, algunos restos de material carbonoso y restos de fósiles, la mayoría de bivalvos. En la parte superior de la sucesión comienza a ganar gradualmente láminas arenosas e incrementa la bioperturbación (Bayona et al, 2008).

Las rocas de la Formación León fueron depositadas en un lago extenso y somero con ligera influencia salobre. En ella se presentan granos en gran cantidad de glauconita, un mineral típico de ambientes marinos, que sugiere episodios de ingesión de aguas salobres en el sistema lacustre.

La edad determinada por palinología para esta unidad es Mioceno Medio.

2.2.3 Formación Carbonera

Se disponen de 10 muestras pertenecientes a la parte superior de la Formación Carbonera la cual presenta un espesor de 124,1 m, ya que no realizaron la perforación de la parte inferior. El tope de esta formación está conformada por lodolitas grises claras y oscuras laminadas, pasando por lodolitas blancas macizas, e intervalos de lodolitas arenosas con clastos de cuarzo. La base de esta formación fue depositada en canales meándricos que migran rápidamente a llanuras fluviales, esto es indicado por la presencia de sucesiones granodecrecientes con areniscas conglomeráticas y conglomerados arenosos cuarzosos pasando a areniscas lodosas y lodolitas laminadas grises.

Las rocas de la Formación Carbonera son subarcosas en su mayoría y cuarzoarenitas, presentando un alto contenido de cuarzo monocristalino, feldespato potásico (microclina esporádicamente) y algunos líticos volcánicos. Las características de estos minerales indica poco transporte y que existe una fuente de aporte de sedimentos cercana, con abundante cuarzo y feldespato potásico, que corresponde a rocas ígneas intrusivas félsicas (granitos – granodioritas), las cuales forman parte del Escudo de la Guyana (Bayona et al., 2008).

La edad determinada por palinología es Mioceno Temprano a Mioceno Medio.

2.3 Ambientes de Acumulación

Las rocas pertenecientes a la base de la Formación Carbonera poseen gran cantidad de areniscas y lodolitas, lo que sugiere que fueron depositadas en un sistema de canales meandriiformes que cortaban llanuras de inundación fluviales, este sistema fue inundado por la transgresión de un lago somero con incursiones de agua salobre. Este lago fue retrocediendo gradualmente, permitiendo la formación de llanuras deltaicas. En la base de la Formación León se observa abundantes granos de glauconita, este mineral es típico de ambientes marinos, el cual nos sugiere que para esta formación hubo episodios de ingresión de aguas salobres en el sistema lacustre. A medida que el aporte de sedimento fue aumentando, el lago se fue rellenando progresivamente. Esto generó una regresión lenta del lago pasando a una facies continental como se observa en la composición de la Formación Guayabo.

En la figura 2.2 se muestra la columna estratigráfica del pozo Saltarín 1A, donde se muestra los diferentes ambientes de acumulación de las formaciones Guayabo, León y Carbonera. Sobre esta figura se destaca unas líneas de color rojo las cuales nos indica las superficies de erosión, estas implican un vacío en el registro del tiempo geológico (hiato).

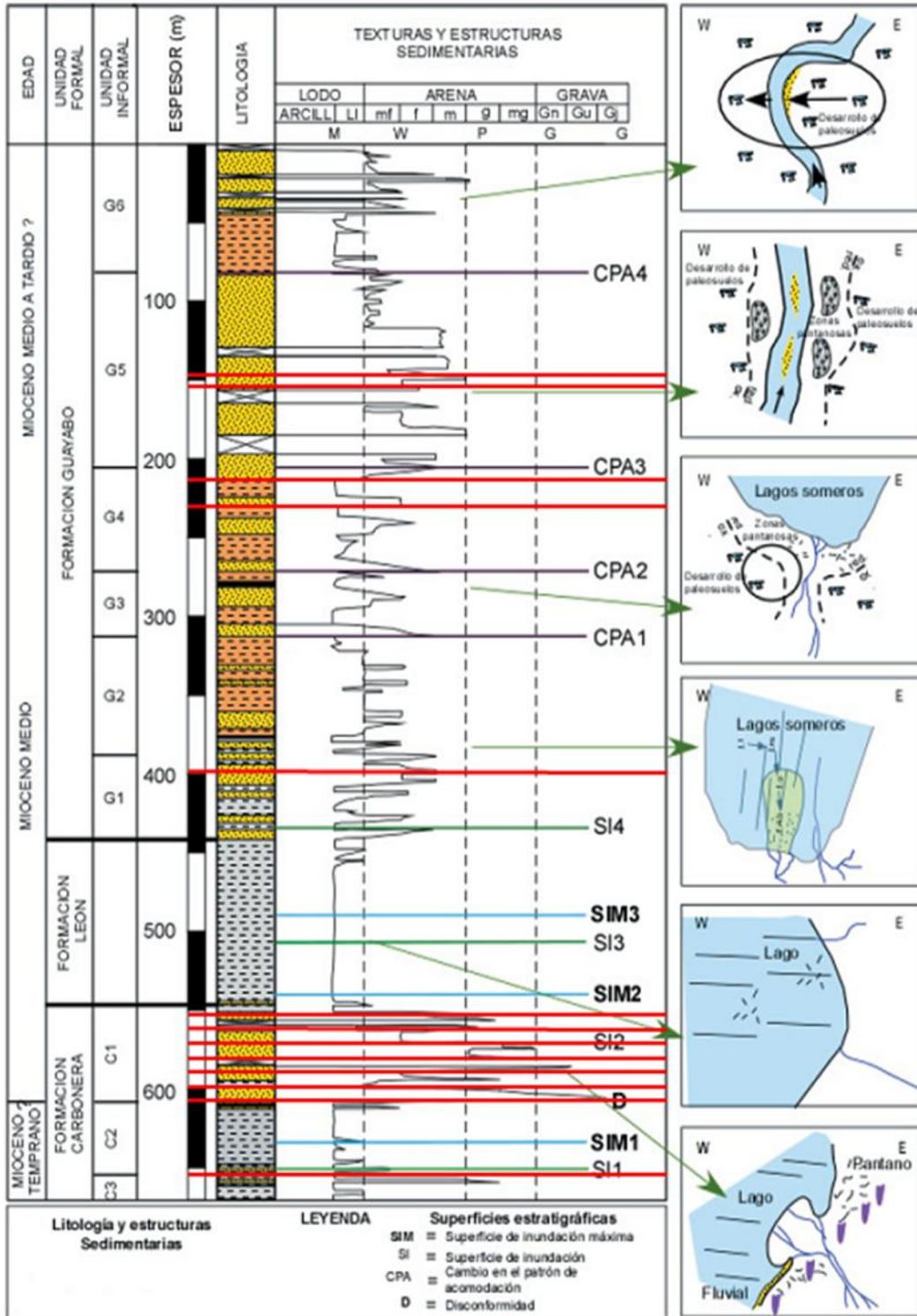


Figura 2.2.- Columna estratigráfica del pozo Saltarín 1A. (Tomado de Bayona et al, 2008)

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

En el presente trabajo especial de grado se muestra la inferencia de la variación isotópica de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) en foraminíferos bénticos a partir de dos parámetros magnéticos (cociente S y susceptibilidad magnética), medidos en un número de muestras del pozo Saltarín 1A (Cuenca Sedimentaria de los Llanos Orientales de Colombia). En este capítulo se tratarán los conceptos más importantes utilizados en la realización de este trabajo. Para esto lo hemos dividido en dos partes, en la primera se explicarán las técnicas experimentales utilizadas en las muestras del pozo Saltarín 1A, como los estudios de foraminíferos, palinología, y estudios de microscopía electrónica de barrido (SEM), así como los conceptos más relevantes relacionados con $\delta^{18}\text{O}$, cociente S y susceptibilidad magnética. En la segunda parte se expondrá todo lo referente a la técnica computacional utilizada.

3.1 Marco Teórico Experimental

Uno de los temas más importantes relacionados con este trabajo es el de la paleoclimatología cuyo objetivo es estudiar las variaciones climáticas, sus causas y dar una descripción lo más precisa posible de las características del clima para un momento determinado del pasado histórico de la Tierra. La paleoclimatología nos proporciona datos, hipótesis y teorías que ayudan al conocimiento de los mecanismos que regulan el clima del

planeta y que permite situar dentro de una perspectiva coherente la influencia del hombre sobre el clima, haciendo una clara separación de la variabilidad climática natural, y de esta manera poder diseñar modelos predictivos climáticos para el futuro.

Las variaciones climáticas ocurren a escalas de tiempo diferente, en la figura 3.1 se representan los factores más importantes del cambio climático y sus escalas temporales de influencia. Entre los factores que determinan las variaciones del cambio climático se encuentran los factores cíclicos a escala orbital y los factores tectónicos, como la deriva continental.

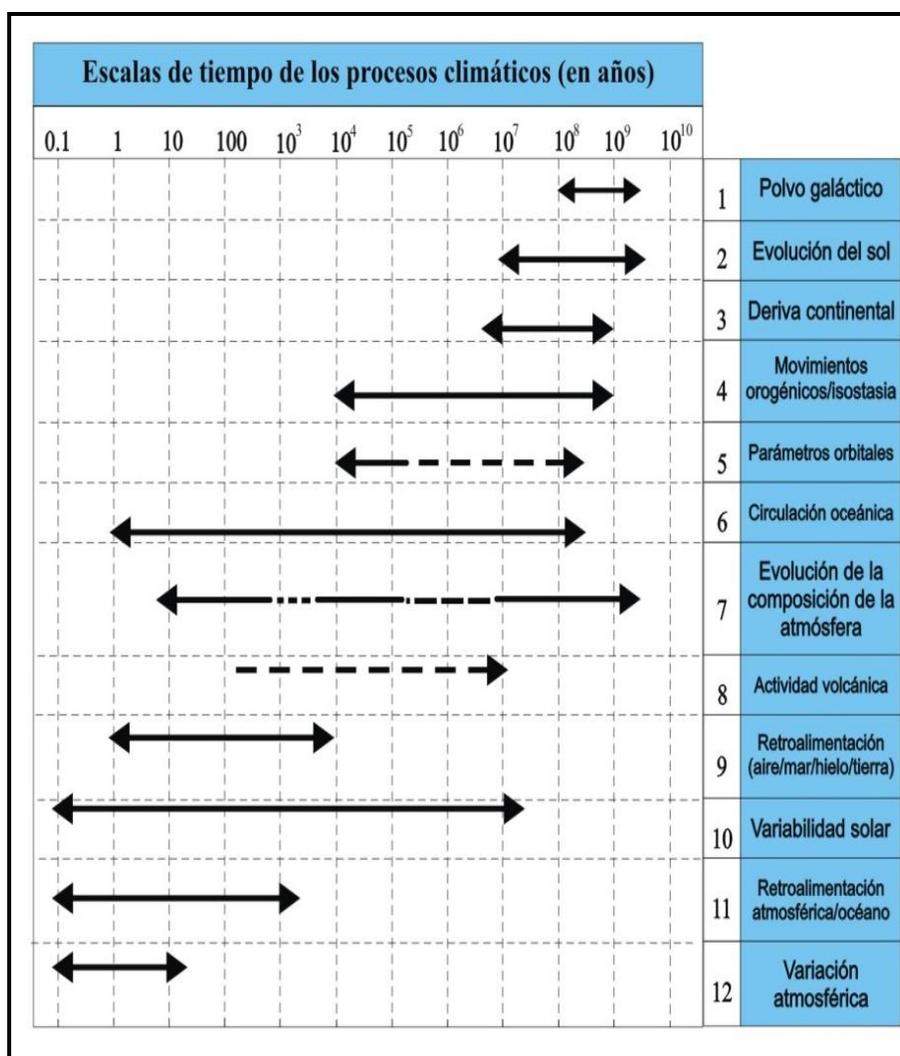


Figura 3.1.- Principales factores del cambio climático y sus escalas temporales de influencia (tomado de Moreno, 2002)

Factores cíclicos a escala orbital: teoría astronómica de Milankovitch

La teoría de Milankovitch fue publicada por el astrónomo yugoslavo Milutin Milankovitch entre 1920 y 1941, en la que explica los cambios climáticos a escala glacial-interglacial mediante las variaciones en la configuración orbital de la Tierra. Esta teoría se basa en los cambios cíclicos que experimentan tanto la órbita terrestre alrededor del sol como el eje de la Tierra, los cuales provocan variaciones en la insolación recibida a lo largo del año en latitudes determinadas. Se distinguen tres tipos de ciclos según su periodicidad:

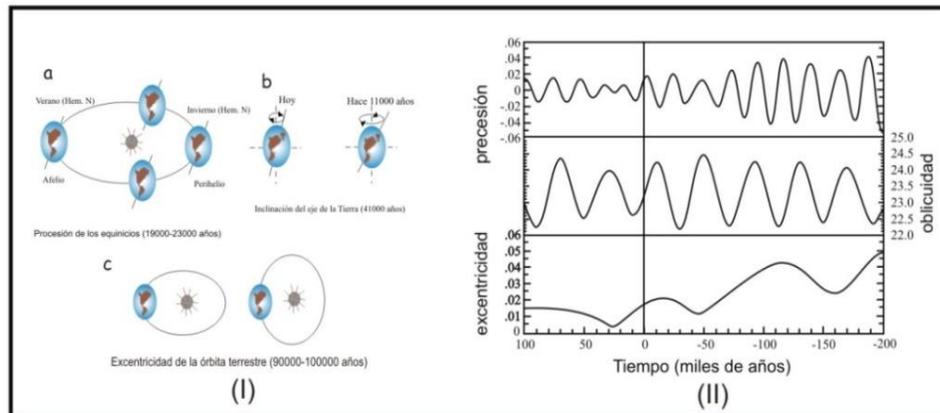


Figura 3.2.- Ciclos de Milankovitch. En la figura (I) se muestra las variaciones en los parámetros orbitales, (a) precesión; (b) oblicuidad y (c) excentricidad. En la figura (II) se muestra la duración en miles de años de estos ciclos (Modificado de Vera, 1994).

- a) Precesión (periodicidad entre 19.000 y 23.000 años): Estos ciclos están inducidos por la precesión de los equinoccios (movimiento de cabeceo del eje terrestre similar al de una peonza), que produce variaciones del perihelio, lo que ocasiona un aumento de la intensidad de las estaciones en un hemisferio y la disminución en el otro.
- b) Oblicuidad (periodicidad de 41.000 años): Se debe a cambios en la oblicuidad del eje de la tierra y en ellos los intervalos de tiempo en los que los rayos solares llegan a la tierra mas oblicuos generando que los inviernos sean mas fríos y los veranos más cálidos. El valor actual de la oblicuidad terrestre es de $23,5^{\circ}$ (el rango va de $22,2$ a $24,5^{\circ}$).
- c) Excentricidad (periodicidad entre 100.000 y 400.000 años): Se refiere a los cambios en la forma de la elipse que describe la tierra en su órbita alrededor del sol, regulando

la cantidad total de insolación que recibe la Tierra en cada momento. El valor actual de excentricidad es de 0,017 (en un rango entre 0,005 y 0,06).

Factores tectónicos: Deriva continental

Otro de los factores que influyen en la variación climática es la derivada continental, la cual hace alusión a los factores paleogeográficos, los cambios latitudinales, formación de montañas, cambios del nivel del mar, configuración y orientación de las masas continentales y océanos. La deriva continental es un proceso lento, por lo que la posición de los continentes fija el comportamiento del clima durante millones de años. Hay dos aspectos a tener en cuenta. Por una parte, las latitudes en las que se concentra la masa continental: si las masas continentales están situadas en latitudes bajas habrá pocos glaciares continentales y, en general, temperaturas medias menos extremas. Así mismo, si los continentes se hallan muy fragmentados habrá menos continentalidad.

3.1.1 Indicadores paleoclimáticos “Proxy”

Para estudiar el rango de variabilidad climática ocurrida en el planeta a lo largo de su historia, no basta con examinar los registros climáticos provenientes de mediciones hechas por el hombre (por medio de termómetros, pluviómetros, etc.) ya que estos cubren los últimos 150 años; podemos recurrir a datos obtenidos de indicadores naturales a los que se le denomina “proxy”, ya que los cambios climáticos modifican los sedimentos, la flora y la fauna dejando huellas que pueden ser utilizadas como registros de la variabilidad climática, entre los proxy se encuentran:

- Corales: Los corales construyen sus esqueletos con carbonato de calcio, un mineral que extraen de las aguas del mar. El carbonato contiene isótopos del oxígeno, así como trazas de minerales, que pueden ser usados para determinar la temperatura del agua en que el coral creció.

- **Polen fósil:** Todas las plantas que florecen producen granos de polen. Sus formas distintivas pueden ser usadas para identificar el tipo de planta del cual provienen. Como los granos de polen están bien preservados en las capas sedimentarias, un análisis de los granos de polen en cada capa nos dice qué clase de plantas crecía en el tiempo en que el sedimento fue depositado. Entonces, se pueden hacer inferencias sobre el clima basándose en los tipos de plantas encontradas en cada capa.
- **Anillos de arboles:** Debido a que el crecimiento de los árboles se ve influenciado por condiciones climáticas, los patrones en los anchos de anillos de árboles, la densidad y composición isotópica reflejan las variaciones en el clima.
- **Testigos de hielo:** Al perforar el hielo para coleccionar testigos de hielo, acumulado durante muchos siglos en las montañas y en los casquetes polares, encontramos que estos contienen polvo, burbujas de aire o isótopos de oxígeno pueden ser usados para interpretar el clima pasado en esa área.
- **Sedimentos lacustres y oceánicos:** Los testigos de sedimentos del suelo de las cuencas oceánicas o lacustres, pueden usarse para interpretar el clima pasado, ya que estos incluyen fósiles pequeñísimos y materias químicas, a partir de los cuales podemos estudiar la variación isotópica del oxígeno.
- **Parámetros magnéticos:** Mediciones magnéticas realizadas en depósitos sedimentarios conservados en diferentes configuraciones (en continentes, lagos y océanos), son utilizados para descifrar los cambios climáticos globales (Shackleton y Opdyke, 1973). En particular, la susceptibilidad magnética es utilizada ya que muestra las características climáticamente controladas (Kent, 1982). Otros parámetros magnéticos son utilizados como proxy de la variación climática como: las remanencias inducidas en laboratorio (IRM y ARM), los espectros de coercitividad, y la dependencia de la frecuencia de los datos geológicos de la susceptibilidad (Walden et al., 1999).

3.1.2 Variación isotópica de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$)

En este punto se expondrá uno de los aspectos más importantes de este trabajo, ya que representa el objetivo principal en la realización del mismo. Los isótopos de un elemento químico son átomos de un mismo elemento que tienen diferente peso atómico, esto se debe a que por lo general poseen uno o más neutrones. Esta diferencia condiciona algunas propiedades físico – químicas y termodinámicas tales como la energía de enlace, la densidad, la velocidad de reacción y difusión, entre otras. Entre los isótopos se pueden diferenciar dos tipos: los estables y los radiactivos. En los primeros su estructura atómica permanece igual a lo largo del tiempo, mientras que los radiactivos sufren un proceso de desintegración hasta alcanzar formas más estables.

Entre los isótopos estables se encuentra el oxígeno, el cual es el elemento más abundante en la tierra y se presenta en la naturaleza en tres isótopos naturales ^{16}O , ^{17}O , y ^{18}O . Siendo el más dominante el ^{16}O (99,76%), y con un pequeño porcentaje el ^{18}O (0,20%) y el ^{17}O (0,04%). Los análisis de isótopos de oxígeno sólo consideran la razón de ^{18}O a ^{16}O , presentes en una muestra debido a su abundancia y a la diferencia en las masas.

El $\delta^{18}\text{O}$, proxy usado en esta investigación, es la variación en la proporción de la masa de oxígeno con un peso atómico de 18 a la masa de oxígeno con un peso atómico de 16 presente en alguna sustancia, obtenidas del hielo polar o en muestras de calcita del océano, usados principalmente como proxy en el cambio climático. Esta relación está ligada a la temperatura del agua de los océanos antiguos, que a su vez reflejan los climas antiguos.

Para poder expresar de forma homogénea las variaciones de la relación isotópica del oxígeno se estableció una muestra patrón que sirviera de referencia. Fue por eso que surgió el “patrón medio del agua del océano” cuyas siglas en inglés son SMOW (*Standard Mean Ocean Water*) y que fue preparado originalmente por Craig en 1961 a partir de muestras de aguas de diferentes océanos tomadas a diferentes profundidades comprendidas entre 500 y 2000 m. Sin embargo, este patrón actualmente se ha agotado y la Agencia Internacional de

Energía Atómica (IAEA en inglés) fue el encargado de reproducir otro patrón de similar procedencia que se denomina VSMOW (*Viena Standard Mean Ocean Water*) y es usado a nivel mundial. Las variaciones de la relación isotópica para oxígeno, se expresan como desviaciones respecto a este patrón, dadas en “partes por mil”, según la expresión:

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{standard}}} - 1 \right) * 1000 \text{ ‰}$$

Donde el valor estándar de la muestra es: $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}} = 2005,20 \pm 0,43 \text{ ppm}$ (Baertschi, 1976).

En consecuencia valores positivos de δ indican que en la muestra hay mayor concentración del isótopo pesado correspondiente a ^{18}O que en el patrón, valores negativos de δ indica que la muestra presenta una menor concentración del isótopo pesado correspondiente a ^{18}O que en el patrón, y valores de δ iguales a 0 indican que la composición isotópica de la muestra es la misma que la del estándar.

Conexión entre el $\delta^{18}\text{O}$ y la temperatura

El ^{18}O es dos neutrones más pesado que ^{16}O y es por esto que la molécula de agua que lo contiene es más pesada en la misma cantidad. Esta requiere la adición de más energía para vaporizar una molécula de H_2^{18}O que una de H_2^{16}O . Ocurre que las moléculas de agua con más peso tienden a evaporarse del mar con mayor dificultad que las ligeras. Además, si han pasado al estado de vapor, tienden a condensarse y a volver al océano antes que las que contienen el isótopo ligero, de este modo durante la precipitación se elimina ^{18}O , dejando cada vez más rico en vapor de agua en O^{16} . Por lo que, durante los períodos de glaciación (épocas frías) las moléculas que contienen el isótopo ^{16}O , más liviano, son las que se evaporan con mayor facilidad debido a que las más pesadas se congelan primero. Así, luego de condensarse, el agua precipita nuevamente bajo la forma de nieve en las latitudes medias y altas, enriquecida en el isótopo liviano, que luego se convierte en hielo

glacial. Quedando así el agua del mar enriquecido de ^{18}O . Durante los períodos interglaciares (épocas cálidas), cuando se produce el retorno de las masas de agua de los mantos de hielo y glaciares al océano, el ^{16}O contenido en el hielo vuelve al sistema por lo que las relaciones isotópicas resultantes son más livianas, es decir, a las de las épocas frías.

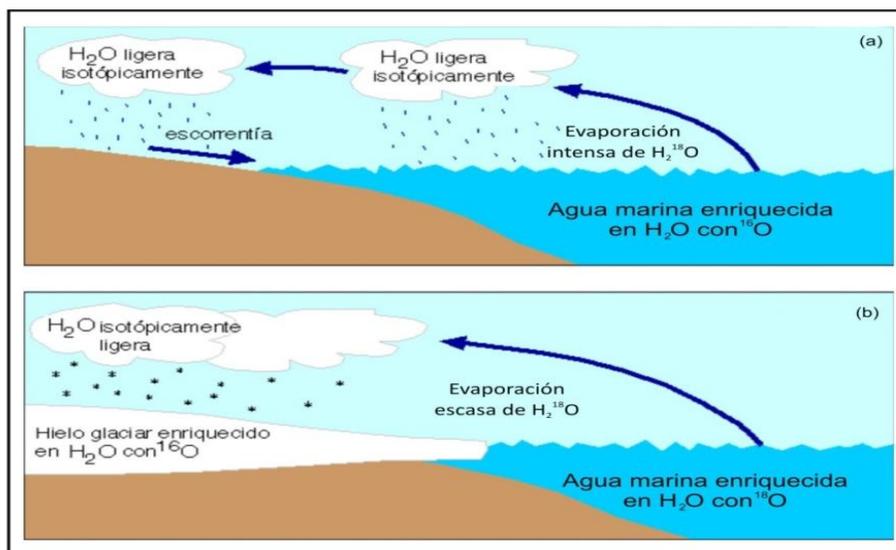


Figura 3.3.- Diferencias en las cantidades relativas de oxígeno-18 en el hielo continental y en el agua marina durante los períodos: (a) de calentamiento global (cálidos) y (b) glaciares (fríos).

Estos cambios quedan registrados en la composición isotópica de las conchas de los microorganismos marinos. Ya que estos construyen su caparazón de caliza, el cual se forma a partir de la reacción del agua con el dióxido de carbono disuelto en el agua. La fracción isotópica del caparazón dependerá de la relación isotópica del agua del mar. Lo que indica que valores altos de $\delta^{18}\text{O}$ para foraminíferos béticos estarían relacionados a bajas temperaturas y que valores bajos de $\delta^{18}\text{O}$ para foraminíferos béticos a altas temperaturas.

En las últimas décadas, a través del ODP (Ocean Drilling Program), se han hecho estudios sistemáticos de los sedimentos marinos del cual se extraen unos largos núcleos cuyas secciones contienen conchas fósiles de foraminíferos bentónicos de diferentes épocas. A partir del estudio de los isótopos de oxígeno, de estos se construyó una curva estándar de los valores del $\delta^{18}\text{O}$ (figura 3.4).

Los datos de isótopos de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) de foraminíferos bentónicos son un proxy de primer orden para climas de alta latitud, porque estos controlan los efectos combinados del volumen global del hielo y las temperaturas de aguas profundas, y ambos tienen origen en altas latitudes. Además, el $\delta^{18}\text{O}$ es una aproximación a los cambios del nivel del mar que está relacionado con el cambio del volumen del hielo continental (Harris y Mix, 2002).

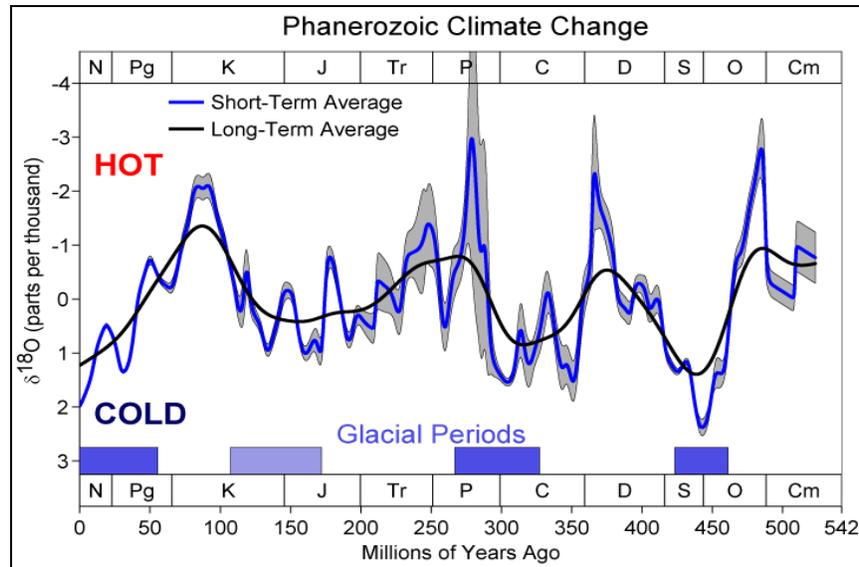


Figura 3.4.- Variación isotópica del $\delta^{18}\text{O}$ para el Fanerozoico (Tomado de Wikipedia).

3.1.3 Bioestratigrafía

La bioestratigrafía es la ciencia que se ocupa de los restos o evidencias de la vida pasada conservados en los estratos y de la organización de éstos en unidades definidas con su contenido fósil. Su objetivo es recopilar y usar la información acerca de la evolución morfológica de especies concretas para de este modo determinar su distribución estratigráfica. Esta disciplina utiliza los fósiles como una herramienta poderosa para poder definir las edades relativas de los estratos. La utilización de estos se basa en el hecho constatado de que los organismos que han poblado la Tierra a través de tiempo, han cambiado su morfología de manera permanente. Si dividimos el tiempo geológico en intervalos sucesivos podremos ver que cada intervalo está caracterizado por la presencia de

unos organismos concretos, los cuales vivieron en un tiempo concreto y ya no vuelven a aparecer, ya que la evolución es un proceso progresivo e irreversible.

La utilización de fósiles como criterio de correlación entre secciones estratigráficas y, por lo tanto, como criterio de datación de los materiales que los contienen, se debe a Smith el cual a finales del siglo XVIII expone que los fósiles no se encuentran contenidos en las rocas de manera fortuita, sino en una sucesión bien definida y pueden ser perfectamente identificables y por lo tanto las rocas formadas durante un particular intervalo temporal, pueden ser reconocidas por su contenido fósil.

Entre las disciplinas que conforman la bioestratigrafía, y que serán utilizadas para determinar las edades de las muestras disponibles, se encuentran el estudio de foraminíferos y la palinología.

Los foraminíferos son animales microscópicos, del reino protistas (seres unicelulares). Su protoplasma está diferenciado en un endoplasma y un ectoplasma del cual emergen pseudópodos retráctiles que el organismo usa para moverse, capturar sus presas y crear su esqueleto calcáreo. Estos están protegidos por un esqueleto, concha solida, de forma variada. Este esqueleto de carbonato cálcico es la característica más sobresaliente de los foraminíferos, y el motivo de que estos organismos, sean susceptibles de fosilizar con relativa facilidad. El esqueleto está constituido por cámaras interconectadas por poros llamados forámenes que, además, dan nombre al grupo. A lo largo de su vida, el foraminífero va añadiendo nuevas cámaras a su concha.

Los foraminíferos suele considerarse como el grupo más importante de los microfósiles marinos debido a que son organismos muy abundantes en los sedimentos marinos y presentan una gran diversidad de especies. Las características ecológicas, metabólicas y evolutivas, los convierte en una de las herramienta fundamentales en la datación bioestratigráfica. Sin embargo, su uso biostratigráfico es solamente parte de su potencial, ya que a través de ellos se pueden obtener datos fiables sobre la evolución ecológica, climática y físico-química de los océanos donde se encuentran.

Los foraminíferos presentan dos modos de vida claramente diferenciados: bentónico, es decir, ligados a la superficie de los fondos marinos o enterrados en ellos, y planctónico, flotando en la columna de agua. Los foraminíferos planctónicos son mucho menos diversos que los bentónicos además de presentar un menor registro geológico, ya que los primeros fósiles son del período Jurásico. Los foraminíferos bentónicos datan a finales del Precámbrico. Dos parámetros ambientales son los principales responsables en determinar la profundidad en la que un foraminífero vive y su abundancia, la disponibilidad de oxígeno y la cantidad de alimento disponible.

Las conchillas de los foraminíferos dan lugar a unos espacios llamados cámaras. El número, forma y la disposición de estas cámaras es uno de los criterios de clasificación básico en la taxonomía de estos organismos. Los foraminíferos son muy útiles para definir subdivisiones bastantes pequeñas de tiempo geológico, debido a su rápida evolución.

Por otro lado, definimos la palinología como una disciplina dedicada al estudio del polen y las esporas (palinomórfos) actual o fósil. Ésta se centra en el análisis de su morfología externa que presenta patrones estructurales diferentes, lo cual permite distinguir taxones diferentes a distintos niveles (familia, géneros, especies). Los granos de polen y de esporas tienen la capacidad de fosilizarse, de esta manera pueden ser preservados en las capas sedimentarias, los cuales pueden ser transportados por el viento, o a través de otros vectores como los animales, y depositados sobre diferentes materiales. Estos son resistentes a la degradación biológica y química, pueden soportar altas temperaturas y presiones, y preservan sus estructuras.

Estos microfósiles sedimentados a lo largo del tiempo experimentan procesos de fosilización de manera que se puede extraer, datar e identificar el polen de un determinado material y deducir así cómo era la vegetación en el pasado. Los granos de polen y las esporas tienen una forma peculiar a su especie y pueden ser usadas para identificar al tipo de planta del cual provienen y así de esta manera determinar según su especie en que tiempo vivió, para así poder determinar la edad de la secuencia sedimentaria en la cual se encuentran.

La paleopalinología se ha convertido en una disciplina que sirve de gran apoyo a otras áreas de estudio paleontológicas para la deducción de resultados paleoambientales y paleoclimáticas. Son útiles en la geología y la estratigrafía ya que permite efectuar correlaciones regionales.

3.1.4 Parámetros magnéticos

En esta sección describiremos los parámetros magnéticos utilizados en el presente trabajo, para inferir del $\delta^{18}\text{O}$, como lo son el cociente S y la susceptibilidad magnética.

3.1.4.1 Cociente S

Uno de los proxy usado en la realización de esta investigación es el cociente S, el cual es un parámetro magnético que refleja la porción de minerales magnéticos de baja coercitividad con respecto a minerales magnéticos de alta coercitividad. El cociente S nos indica la relación entre minerales de alta coercitividad como la hematita y de baja coercitividad como la magnetita presentes en una muestra de roca.

Para obtener el valor del cociente S (figura 3.5), primero se calcula la magnetización de saturación de la muestra, sometiéndola a un campo magnético intenso (generalmente de 1.5 a 5 T) en una dirección preferencial y midiendo su magnetización, este valor de magnetización es el denominado SIRM, es la IRM de saturación (IRM: magnetización remanente isothermal, la cual se adquiere por la acción de un campo magnético intenso a una temperatura constante). Posteriormente se aplica un campo en la dirección opuesta de menor intensidad (generalmente de 0.3 T) y se mide su magnetización. El valor del cociente S vendrá dado por la división del valor de magnetización que fue adquirida sometiendo la muestra al campo magnético menos intenso y en sentido opuesto, entre el valor de SIRM, mediante la ecuación:

$$S = \frac{IRM_{0.3T}}{SIRM_{1.5T \rightarrow 5T}}$$

Los valores de cociente S, van en el rango de 0 a 1. Que el valor de dicho cociente sea próximo a 0, indica que la magnetización remanente de la muestra es debido a minerales magnéticamente pobres (presencia en mayor porción de minerales de alta coercitividad) donde el mineral magnético más predominante es la hematita. Mientras que valores cercanos a 1 indica la presencia de minerales altamente magnéticos (presencia en mayor porción de minerales de baja coercitividad), donde el mineral magnético dominante es la magnetita (Evans y Heller, 2003).

El cociente S es un parámetro importante tanto en la geofísica como en la geología, ya que a partir de él podemos:

- Estimar la mineralogía magnética de la muestra (porción relativa de hematita sobre magnetita).
- Estimar el tipo de ambiente: oxidante - reductor.

La hematita es estable en ambientes oxidantes, lo que nos indica que al obtener valores de cociente S próximos a 0 estaríamos en presencia de un ambiente oxidante.

La magnetita es estable en ambientes reductores, lo que nos indica que al obtener valores de cociente S próximos a 1 estaríamos en presencia de un ambiente reductor.

- Estimar los cambios del nivel del mar:

Los ambientes oxidantes son característicos de sedimentación en aguas someras.

Los ambientes reductores son característicos de sedimentación en aguas profundas.

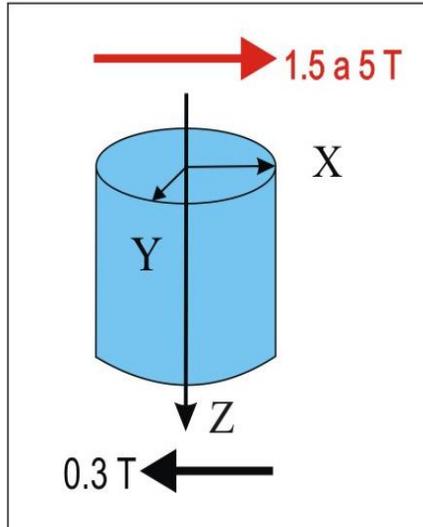


Figura 3.5.- Aplicación de dos campos antiparalelos para la determinación del cociente S.

Podemos establecer una relación entre el cociente S y la variación isotópica del oxígeno $\delta^{18}\text{O}$, ya que en épocas glaciares donde se da un descenso del agua del mar (regresión) y el $\delta^{18}\text{O}$ toma valores altos; lo que nos indica que para valores de cociente S cercanos a 0 le correspondería valores de $\delta^{18}\text{O}$ altos. Por el contrario en épocas de calentamiento global donde se da un ascenso del agua del mar (transgresión) los valores de $\delta^{18}\text{O}$ son bajos; lo que nos indica que para valores de cociente S próximos a 1, le correspondería valores de $\delta^{18}\text{O}$ bajos.

3.1.4.2 Susceptibilidad Magnética

Al introducir un material en una región en la cual existe un campo magnético, este se magnetiza y la magnitud de la magnetización dependerá de la intensidad del campo. La relación entre la magnitud de magnetización del material M, está relacionada con el campo externo aplicado H, de la siguiente manera:

$$B = H + 4\pi M \quad (cgs)$$

Donde B es la inducción magnética del material, M la magnetización del material y H el campo magnético externo aplicado.

Las propiedades magnéticas de una sustancia se caracterizan, no solo por la magnitud de M, sino también por la forma en que ésta varía con H. El cociente de estas dos cantidades se denomina susceptibilidad magnética y se representa por el símbolo χ :

$$\chi = \frac{M}{H}$$

La susceptibilidad magnética de una roca dependerá directamente de la forma, tamaño y del tipo de granos que la conforman y por ende de la magnetización remanente, así como también de la magnitud del campo externo. Rocas con un alto contenido de magnetita, tienen una susceptibilidad magnética más alta que rocas con menos contenido de magnetita. De esta manera, la susceptibilidad magnética es una medida de la atracción total que ejerce un campo magnético dado un mineral (Dearing, 1999).

Mediante estudios recientes se han identificado variaciones climáticas a partir de registros de mineralogía magnética, validados a través de la comparación con registros independientes de datos geoquímicos (como los de $\delta^{18}\text{O}$). El análisis de susceptibilidad magnética, es una de las herramientas de investigación utilizada para reconstruir estas variaciones climáticas ocurridas a lo largo de la historia de la Tierra. Se ha determinado que para sedimentos lacustres, en épocas glaciales el contenido magnético de los suelos es mayor que en épocas de interglacial, ya que la aridez y las bajas temperaturas reducen la vegetación y el desarrollo del suelo, mientras que la erosión produce una sedimentación intensa. Se dan pocas alteraciones diagenéticas de las fases magnéticas primarias, y los sedimentos producidos muestran una alta susceptibilidad magnética. Por el contrario, durante las épocas interglaciales se da un incremento en la temperatura y aumenta la humedad, favoreciendo el crecimiento de la vegetación y la formación del suelo, por lo que se reduce la erosión mientras que la productividad orgánica es realzada. El grado de alteración de las fases magnéticas primarias, en un proceso de diagénesis temprana, el cual está ligado a la composición de la mezcla de agua y sedimentos. En tales condiciones la

titanomagnetita primaria se disuelve parcial o totalmente precipitando otros minerales de magnetización más baja y menor susceptibilidad tales como los sulfuros de hierro. Produciéndose sedimentos que muestran niveles de susceptibilidad bajos (Evans y Heller, 2003).

De esta manera, la relación entre la susceptibilidad magnética medida en sedimentos lacustres y la variación isotópica del oxígeno $\delta^{18}\text{O}$ medidos en foraminíferos béticos sería en el mismo sentido, ya que sabemos que en épocas glaciares el $\delta^{18}\text{O}$ y la χ toman valores altos. En épocas interglaciares los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y de χ son bajos.

Por otra parte, la presencia de minerales magnéticos secundarios generados a partir de la oxidación, reducción, deshidratación o recristalización de minerales magnéticos primarios constituye un fuerte indicador de posibles magnetizaciones secundarias, adquiridas con posterioridad a la formación de la roca en estudio. En las últimas décadas, se han realizado estudios en los cuales vinculan las anomalías en la susceptibilidad magnética con procesos diagenéticos tardíos. Estas anomalías podrían ser debido a concentraciones de magnetita autigénica y/o sulfuros de hierro, producto de la alteración química de óxidos de hierro primario en condiciones reductoras inducidas por un reservorio subyacente (Foote, 1996; Saunders y Terry, 1985; Aldana et al., 1999; Costanzo Álvarez et al., 2000; Díaz et al, 2000). Los hidrocarburos generados y/o entrampados en profundidad, migran en pequeñas cantidades a la superficie y producen, a través de interacción geoquímica, alteraciones en las mineralogías magnéticas de los sedimentos.

Mediante la técnica de microscopía electrónica, podemos observar agregados esféricos de minerales submicrónicos (framboides), los cuales son un indicio de magnetizaciones secundarias.

3.1.4.3 Microscopio Electrónico de Barrido

El microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés para *Scanning Electron Microscopy*), es un instrumento que permite la observación y caracterización

superficial de materiales, dando información morfológica del material analizado. Este fue inventado en 1931 por Ernst Ruska, y utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen.

En el microscopio electrónico de barrido la muestra es recubierta con una capa de metal delgado, y es barrida mediante un haz de electrones. Es necesario acelerar los electrones en un campo eléctrico, para aprovechar de esta manera su comportamiento ondulatorio, lo cual se lleva a cabo en el cañón del microscopio. Los electrones acelerados salen del cañón, y son enfocados por las lentes condensadoras, cuya función es reducir la imagen del filamento, de manera que incida en la muestra un haz de electrones lo más pequeño posible (para así tener una mejor resolución). Con las bobinas deflectoras se barre este fino haz electrones sobre la muestra, punto por punto y línea por línea. Cuando el haz incide sobre la muestra, se producen muchas interacciones entre los electrones del mismo haz, y los átomos de la muestra. Entre las interacciones fundamentales en el microscopio electrónico de barrido están los electrones secundarios, los cuales son electrones de baja energía (decenas de eV) que resultan de la emisión por parte de los átomos constituyentes de la muestra (los más cercanos a la superficie) debido a la colisión con el haz incidente. A partir de estos electrones se generan las imágenes de microscopios de barrido.

La intensidad de la emisión de los electrones secundarios varía en función del ángulo que forma el haz incidente con la superficie del material, es decir, depende de la topografía de la muestra. De esta manera, la señal emitida por los electrones se recoge mediante un detector y se amplifica para cada posición. El aumento de la imagen producido por el microscopio de barrido resulta de la relación entre las dimensiones de la imagen final y el área de la muestra que ha sido barrida.

3.1.4.4 Espectroscopía de Rayos X por Dispersión en Energía (EDX)

El espectro de radiación X emitido por un mineral, puede ser utilizado para hacer un microanálisis químico mediante espectrometría de dispersión en energía.

Para estimular a la muestra de tal manera que se produzca la emisión de rayos X, sobre dicha muestra debe incidir un haz de partículas de alta energía, tal como un haz de electrones. El haz incidente, excita un electrón en la muestra, el cual puede escapar del átomo produciéndose una vacancia, la cual es ocupada por electrones de capas más externas, esta transición de la capa más externa a una más interna puede generar radiación X. La cantidad y energía de los rayos X emitidos por una muestra puede ser medida por un espectrómetro de energía dispersiva. Como la energía de los rayos X son característicos de la diferencia de energía entre los dos depósitos, y de la estructura atómica de los elementos de los que fueron emitidos, esto permite establecer la composición elemental de la muestra.

Hay cuatro componentes principales de la detección de EDX: la fuente del haz, el detector de rayos X, el pulso de procesador, y el analizador. Sin embargo, los sistemas EDX son comúnmente encontrados en los microscopios electrónicos de barrido (SEM - EDX). Un detector de EDX se utiliza para convertir la energía de rayos X en señales de voltaje, esta información es enviada a un procesador de pulso, que mide las señales y los pasa a un analizador de visualización de datos y análisis.

En la geología y en la geofísica la espectroscopia de dispersión de rayos X se usa habitualmente en micropaleontología, diagénesis y determinación de texturas en granos, y mineralogía.

3.2 MARCO TEÓRICO COMPUTACIONAL

La inferencia del $\delta^{18}\text{O}$ se realizará mediante el uso del modulo ANFIS de las Redes Neuronales Difusas (RND). Las RDN es la combinación entre los algoritmos de lógica difusa y redes neuronales artificiales. En esta sección explicará cada uno de estos algoritmos, así como la hibridación de ambos.

3.2.1 Lógica Difusa

La lógica difusa ha adquirido importancia en los últimos años por la variedad de sus aplicaciones, las cuales van desde el control de complejos procesos industriales, hasta el diseño de dispositivos artificiales de deducción automática, pasando por la construcción de artefactos electrónicos de uso doméstico, así como también sistemas de diagnóstico. En la geociencia, la lógica difusa ha sido usada en varios trabajos aplicándose a parámetros petrofísicos tales como rayos gamma en rocas, contenido de lutita, porosidad, permeabilidad, etc., para así obtener información geológica adicional de un área en particular (Finol et al., 2001; Hambalex, 2003 y Hurtado et al., 2008).

A diferencia de la teoría de lógica clásica la cual solo admite dos opciones, la pertenencia o no de un elemento a un conjunto; la teoría de la lógica difusa permite la pertenencia parcial a un conjunto definida mediante una función de pertenencia. La lógica difusa descansa en la idea de que en un instante dado, no es posible precisar el valor de una variable x , sino tan solo conocer el grado de pertenencia de cada uno de los conjuntos en que se ha particionado el rango de variación de la variable. El grado de pertenencia se cuantifica mediante la función de pertenencia $\mu(x)$ (López, 2005).

Conjuntos Difusos

Un conjunto difuso es una colección de objetos denominado universo del discurso, que representa una clase o concepto y queda caracterizado por una función de pertenencia o inclusión, que toma valores en el intervalo $[0,1]$ y asigna a cada objeto un valor de ese intervalo, es decir, un grado de pertenencia al conjunto difuso. De esta manera, los conjuntos difusos pueden ser considerados como una generalización de los conjuntos clásicos.

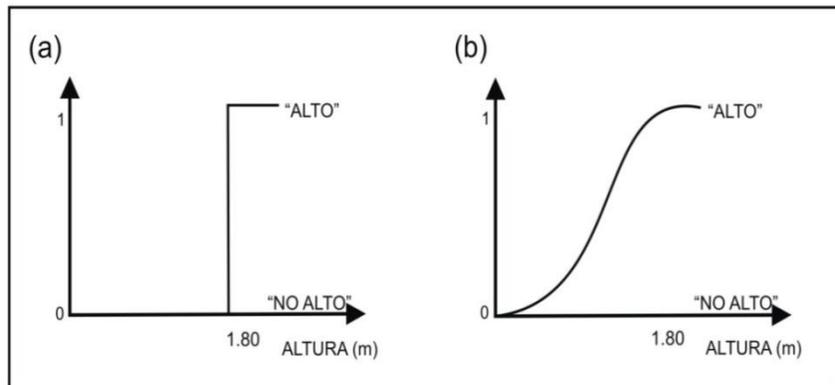


Figura 3.6.- Conjuntos lógicos, (a) visión de la lógica clásica y (b) visión de la lógica difusa.

Funciones de Pertenencia

Cada elemento del universo es miembro en alguna medida del conjunto difuso; la función que asigna a cada elemento del universo un valor de pertenencia a dicho conjunto se denomina función de pertenencia $\mu(x)$. Formalmente, un conjunto clásico A, en un universo U, se puede definir de varias formas, enumerando los elementos que pertenecen al conjunto, especificando las propiedades que deben cumplir los elementos que pertenecen a ese conjunto o en términos de la función de pertenencia $\mu(x)$:

$$\mu_A = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases}$$

Un conjunto difuso en el universo U se caracteriza por una función de pertenencia $\mu(x)$ que toma valores en el intervalo [0,1]. Se dice entonces que un conjunto difuso A está integrado por componentes x tales que:

$$A = \{x, \mu_A(x) | x \in X\}$$

La forma de la función de pertenencia utilizada dependerá del criterio aplicado en la resolución de cada problema, la única condición que debe cumplir es que tome valores entre 0 y 1 y sea continua. Hay diversas expresiones que se utilizan como función de pertenencia, algunas de ellas se muestran en la figura 3.7.

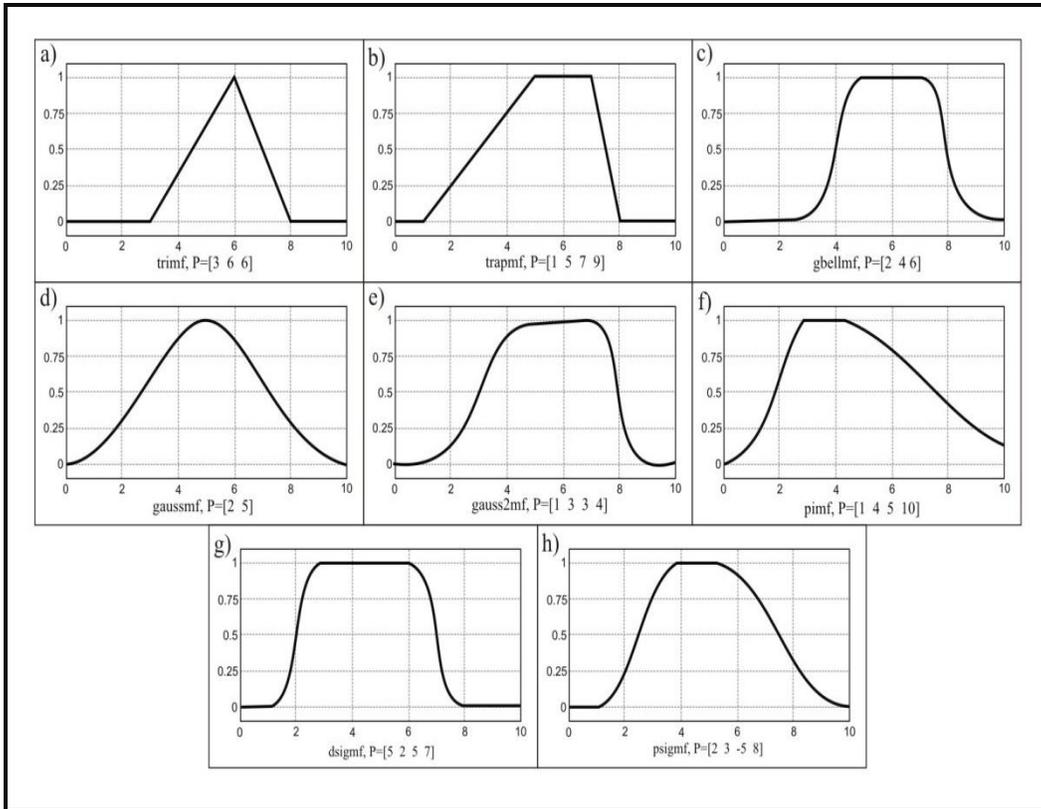


Figura 3.7.- Tipos de funciones de pertenencia (membership function, mf). (a) trimf, (b) trapmf, (c) gbellmf, (d) gausmf, (e) gauss2mf, (f) pimf, (g) dsigmf, (h) psigmf (Tomado de Fuzzy Logic Toolbox, The MathWorks Inc, 2000)

A continuación se describen las ocho funciones de pertenencia que se utilizarán en este estudio:

- a. **Función de pertenencia triangular (trimf):** Es adecuada para modelar propiedades con un valor de inclusión distinto de cero para un rango de valores estrecho entorno a un punto b. Está definido por tres parámetros a, b y c; y viene dada por:

$$tri(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$

- b. **Función de pertenencia trapezoidal (trapmf):** Resulta adecuada para modelar propiedades que comprenden un rango de valores. Está definida por cuatro parámetros a, b, c y d; viene dada por:

$$\text{trap}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$$

- c. **Función de pertenencia campana generalizada (gbellmf):** Está representada por la función campana generalizada y está definida por tres parámetros a, b y c; viene dada por:

$$\text{gbell}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}}$$

- d. **Función de pertenencia gaussiana (gaussmf):** Está representada por la función gaussiana generalizada que depende de dos parámetros σ y c; viene dada por:

$$\text{gauss}(x; \sigma, c) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^2}$$

- e. **Función de pertenencia gaussiana de dos caras (Gauss2mf):** Se representa por la misma expresión que la función de pertenencia gaussiana generalizada, con la diferencia de que depende de otros dos parámetros, cada par de ellos modifica un lado de la curva gaussiana.
- f. **Función de pertenencia π (pimf):** Tiene forma de campana y resulta adecuada para conjuntos definidos en torno a un valor. Viene dada por:

$$\pi(x; c, l) = \begin{cases} S\left(x; c - \lambda, c - \frac{\lambda}{2}, c\right) & x \leq c \\ 1 - S\left(x; c, c + \frac{\lambda}{2}, c + \lambda\right) & x \geq c \end{cases}$$

- g. **Función de pertenencia diferencia sigmoidal (dsigmf):** Viene dada por la suma de funciones sigmoideas. Esta función depende de los parámetros a y c ; y viene dada por la siguiente expresión:

$$dsig(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$$

- h. **Función de pertenencia producto sigmoidal (psigmf):** Viene dada por la multiplicación de dos funciones sigmoideas, cada una de las cuales se representan por la última expresión mostrada, pero con valores distintos de sus parámetros característicos.

Reglas Difusas

Las reglas difusas son un conjunto de proposiciones del tipo SI-ENTONCES que modelan el problema que se quiere resolver. Una regla difusa simple tiene la forma:

$$\text{“Si } x \text{ es a } A \text{ e } y \text{ es a } B, \text{ entonces } f_i = ax_i + by_i + c\text{”}$$

Donde A y B son conjuntos difusos definidos en los rangos de “ x ” e “ y ” respectivamente. Una regla difusa expresa una relación entre los conjuntos A y B cuya función característica sería $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$ y representa lo que conocemos como implicación lógica.

La base de reglas suele agrupar todas las reglas que se necesitan para representar todo el conocimiento conocido de la relación entre los antecedentes y los consecuentes. Se puede representar como una tabla de reglas o como una memoria asociativa difusa, que son

matrices que representan la consecuencia de cada regla definida para la combinación de dos entradas.

Hay dos tipos de formato para las reglas difusas:

- Modelo Mamdani: Tanto el antecedente como el consecuente de la regla son conjuntos difusos.
- Modelo Takagi - Sugeno: Es un modelo difuso preciso, que se centra en la precisión. El consecuente de la regla es una función de salida, combinación lineal de las variables de entrada o una constante.

3.2.2 Redes Neuronales Artificiales

Las redes de neuronas artificiales son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas en una red que colabora para reproducir un estímulo de salida. Entre sus características se puede destacar, que es capaz de procesar a gran velocidad grandes cantidades de información, combinarla o compararla con la información almacenada y dar respuestas adecuadas.

Las redes neuronales están formadas por una serie de capas de neuronas que están unidas entre sí mediante sinapsis. Las neuronas artificiales como unidades independientes no son muy eficaces para el tratamiento de la información y se agrupan en estructuras más grandes. La distribución de neuronas dentro de la red se realiza formando niveles o capas de un número determinado de neuronas cada una. A partir de su situación dentro de la red se pueden distinguir tres tipos de capas, las de entrada (reciben la información desde el exterior), las de salida (estas envían la información hacia el exterior) y las capas ocultas (son capas que solo sirven para procesar información y comunicar otras capas). Las capas de entrada y de salida no son válidas para producir procesamiento, y son usadas solo como sensores.

A continuación se describen los elementos que componen una neurona artificial (figura 3.8):

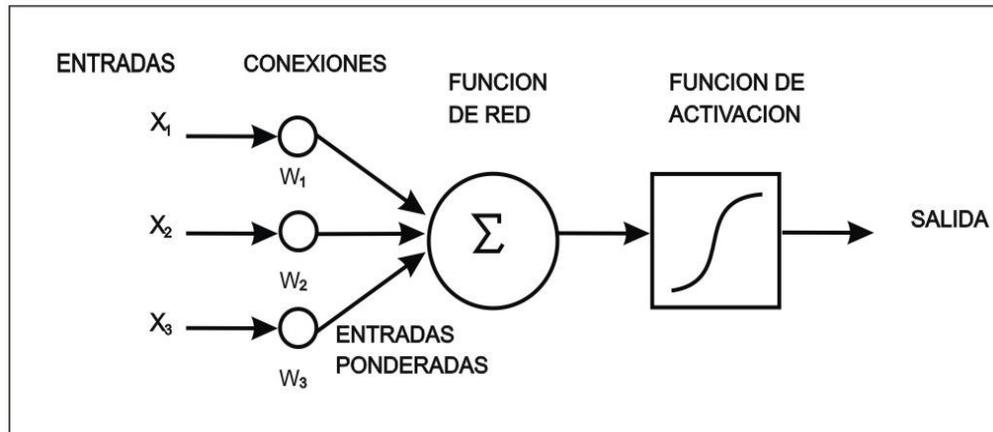


Figura 3.8.- Elementos que componen una neurona artificial.

- **Conjunto de entradas.** Las entradas de una neurona. Estas pueden ser provenientes del exterior o de otras neuronas artificiales.
- **Peso sinápticos.** Define la fuerza de conexión entre dos neuronas. Los pesos sinápticos pueden tomar valores positivos, negativos o cero. En caso de una entrada positiva, un peso positivo actúa como excitador, mientras que un peso negativo actúa como inhibidor. En caso de que el peso sea cero, no existe comunicación entre el par de neuronas. Mediante el ajuste de los pesos sinápticos la red es capaz de adaptarse a cualquier entorno y realizar una determinada tarea.
- **Función de propagación.** Integra la información proveniente de todas las neuronas y proporciona el valor del potencial de la neurona. Generalmente como función se utiliza la suma ponderada de las entradas multiplicadas por su peso.
- **Función de activación.** Provee el estado de activación de la neurona. Puede no existir, siendo en este caso la salida la misma función de propagación.

- **Función de salida.** Nos da la salida, generalmente la función utilizada es la identidad, es decir, la salida será el grado de activación.

3.2.3 Redes Neuronales Difusas

Las teorías de conjuntos difusos y la lógica difusa tratan de imitar el razonamiento y comportamiento humano, por otro lado, los modelos de redes neuronales artificiales son herramientas que emulan la arquitectura y forma de representación de la información en el cerebro humano. Tratando de potenciar las ventajas de ambos y poder construir un sistema con más “inteligencia”, se realizó la integración de estos dos paradigmas. Para algunas aplicaciones se ha encontrado soluciones que integran estos dos enfoques, los sistemas neurales difusos, que resultaron más eficientes que las implementaciones clásicas de redes neuronales o lógica difusa por separado.

Las redes neuronales difusas se refieren a un híbrido entre las redes neuronales artificiales y la lógica difusa. Los sistemas neuro difusos combinan el tipo de razonamiento de los sistemas difusos, similares al razonamiento humano, con la estructura conexionista de las redes neuronales.

La forma en que estos sistemas incorporan el razonamiento humano es a través de conjuntos difusos (fuzzy sets) y un modelo lingüístico formado por un conjunto de reglas difusas “si antecedente, entonces consecuente” (Moya, 2007). El aprendizaje de Redes Neuronales proporciona una buena forma de ajustar el conocimiento experto y generar automáticamente reglas difusas y funciones de pertenencia o idoneidad para ajustarse a ciertas especificaciones y reducir el tiempo de diseño y los costes. Por otro lado, la Lógica Difusa aumenta la capacidad de generalización de las Redes Neuronales proporcionando salidas más fiables cuando se necesita extrapolar más allá de los datos de entrenamiento.

3.2.4 ANFIS (Adaptative Neuro Fuzzy Inference System)

En 1993 J. R. Jang desarrolló un sistema de razonamiento difuso planteado como una red de tipo neuronal y diseñado con la capacidad de aprendizaje de dicha red. Un sistema ANFIS engloba las mejores características de los sistemas difusos y de las redes neuronales. De los primeros utiliza la representación del conocimiento previo en un conjunto de restricciones para reducir el espacio de búsqueda de optimización, mientras que de las redes neuronales emplean la adaptación de propagación inversa a la red estructurada para automatizar el ajuste de los parámetros.

Un modelo ANFIS es un modelo híbrido adaptativo donde las reglas se aplican siguiendo una estructura de red tipo neuronal que puede ser interpretada como una red neuronal con parámetros difusos. Las capacidades adaptivas de las redes ANFIS las hacen directamente aplicables a una gran cantidad de áreas.

Este tipo de red está direccionada hacia delante (feed forward) y consiste en nodos y enlaces direccionales. Los nodos son adaptivos si sus salidas dependen de sus entradas o de los parámetros modificables de la función interna del nodo. Una red adaptiva tiene alguno o todos sus nodos adaptivos, es decir, que la salida de los mismos depende de los parámetros que pertenecen a éste y la regla de aprendizaje específica que debe cambiar en los parámetros para minimizar la medida de error. El conjunto de parámetros de una red adaptiva es la unión de los conjuntos de parámetros de cada nodo adaptivo. Para conseguir una relación entrada-salida, los parámetros de la red se determinan con base en datos de entrada que se denominan datos de entrenamiento dentro de un proceso de aprendizaje, de manera similar a como se hace en las redes neuronales. La regla básica de aprendizaje de las redes adaptivas se basa en un proceso de optimización generalmente del tipo de gradiente descendente y la regla de la cadena para propagar el error hacia las capas internas de la red.

3.2.4.1 Arquitectura de ANFIS

Este sistema híbrido neuro difuso es funcionalmente equivalente al mecanismo de inferencia Takagi - Sugeno (T-S). Para este sistema de inferencia de primer orden hay un conjunto de reglas difusa SI-ENTONCES en las que los niveles de activación se calculan utilizando el operador AND que puede modelarse utilizando un operador t-norma. La salida del modelo se obtiene por la normalización de los grados de activación de las reglas multiplicando por la salida individual de cada regla.

Este tipo de inferencia se representa por medio de una red neural híbrida adaptable con 5 capas, donde cada capa realiza una operación del mecanismo de inferencia difusa. Todos los nodos de una misma capa tienen la misma función, los nodos caracterizados como cuadrados en la figura 3.9 son adaptables, es decir, sus parámetros son ajustables; y los nodos representados como círculos efectúan operaciones.

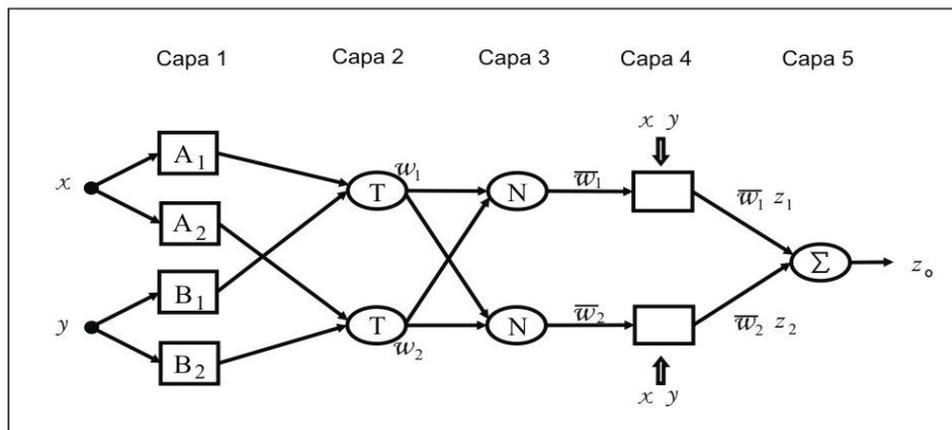


Figura 3.9.- Red neural híbrida adaptable (Tomado de Moya, 2007).

Partimos de la suposición de que el sistema de inferencia difusa tiene dos entradas (x e y) y una salida (z) y de que la base de reglas tiene dos reglas difusas si – entonces del tipo Takagi – Sugeno:

Regla 1: Si x es A_1 e y es B_1 , entonces $z_1 = p_1x + q_1y + r_1$

Regla 2: Si x es $a A_2$ e y es $a B_2$, entonces $z_2 = p_2x + q_2y + r_2$

Donde en el antecedente de las reglas se tienen los parámetros de las funciones de pertenencia, y en el consecuente las salidas individuales de cada regla las cuales se obtienen como una combinación lineal entre los parámetros del antecedente de cada regla, es decir, una combinación lineal de las entradas que se le suministra al sistema.

En el siguiente esquema se ilustra el mecanismo de razonamiento de ANFIS con estas dos reglas difusas:

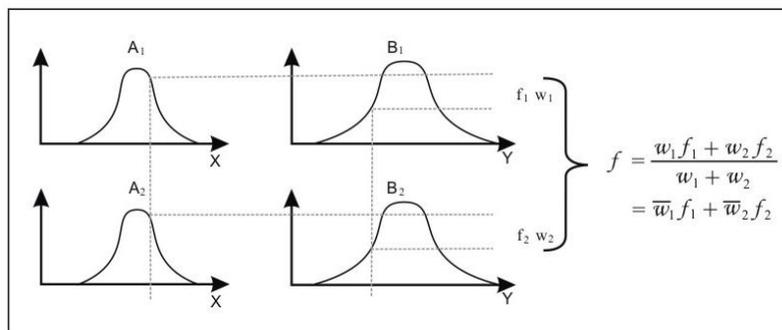


Figura 3.10.- Mecanismo de razonamiento de ANFIS con dos reglas difusas.

Las cinco capas de la estructura de la red ANFIS (figura 3.9) tienen una misión concreta dentro del sistema:

Capa 1: Las entradas se corresponden con las entradas al sistema (x e y) y la salida es el grado de pertenencia para el cual la variable de entrada satisface el término lingüístico A_i asociado al nodo.

$$O_i^1 = A_i(x)$$

Esta es una de las capas que tienen parámetros ajustables, en este caso los parámetros son los que representan las particiones difusas usadas en las reglas, es decir, se corresponden con los parámetros de las funciones de pertenencia de las entradas y el

numero de reglas usadas. Los parámetros de dichas funciones (constantes que las caracterizan) son los que se conocen como parámetros del antecedente. Las funciones de pertenencia $\mu(x)$ pueden ser de cualquier tipo, entre las que se encuentran las zdiscutidas anteriormente.

Capa 2: Cada nodo calcula el grado de activación de la regla asociada al mismo. Ambos nodos están representados por T en el dibujo porque pueden representar cualquier T-norma para modelar la operación lógica AND. El grado de activación de la regla se obtiene mediante la operación entre las señales de entrada (salida de los nodos de la capa 1), aunque puede utilizarse un operador T-norma para calcularlo.

$$O_i^2 = w_i = A_i(x) \cdot B_i(x), \quad \text{para } i = 1, 2, \dots$$

Capa 3: Cada nodo de la capa 3 está representado por N en el dibujo de forma que se indica la normalización de los grados de activación. Su salida es el grado de activación normalizado (respecto a la suma de los grados de activación) de la regla i.

Cada nodo se corresponde con una de las reglas que se han introducido en el sistema, igual que los nodos de la capa anterior.

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad \text{para } i = 1, 2, \dots$$

Capa 4: La salida de los nodos se corresponde con el producto entre el grado de activación normalizado (salida de la capa 3) por la salida individual de cada regla (calculada por los nodos de esta capa).

$$O_i^4 = \bar{w}_i \cdot f_i = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i), \quad \text{para } i = 1, 2, \dots$$

Donde p_i , q_i y r_i forman el conjunto de parámetros del consecuente. Estos parámetros, son los coeficientes de las funciones lineales que forman el consecuente de las reglas. Son parámetros ajustables, como los de la capa 1.

Capa 5: Tiene un único nodo que calcula la salida total del sistema como la suma de todas sus señales de entradas individuales.

$$o^5 = z_0 = \sum_i \bar{w}_i \cdot z_i$$

3.2.4.2 Aprendizaje del ANFIS

En un modelo ANFIS hay que entrenar dos conjuntos de parámetros: los del antecedente (constantes que caracterizan las funciones de pertenencia) y los del consecuente (coeficientes de las funciones lineales del consecuente de las reglas). Los algoritmos de aprendizaje que suelen emplearse son de gradiente descendente para optimizar los parámetros del antecedente y el algoritmo de mínimos cuadrados para determinar los parámetros lineales del consecuente, debido a esta combinación, la regla de aprendizaje se conoce como “regla de aprendizaje híbrido”.

Para poder aplicar este aprendizaje en grupo, en cada época de entrenamiento se debe ejecutar un paso forward y otro backward. En el paso forward, los parámetros de las funciones de pertenencia de la capa 1 se inicializan, sólo en el primer paso de entrenamiento, y se presenta un vector de entrada-salida, se calculan las salidas del nodo para cada capa de la red y se obtienen los parámetros del consecuente en la capa 4 usando el método de mínimos cuadrados. Con los parámetros del consecuente identificados se calcula el error como la diferencia entre la salida obtenida en la red y la salida deseada (que se presentó al sistema en los pares de entrenamiento). Para medir el error de entrenamiento suele emplearse la suma de errores cuadráticos. En el paso backward, se propagan las señales de error desde la salida, en dirección hacia las entradas. Para cada dato de entrenamiento se acumula el vector gradiente. Al final de este paso para todos los datos de entrenamiento, los parámetros en la capa 1 (parámetros de las funciones de pertenencia) se actualizan por el método gradiente descendente en el que, se multiplica cada parámetro por una magnitud proporcional a la derivada del error respecto a ese parámetro.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO EXPERIMENTAL

4.1 Determinación de la naturaleza primaria o secundaria de las mineralogías magnéticas de las muestras del pozo Saltarín 1A

En la figura 4.1 se presenta el perfil de susceptibilidad magnética en función de la profundidad generado para el pozo petrolero Saltarín 1A, ubicado en la cuenca de los Llanos Orientales de Colombia (López et al, 2009). Dicho perfil varía en un rango de profundidad de 0 m a 667 m aproximadamente, con un intervalo de muestreo de 5m. Podemos observar en el perfil que para algunos niveles de profundidad la susceptibilidad magnética presenta valores anómalos, estos podrían ser un indicio de procesos diagenéticos secundarios, que pudieron alterar las mineralogías primarias de las muestras.

El $\delta^{18}\text{O}$ es independiente de las mineralogías magnéticas. A diferencia del $\delta^{18}\text{O}$, los valores del cociente S (CS) y de la susceptibilidad magnética (χ) si están sujetos a las alteraciones en las mineralogías magnéticas de las muestras. Es por ello que es importante determinar la naturaleza primaria de las muestras del pozo, a fin de establecer los rangos de profundidades en donde es posible correlacionar directamente los parámetros $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ .

Algunos minerales magnéticos secundarios producidos por la presencia de hidrocarburos, presentan morfología framboidal, es decir, se presentan como agregados esféricos de cristales sub-micrónicos. De esta manera, mediante la observación directa de dichos minerales podríamos evaluar el carácter primario o secundario de estos. Entre los métodos de observación directa utilizados en el presente trabajo, para la identificación de

mineralogías magnéticas secundarias se encuentran, microscopía electrónica y microscopía óptica. A continuación se presenta la descripción de los estudios llevados a cabo para la determinación de la naturaleza primaria o secundaria de las muestras.

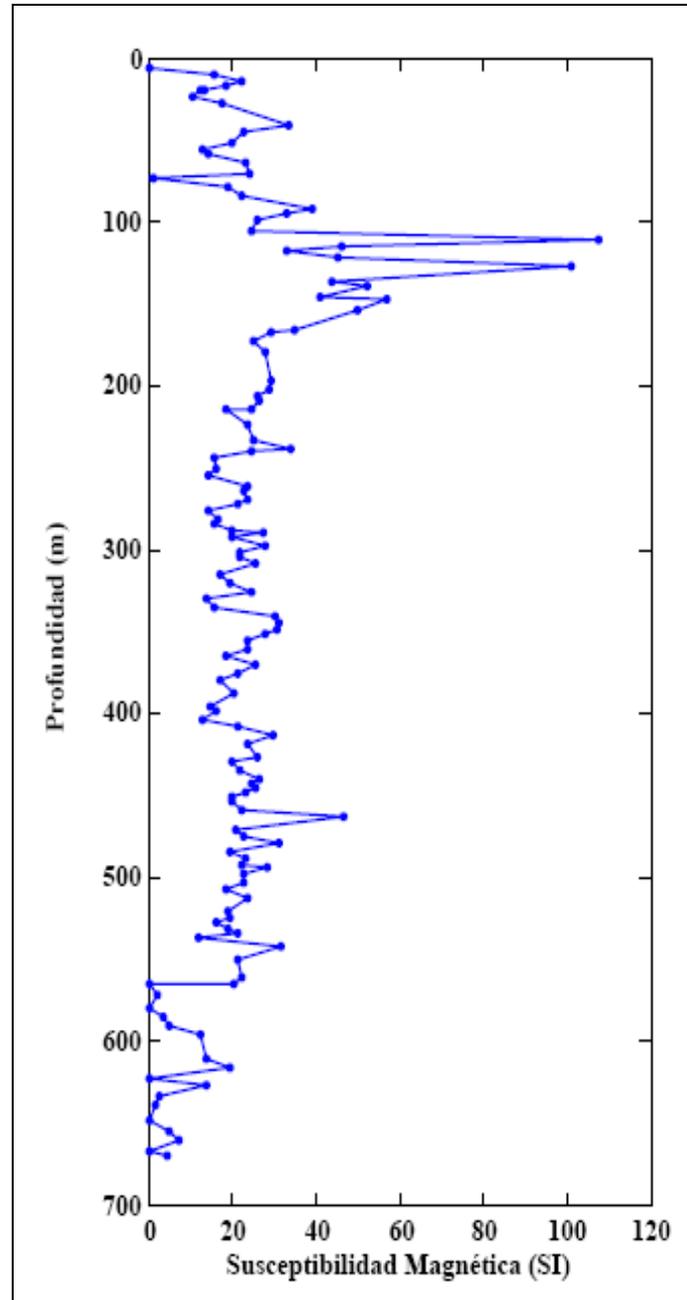


Figura 4.1.- Perfil de susceptibilidad magnética para el pozo Saltarín-1A, Cuenca de los Llanos Orientales Colombia.

4.1.1 Preparación de las muestras para estudios de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDX)

Se seleccionaron 9 muestras de las 134 muestras disponibles, el criterio usado para seleccionarlas fue escoger aquellas muestras que presentaban mayor respuesta magnética, para realizar estudios de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDX). En la tabla 4.1 se indican las muestras usadas para dicho estudio:

| Muestra | Profundidad (m) | Formación | Susceptibilidad Magnética (SI) |
|---------|-----------------|-----------|--------------------------------|
| 1 | 110.37 | Guayabo | 107.69 |
| 2 | 127.40 | Guayabo | 100.81 |
| 3 | 137.31 | Guayabo | 52.39 |
| 4 | 147.25 | Guayabo | 57.10 |
| 5 | 462.43 | León | 46.60 |
| 6 | 479.55 | León | 31.17 |
| 7 | 541.75 | León | 31.44 |
| 8 | 616.48 | Carbonera | 19.52 |
| 9 | 627.36 | Carbonera | 14.04 |

Tabla 4.1.- Muestras analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X por dispersión de electrones secundarios (EDX)

La selección y preparación de las muestras fue realizada por el Lic. Diego López en el Laboratorio de Paleomagnetismo y Magnetismo de Rocas, de la Universidad Simón Bolívar. El procedimiento llevado a cabo para la preparación de las muestras se describe a continuación:

- Se tomaron aproximadamente 20 gramos de cada una de las 9 muestras seleccionadas, mediante un mortero de cerámica se trituraron hasta obtener una fina arena. Diluimos con acetona esta arena, con el fin de mantener en suspensión los granos.

- Se aplicó un imán de mano, el cual se cubrió con plástico para no contaminar la muestra, sobre la mezcla para extraer la parte magnética.
- El separado magnético se lleva a una hoja de papel limpia, y se realiza el procedimiento de aplicar el imán sobre la muestra varias veces para cada una de las muestras, con la finalidad de obtener la mayor cantidad de separado magnético.
- El separado magnético se colocó en pequeños frascos de vidrio, identificando a que niveles de profundidad pertenece. El resto de la muestra, es decir, la fracción no magnética se colocó en frascos independientes, identificando el nivel de profundidad al cual pertenecen; para posibles estudios posteriores, en caso de ser necesario.

Los estudios de microscopía electrónica (SEM) y de espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDX) estuvieron a cargo del Ing. Glen Rodríguez y se realizaron en el Laboratorio de Superficies del Departamento de Ciencias de los Materiales, Sección de Microscopía Electrónica de la Universidad Simón Bolívar. A continuación se describe los pasos llevados a cabo para la realización de dichos estudios:

- El separado magnético, contenido en los frascos, se disolvió en alcohol para dispersar pequeñas cantidades de la muestra. Se tomaron unas gotas de esta preparación mediante una inyectora (para cada una de las preparaciones se utilizó una inyectora diferente para evitar la contaminación de estas); y las colocamos sobre una fina capa de carbono la cual se encontraría fija al porta muestra.
- El porta muestras se expone durante 5 minutos a un recubrimiento de un metal conductor (oro), mediante un equipo especial marca Esputerin Hochspannung, mostrado en la figura 4.2.



Figura 4.2.- Equipo mediante el cual se recubrió de oro la muestra, marca Esputerin Hochspannung.

- Se realizó el procedimiento descrito anteriormente para cada una de las 9 muestras seleccionadas. Estas se colocaron dentro del microscopio electrónico de barrido el cual se muestra en la figura 4.3. Para el análisis se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca JEOL JSM – 6390; y una sonda de rayos X Oxford Instruments, modelo 7582.



Figura 4.3.- Microscopio electrónico de barrido marca JEOL JSM – 6390 y sonda de rayos X Oxford Instruments, modelo 7582.

- Los patrones de dispersión de energía usados en la espectroscopia de rayos X fueron procesados por el programa NORA System Six.



Figura 4.4.- Porta muestra sobre el cual son colocadas las muestras a analizar para realizar los estudios de SEM y EDX.

4.2 Preparación de las muestras para estudios de bioestratigrafía

Para asociar los valores de $\delta^{18}\text{O}$ global con los parámetros magnéticos de cociente S y susceptibilidad magnética, es necesario conocer las edades geológicas a las que pertenecen las muestras del pozo, para esto se realizaron estudios de bioestratigrafía.

En la figura 4.5 se muestran los perfiles correspondientes a: (a) valores globales de foraminíferas bénticas de $\delta^{18}\text{O}$ en función de la edad geológica en Ma para el Cenozoico (Zachos et al., 2001); (b) cociente S en función de la profundidad medidas realizadas directamente de las muestras del pozo Saltarín 1A, en la Universidad de Edimburgo por V. Costanzo y M. Aldana de la Universidad Simón Bolívar; y (c) susceptibilidad magnética en función de la profundidad (López, 2009). En las siguientes secciones se describirá los

estudios estratigráficos que se llevaron a cabo entre los que se encuentra el estudio de foraminíferos y palinología.

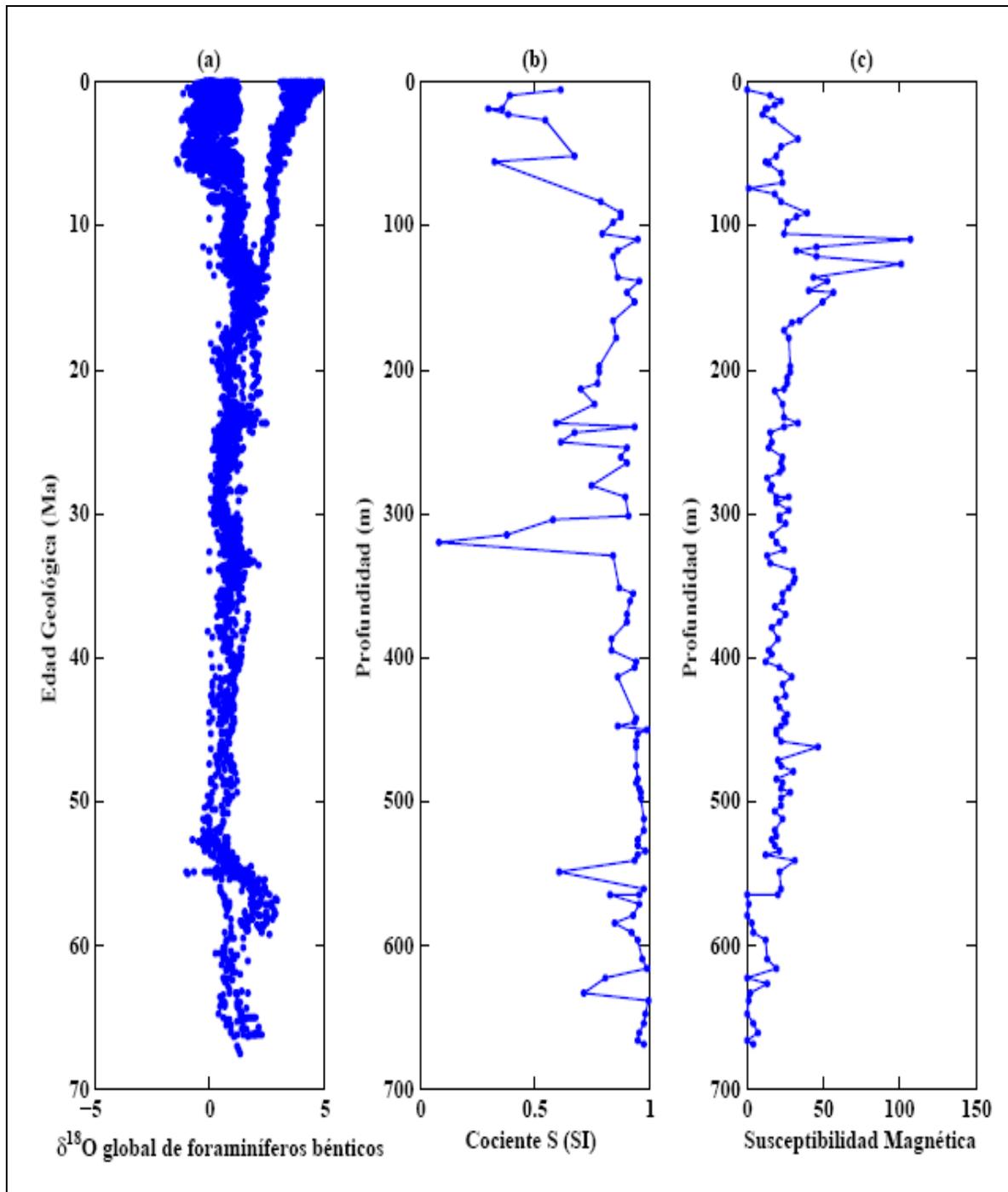


Figura 4.5.- Perfiles de (a) $\delta^{18}\text{O}$ global de foraminíferos béticos graficado en función de edad geológica en Ma, (b) Cociente S experimental y (c) Susceptibilidad Magnética experimental, ambos graficados en función de la profundidad en metros.

4.2.1 Preparación de las muestras para estudios de foraminíferos

Se realizó el análisis de 33 muestras sedimentológicas de las 134 muestras disponibles para realizar estudios de foraminíferos, esto con el objetivo de determinar la edad geológica de las muestras del pozo. Para la preparación de las muestras se utilizó la técnica del levigado (figura 4.6), ya que esta técnica nos permite obtener mayor precisión en la determinación de las edades.

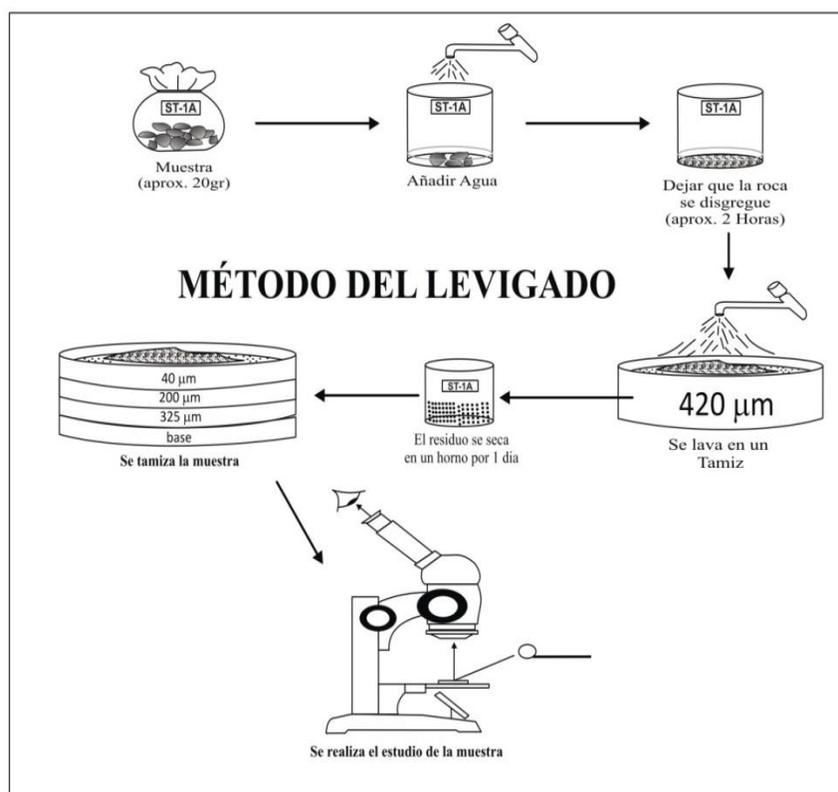


Figura 4.6.- Técnica del levigado usado para el estudio de foraminíferos

La preparación de las muestras fue realizada en el Laboratorio de Paleomagnetismo y Magnetismo de Rocas de la Universidad Simón Bolívar, bajo la supervisión del profesor Oswaldo Guzmán. Los pasos realizados fueron los siguientes:

- Se seleccionaron 33 muestras a intervalos fijos cada 20 m, para el respectivo estudio micropaleontológico. Estas muestras debían ser de litologías finas (lutitas), ya que al ser poco porosas permite la preservación de foraminíferos.
- Se tomaron aproximadamente 20 gramos de cada muestra y cada una se colocó en agua separadamente durante 2 horas, con el fin de favorecer la disgregación de la muestra rocosa.
- Una vez disgregado el material, se transfirió a un tamiz de tamaño de malla de 420 μm , en el cual se procedió al lavado para eliminar el exceso de arcilla. Después de lavar la muestra, se coloca el residuo en un recipiente el cual es llevado a un horno convencional a 90 °C por 24 horas para eliminar el exceso de agua.
- Como se utiliza el mismo tamiz para el lavado de cada muestra, se agrega azul de metileno sobre este luego del lavado para evitar contaminaciones de una muestra a otra, ya que de esta manera los caparazones de los foraminíferos retenidos se teñirán de azul.
- La muestra una vez seca, se lleva a una torre de tamices de diferente tamaño de malla, con el fin de separar la muestra en cuatro fracciones para facilitar la revisión de las muestras, y de esta manera lograr una efectiva y correcta identificación de los microorganismos. Los tamices utilizados fueron de 40 μm , 200 μm y 315 μm de tamaño de malla. El residuo que se obtiene en cada tamiz se recoge en recipientes individuales, se identifican según al nivel de profundidad y al número de tamiz al cual pertenecen.
- Se procede a examinar cada fracción colocando la muestra sobre un portaobjeto de forma rectangular con base de madera y fondo rugoso de color negro, para distinguir los caparazones. Esto se realiza bajo una lupa binocular de alta resolución, para realizar el separado de foraminíferos (picking). Mediante un pincel humedecido en agua se extraen los foraminíferos y se colocan en un pequeño frasco para facilitar su identificación.

- Una vez realizado el separado de foraminíferos, se examinan mediante un microscopio óptico para realizar la clasificación de los foraminíferos por especies y se comparara con especies actuales y fósiles, para así determinar la edad a la cual pertenecen.

4.2.2 Preparación de las muestras para estudios de palinología

Con la finalidad de determinar la edad geológica de las muestras, se seleccionaron 11 muestras para realizar estudios de palinología. La preparación de las muestras fue realizada en el Laboratorio de Paleomagnetismo y Magnetismo de Rocas de la Universidad Simón Bolívar, y los estudios de palinología fueron realizadas en PDVSA por el Dr. Víctor Padrón. Los pasos realizados fueron los siguientes:

- Se seleccionaron 11 muestras a intervalos fijos de 60 metros aproximadamente, para realizar los estudios de palinología, estas debían ser de litologías finas (lutitas), ya que al ser poco porosas permite la preservación de la microflora.
- De cada muestra seleccionada se tomaron 11 gramos aproximadamente; luego, se procede a triturar la muestra con un mortero de cerámica, hasta disgregar la muestra. La muestra disgregada, se ataca con ácidos para suprimir los minerales y permitir aislar la materia orgánica y los microfósiles.
- Los ácidos usados para esto son: ácido clorhídrico para atacar los carbonatos, ácido fluorhídrico para la disolución de la sílice, ácido nítrico para oxidar y eliminar el exceso de materia orgánica, blanquear y limpiar el polen y las esporas que se van estudiar.
- Una vez realizado el paso anterior, el polen y las esporas es analizado mediante un microscopio óptico para identificar el tipo de espora o polen, y se realiza la comparación con especies actuales y fósiles.

CAPÍTULO V

MARCO METODOLÓGICO COMPUTACIONAL

Uno de los objetivos principales de este trabajo es establecer algún tipo de relación matemática entre los valores globales de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferas bénticas con cantidades magnéticas como el cociente S (CS) y la susceptibilidad magnética (χ) medidos directamente del pozo Saltarín 1A; para esto, es necesario asociarlos a un factor común, que en este caso son las edades geológicas. Para esto contábamos con dos amarres de edades bioestratigráficas. Estos amarres sitúan al tope del Mioceno medio a aproximadamente 305 metros y el tope del Mioceno inferior a 610 metros aproximadamente, las dos relaciones de edad-profundidad fueron suministradas por el Dr. Carlos Jaramillo del Smithsonian Institute of Tropical Research, Panamá. Debido a que solo se poseen estas dos edades partimos de la hipótesis de una tasa de sedimentación constante para toda la columna, entre dichas edades. De esta manera se obtuvieron 44 valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ para la misma profundidad (ver apéndice 1).

Una vez establecida la relación por edades entre el $\delta^{18}\text{O}$ y los valores de CS y χ , se utilizó la técnica computacional de Redes Neuronales Difusas (RND) a partir del módulo de ANFIS del programa MatLab (versión 7.0), para inferir valores de $\delta^{18}\text{O}$, a partir de datos experimentales de Cociente S y de susceptibilidad magnética.

Para el entrenamiento del sistema difuso se alimentó la red con tres combinaciones de conjuntos de entrada: $\delta^{18}\text{O} - \text{CS}$, $\delta^{18}\text{O} - \chi$ y $\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$. Para los conjuntos de

entrada $\delta^{18}\text{O} - \text{CS}$ y $\delta^{18}\text{O} - \chi$, se consideraron los 4 modelos que se describen a continuación:

- Modelo A. Este modelo simple será entrenado con los valores de entrada de $\delta^{18}\text{O} - \text{CS}$ y $\delta^{18}\text{O} - \chi$, y se obtendrá para cada caso ecuaciones del tipo:

$$\delta^{18}\text{O} = a\text{CS} + b \quad y \quad \delta^{18}\text{O} = a\chi + b$$

- Modelo B. Este modelo semi - log será entrenado con valores de $\delta^{18}\text{O} - \text{Log}(\text{CS})$ y $\delta^{18}\text{O} - \text{Log}(\chi)$, y se obtendrá para cada caso ecuaciones del tipo:

$$\delta^{18}\text{O} = a \text{Log}(\text{CS}) + b \quad y \quad \delta^{18}\text{O} = a \text{Log}(\chi) + b$$

- Modelo C. Este modelo semi - log será entrenado con valores de $\text{Log}(\delta^{18}\text{O}) - \text{CS}$ y $\text{Log}(\delta^{18}\text{O}) - \chi$, y se obtendrá para cada caso ecuaciones del tipo:

$$\text{Log}(\delta^{18}\text{O}) = a\text{CS} + b \quad y \quad \text{Log}(\delta^{18}\text{O}) = a\chi + b$$

- Modelo D. Este modelo log - log será entrenado con valores de $\text{Log}(\delta^{18}\text{O}) - \text{Log}(\text{CS})$ y $\text{Log}(\delta^{18}\text{O}) - \text{Log}(\chi)$, y se obtendrá para cada caso ecuaciones del tipo:

$$\text{Log}(\delta^{18}\text{O}) = a \text{Log}(\text{CS}) + b \quad y \quad \text{Log}(\delta^{18}\text{O}) = a \text{Log}(\chi) + b$$

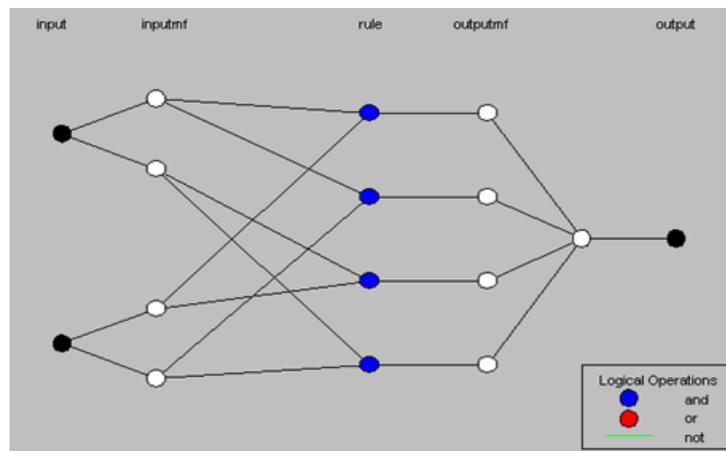
Para el conjunto de entrada $\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$, se utilizó dos modelos A y B₁, obteniéndose en cada caso ecuaciones del tipo:

$$\delta^{18}O = aCS + b\chi + c \quad y \quad \delta^{18}O = aCS + b\text{Log}(\chi) + c$$

Los valores de las constantes a, b y c, son dados por el programa después de cada entrenamiento y se obtendrán tantos valores como reglas difusas se apliquen durante el entrenamiento. Para el tratamiento de los datos en las tres combinaciones, se aplicó la función logaritmo al $\delta^{18}O$, cociente S y susceptibilidad magnética, con la finalidad de eliminar posibles potencias, y de esta manera mejorar la inferencia de los datos.

La estructura del sistema de inferencia difusa, puede crearse por dos métodos que MatLab nos propone los cuales son *subtractive clustering* y *grid partitioning*. En este caso escogimos la segunda opción la cual está basada en un número fijo de funciones de pertenencia. Estas son ocho funciones las cuales son: trimf, trapmf, gbellmf, gaussmf, gauss2mf, pimf, psigmf, dsigmf. Para cada una de ellas se realizó pruebas, variando el número de reglas difusa. El número de reglas difusas usadas es de 2 (mínimo de reglas permitidas por el programa) a un número máximo. Este número máximo de reglas difusas corresponde a un número equivalente al 10% de la totalidad de datos.

De esta manera, crearemos una estructura del tipo:



Como algoritmo de entrenamiento se utilizó el algoritmo híbrido, el cual utiliza retropropagación (gradiente descendente) para los parámetros asociados con las funciones de pertenencia de las entradas y mínimos cuadrados para las funciones de pertenencia de las salidas (consecuente de las reglas). Se escogió como valor de error de tolerancia 0, para cada entrenamiento. Este valor es importante ya que indica el error que es aceptable para el usuario durante el entrenamiento. El error de tolerancia le indicará al sistema el error mínimo con el que se debe dejar de entrenar el sistema.

Durante la fase de entrenamiento de la red neuronal, el programa nos suministrará un error, el cual está dado con respecto a los valores reales y los valores inferidos. Una vez concluidos los entrenamientos, se escoge la función de pertenencia y el modelo que nos presente el menor error, ya que este nos indicará si la inferencia ha mejorado, para cada una de las combinaciones de datos de entrada.

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ inferidos mediante la función de pertenencia y el modelo escogido serán graficados en función de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ experimentales, a fin de visualizar su correspondencia, lo cual nos indicará en qué medida mejora la inferencia de este valor.

Una vez escogida la función de pertenencia y el modelo, procedimos a realizar la división de los datos. Debido a que no se dispone de suficientes amarres de edades, se dividió los valores experimentales de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ , en cuatro sub-secciones de espesores iguales en profundidad de aproximadamente 76,25 metros cada una, esto con el fin de estudiar hasta que nivel de profundidad es realista considerar una tasa de sedimentación

constante para un intervalo de 305 metros de profundidad (aproximadamente 4.4 Ma). Las divisiones fueron realizadas para el siguiente rango de profundidad:

1. La sección 1: abarca de 305 m a 381,25 m.
2. La sección 2: abarca de 381,25 m a 457,5 m.
3. La sección 3: abarca de 457,5 m a 533,75 m.
4. La sección 4: abarca de 533,75 m a 610 m.

El entrenamiento de la red difusa para cada una de las cuatro divisiones se realiza tomando en cuenta las tres combinaciones de valores de entrada, y se utilizará como modelo de entrenamiento el que arroje la mejor inferencia para el total de datos en estudio (305 m a 610 m) en cada caso.

5.1 Entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS

La red neuro-difusa fue entrenada con valores de entrada de $\delta^{18}\text{O}$ y CS para los modelos A, B, C, y D, utilizando un mínimo de 2 reglas a un máximo 4 reglas difusas (10% del total de datos). Para el análisis de los datos solo se considerará los entrenamientos realizados con la función de pertenencia gaussmf, ya que esta nos presenta los menores errores para los 4 modelos (ver tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4), lo que nos indica una mejor inferencia.

| Modelo A | | | | | | |
|------------------------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|
| Función de pertenencia | 2 Reglas Difusas | | 3 Reglas Difusas | | 4 Reglas Difusas | |
| | Error | Iteración | Error | Iteración | Error | Iteración |
| Trimf | 0.24545 | 5 | 0.24037 | 3 | 0.24225 | 5 |
| Trapmf | 0.24838 | 28 | 0.24101 | 3 | 0.24205 | 5 |
| Gbellmf | 0.24259 | 35 | 0.23679 | 45 | 0.23615 | 20 |
| Gaussmf | 0.24676 | 50 | 0.24208 | 25 | 0.21925 | 25 |
| Gauss2mf | 0.24838 | 15 | 0.24222 | 5 | 0.23150 | 5 |
| Pimf | 0.24838 | 18 | 0.24241 | 5 | 0.23904 | 18 |
| Dsigmf | 0.24834 | 45 | 0.24244 | 18 | 0.24160 | 25 |
| Psigmf | 0.24834 | 45 | 0.24244 | 18 | 0.24160 | 25 |

Tabla 5.1.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo A.

| Modelo B | | | | | | |
|------------------------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|
| Función de Pertenencia | 2 Reglas Difusas | | 3 Reglas Difusas | | 4 Reglas Difusas | |
| | Error | Iteración | Error | Iteración | Error | Iteración |
| Trimf | 0.24782 | 5 | 0.24705 | 5 | 0.24195 | 5 |
| Trapmf | 0.24396 | 25 | 0.24223 | 15 | 0.24250 | 18 |
| Gbellmf | 0.24254 | 30 | 0.24234 | 20 | 0.24233 | 10 |
| Gaussmf | 0.24302 | 200 | 0.24233 | 40 | 0.24233 | 5 |
| Gauss2mf | 0.24242 | 20 | 0.24235 | 10 | 0.24228 | 5 |
| Pimf | 0.24242 | 45 | 0.24258 | 15 | 0.24251 | 5 |
| Dsigmf | 0.24250 | 42 | 0.24237 | 18 | 0.24221 | 18 |
| Psigmf | 0.24250 | 42 | 0.24237 | 18 | 0.24221 | 18 |

Tabla 5.2.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo B.

| Modelo C | | | | | | |
|------------------------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|
| Función de Pertenencia | 2 Reglas Difusas | | 3 Reglas Difusas | | 4 Reglas Difusas | |
| | Error | Iteración | Error | Iteración | Error | Iteración |
| Trimf | 0.074043 | 5 | 0.072532 | 5 | 0.072385 | 10 |
| Trapmf | 0.074419 | 25 | 0.072171 | 0 | 0.072656 | 5 |
| Gbellmf | 0.072930 | 25 | 0.072144 | 45 | 0.072239 | 15 |
| Gaussmf | 0.074256 | 60 | 0.072652 | 20 | 0.065979 | 30 |
| Gauss2mf | 0.072919 | 22 | 0.072624 | 5 | 0.071049 | 5 |
| Pimf | 0.075167 | 20 | 0.072632 | 5 | 0.071136 | 18 |
| Dsigmf | 0.075151 | 45 | 0.072659 | 20 | 0.072532 | 15 |
| Psigmf | 0.075151 | 45 | 0.072659 | 20 | 0.072532 | 15 |

Tabla 5.3.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo C.

| Modelo D | | | | | | |
|------------------------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|
| Función de Pertenencia | 2 Reglas Difusas | | 3 Reglas Difusas | | 4 Reglas Difusas | |
| | Error | Iteración | Error | Iteración | Error | Iteración |
| Trimf | 0.072886 | 10 | 0.074680 | 5 | 0.072534 | 5 |
| Trapmf | 0.075620 | 5 | 0.072555 | 10 | 0.072674 | 18 |
| Gbellmf | 0.072739 | 30 | 0.072659 | 25 | 0.072651 | 10 |
| Gaussmf | 0.073048 | 180 | 0.072658 | 30 | 0.072650 | 5 |
| Gauss2mf | 0.072696 | 20 | 0.072659 | 15 | 0.072631 | 10 |
| Pimf | 0.076890 | 45 | 0.072702 | 15 | 0.072675 | 5 |
| Dsigmf | 0.072700 | 40 | 0.072656 | 10 | 0.072630 | 20 |
| Psigmf | 0.072700 | 40 | 0.072656 | 10 | 0.072630 | 20 |

Tabla 5.4.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo D.

Se muestra en las figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4, los resultados obtenidos del entrenamiento de la red neuronal difusa para todo el perfil de datos (de 305 a 610 m) con la función de pertenencia gaussmf, usando 2, 3 y 4 reglas difusas para los modelos A, B, C y D.

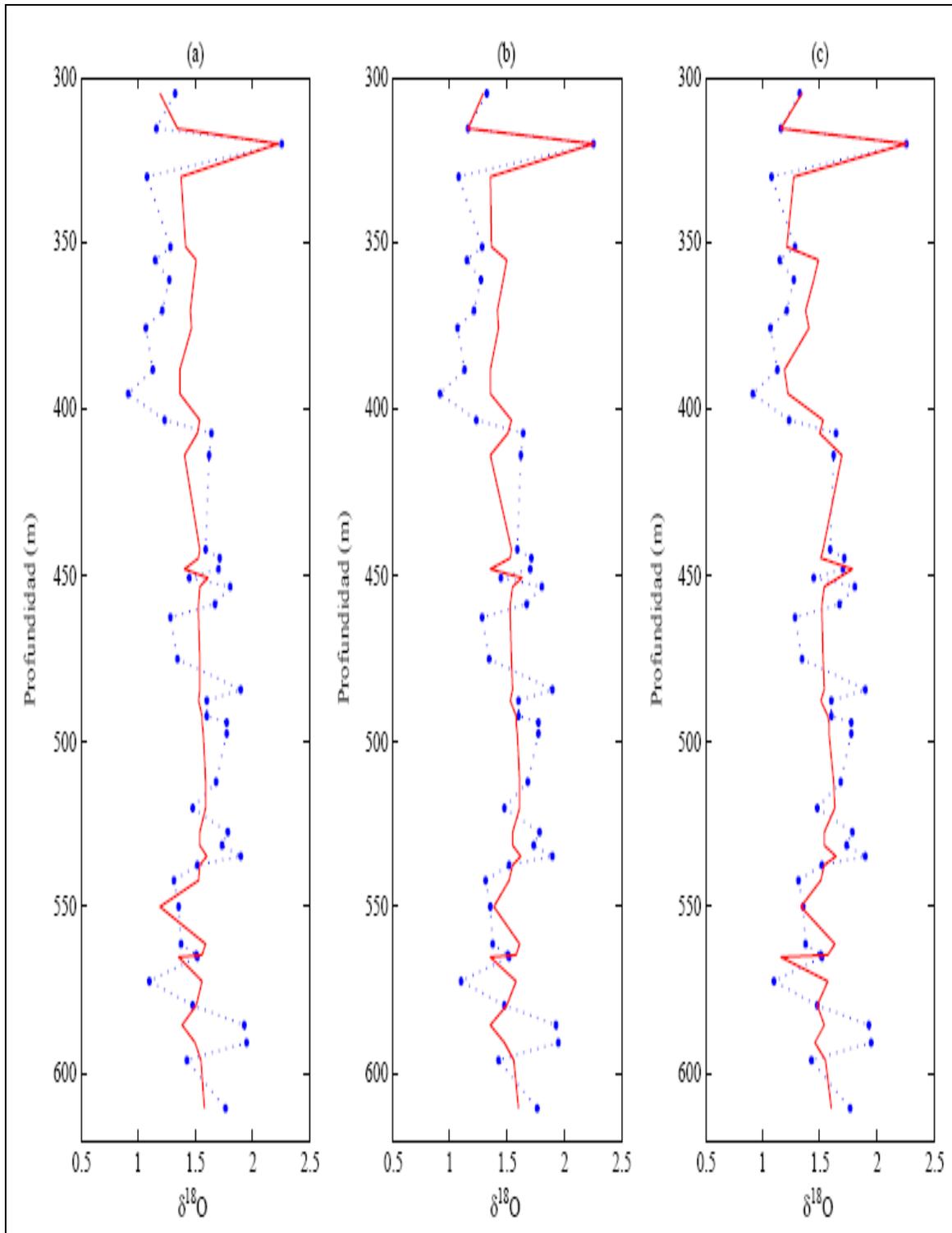


Figura 5.1.- Grafica del $\delta^{18}O$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}O$ y CS, para la función de pertenencia gaussmf con: (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo A.

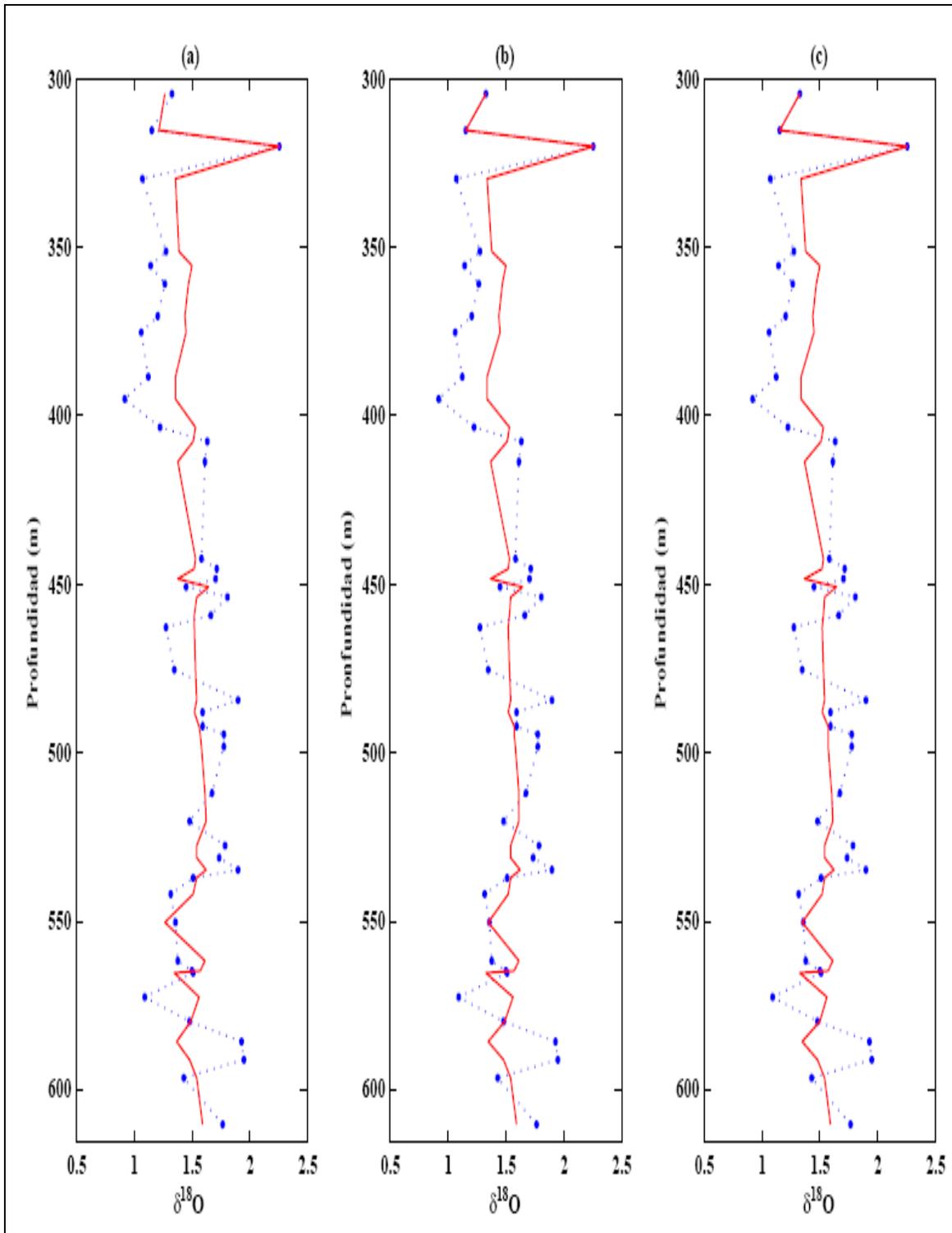


Figura 5.2.- Grafica del $\delta^{18}O$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}O$ y CS, para la función de pertenencia gaussmf con: (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo B.

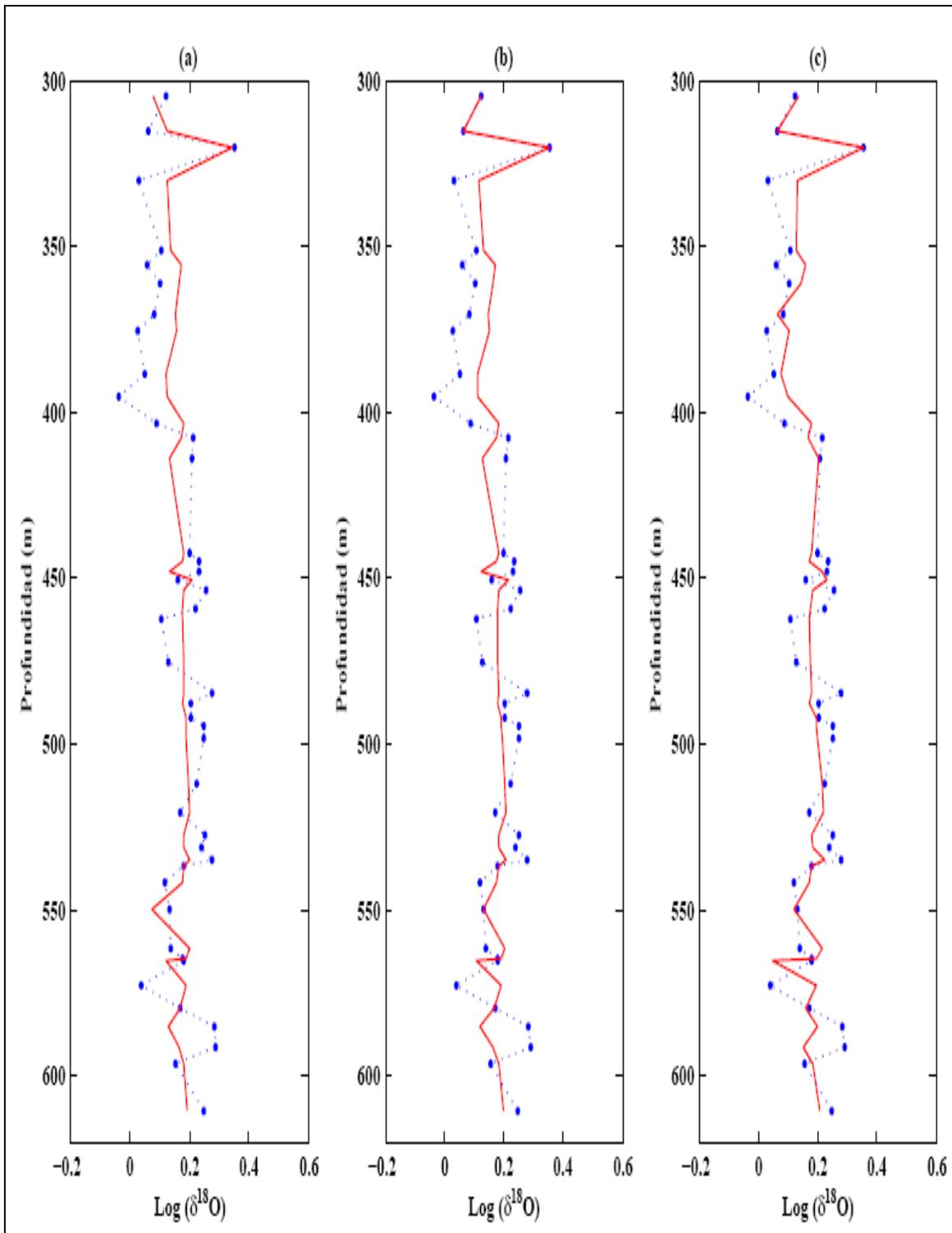


Figura 5.3.- Grafica del logaritmo de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para la función de pertenencia gaussmf con: (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo C.

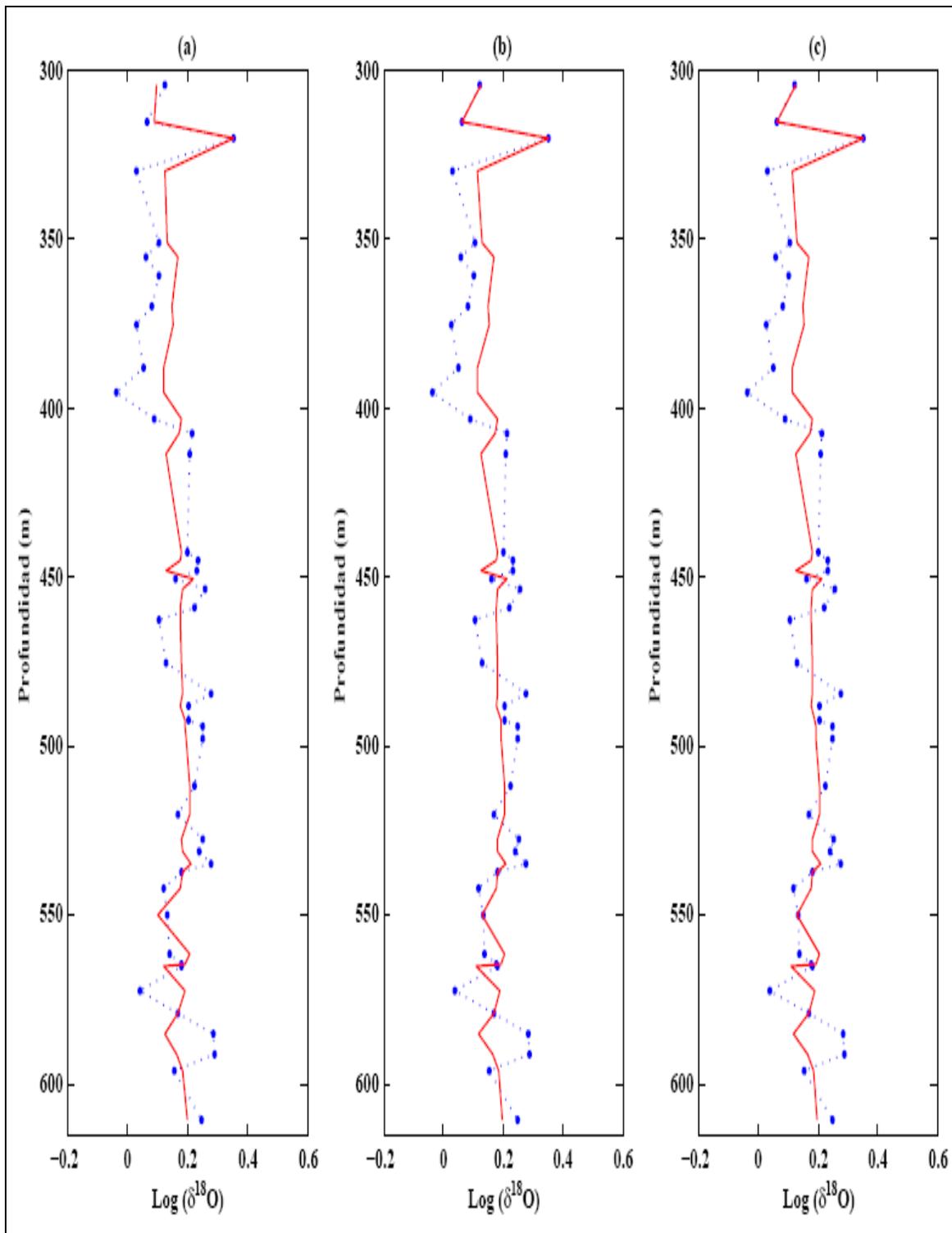


Figura 5.4.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para la función de pertenencia gaussmf con: (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo D.

5.2.1 Entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ

Se entrenó la red difusa con valores de entrada de $\delta^{18}\text{O}$ y χ para los 4 modelos descritos en la sección anterior, utilizando de 2 a 4 reglas difusas. Vemos que la función de pertenencia que mejor se ajusta a los datos para los cuatro modelos es la función gaussmf (ver tablas 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8). De manera que para el tratamiento de los datos se utilizará esta función de pertenencia.

| Modelo A | | | | | | |
|----------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|
| | 2 Reglas Difusas | | 3 Reglas Difusas | | 4 Reglas Difusas | |
| Función | Error | Iteración | Error | Iteración | Error | Iteración |
| Trimf | 0.28519 | 70 | 0.28189 | 5 | 0.24852 | 100 |
| Trapmf | 0.28228 | 160 | 0.27699 | 250 | 0.26564 | 70 |
| Gbellmf | 0.26504 | 13000 | 0.25616 | 400 | 0.25727 | 350 |
| Gaussmf | 0.27426 | 2600 | 0.26260 | 2400 | 0.25833 | 1400 |
| Gauss2mf | 0.27426 | 1450 | 0.27151 | 600 | 0.23646 | 1300 |
| Pimf | 0.27454 | 2350 | 0.27129 | 550 | 0.25463 | 700 |
| Dsigmf | 0.27918 | 400 | 0.26406 | 100 | 0.23719 | 1100 |
| Psigmf | 0.26084 | 2250 | 0.26406 | 100 | 0.23719 | 1100 |

Tabla 5.5.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo A.

| Modelo B | | | | | | |
|----------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|
| | 2 Reglas Difusas | | 3 Reglas Difusas | | 4 Reglas Difusas | |
| Función | Error | Iteración | Error | Iteración | Error | Iteración |
| Trimf | 0.27573 | 25 | 0.26369 | 55 | 0.24939 | 5 |
| Trapmf | 0.27278 | 20 | 0.26274 | 5 | 0.26954 | 5 |
| Gbellmf | 0.27143 | 75 | 0.25677 | 55 | 0.25301 | 45 |
| Gaussmf | 0.27121 | 75 | 0.25572 | 65 | 0.25907 | 20 |
| Gauss2mf | 0.27113 | 30 | 0.24981 | 25 | 0.25446 | 10 |
| Pimf | 0.27281 | 25 | 0.25352 | 45 | 0.24801 | 45 |
| Dsigmf | 0.27118 | 45 | 0.25644 | 45 | 0.25236 | 10 |
| Psigmf | 0.27118 | 45 | 0.25644 | 45 | 0.25236 | 10 |

Tabla 5.6.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo B.

| Modelo C | | | | | | |
|-----------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|
| | 2 Reglas Difusas | | 3 Reglas Difusas | | 4 Reglas Difusas | |
| Función | Error | Iteración | Error | Iteración | Error | Iteración |
| Trimf | 0.084030 | 80 | 0.082827 | 10 | 0.071451 | 100 |
| Trapmf | 0.082933 | 125 | 0.081336 | 300 | 0.079162 | 80 |
| Gbellmf | 0.073783 | 9900 | 0.075610 | 420 | 0.075926 | 450 |
| Gaussmf | 0.080465 | 2500 | 0.077412 | 1900 | 0.076290 | 1400 |
| Gauss2mf | 0.080465 | 1500 | 0.080320 | 400 | 0.074046 | 1300 |
| Pimf | 0.080529 | 2400 | 0.080230 | 650 | 0.076426 | 800 |
| Dsigmf | 0.082245 | 400 | 0.078230 | 100 | 0.070357 | 1010 |
| Psigmf | 0.077111 | 2100 | 0.078230 | 100 | 0.070359 | 1010 |

Tabla 5.7.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo C.

| Modelo D | | | | | | |
|-----------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|
| | 2 Reglas Difusas | | 3 Reglas Difusas | | 4 Reglas Difusas | |
| Función | Error | Iteración | Error | Iteración | Error | Iteración |
| Trimf | 0.081509 | 15 | 0.078052 | 25 | 0.072338 | 5 |
| Trapmf | 0.080536 | 20 | 0.077325 | 10 | 0.077255 | 10 |
| Gbellmf | 0.080153 | 90 | 0.075711 | 150 | 0.074789 | 10 |
| Gaussmf | 0.080115 | 50 | 0.075226 | 50 | 0.076343 | 15 |
| Gauss2mf | 0.080108 | 30 | 0.073539 | 25 | 0.074831 | 10 |
| Pimf | 0.080571 | 20 | 0.074671 | 30 | 0.074136 | 42 |
| Dsigmf | 0.080106 | 50 | 0.075581 | 45 | 0.074364 | 15 |
| Psigmf | 0.080106 | 50 | 0.075581 | 45 | 0.074364 | 15 |

Tabla 5.8.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para todas las funciones de pertenencia usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo D.

En las figuras 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8, se muestran los resultados obtenidos del entrenamiento de la red difusa para el total de datos (de 305 a 610 m) con la función de pertenencia gaussmf usando 2, 3 y 4 reglas difusas para los modelos A, B, C y D.

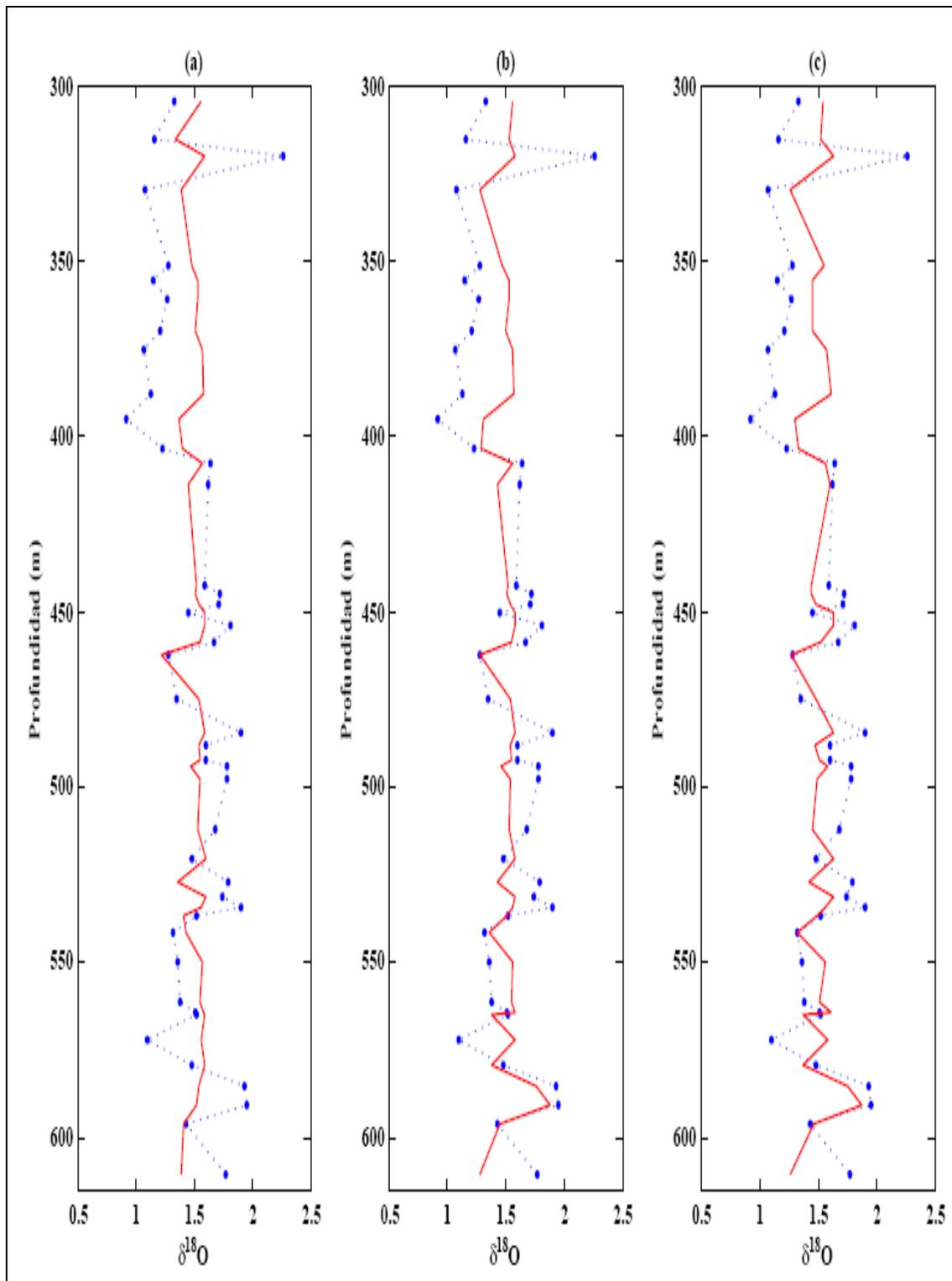


Figura 5.5.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para la función de pertenencia gaussmf con: (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo A.

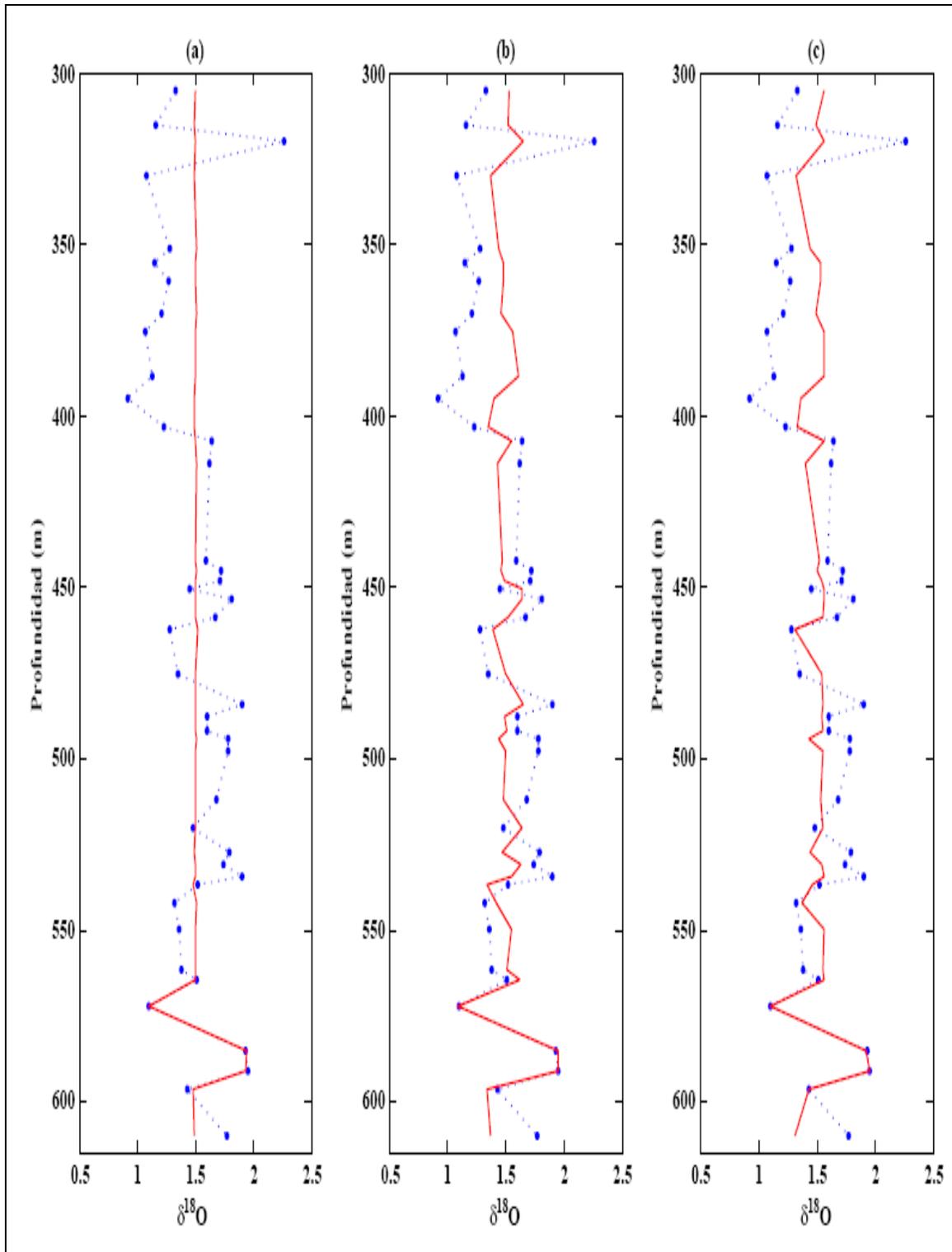


Figura 5.6.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para la función de pertenencia gaussmf para (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo B.

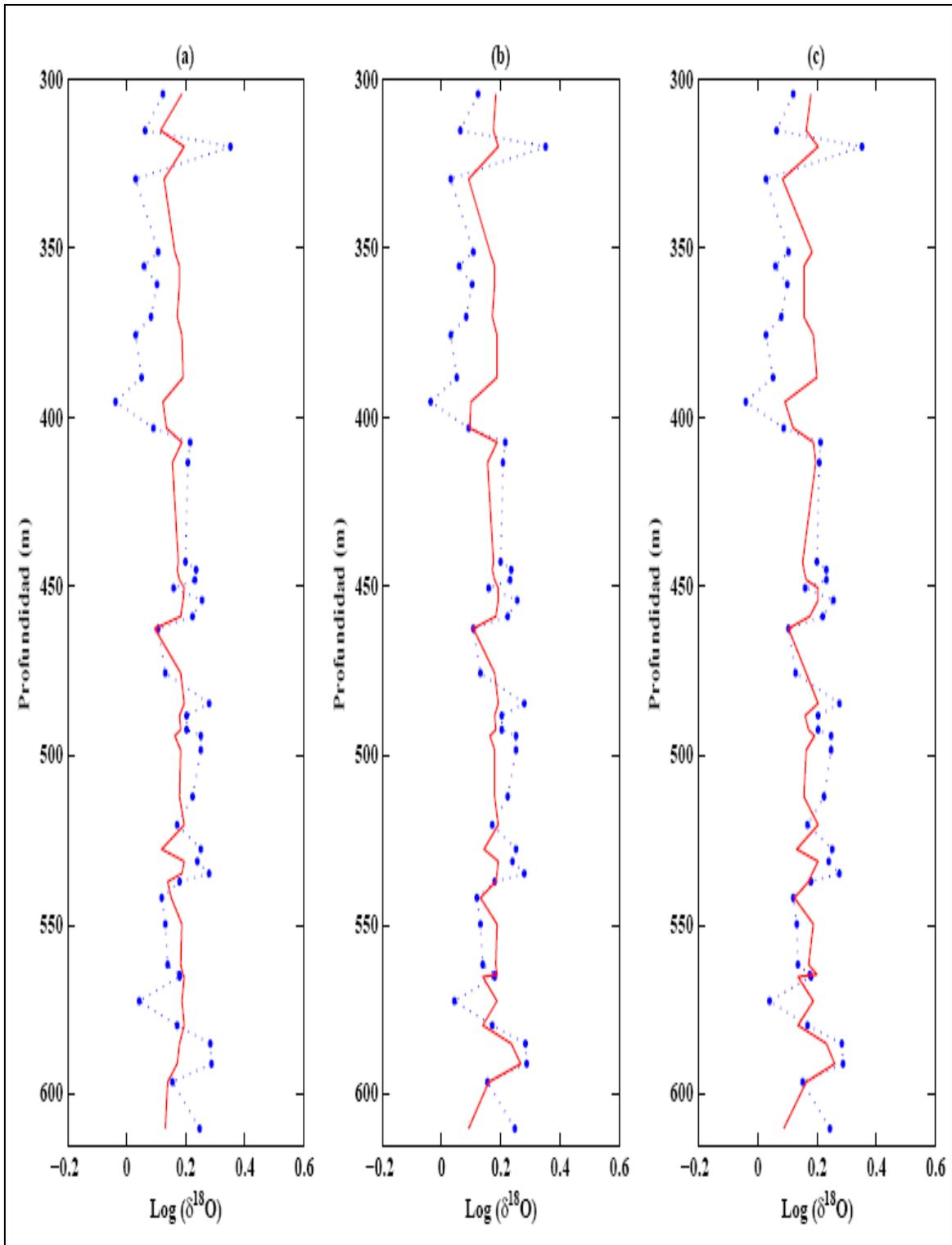


Figura 5.7.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para la función de pertenencia gaussmf para (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo C.

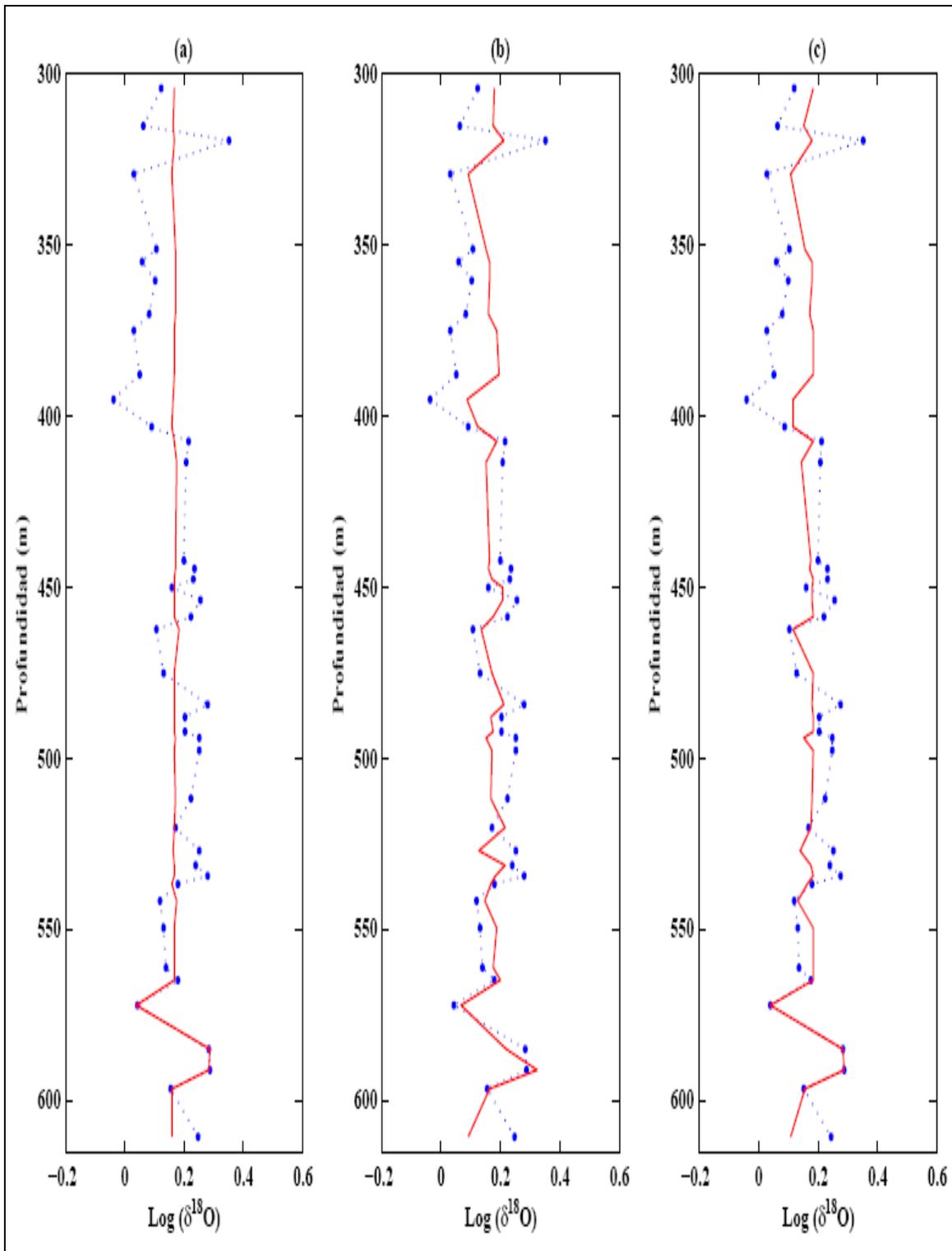


Figura 5.8.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para la función de pertenencia gaussmf para (a) 2 reglas de pertenencia, (b) 3 reglas de pertenencia y (c) 4 reglas de pertenencia; para el modelo D.

5.3 Entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ

Se llevo a cabo el entrenamiento de la red difusa con los valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ para el modelo A y B₁, utilizando 2 reglas asignadas a CS y 1 regla a χ [CS χ] [2 1] (2 reglas difusas), 1 regla asignada a CS y 2 reglas a χ [CS χ] [1 2] (2 reglas difusas), 3 reglas asignadas a CS y 1 regla a χ [CS χ] [3 1] (3 reglas difusas), 1 regla asignada a CS y 3 reglas a χ [CS χ] [1 3] (3 reglas difusas), y 2 reglas asignadas a CS y 2 regla a χ [CS χ] [2 1] (4 reglas difusas); con el fin de escoger cual nos ofrecía el menor error, para la función de pertenencia gaussmf (ver tablas 5.9 y 5.10).

| Modelo A | | | | |
|--------------------------------|------------------------------|---|------------------|--------------|
| Total de reglas difusas | Reglas asignadas a CS | Reglas asignadas a χ | Iteración | Error |
| 2 | 2 | 1 | 25 | 0.24089 |
| 2 | 1 | 2 | 2350 | 0.26363 |
| 3 | 3 | 1 | 50 | 0.22435 |
| 3 | 1 | 3 | 2400 | 0.22696 |
| 4 | 2 | 2 | 45 | 0.17302 |

Tabla 5.9.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ , para la funciones de pertenencia gaussmf, usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo A.

| Modelo B₁ | | | | |
|--------------------------------|------------------------------|---|------------------|--------------|
| Total de reglas difusas | Reglas asignadas a CS | Reglas asignadas a $\text{Log}(\chi)$ | Iteración | Error |
| 2 | 2 | 1 | 100 | 0.22371 |
| 2 | 1 | 2 | 45 | 0.27033 |
| 3 | 3 | 1 | 65 | 0.20851 |
| 3 | 1 | 3 | 25 | 0.23122 |
| 4 | 2 | 2 | 30 | 0.18007 |

Tabla 5.10.- Errores dados por el programa Matlab durante la fase de entrenamiento de la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ , para la funciones de pertenencia gaussmf, usando 2, 3 y 4 reglas difusas, para el modelo B₁.

Se muestra en las figuras 5.9 y 5.10, los resultados obtenidos del entrenamiento de la red neuronal difusa para todo el perfil de datos (de 305 a 610 m) con la función de pertenencia gaussmf, usando 2, 3 y 4 reglas difusas para los modelos A y B₁.

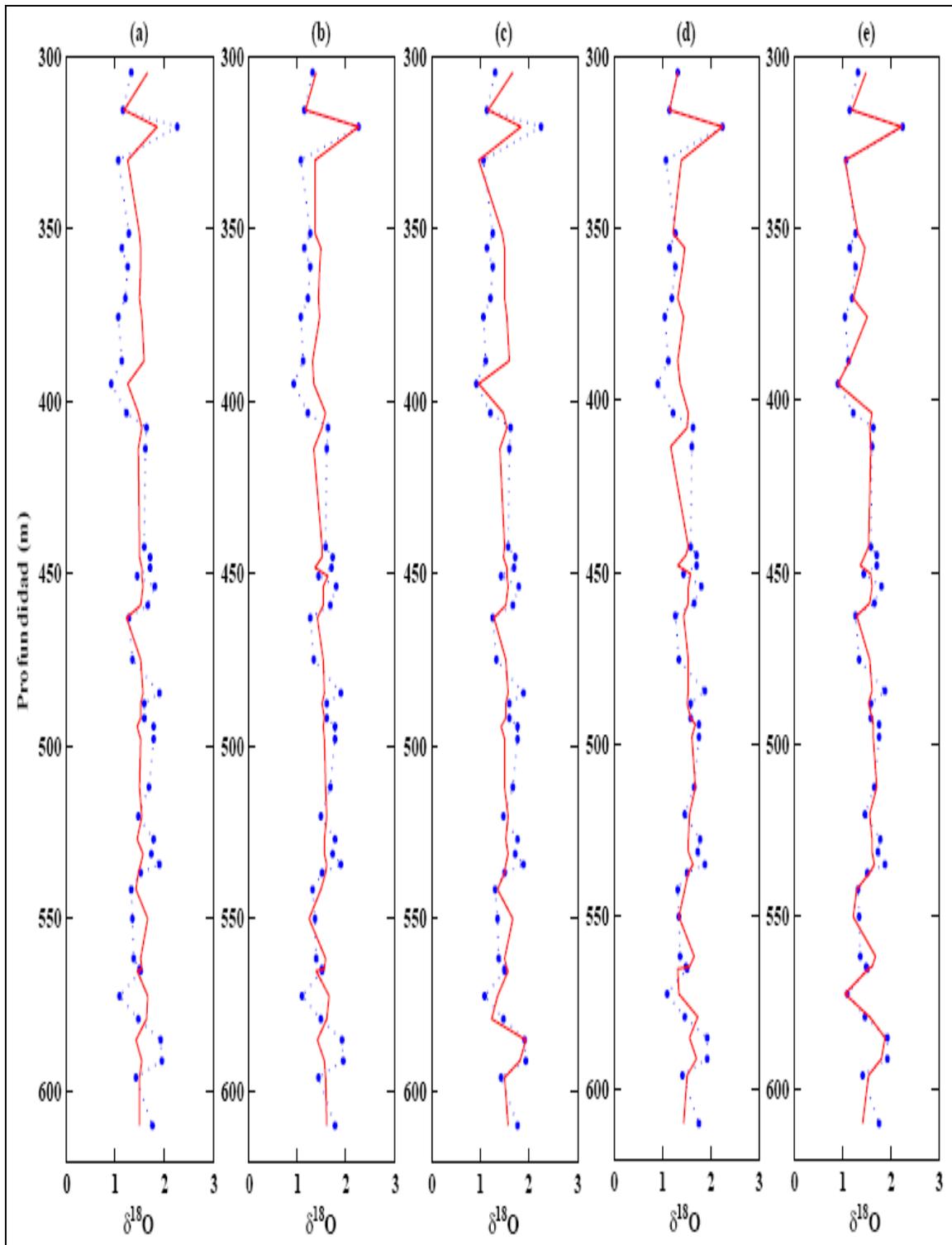


Figura 5.9.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ , para la función de pertenencia gaussmf para: (a) [CS χ] [2 1], (b) [CS χ] [1 2], (c) [CS χ] [3 1], (d) [CS χ] [1 3] y (e) [CS χ] [2 2]; para el modelo A.

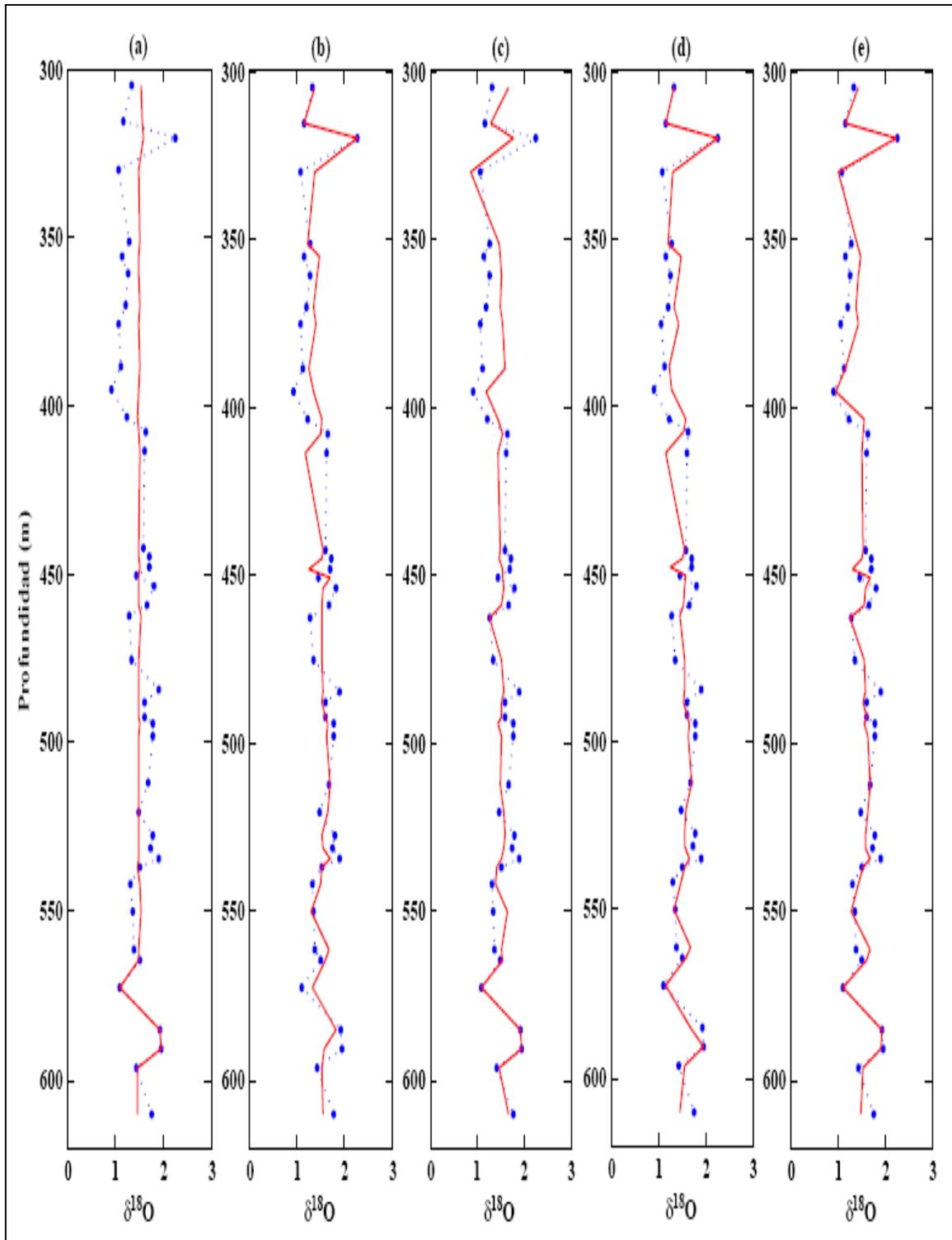


Figura 5.10.- Grafica del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferido (línea continua) en función de la profundidad en metros, entrenando la red neuronal difusa con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ , para la función de pertenencia gaussmf para: (a) [CS χ] [2 1], (b) [CS χ] [1 2], (c) [CS χ] [3 1], (d) [CS χ] [1 3] y (e) [CS χ] [2 2]; para el modelo B₁.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS Y ANÁLISIS EXPERIMENTALES

Inicialmente se realizaron los análisis de microscopía electrónica y microscopía óptica, a muestras del pozo Saltarín 1A, con el fin de determinar la naturaleza primaria o secundaria tanto de los minerales magnéticos como no magnéticos de estas muestras. Seguidamente se realizaron estudios bioestratigráficos a un número de muestras del pozo Saltarín 1A. Entre las técnicas aplicadas se encuentra el estudio de foraminíferos y palinológico. La finalidad de estos estudios bioestratigráficos era la de determinar la edad geológica de las muestras para correlacionar directamente los valores de $\delta^{18}\text{O}$ globales obtenidos de foraminíferos béticos con los parámetros magnéticos de cociente S y susceptibilidad magnética medidos directamente en las muestras del pozo.

6.1 Resultados y análisis del estudio de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X por dispersión en energía (EDX)

Con la finalidad de determinar si las anomalías observadas en el perfil de susceptibilidad magnética están asociadas a la presencia de minerales magnéticos primarios (anomalías tipo B) o a minerales magnéticos autigénicos secundarios (anomalías tipo A) producto de procesos diagenéticos tardíos inducidas por el yacimiento petrolífero subyacente (Costanzo - Álvarez et al., 2000), se realizaron estudios de microscopía

electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X por dispersión en energía (EDX). Las muestras usadas fueron separados magnéticos de la fracción total de roca no consolidada.

A continuación se muestran las fotomicrografías SEM, los análisis de EDX y las composiciones obtenidas para las nueve muestras analizadas en diferentes niveles de profundidad (ver tabla 4.1).

Muestra 1a. Profundidad: 110.37 m, $\chi = 107.69$.

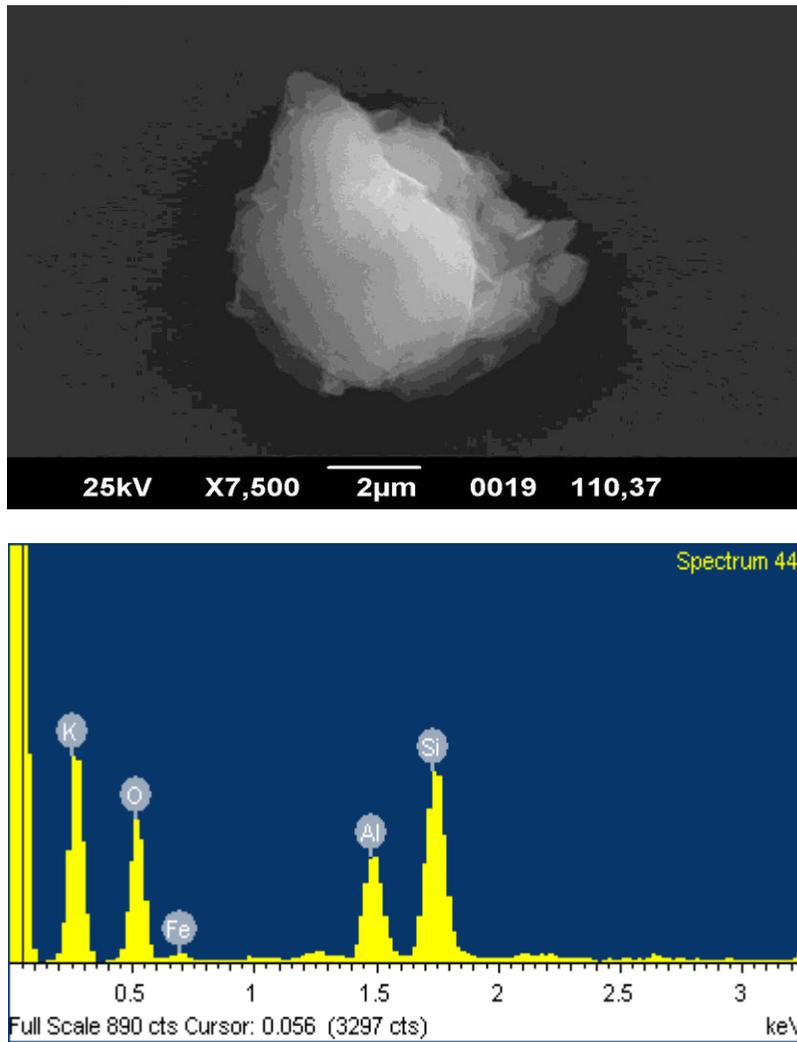


Figura 6.1.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 1a. Profundidad 110.37 m.

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 51.46 | 68.65 |
| Al ₂ O ₃ | Al | 10.70 | 8.47 |
| SiO ₂ | Si | 21.23 | 16.14 |
| K | K | 2.41 | 1.32 |
| Fe | Fe | 14.19 | 5.42 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.1.- Composición de la muestra 1a, profundidad 110.37 m

Muestra 1b. Profundidad: 110.37 m, $\chi = 107.69$

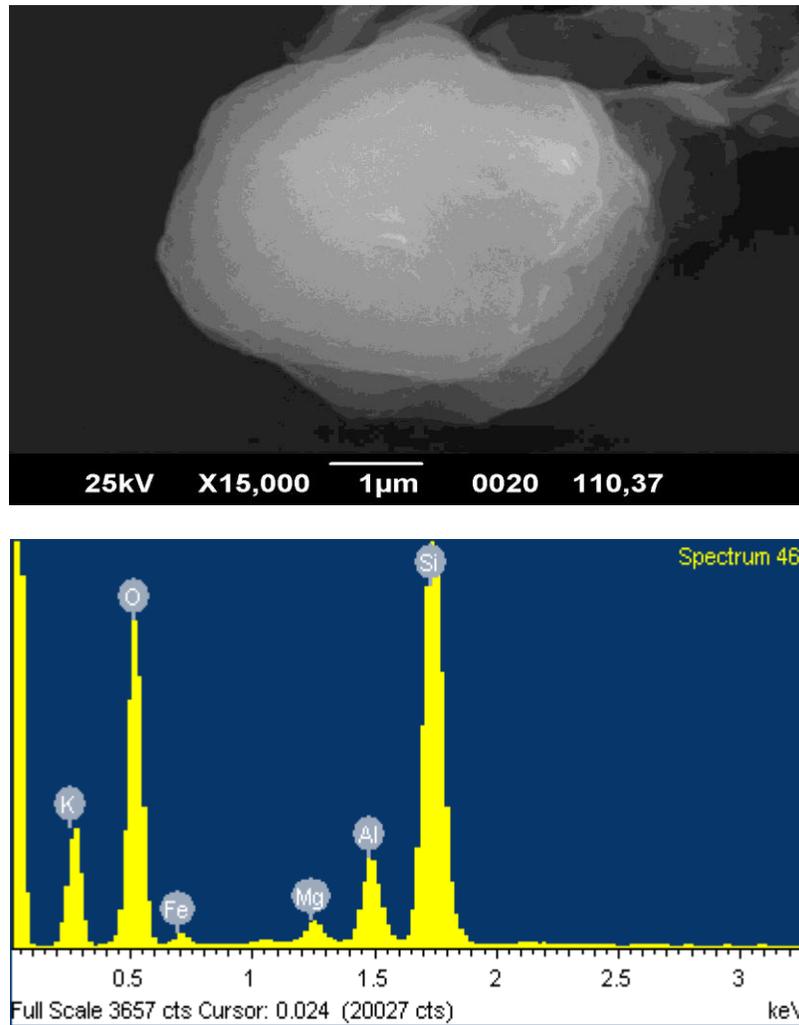


Figura 6.2.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 1b. Profundidad: 110.37 m.

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 62.00 | 75.26 |
| MgO | Mg | 1.76 | 1.41 |
| Al ₂ O ₃ | Al | 4.96 | 3.57 |
| SiO ₂ | Si | 25.70 | 17.77 |
| K | K | 0.34 | 0.17 |
| Fe | Fe | 5.24 | 1.82 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.2.- Composición de la muestra 1b, profundidad 110.37 m

Muestra 1c. Profundidad: 110.37 m, $\chi = 107.69$

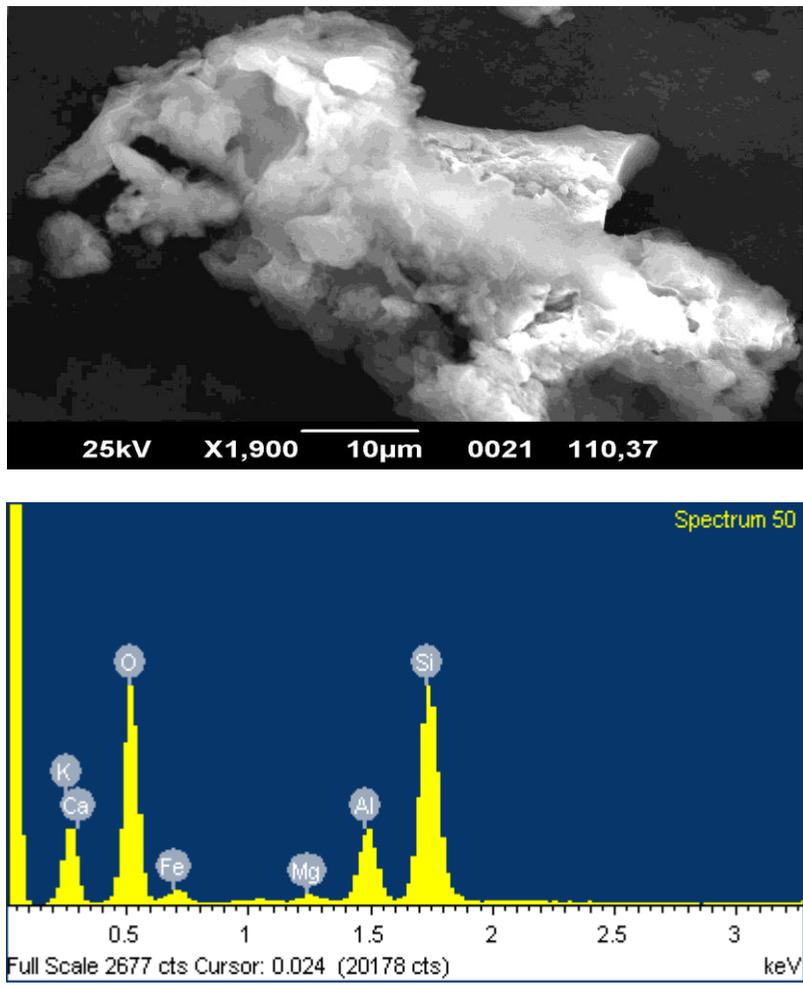


Figura 6.3.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 1c. Profundidad: 110.37 m.

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|--------------------------------|-----------------|---------------|------------------|
| SiO ₂ | O | 61.89 | 75.96 |
| MgO | Mg | 0.86 | 0.70 |
| Al ₂ O ₃ | Al | 7.02 | 5.11 |
| SiO ₂ | Si | 21.57 | 15.08 |
| K | K | 0.43 | 0.22 |
| Ca | Ca | 0.33 | 0.16 |
| Fe | Fe | 7.90 | 2.78 |
| | Total | 100 % | 100 |

Tabla 6.3.- Composición de la muestra 1c. Profundidad: 110.37 m

Muestra 2a. Profundidad: 127.40 m, $\chi = 100.81$

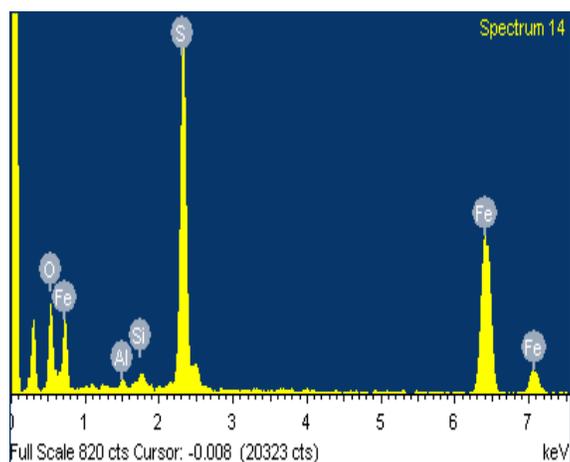
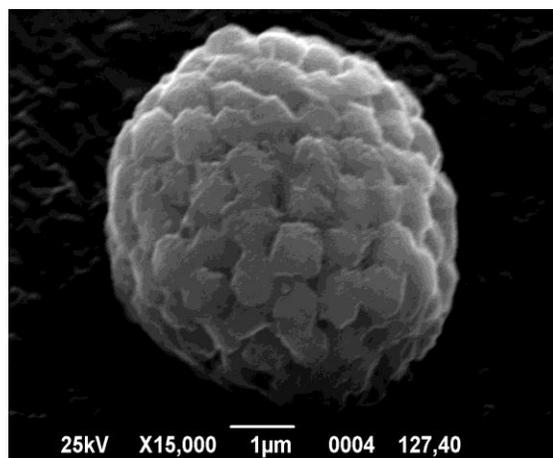


Figura 6.4.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 2a. Profundidad: 127.40 m

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 33.32 | 56.35 |
| Al ₂ O ₃ | Al | 0.95 | 0.95 |
| SiO ₂ | Si | 0.98 | 0.94 |
| FeS ₂ | S | 28.88 | 24.37 |
| Fe | Fe | 35.87 | 17.38 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.4.- Composición de la muestra 2a. Profundidad: 127.40 m

Muestra 2b. Profundidad: 127.40 m, $\chi = 100.81$

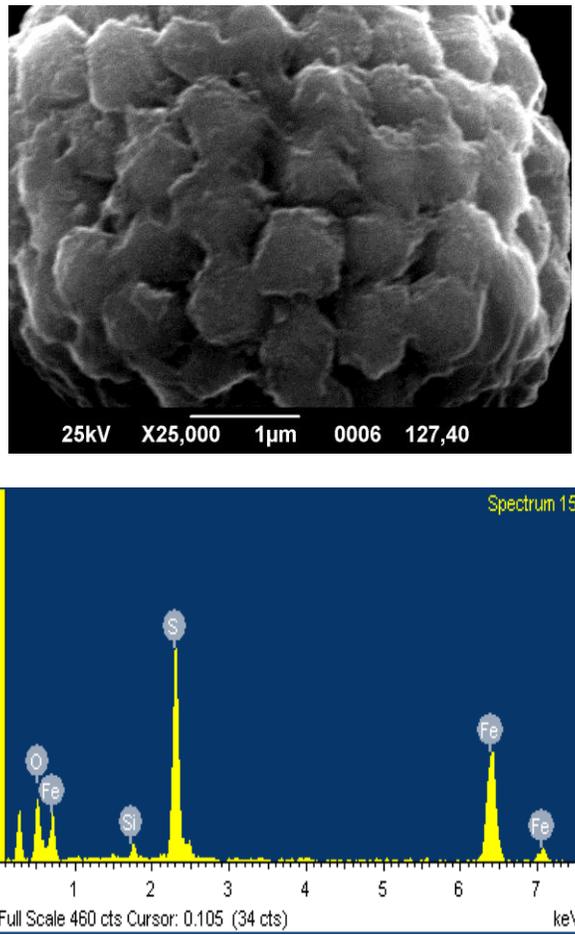


Figura 6.5.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 2b. Profundidad: 127.40 m.

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 34.31 | 57.76 |
| Al ₂ O ₃ | Al | 0.95 | 1.75 |
| FeS ₂ | S | 27.04 | 22.72 |
| Fe | Fe | 36.82 | 17.76 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.5.- Composición de la muestra 2a. Profundidad: 127.40 m

Muestra 3a. Profundidad: 139.31 m, $\chi = 52.39$

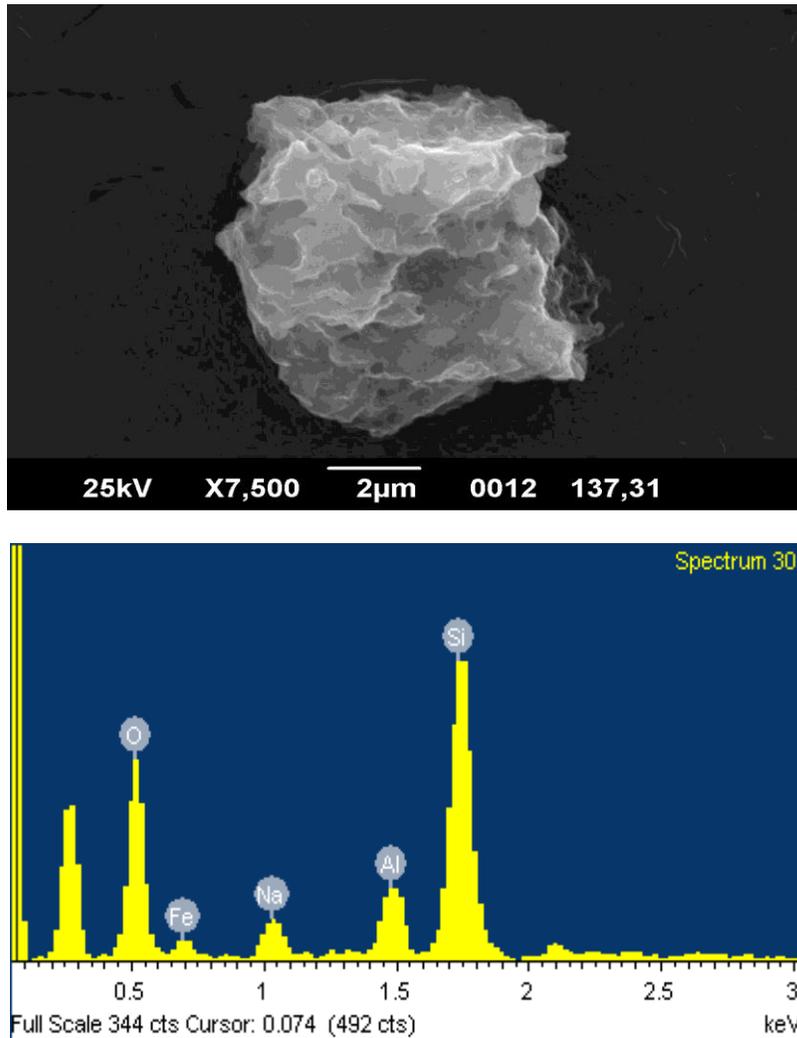


Figura 6.6.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 3a. Profundidad: 139.31 m.

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 51.36 | 66.93 |
| Na | Na | 6.27 | 5.69 |
| Al ₂ O ₃ | Al | 6.22 | 4.81 |
| SiO ₂ | Si | 24.62 | 18.27 |
| Fe | Fe | 11.53 | 4.30 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.6.- Composición de la muestra 3a. Profundidad: 139.31m

Muestra 3b. Profundidad: 139.31 m, $\chi = 52.39$

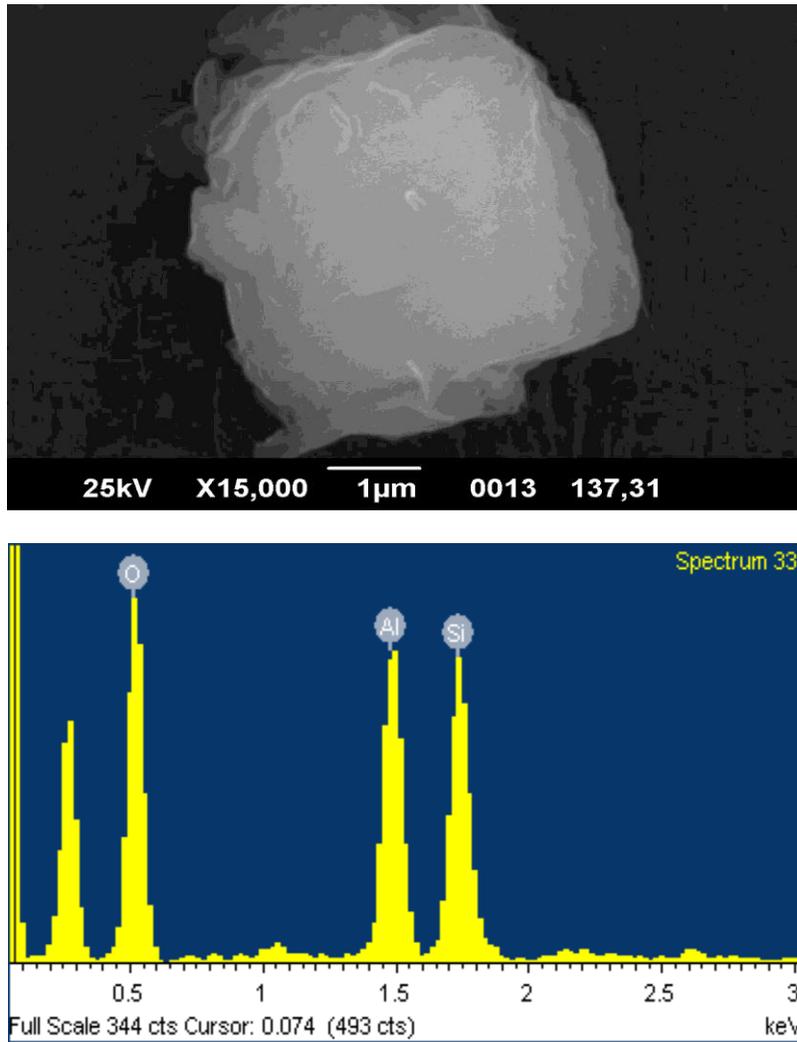


Figura 6.7.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 3b. Profundidad: 139.31m.

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 64.55 | 75.82 |
| Al ₂ O ₃ | Al | 16.61 | 11.57 |
| SiO ₂ | Si | 18.84 | 12.61 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.7.- Composición de la muestra 3b. Profundidad: 139.31m

Muestra 4a. Profundidad: 147.25 m, $\chi = 57.10$

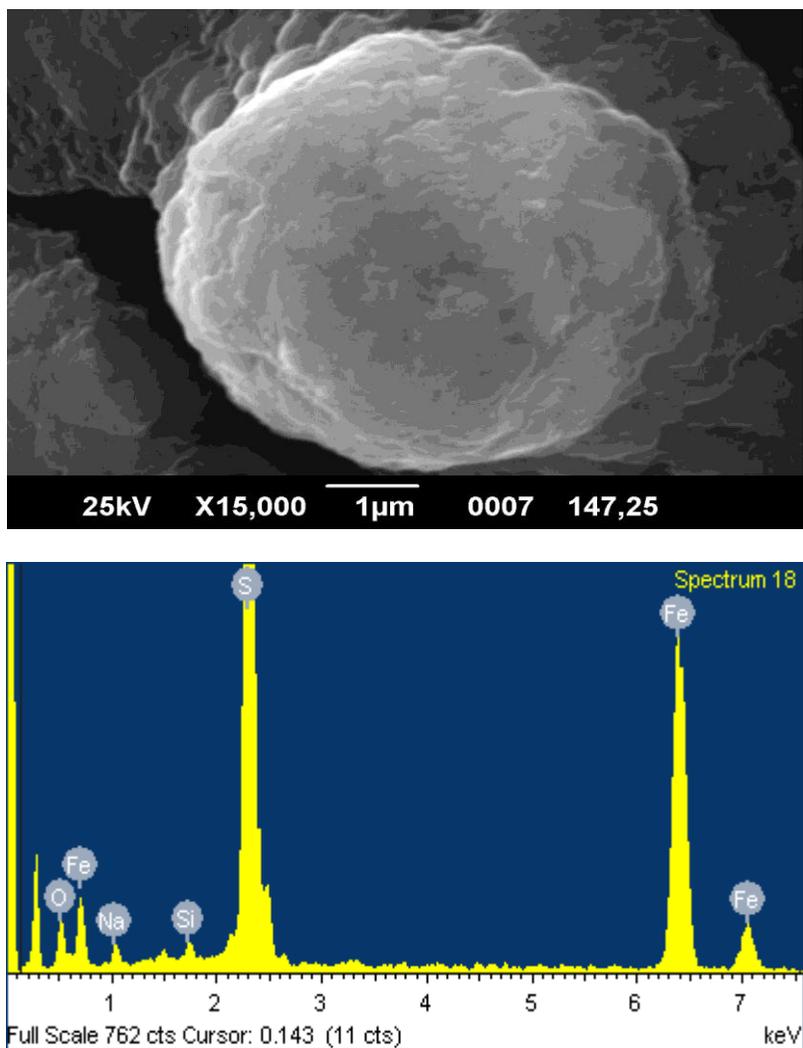


Figura 6.8.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 4a. Profundidad: 147.25 m.

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 13.97 | 28.41 |
| Na | Na | 2.14 | 3.03 |
| SiO ₂ | Si | 0.82 | 0.95 |
| FeS ₂ | S | 44.52 | 45.17 |
| Fe | Fe | 38.54 | 22.45 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.8.- Composición de la muestra 4a. Profundidad: 147.25 m

Muestra 4b. Profundidad: 147.25 m, $\chi = 57.10$

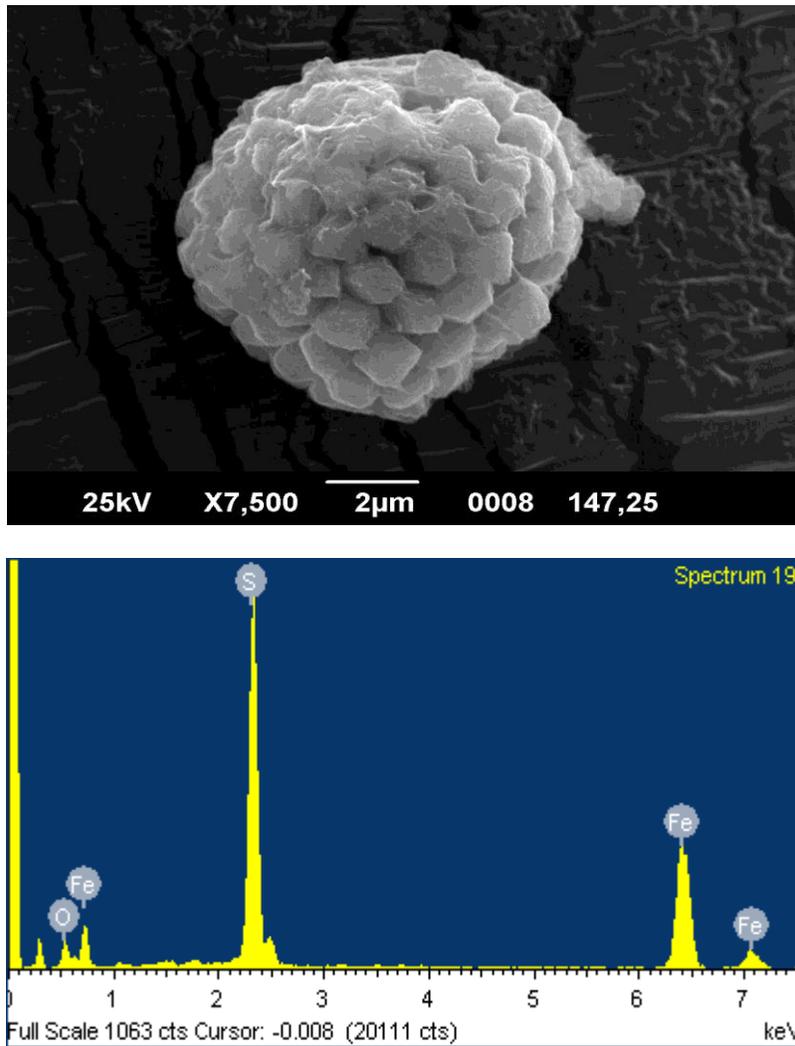


Figura 6.9.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 4b. Profundidad: 147.25 m.

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 18.60 | 36.71 |
| FeS ₂ | S | 41.18 | 40.55 |
| Fe | Fe | 40.21 | 22.73 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.9.- Composición de la muestra 4b. Profundidad: 147.25 m

Muestra 5a. Profundidad: 462.43 m, $\chi = 57.10$

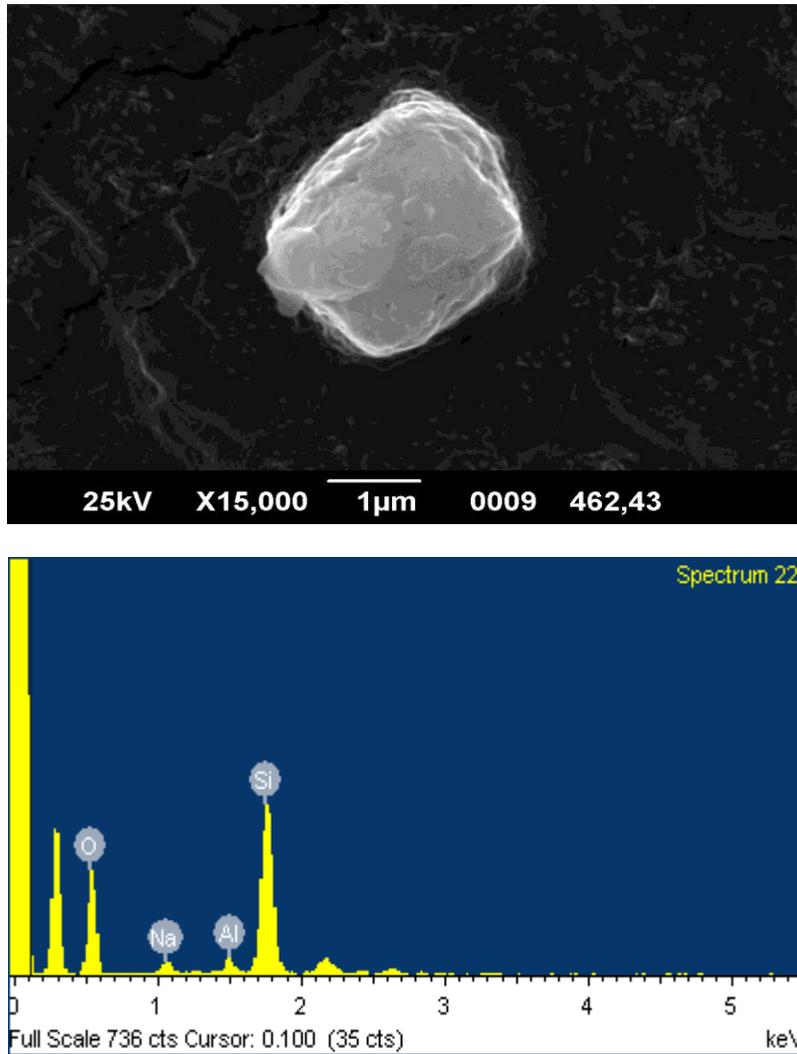


Figura 6.10.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 5a. Profundidad: 462.43 m

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 63.46 | 74.77 |
| Na | Na | 4.28 | 3.51 |
| Al ₂ O ₃ | Al | 2.31 | 1.62 |
| SiO ₂ | Si | 29.95 | 20.10 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.10.- Composición de la muestra 5a. Profundidad: 462.43 m

Muestra 6a. Profundidad: 479.55 m, $\chi = 31.17$

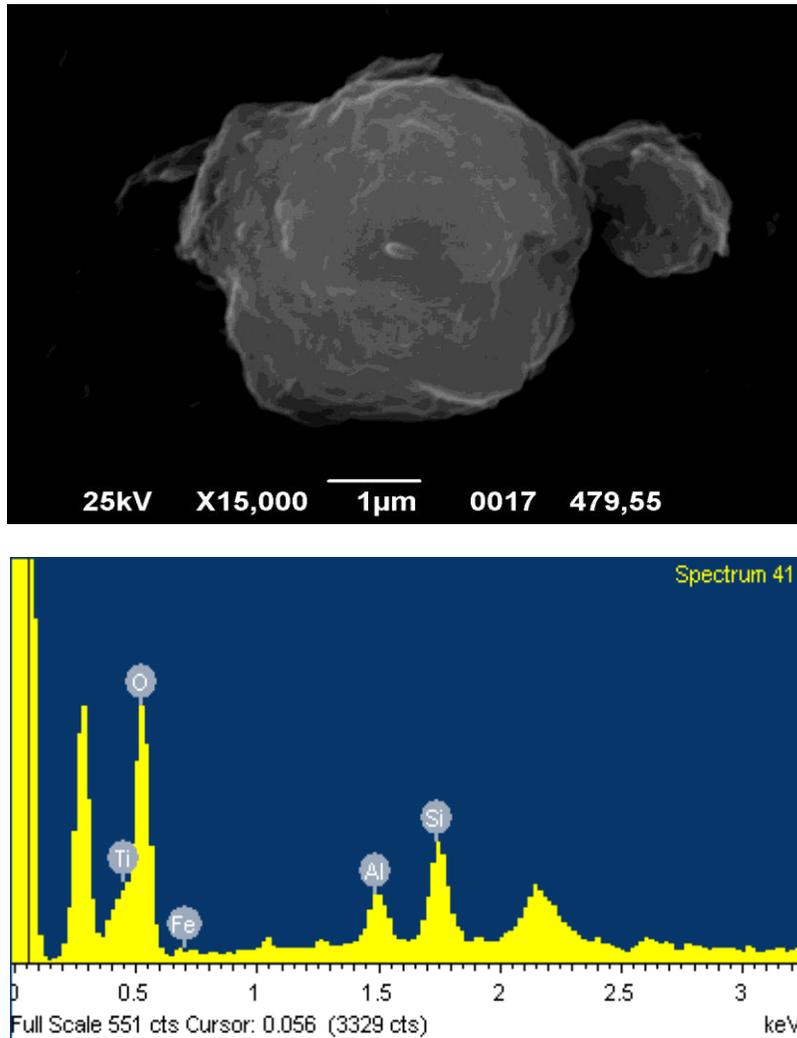


Figura 6.11.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 6a. Profundidad: 479.55 m.

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 57.73 | 79.32 |
| Al ₂ O ₃ | Al | 1.46 | 1.19 |
| SiO ₂ | Si | 2.53 | 1.98 |
| Ti | Ti | 37.35 | 17.14 |
| Fe | Fe | 0.93 | 0.37 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.11.- Composición de la muestra 6a. Profundidad: 479.55 m

Muestra 6b. Profundidad: 479.55 m, $\chi = 31.17$

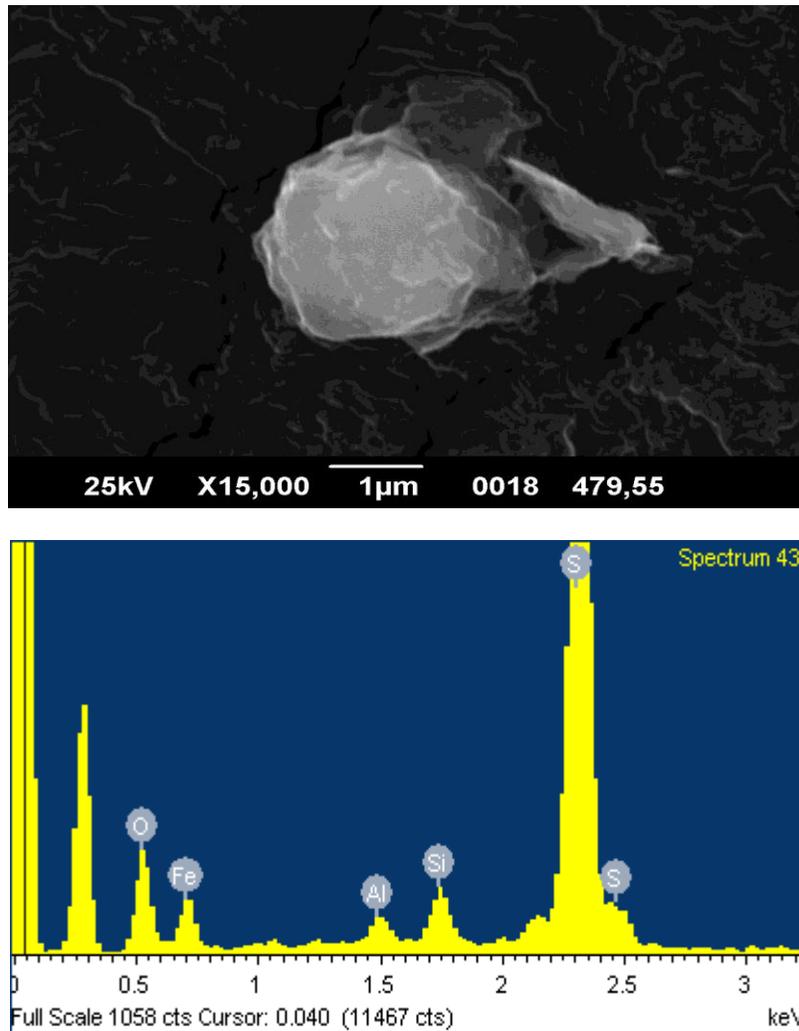


Figura 6.12.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 6b. Profundidad: 479.55 m.

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 29.63 | 50.71 |
| Al ₂ O ₃ | Al | 1.67 | 1.69 |
| SiO ₂ | Si | 3.00 | 2.92 |
| FeS ₂ | S | 34.30 | 29.28 |
| Fe | Fe | 31.41 | 15.40 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.12.- Composición de la muestra 6b. Profundidad: 479.55 m

Muestra 7a. Profundidad: 541.75 m, $\chi = 31.44$

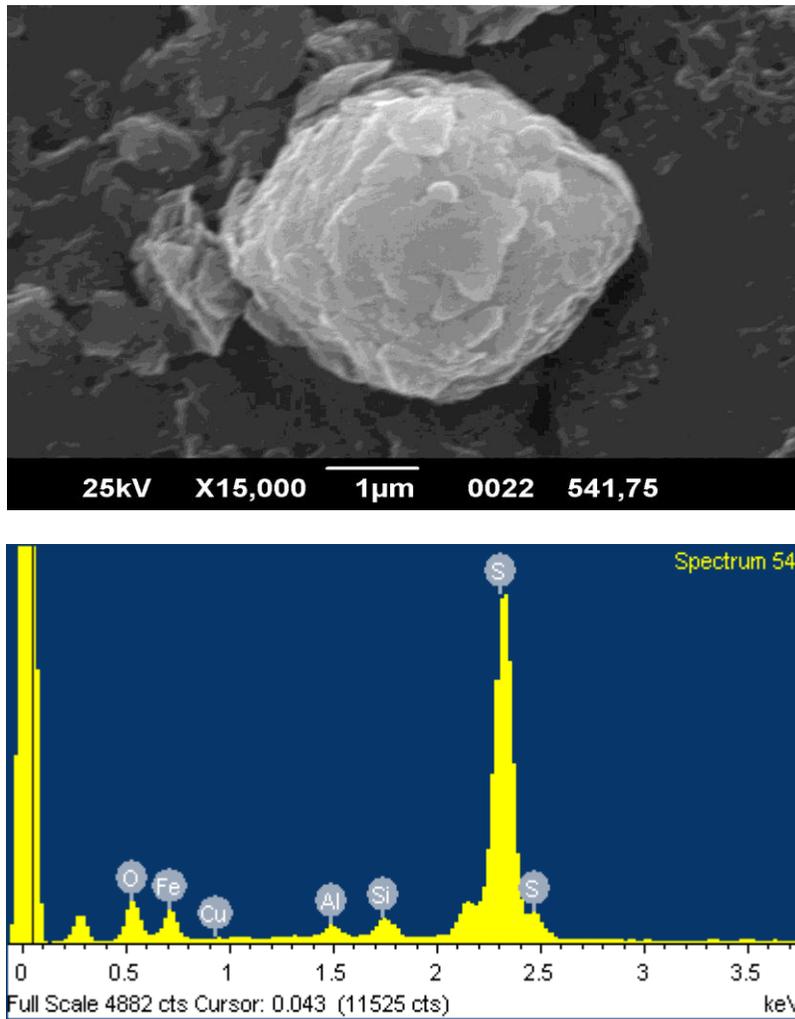


Figura 6.13.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 7a. Profundidad: 541.75 m

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 25.58 | 45.84 |
| Al ₂ O ₃ | Al | 1.66 | 1.76 |
| SiO ₂ | Si | 2.21 | 2.25 |
| FeS ₂ | S | 36.67 | 32.80 |
| Fe | Fe | 33.08 | 16.99 |
| Cu | Cu | 0.80 | 0.36 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.13.- Composición de la muestra 7a. Profundidad: 541.75 m

Muestra 8a. Profundidad: 616.48 m, $\chi = 19.52$

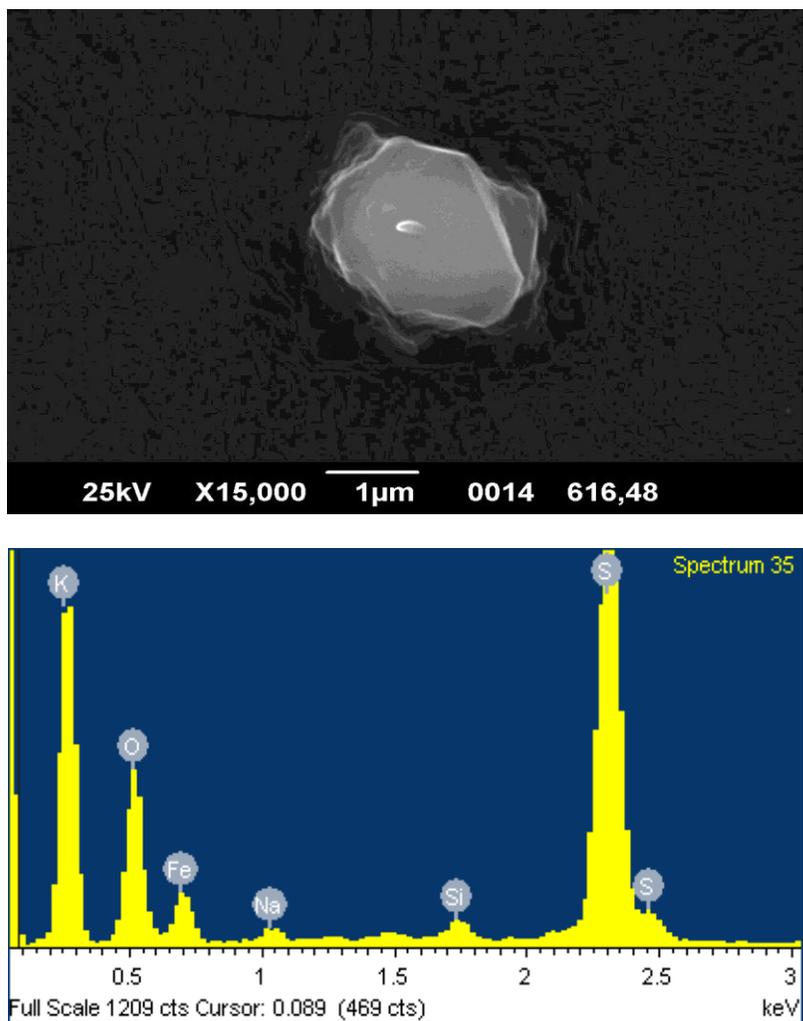


Figura 6.14.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 8a. Profundidad: 616.48 m.

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 44.22 | 66.12 |
| Na | Na | 2.07 | 2.15 |
| SiO ₂ | Si | 1.21 | 1.03 |
| FeS ₂ | S | 25.26 | 18.84 |
| K | K | 0.97 | 0.60 |
| Fe | Fe | 26.28 | 11.26 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.14.- Composición de la muestra 8a. Profundidad: 616.48 m

Muestra 8b. Profundidad: 616.48 m, $\chi = 19.52$

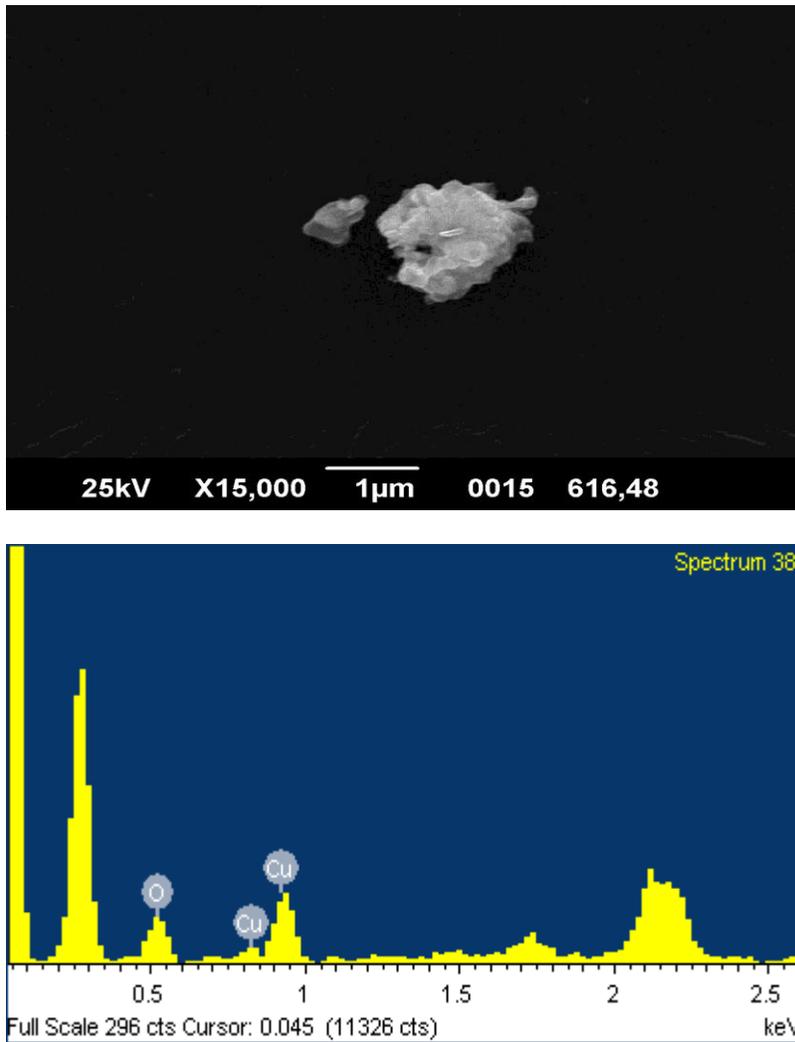


Figura 6.15.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 8b. Profundidad: 616.48 m.

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 43.01 | 74.98 |
| Cu | Cu | 56.99 | 25.02 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.15.- Composición de la muestra 8b. Profundidad: 616.48 m

Muestra 8c. Profundidad: 616.48 m, $\chi = 19.52$

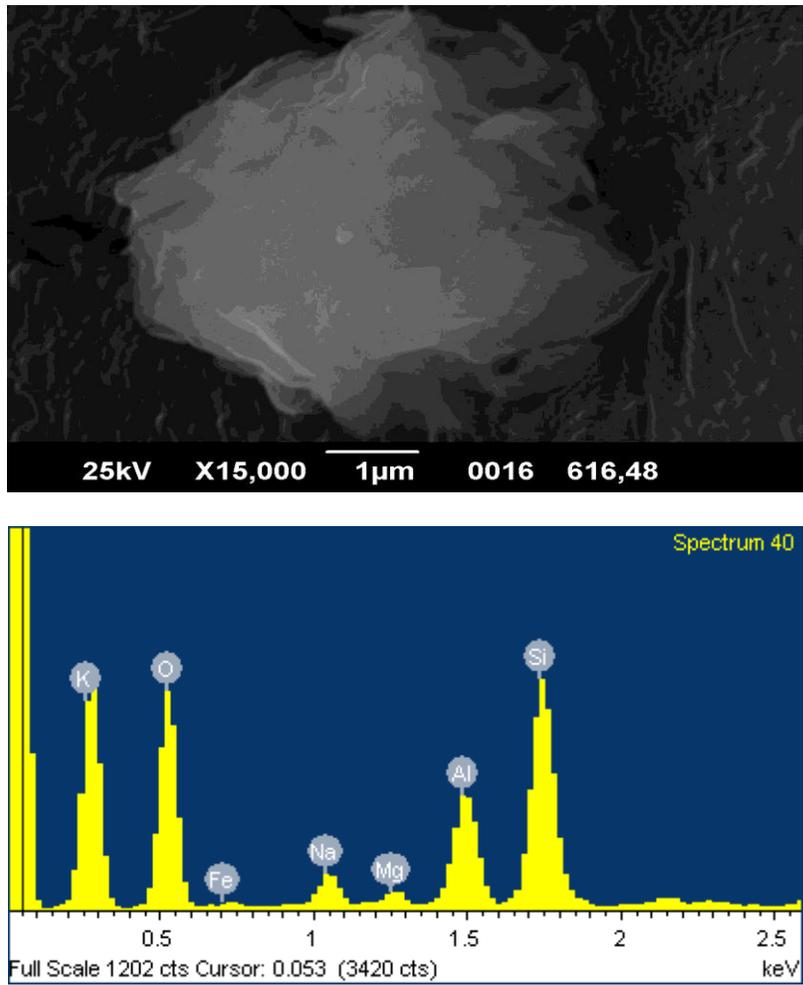


Figura 6.16.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 8c. Profundidad: 616.48 m.

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|--------------------------------|--------------|--------------|------------|
| SiO ₂ | O | 59.28 | 72.16 |
| Na | Na | 4.94 | 4.18 |
| MgO | Mg | 1.35 | 1.08 |
| Al ₂ O ₃ | Al | 9.35 | 6.75 |
| SiO ₂ | Si | 19.63 | 13.61 |
| K | K | 2.15 | 1.07 |
| Fe | Fe | 3.30 | 1.15 |
| | Total | 100 % | 100 |

Tabla 6.16.- Composición de la muestra 8c. Profundidad: 616.48 m

Muestra 9a. Profundidad: 627.36 m, $\chi = 14.04$

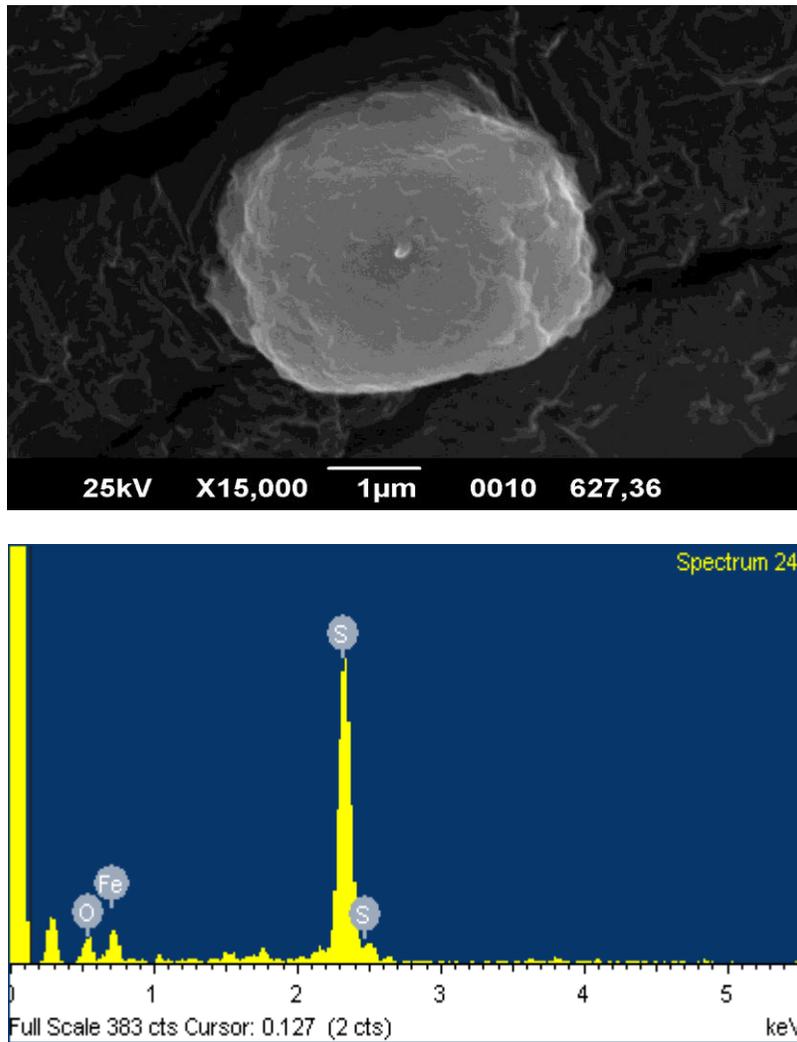


Figura 6.17.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 9a. Profundidad: 627.36 m

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 22.49 | 42.25 |
| FeS ₂ | S | 40.19 | 37.67 |
| Fe | Fe | 37.32 | 20.08 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.17.- Composición de la muestra 9a. Profundidad: 627.36 m

Muestra 9b. Profundidad: 627.36 m, $\chi = 14.04$

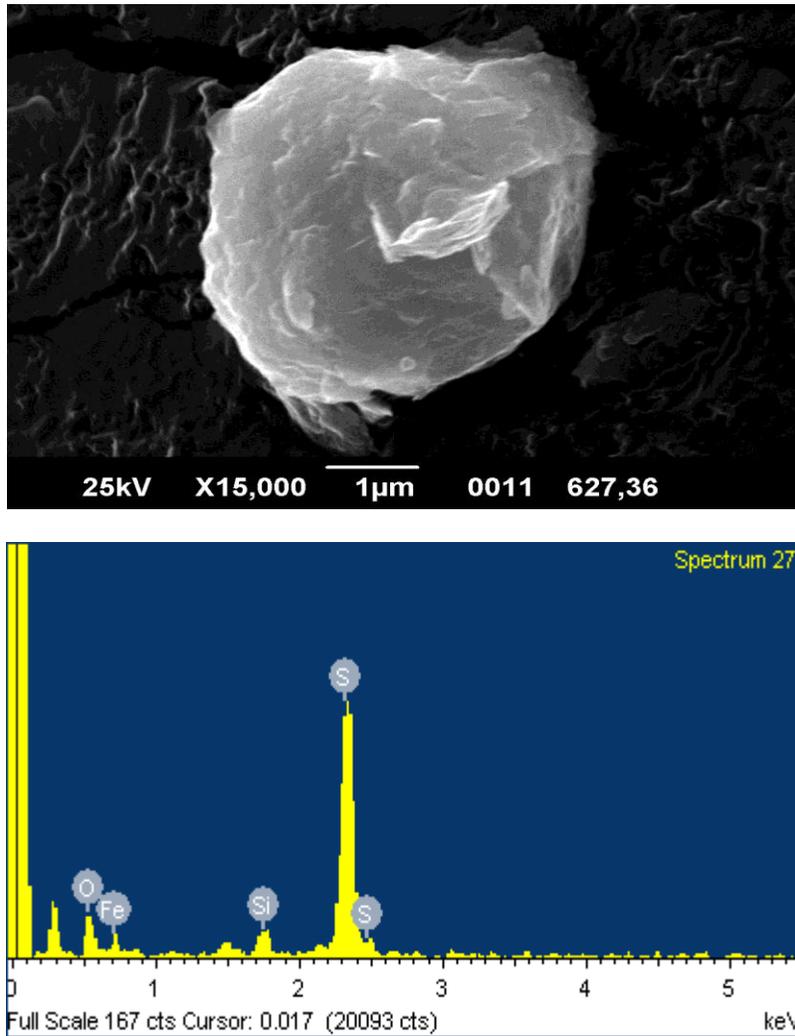


Figura 6.18.- Fotomicrografía y EDX de la muestra 9b. Profundidad: 627.36 m

| Compuesto químico | Elemento | % Peso | % Atómico |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| SiO ₂ | O | 31.02 | 52.52 |
| SiO ₂ | Si | 3.69 | 3.56 |
| FeS ₂ | S | 34.06 | 28.77 |
| Fe | Fe | 31.23 | 15.15 |
| | Total | 100 % | 100 % |

Tabla 6.18.- Composición de la muestra 9b. Profundidad: 627.36

Los estudios de espectroscopía de dispersión de rayos X (EDX) realizados en las nueve muestras nos indican la presencia de diferentes elementos químicos tales como: hierro (Fe), azufre (S), cobre (Cu), silicio (Si), aluminio (Al), potasio (K), magnesio (Mg), sodio (Na), entre otros. Es muy probable que las concentraciones de Si, Al, K, Cu y Na estén reflejando la composición química del entorno y no, específicamente, del cristal analizado.

En las fotomicrografías se muestran las imágenes topográficas de los granos magnéticos. En los niveles de profundidad de 127,40 m y 147,27 m (figuras 6.4 y 6.9, respectivamente), se observan framboides de minerales magnéticos típicamente autigénicos, los cuales están compuestos por cristales magnéticos submicrónicos de hierro (Fe) y azufre (S), lo que sugiere que estos minerales podrían ser el resultado de un reemplazo parcial de magnetita en pirita producto de un ambiente reductor inducido por el yacimiento petrolífero subyacente (Aldana et al, 1996; Costanzo - Álvarez et al, 2000; López et al, 2009). De esta manera, los valores anómalos de susceptibilidad magnética encontrados a estas profundidades pudieran asociarse a la presencia de minerales magnéticos secundarios (anomalías tipo A).

Mientras que en aquellos niveles de profundidad en los cuales no se encontró presencia de framboides los valores anómalos de susceptibilidad podrían ser producto del contenido de hierro y otros minerales magnéticos (anomalías tipo B), lo cual sugeriría que no se produjo alteración de las mineralogías magnéticas primarias. Para estos niveles de profundidad los análisis de EDX revelan un alto contenido de S, debido a que los paleoambientes de sedimentación en las litologías del pozo Saltarín 1A son principalmente lacustres. Es probable también que las anomalías de S en estas muestras sean producto de contaminación de crudo proveniente de un yacimiento petrolífero subyacente. Ninguno de estos granos minerales presentan rasgos morfológicos característicos de óxidos o sulfuros de Fe autigénicos.

Para el intervalo entre 305 y 610 metros de profundidad, en el cual se llevó a cabo la inferencia de $\delta^{18}\text{O}$, no se observó la presencia de framboides, lo cual podría ser evidencia

de que en este intervalo las mineralogías magnéticas presentes en las muestras son de carácter principalmente primario o de procesos diagenéticos tempranos casi contemporáneos con la sedimentación.

6.2 Resultados y análisis del estudio de microscopía óptica

Se realizaron estudios de foraminíferos a 33 muestras del pozo Saltarín 1A, para determinar sus edades geológicas. Las 33 muestras utilizadas para el estudio fueron analizadas en un microscopio óptico. La observación directa también nos sirvió para la identificación de las características de las mineralogías presentes en ellas. Entre estas características se encuentran el color y la morfología de los granos. En el apéndice 2 se describen las características de los minerales presentes en las muestras observadas mediante el análisis óptico.

Cuando una muestra contiene óxidos de hierro, estos suelen impartir a los sedimentos un color rojizo o marrón rojizo. Muestras con tonalidades rojizas contienen mayor cantidad de hematita en su composición ya que este mineral posee esta tonalidad y es uno de los más abundantes en la corteza terrestre. Otros granos minerales podrían presentar tonalidades grises, que nos indicarían la presencia en mayor proporción de magnetita.

La morfología de los granos minerales, nos suministrar información acerca de los procesos de transporte, deposición y la historia diagenética de los sedimentos.

En el perfil de cociente S (ver capítulo IV) se puede observar que predominan las fases magnéticas de baja coercitividad, ya que la mayoría de las muestras presentan valores de cociente S cercanos a 1, es decir, mayor porción magnetita. Esto concuerda con las observaciones directas de microscopía óptica ya que para la mayoría de las muestras se observa gran cantidad de un mineral de tonalidad gris (posiblemente magnetita). En algunas profundidades también se observa gran cantidad de minerales de color rojizo, óxidos de

hierro (posiblemente hematita), los valores del cociente S cercanos a 0, para estas profundidades, concuerdan con estas observaciones.

En las muestras 28 y 29 (ver apéndice 2), observamos un mineral de color verde oscuro, posiblemente glauconita. La glauconita es una arcilla característica de la alteración diagenética temprana de la biotita depositada en un ambiente sedimentario marino (ambiente reductor). Esta observación parece estar de acuerdo con los valores de cociente S cercanos a 1 para estas muestras lo cual sugiere un paleoambiente reductor (transgresión).

En los minerales observados predominan los granos con morfología euhedral, es decir, granos con caras, bordes y vértices bien desarrolladas y sin marcas apreciables de alteración. Esto evidencia que en dichas muestras no se produjeron alteraciones apreciables en las composiciones mineralógicas y podrían ser primarias o el producto de un proceso diagenético temprano.

De las observaciones directas realizadas mediante microscopía electrónica y óptica, podemos inferir que en el pozo Saltarín 1A no se aprecian alteraciones obvias en las mineralogías magnéticas, en el intervalo de datos a estudiar (de 305 m a 610 m).

6.3 Resultados y análisis del estudio de foraminíferos

Se realizaron estudios de foraminíferos a 33 muestras del pozo Saltarín 1A, para determinar las edades geológicas a las que pertenecen y con el fin de establecer la relación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ global, dados en Ma, y los parámetros magnéticos: cociente S (CS) y susceptibilidad magnética (χ) dados en profundidad.

En el estudio de estas muestras no se encontraron foraminíferos, lo cual podría ser el resultado de lo inadecuado de las condiciones termoquímicas del ambiente de depositación (PH, salinidad, entre otras) para que estos microorganismos puedan vivir y conservarse después de muertos.

6.4 Comparación entre los ciclos eustáticos y el cociente S

Los ciclos eustáticos son los cambios del nivel del mar que han afectado a la Tierra durante toda su historia geológica y que son inducidos por fenómenos climáticos o tectónicos. Entre los factores climáticos que producen cambios significativos en el nivel del mar se encuentra el glaciario. Por otro lado, los fenómenos tectónicos globales que inducen cambios en el nivel del mar son producidos, por ejemplo, por el crecimiento desigual de las dorsales oceánicas, colisión entre placas, entre otras.

La comparación entre los ciclos eustáticos y el cociente S es válida, ya que el cociente S nos mide la proporción relativa entre minerales ferrimagnéticos de baja coercividad (magnetita) y antiferrimagnéticos de alta coercividad (hematita) reflejando cambios en las paleocondiciones óxido-reductoras de los distintos estratos analizados, lo que indirectamente nos indica los eventos transgresivos y regresivos que han ocurrido en el pozo Saltarín 1A. En la figura 6.19 se muestra una tabla de los ciclos eustáticos a nivel global (Vail et. al, 1977) y paralelamente el perfil del cociente S medido directamente del pozo Saltarín 1A. Se muestran también dos líneas rojas que corresponden a los dos amarres de edades disponibles, ubicados a 305 m y 610 m de profundidad para el tope del Mioceno medio y el tope del Mioceno inferior respectivamente (Carlos Jaramillo, comunicación personal).

Al comparar ambos perfiles, observamos que entre los dos amarres de edades el cociente S parece coincidir en dos eventos regresivos globales mostrados en el perfil de los ciclos eustáticos. En general, el comportamiento del cociente S entre estos dos amarres de edades es muy similar al comportamiento de los ciclos eustáticos, lo que nos hace pensar que las mineralogías magnéticas presentes en las muestras del pozo Saltarín 1A, para este intervalo no sufrieron alteraciones diagenéticas tardías. De aquí que, muy probablemente, al inferir los valores $\delta^{18}\text{O}$ globales a partir del cociente S obtendremos una buena correlación entre ambos parámetros.

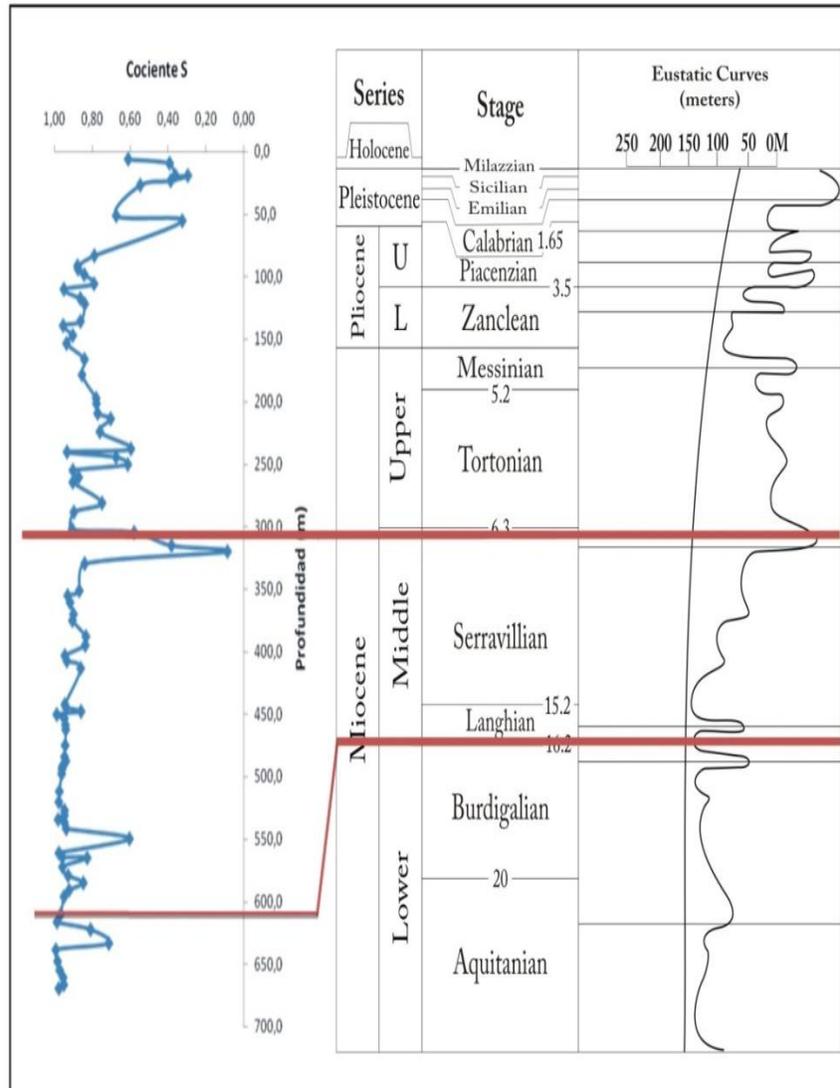


Figura 6.19.- Comparación entre el perfil de cociente S para el pozo Salterín 1A (figura de la izquierda) y los ciclos eustáticos a nivel global (figura de la derecha), entre dos amarres de edades.

6.5 Asociación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$, cociente S y susceptibilidad magnética

Debido al hecho de que no fue posible determinar las edades de las muestras, se realizó la asociación entre los valores de CS y χ del pozo y los valores globales de foraminíferos bénticos de $\delta^{18}\text{O}$ suponiendo una tasa de sedimentación constante entre dos

amarres de edades disponibles, ubicados a 305 m y 610 m de profundidad para el tope del Mioceno medio y el tope del Mioceno inferior respectivamente (Carlos Jaramillo, comunicación personal), obteniéndose 44 valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ a la misma profundidad (ver apéndice 1).

En las figuras 6.20a y 6.20b, se muestra la variación de la susceptibilidad magnética y el cociente S para el pozo Saltarín 1A en profundidad para el intervalo de 305 a 610 m. El primer parámetro magnético puede ser usado como una medida de la concentración y tipo de minerales ferrimagnéticos (magnetita) presentes en una muestra de roca y es considerado, como un parámetro magnético cuya variabilidad refleja la ciclicidad climática global (Shackleton y Opdyke, 1973; Kent, 1982; Walden et al., 1999). Por otro lado, el segundo parámetro, nos da una medida relativa de las contribuciones entre minerales magnéticos de baja (magnetita) y alta (hematita) coercividad, reflejando cambios en las paleocondiciones óxido-reductoras de los distintos estratos analizados con valores cercanos a cero para ambientes netamente oxidantes (eventos regresivos) y valores cercanos a 1 para ambientes netamente reductores (eventos transgresivos). De esta forma se esperaría que la variabilidad de estos parámetros estuviese ligada, en mayor o menor grado, a los cambios climáticos globales descritos por los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos.

En la figura 6.20c considerando la tasa de sedimentación constante entre los dos amarres de edades disponibles, se muestra el perfil correspondiente con los cambios globales de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ para foraminíferos béticos a los mismos niveles de profundidad que los parámetros CS y χ . En el perfil de $\delta^{18}\text{O}$ los períodos glaciares vendrían representados por valores altos de $\delta^{18}\text{O}$ mientras que los de calentamiento global por los valores bajos de $\delta^{18}\text{O}$. En principio, suponiendo que los valores de CS respondieran únicamente a ciclos climáticos y ciclos eustáticos globales, y que la tasa de sedimentación entre el tope del Mioceno medio y el tope del Mioceno inferior, para el pozo Saltarín 1A, fuese constante; aun así se podría esperar que ambos parámetros correlacionaran en sentido inverso, es decir, que para aquellos niveles con valores altos de CS encontrásemos valores bajos de $\delta^{18}\text{O}$ y viceversa. Esta correspondencia inversa se observa, a simple vista, al comparar el perfil 6.20b con el 6.20c para algunos intervalos de profundidad.

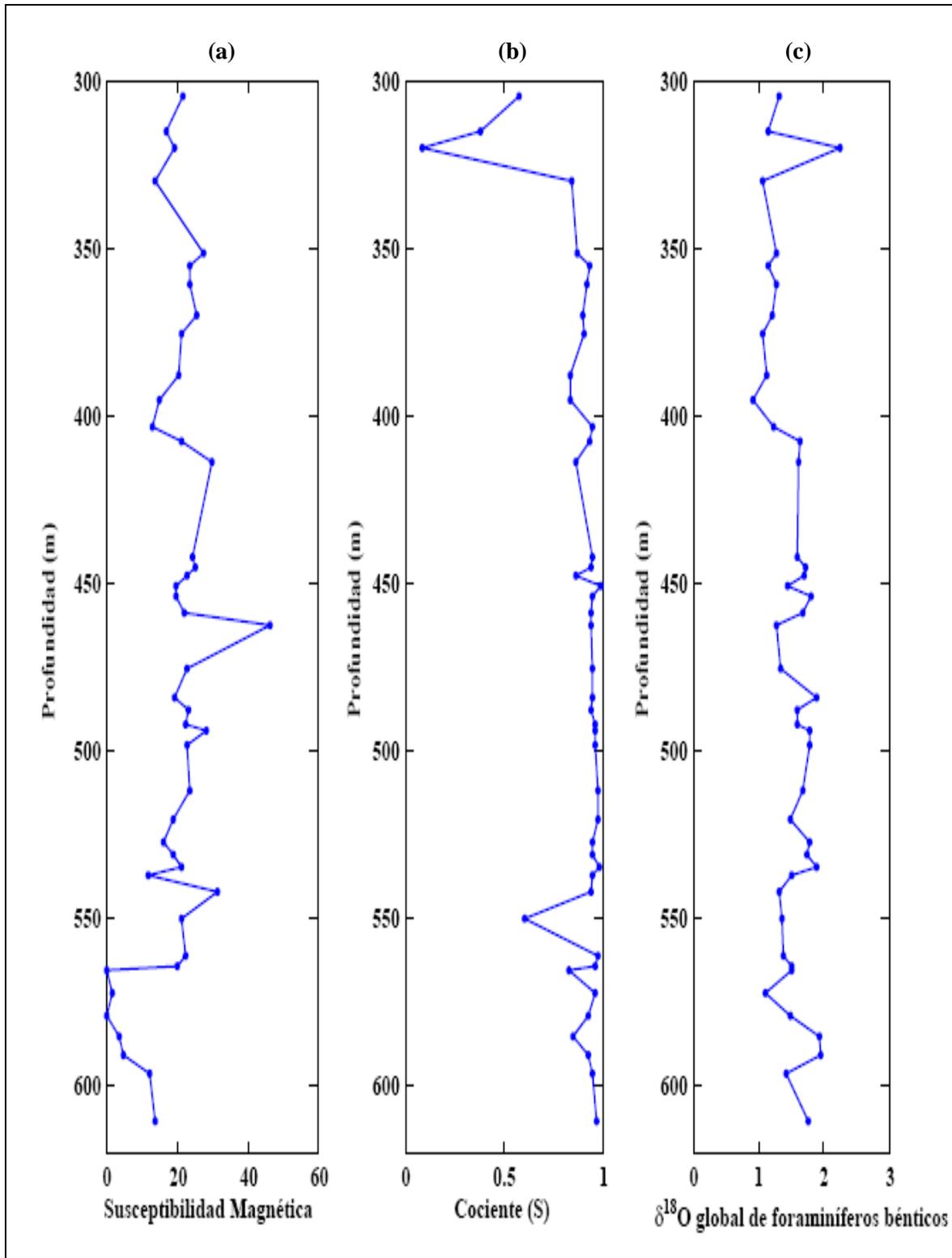


Figura 6.20.- Medidas de: (a) Susceptibilidad Magnética, (b) Cociente S y (c) $\delta^{18}\text{O}$ globales (asumiendo una tasa de sedimentación constante entre los dos amarres de edades disponibles), graficados a profundidad en metros.

6.6 Conclusiones de los resultados experimentales

En esta sección se presentan las conclusiones más importantes de los resultados experimentales:

- La mayoría de las muestras analizadas presentan cantidades anómalas de S, debido a que los paleoambientes de sedimentación en las litologías del pozo Saltarín 1A son principalmente lacustres es muy probable que las anomalías de S en las muestras sean producto de contaminación de crudo proveniente de un yacimiento petrolífero subyacente.
- Los resultados obtenidos de SEM y EDX, parecen indicar que las muestras provenientes de niveles estratigráficos entre los 305 y 610 metros de profundidad, no presentan mineralogías magnéticas secundarias productos de procesos de diagénesis tardía (ej.: framboides).
- Los minerales analizados mediante microscopía óptica presentan morfología euhedral, esto evidencia que dichas muestras son principalmente de carácter primario o autigénico temprano sin evidencias claras de procesos abrasivos de erosión y transporte.
- Las observaciones directas realizadas a un número de muestras por microscopía electrónica y microscopía óptica, nos indica que para el intervalo de datos a estudiar no parece haber alteración tardía de las mineralogías magnéticas.
- El estudio de foraminíferos dio resultados negativos lo que puede deberse a que las condiciones para que estos microorganismos cohabiten y/o sean preservados en un paleoambiente deposicional como el de los estratos del Pozo Saltarín 1A, no eran las apropiadas.
- Debido al hecho de que no se pudieron determinar las edades de estas rocas mediante los estudios bioestratigráficos, partimos de la hipótesis de una tasa de

sedimentación constante entre dos amarres de edades disponibles entre los 305 y los 610 metros de profundidad.

CAPÍTULO VII

RESULTADOS Y ANÁLISIS COMPUTACIONALES

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para las pruebas realizadas con los valores de entrada de:

- a. Variación isotópica del oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) y cociente S (CS)
- b. Variación isotópica del oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) y susceptibilidad magnética (χ)
- c. Variación isotópica del oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$), cociente S (CS) y susceptibilidad magnética (χ)

Para la totalidad de datos en estudio (tope Mioceno Medio/tope Mioceno Inferior), así como para cada una de las sub-divisiones realizadas, aplicando los modelos que se describieron en el capítulo V. Para el entrenamiento de la red neuronal difusa con las tres combinaciones de valores de entrada se consideraron los datos de todo el perfil y las 4 subdivisiones de esta manera:

- Toda la columna: de 305 a 610 m.
- Sección 1 (S1): de 305 a 381,25 m.
- Sección 2 (S2): de 381,25 a 457,5 m.
- Sección 3 (S3): de 457,5 a 533,75 m.
- Sección 4 (S4): de 533,75 a 610 m.

7.1 Correlación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y los parámetros magnéticos cociente S (CS) y susceptibilidad magnética (χ), utilizando un método de regresión lineal

Para estudiar la correlación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ para foraminíferos béticos y los parámetros magnéticos de cociente S (CS) y susceptibilidad magnética (χ) utilizando un método de regresión lineal convencional, hemos utilizado el programa Excel. En la figura 7.1 se muestran los resultados obtenidos, colocamos el mejor ajuste con Excel, donde observamos que el coeficiente de correlación lineal entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS es del 5.6% y el coeficiente de correlación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ es del 0.6%. En ambos casos la correlación obtenida mediante el uso de un método convencional es muy baja, lo cual justifica la utilización de la técnica computacional de redes neuronales difusas para establecer la relación entre los parámetros de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ .

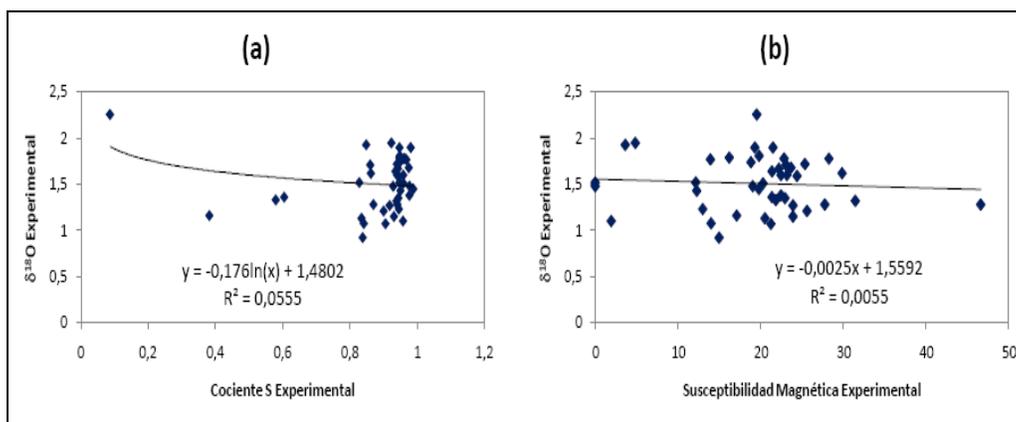


Figura 7.1.- Gráficos cruzados de (a) cociente S experimental vs $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos y (b) susceptibilidad magnética experimental vs $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos, para toda la columna (305 – 610 m).

7.2 Entrenamiento de la red neuronal

En esta sección se muestran los resultados relacionados con el entrenamiento de la RND para los tres casos a, b y c, enumerados al inicio del capítulo.

7.2.1 Entrenando la red con $\delta^{18}\text{O}$ y cociente S (CS)

Una de las pruebas más importantes realizadas, consistió en la determinación del modelo matemático a ser utilizado. En la figura 7.2 se muestran los perfiles del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos e inferido, graficados en profundidad, así como los gráficos cruzados del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos vs $\delta^{18}\text{O}$ inferido experimental, al entrenar la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para los modelos A, B, C y D, utilizando 4 reglas difusas. En estas figuras observamos que las mejores relaciones de linealidad se obtienen mediante los modelos A ($\delta^{18}\text{O} - \text{CS}$) y C ($\text{Log}(\delta^{18}\text{O}) - \text{CS}$), con un coeficiente de correlación del 41.82% y 41.52% respectivamente. La diferencia entre ambos modelos es de apenas el 0.30%, lo que nos indica que el factor potencial que afecta a el $\delta^{18}\text{O}$ podría ser próximo a 1. Por simplicidad en la interpretación, hemos utilizado el modelo A como modelo de inferencia de $\delta^{18}\text{O}$.

Hemos encontrando que la mejor inferencia del $\delta^{18}\text{O}$ entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para los datos en estudio (tope Mioceno Medio/tope Mioceno Inferior), asumiendo una tasa de sedimentación constante, se obtiene con ecuaciones del tipo: $\delta^{18}\text{O} = a\text{CS} + b$ (modelo A). Este modelo lo hemos utilizado posteriormente para inferir el $\delta^{18}\text{O}$ para los datos de entrada de las subdivisiones realizadas S1, S2, S3 y S4.

Otro factor importante, es la determinación del número de reglas a ser utilizado. En la figura 7.3 se muestran los perfiles del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos e inferido graficados en profundidad, así como los gráficos cruzados del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos vs $\delta^{18}\text{O}$ inferido, para el entrenamiento con el modelo A, utilizando de 2 a 4 reglas difusas. En estas figuras podemos observar que al entrenar la red con 2 y 3 reglas difusas obtenemos un coeficiente de correlación del 26.3% y 29.1% respectivamente. Sin embargo, la mejor inferencia se obtiene entrenando la red con 4 reglas difusas, obteniéndose un coeficiente de correlación del 41.8%.

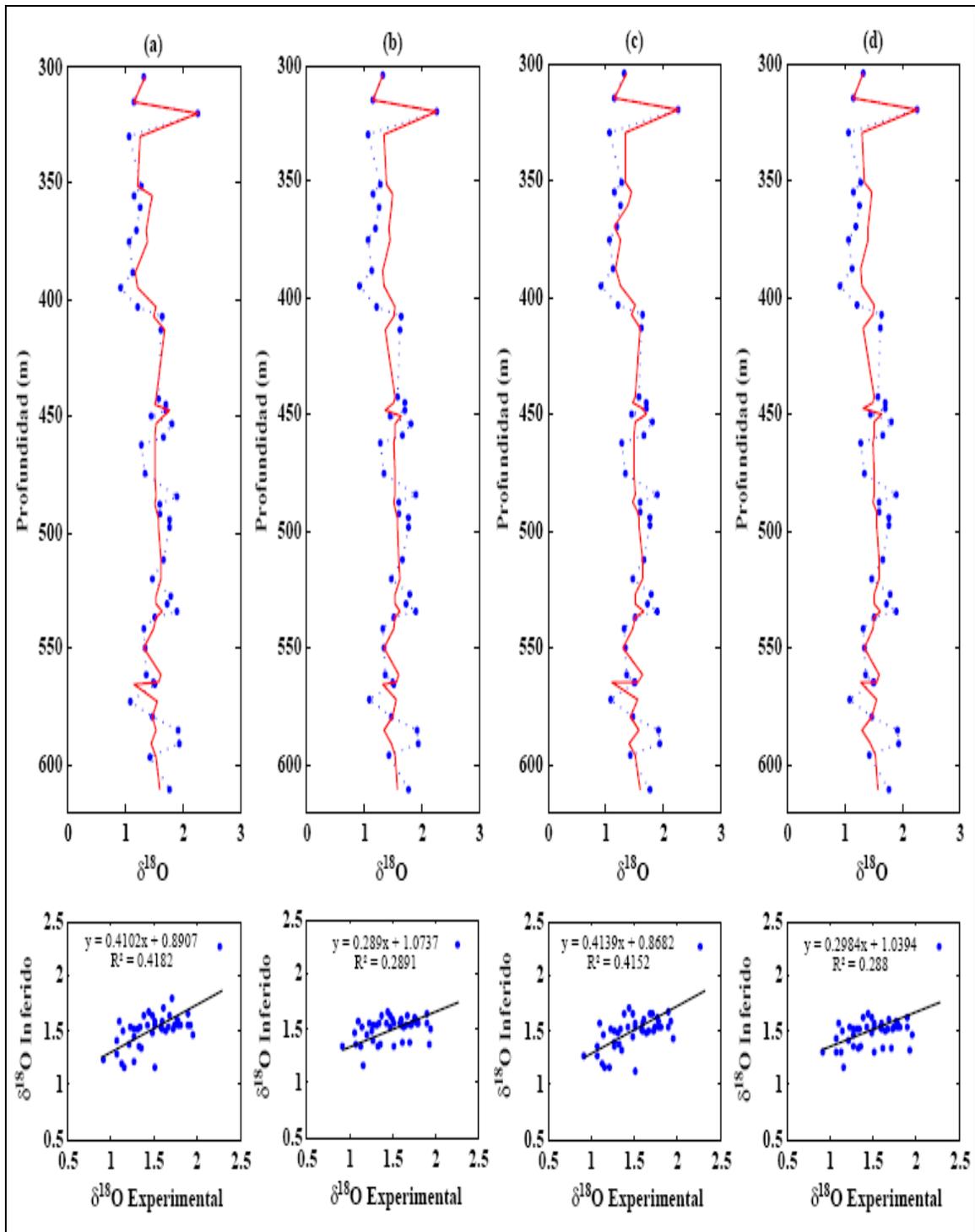


Figura 7.2.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros, así como los gráficos cruzados de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido, para toda la columna (305 – 610 m), entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS usando 4 reglas difusas, para: (a) Modelo A, (b) Modelo B, (c) Modelo C y (d) Modelo D.

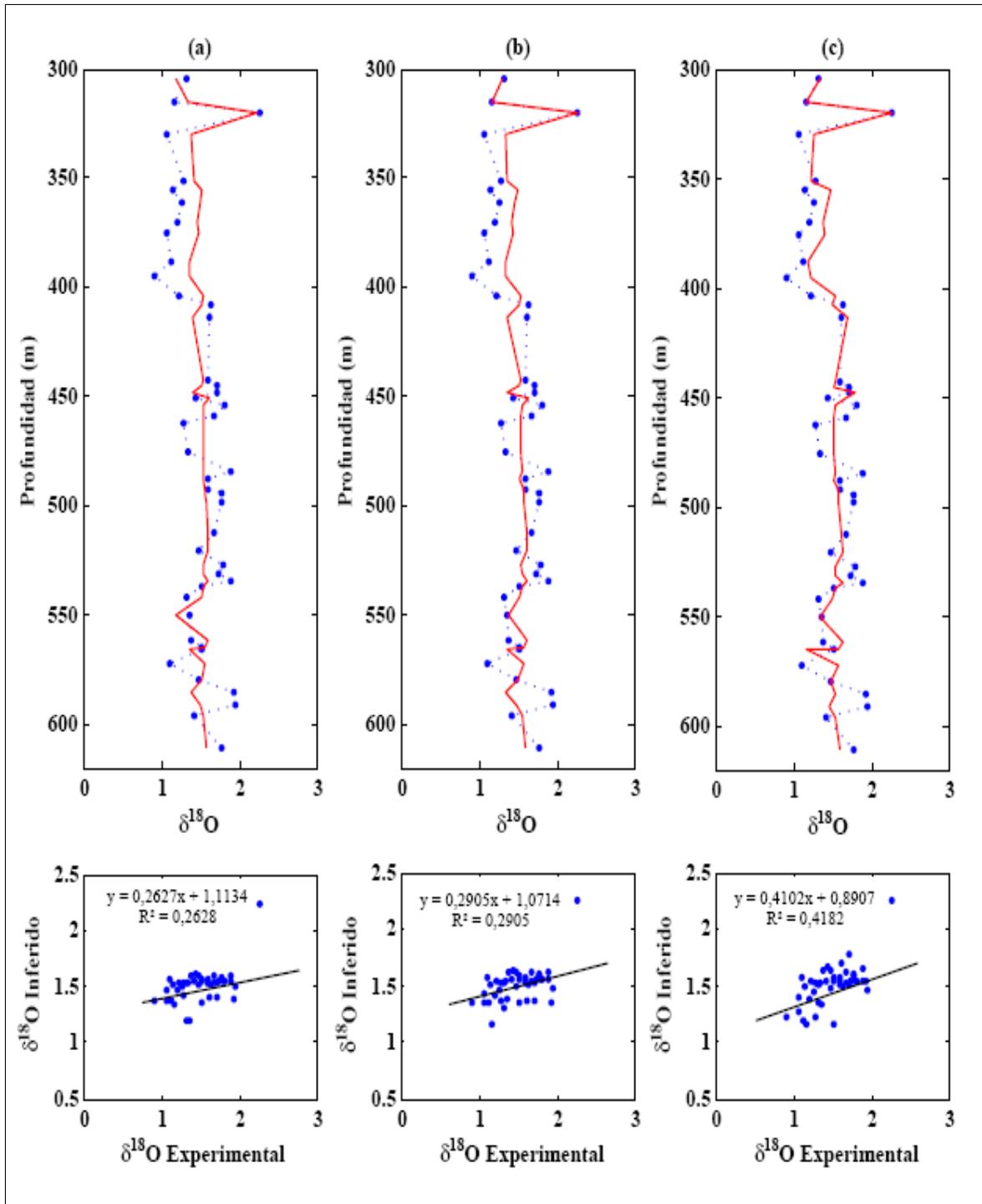


Figura 7.3.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros, así como los gráficos cruzados de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido, para toda la columna (305 – 610 m), entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CS usando: (a) 2 reglas difusas, (b) 3 reglas difusas, y (c) 4 reglas difusas. Para el modelo A.

7.2.2 Entrenando la red con $\delta^{18}\text{O}$ y susceptibilidad magnética (χ)

Al igual que en la sección anterior, el primer paso realizado fue la determinación del modelo matemático a ser utilizado. Se muestran en la figura 7.4 los perfiles del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos e inferido graficados en profundidad, así como los gráficos cruzados del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos vs $\delta^{18}\text{O}$ inferido, entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para los modelos A, B, C y D, utilizando 4 reglas difusas. En esta figura observamos que la linealidad en la inferencia para los 4 modelos es similar. Sin embargo, se observa una leve mejoría utilizando los modelos B ($\delta^{18}\text{O} - \text{Log}(\chi)$) y D ($\text{Log}(\delta^{18}\text{O}) - \text{Log}(\chi)$); con un coeficiente de correlación del 22.4% y 21.7% respectivamente. La diferencia entre ambos modelos es de apenas el 0.7%, lo que nos hace pensar que al igual que para el caso de $\delta^{18}\text{O}$, sobre los valores de χ podría estar influyendo una potencia cercana a 1. En este caso tomaremos el modelo B para las inferencias de $\delta^{18}\text{O}$, los análisis posteriores se realizarán utilizando este modelo.

La mejor inferencia del $\delta^{18}\text{O}$ entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para los datos en estudio (tope Mioceno Medio/tope Mioceno Inferior), asumiendo una tasa de sedimentación constante, se obtiene con ecuaciones del tipo: $\delta^{18}\text{O} = a\text{Log}(\chi) + b$ (modelo B). Este modelo lo hemos utilizado posteriormente para inferir el $\delta^{18}\text{O}$ en los datos de las secciones S1, S2, S3 y S4.

En la figura 7.5 se muestran los perfiles del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos e inferido graficados en profundidad, así como sus gráficos cruzados ($\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos vs $\delta^{18}\text{O}$ inferido) para el modelo B, utilizando entre 2 y 4 reglas difusas. En esta figura podemos observar que al entrenar la red con 2, 3 y 4 reglas difusas obtenemos un coeficiente de correlación del 14.97%, 24.41% y 22.42% respectivamente, donde la mejor relación de linealidad se obtiene entrenando la red con 3 reglas difusas (coeficiente de correlación del 24.41%), sin embargo la dispersión desmejora.

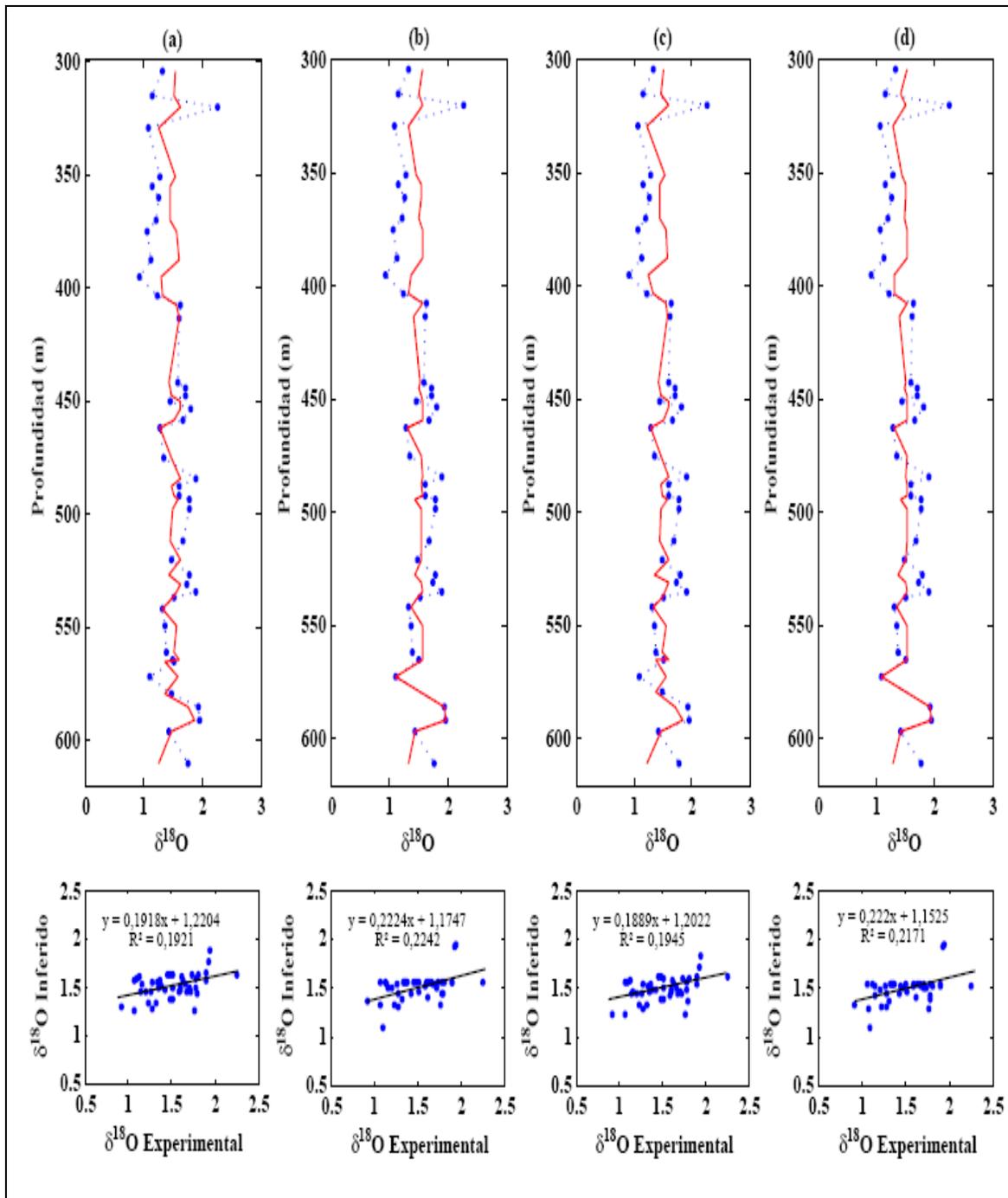


Figura 7.4.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros, así como los gráficos cruzados de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido, para toda la columna (305 – 610 m), entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ usando 4 reglas difusas, para: (a) Modelo A, (b) Modelo B, (c) Modelo C y (d) Modelo D.

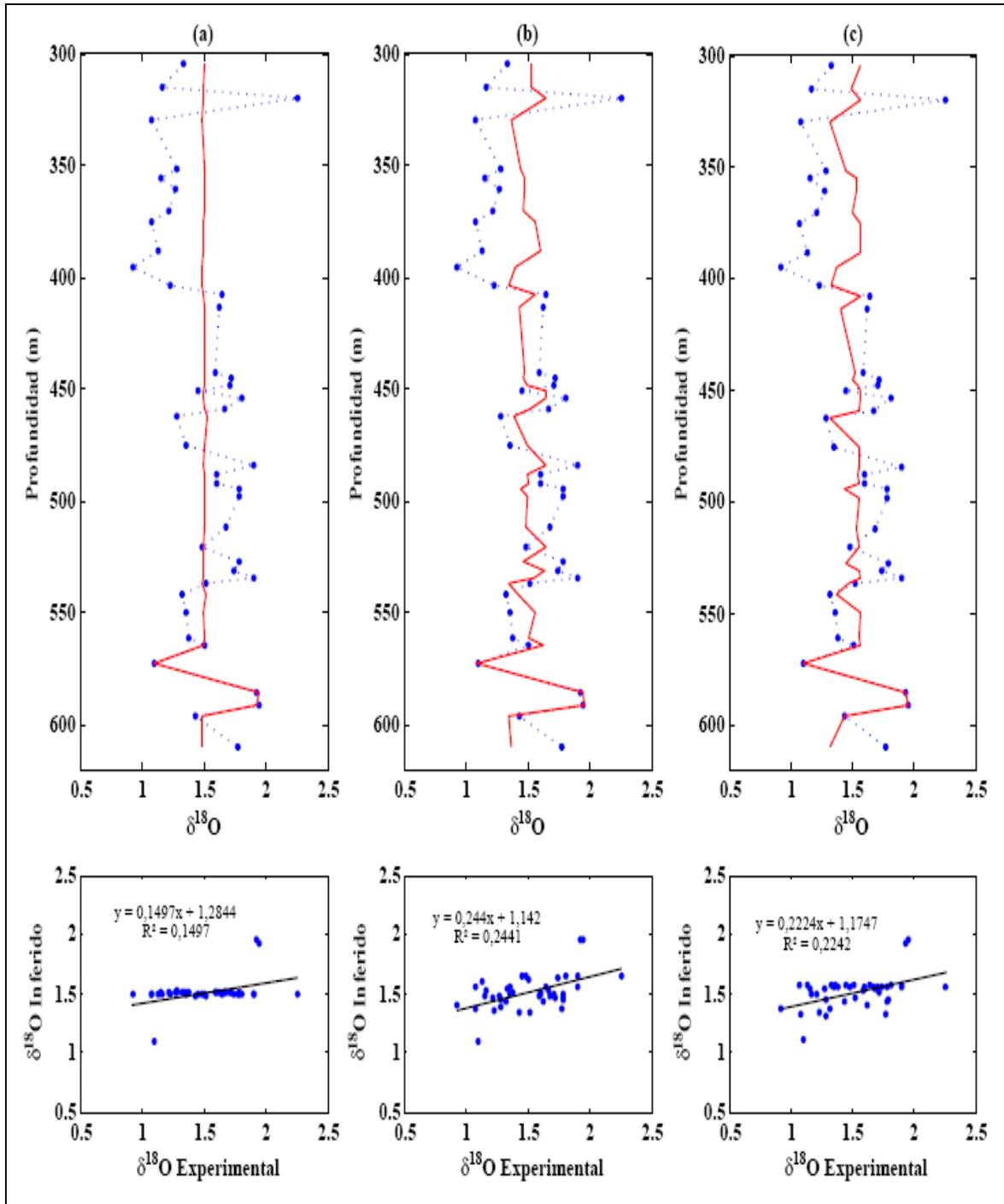


Figura 7.5.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros, así como los gráficos cruzados de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido, para toda la columna (305 – 610 m), entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y χ usando: (a) 2 reglas difusas, (b) 3 reglas difusas, y (c) 4 reglas difusas. Para el modelo B.

La baja relación de linealidad obtenida en los casos del entrenamiento con $\delta^{18}\text{O}$ y CS o χ , podría estar reflejando en cierta medida las influencias tectónicas locales y/o regionales y a los cambios climáticos locales, así como los eventos diagenéticos que podrían haber afectado las mineralogías magnéticas primarias de las muestras del pozo Saltarín 1A, por lo que se esperaría que la dependencia entre los parámetros magnéticos y $\delta^{18}\text{O}$ no fuese unívoca. También podría estar influyendo negativamente, en la inferencia, la hipótesis de una tasa de sedimentación constante. Esto explicaría el porqué las inferencias no fueron lo suficientemente satisfactorias al alimentar la red con todos los datos experimentales de los parámetros magnéticos y de $\delta^{18}\text{O}$ para el intervalo de edades/profundidades utilizado.

La relación lineal en el grafico cruzado $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido obtenido a partir de CS (coeficiente de correlación del 41%), es mejor que la obtenida en el grafico cruzado de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido obtenido a partir de χ (coeficiente de correlación del 24%). Esto podría deberse a que los valores de CS del pozo, en este caso particular, estarían más relacionados a los cambios climáticos y eustáticos globales y los valores de la χ estarían más ligados a cambios climáticos locales y/o regionales.

7.2.3 Entrenando la red con $\delta^{18}\text{O}$ y las cantidades magnéticas de cociente S (CS) y susceptibilidad magnética (χ) simultáneamente

En la figura 7.6 se muestran los perfiles del $\delta^{18}\text{O}$ inferido y de foraminíferos béticos graficados en profundidad, y los gráficos cruzados del $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos béticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido, habiendo entrenado la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ , para los modelos A ($\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$) y B₁ ($\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \text{Log}(\chi)$), con 4 reglas difusas. Podemos observar que se obtiene un coeficiente de correlación lineal del 63.6% para el modelo A y un coeficiente del 62% para el modelo B₁, aunque la diferencia entre ambas correlaciones

de los modelos es casi despreciable (1.6%), hemos decidimos utilizar el modelo A como conjunto de entrada apropiado en la inferencia del $\delta^{18}\text{O}$ para todo el conjunto de datos (305 a 610 m) y para las sub-secciones, ya que la dispersión es menor.

La mejor inferencia del $\delta^{18}\text{O}$, entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ para el total de datos en estudio (tope Mioceno Medio/tope Mioceno Inferior), se obtiene con ecuaciones del tipo: $\delta^{18}\text{O} = aCS + b\chi + c$. Donde a, b y c, son coeficientes ajustados por el algoritmo de redes neuronales difusas.

En la figura 7.7 se observa que al entrenar la red con 2 reglas difusas [CS χ] [2 1] (2 reglas asignadas a CS y 1 regla asignada a χ) obtenemos un coeficiente de correlación lineal del 29.7%, y al entrenar la red con 2 reglas difusas [CS χ] [1 2] (1 regla asignada a CS y 2 reglas asignadas a χ) obtenemos un coeficiente de correlación del 15.9%. Estos resultados nos indican que el cociente S estaría más ligado a los cambios climáticos globales, y que la información contenida en la χ sirve de complemento a fin de mejorar la inferencia, respecto a los entrenamientos donde solo se usaba uno de los dos parámetros magnéticos.

La mejor relación de linealidad se obtiene entrenando la red con 4 reglas difusas [CS χ] [2 2] (2 reglas asignadas a CS y 2 reglas asignadas a χ), con coeficiente de correlación lineal del 63.8%, y una menor dispersión.

Para completar al análisis cuantitativo se calculó la raíz del error cuadrado medio (RMSE, por sus siglas en ingles para *the root mean-square error*), para estimar el ajuste entre los valores inferidos por medio de las RND y los valores de foraminíferos bénticos, mediante la ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta^{18}\text{O}_{i}^{\text{foraminíferos bénticos}})^2 - (\delta^{18}\text{O}_{i}^{\text{inferido}})^2}{n}}$$

donde n es el número de datos utilizados.

Para concluir, observamos que al alimentar la red difusa con solo dos parámetros ($\delta^{18}\text{O}$ – CS, coeficiente de correlación lineal del 41%; y $\delta^{18}\text{O}$ – χ , coeficiente de correlación lineal del 22%) las inferencias no fueron satisfactorias. Sin embargo, al entrenar la red con tres parámetros ($\delta^{18}\text{O}$ – CS – χ) mejora notablemente esta inferencia, obteniéndose un coeficiente de correlación lineal del 63% y un valor de RMSE del orden de 0.17, que indica una baja dispersión.

En el caso, en el cual eventos tectónicos locales y/o regionales (por ejemplo el levantamiento de la cordillera de los Andes), podrían haber influido a lo largo de la historia geológica, sobre las muestras provenientes del pozo Saltarín 1A, se esperaría que los parámetros magnéticos reflejaran muy poco o nada la variabilidad climática global. Sin embargo, una inferencia del 63% nos indica que estos valores de CS y χ , son sensibles en gran medida, a las variaciones climáticas globales entre el tope del Mioceno medio y el tope del Mioceno superior.

De estos resultados resulta evidente que los dos parámetros magnéticos utilizados para alimentar la red e inferir los valores de los $\delta^{18}\text{O}$, se complementan mutuamente en el registro fósil de los cambios climáticos globales que de alguna manera pudieron afectar la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia. La susceptibilidad magnética medida en rocas sedimentarias, nos da una idea de la concentración de minerales ferrimagnéticos (magnetita y maghemita) pero es poco sensible a la distribución de tamaños de granos magnéticos en la roca. El cociente S, por otro lado, mide la proporción relativa entre minerales ferrimagnéticos de baja coercividad (magnetita) y antiferrimagnéticos de alta coercividad (hematita) cuantificando así las condiciones óxido reductoras del ambiente de sedimentación o de diagénesis temprana en estas rocas.

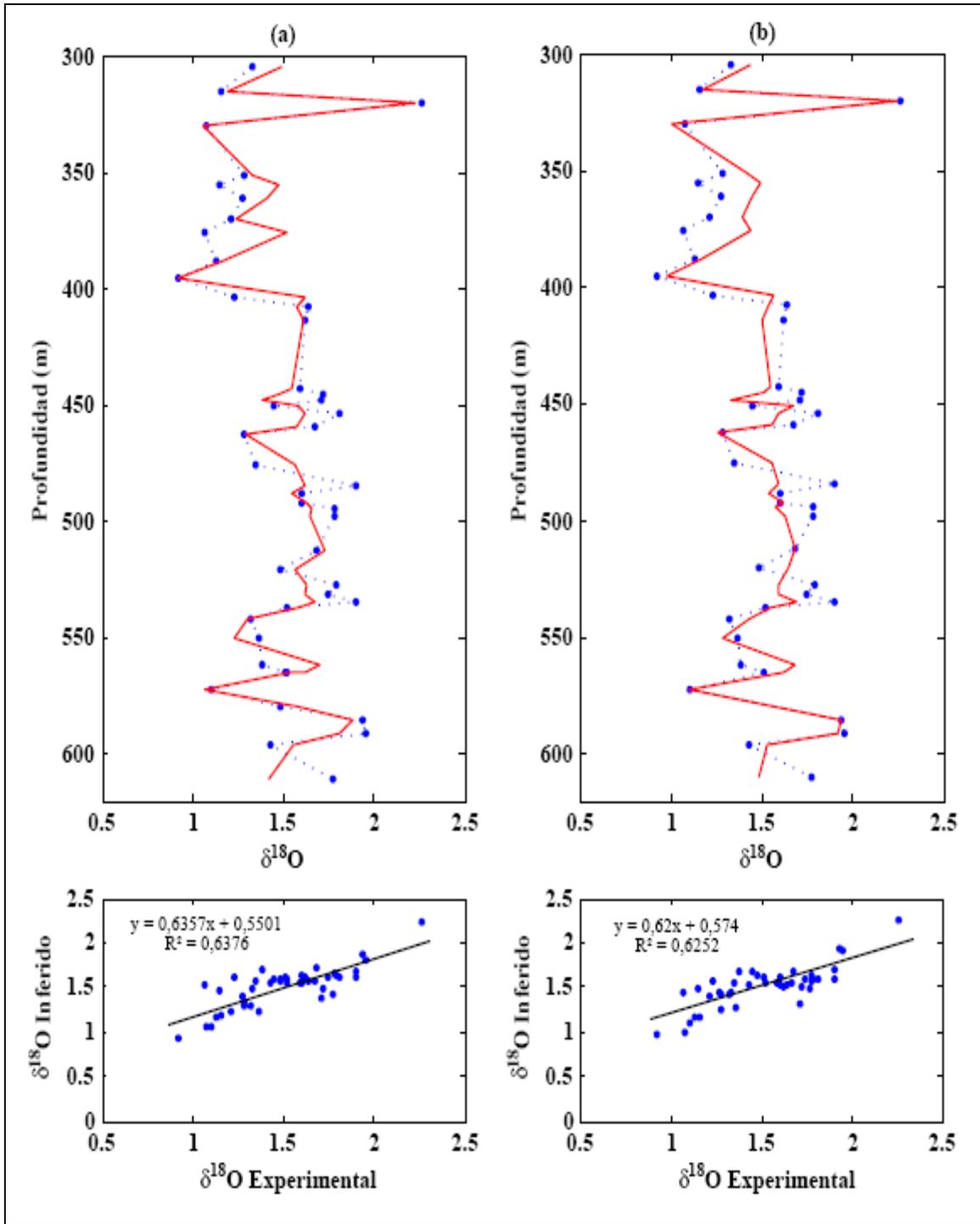


Figura 7.6.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros, así como los gráficos cruzados de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido, para toda la columna (305 – 610 m), entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ ; usando [CS χ] [2 2], para: (a) Modelo A y (b) Modelo B₁.

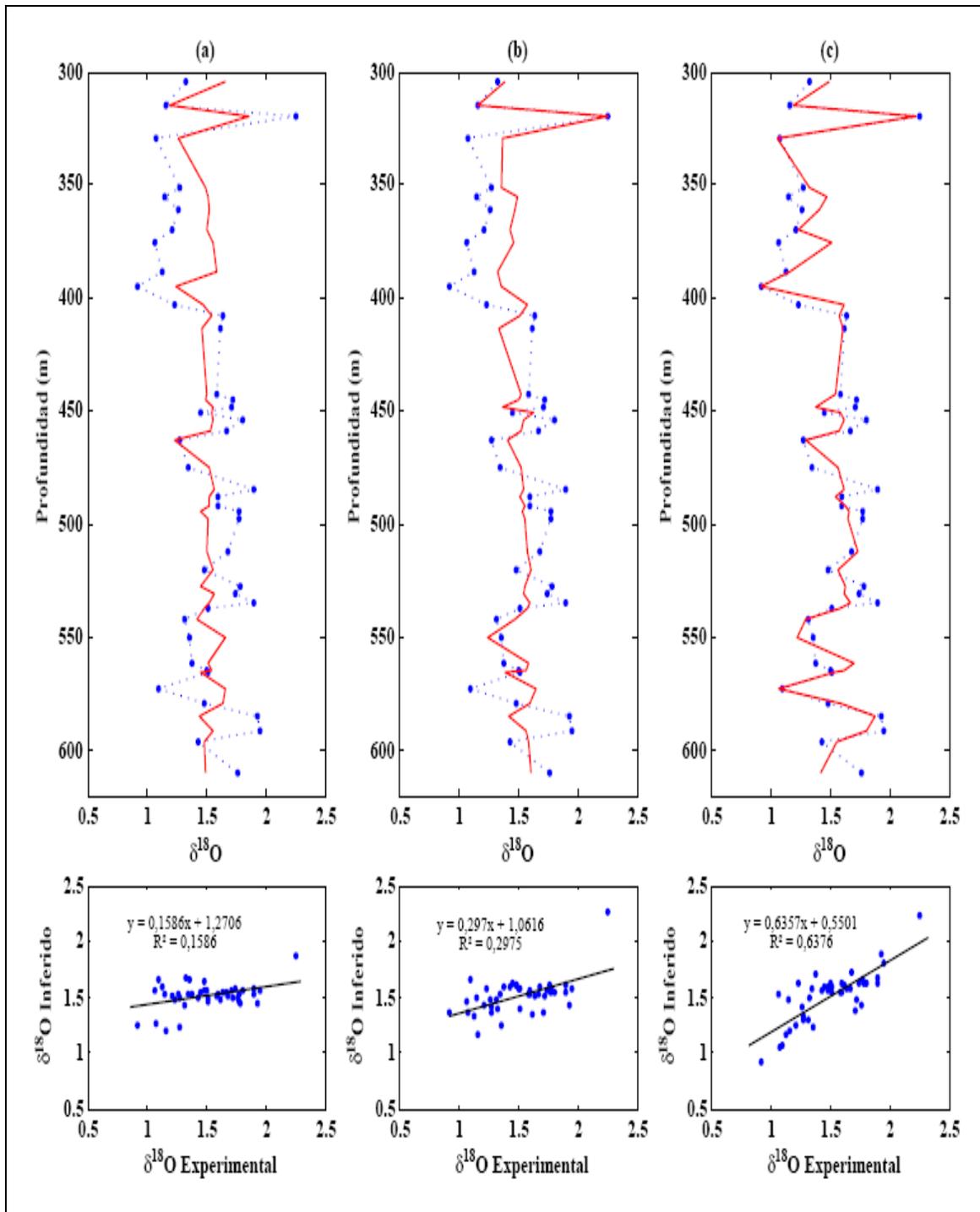


Figura 7.7.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros, así como los gráficos cruzados de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos vs. $\delta^{18}\text{O}$ inferido, para toda la columna (305 – 610 m), entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ ; usando: (a) [CS χ] [1 2]; (b) [CS χ] [2 1] y (c) [CS χ] [2 2] reglas difusas. Para el Modelo A.

7.3 Inferencia del $\delta^{18}\text{O}$ en las cuatro sub-secciones de los datos seleccionados

Los valores de inferencia obtenidos para la totalidad de los datos en estudio (305 a 610 metros) en los casos mostrados en las secciones anteriores, podrían estar influenciados por la hipótesis tomada de una tasa de sedimentación constante entre los dos amarres de edades disponibles. Hemos decidido dividir los datos en 4 sub-secciones de igual espesor 76,25 m cada una aproximadamente, con el fin de monitorear cuán realista resulta tomar una tasa de sedimentación constante entre 305 metros profundidad en un intervalo de tiempo de aproximadamente 4.4 Ma. Dos de estas sub-secciones, la primera y la última, están amarradas en uno de sus extremos a las edades conocidas del tope del Mioceno Medio e Inferior respectivamente. De esta forma, si la inferencia estuviese siendo afectada principalmente por la hipótesis de una tasa de sedimentación constante, se esperaría que la misma mejorara en la medida en que las pruebas con la red se confinaran a los datos de un pequeño entorno en la vecindad de los amarres de edades.

Para el entrenamiento neuro difuso de las 4 sub-secciones se utilizó como modelo el que mejor se ajustó a los datos para cada una de las combinaciones de los valores de entrada. En el caso de $\delta^{18}\text{O} - \text{CS}$ se utilizó el modelo A, para $\delta^{18}\text{O} - \chi$ se utilizó el modelo B y para $\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$ se utilizó el modelo A. El entrenamiento se llevó a cabo con la función de pertenencia gaussmf y solo con 2 reglas difusas debido a la poca cantidad de datos. En el apéndice 3 se muestran los errores reportados por el programa.

En las figuras 7.8 y las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 del apéndice 4 se muestran los resultados para las 4 subdivisiones realizadas tomando como datos de entrada los valores de $\delta^{18}\text{O} - \text{CS}$, $\delta^{18}\text{O} - \chi$ y $\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$, respectivamente. Para estos tres casos observamos que a medida que nos alejamos del amarre superior la inferencia desmejora. La última sección desmejora considerablemente con respecto a la primera, esto puede ser debido a que en esta sección se observan varias superficies de erosión entre los 550 metros y los 610 metros aproximadamente (ver figura 2.2), por lo que parte del registro estratigráfico se ha perdido. De esta manera, no sería válida la asociación realizada entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$

con los parámetros de CS y χ , ya que estaría desfasada. Por lo que tomar una tasa de sedimentación constante es inadecuado.

Debido a que asumir una tasa de sedimentación constante arroja errores, esperamos que al tener más amarres de edades la inferencia del registro climático global de $\delta^{18}\text{O}$ en foraminíferos béticos, a partir de los parámetros magnéticos mejore.

Hemos graficado los valores globales de $\delta^{18}\text{O}$ para foraminíferos béticos, así como los valores inferidos para la totalidad de datos en estudio (305 a 610 m) utilizando para [CS χ] [2 2] reglas difusas, para la primera sección utilizando [CS χ] [1 2] reglas difusas, y para las otras tres secciones utilizando [CS χ] [2 1] reglas difusas, al entrenar la red con valores de $\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$ (ver figura 7.8).

Luego del entrenamiento de la red difusa, esta nos proporciona un conjunto de ecuaciones que nos permiten inferir valores de $\delta^{18}\text{O}$ a partir de valores de CS y χ . En trabajos futuros, se plantea utilizar estas ecuaciones para inferir valores de $\delta^{18}\text{O}$ en otras zonas. Las ecuaciones obtenidas son:

- Toda la columna (305 - 610 m) [CS χ] [2 2]

Si CS está en el rango [0.240 0.113] y χ está en el rango es [19.786 -0.002]

$$\text{Entonces } \delta^{18}\text{O} = -24.17 \text{ CS} - 0.34 \chi + 18.01$$

Si CS está en el rango [0.240 0.113] y χ está en el rango [19.788 46.597]

$$\text{Entonces } \delta^{18}\text{O} = 28.68 \text{ CS} + 0.87 \chi - 28.26$$

Si CS está en el rango [0.105 1.128] y χ está en el rango [19.786 -0.002]

$$\text{Entonces } \delta^{18}\text{O} = -26.90 \text{ CS} + 0.57 \chi + 26.83$$

Si CS está en el rango [0.105 1.128] y χ está en el rango [19.788 46.597]

$$\text{Entonces } \delta^{18}\text{O} = 37.97 \text{ CS} + 0.02 \chi - 36.00$$

- Sección 1 [CS χ] [2 1]

Si CS está en el rango [0.211 0.036] y χ está en el rango [Inf 27.754]

$$\text{Entonces } \delta^{18}\text{O} = -0.19 \text{ CS} + 0.46 \chi - 6.37$$

Si CS está en el rango [0.341 0.934] y χ está en el rango [Inf 27.754]

$$\text{Entonces } \delta^{18}\text{O} = -0.21\text{CS} + 0.02 \chi + 0.87$$

- Sección 2 [CS χ] [1 2]

Si CS está en el rango [Inf 0.989] y χ está en el rango [5.584 -3.999]

$$\text{Entonces } \delta^{18}\text{O} = -10.53 \text{ CS} + 0.10 \chi + 9.95$$

Si CS está en el rango [Inf 0.989] y χ está en el rango [2.130 29.611]

$$\text{Entonces } \delta^{18}\text{O} = -1.58 \text{ CS} - 0.01 \chi + 3.38$$

- Sección 3 [CS χ] [1 2]

Si CS está en el rango [Inf 0.981] y χ está en el rango [1.033 11.385]

$$\text{Entonces } \delta^{18}\text{O} = -12.20 \text{ CS} + 0.04 \chi + 12.58$$

Si CS está en el rango [Inf 0.981] y χ está en el rango [1.084 29.866]

$$\text{Entonces } \delta^{18}\text{O} = 6.06 \text{ CS} + 0.01 \chi - 4.31$$

- Sección 4 [CS χ] [1 2]

Si CS está en el rango [Inf 0.977] y χ está en el rango [2.592 -11.359]

$$\text{Entonces } \delta^{18}\text{O} = -3.45 \text{ CS} + 0.12 \chi + 4.44$$

Si CS está en el rango [Inf 0.977] y χ está en el rango [1.366 18.437]

$$\text{Entonces } \delta^{18}\text{O} = 0.31 \text{ CS} - 0.01 \chi + 1.48$$

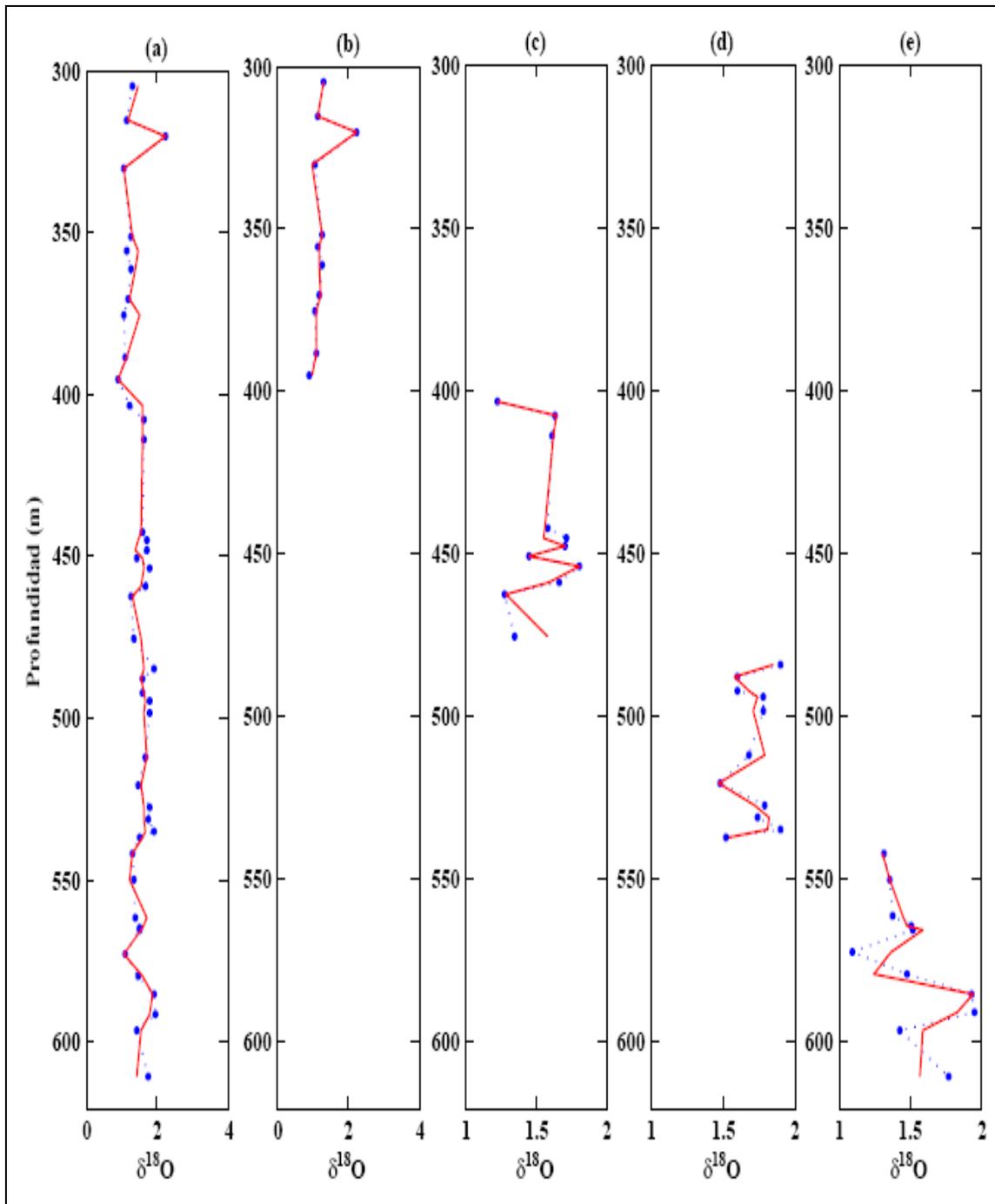


Figura 7.8.- Gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bénticos (línea punteada) e inferidos (línea continua) graficados en función de la profundidad en metros para: (a) toda la columna (305 – 610 m) utilizando [CS χ] [2 2], (b) sección 1 utilizando [CS χ] [2 1], (c) sección 2 utilizando [CS χ] [1 2], (d) sección 3 utilizando [CS χ] [1 2] y (e) sección 4 utilizando [CS χ] [1 2]. Entrenando la red con valores de $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ ; para el Modelo A.

En la tabla 7.1 se presentan los valores de RMSE, así como los valores de R^2 obtenidos para la totalidad de datos en estudio y las cuatro sub-secciones.

| | R^2 | RMSE |
|------------------------|--------|------------|
| Todos los datos | 0,6376 | 0,17389957 |
| Sección 1 | 0,9775 | 0,05023957 |
| Sección 2 | 0,7713 | 0,08869677 |
| Sección 3 | 0,7586 | 0,06727794 |
| Sección 4 | 0,6808 | 0,14118689 |

Tabla 7.1.- Valores de R^2 y RMSE para el total de los datos en estudio (Tope Mioceno Medio/Tope Mioceno Inferior) y las cuatros sub-secciones.

En los análisis cuantitativos obtuvimos que la sección 1 presenta el valor de RMSE más bajo y el valor de R^2 más alto, lo que quiere decir que esta sección presenta el mejor ajuste y la mejor linealidad entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ experimentales e inferidos esto lo podemos observar a simple vista en la figura 7.8. La sección 3 también presenta un valor de RMSE bajo y de R^2 alto pero desmejora con respecto a la 1; mientras que para las secciones 2 y 4 estos valores desmejoran, esto puede ser debido a que estas dos secciones (S2 y S4) presentan superficies de erosión. Sin embargo, la sección 4 presenta los índices de RMSE más altos y los de R^2 más bajos, ya que esta presenta una gran densidad de superficies de erosión.

7.4 Conclusiones de los resultados computacionales

A continuación se presentan las conclusiones más relevantes de este capítulo:

- La baja relación de linealidad obtenida de los entrenamientos con valores de entrada de $\delta^{18}\text{O} - \text{CS}$ y $\delta^{18}\text{O} - \chi$, podría estar influenciada por los cambios climáticos y tectónicos locales y/o regionales, así como procesos diagenéticos que podrían haber afectado las mineralogías magnéticas primarias de las muestras del pozo Saltarín 1A, por lo que la dependencia entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y los parámetros magnéticos

podrían no ser unívocos. Otro factor que podría estar afectando negativamente la inferencia, es el hecho de haber tomado una tasa de sedimentación constante en 305 metros de profundidad.

- Los resultados obtenidos nos indican que los valores de cociente S del pozo estarían más relacionados a los cambios climáticos y cambios eustáticos globales. Mientras que los valores de susceptibilidad magnética nos podrían reflejar cambios climáticos y eustáticos locales y/o regionales.
- Al alimentar la red neuro difusa con solo dos parámetros las inferencias no fueron suficientemente satisfactorias. Sin embargo, al entrenar la red difusa con tres parámetros ($\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$) esta mejora notablemente.
- En el pozo Saltarín 1A, en el cual podrían haber influido eventos tectónicos locales y/o regionales de gran magnitud a lo largo de historia geológica de la Cuenca de los Llanos Orientales, como el levantamiento de la cordillera de los Andes, se esperaría que los parámetros magnéticos reflejaran muy poco o nada la variabilidad climática global. Sin embargo, la calidad de la inferencia obtenida, tomando en cuenta el coeficiente de correlación lineal (63%) y el valor RMSE (17%) nos indican que estos valores de CS y χ , son sensibles en gran medida, a las variaciones climáticas globales ocurridas entre el tope del Mioceno medio y el tope del Mioceno superior.
- De los resultados obtenidos de las cuatro sub-divisiones realizadas observamos que la ultima sub-sección (533,75 a 610 m) la inferencia desmejora considerablemente tomando en cuenta el coeficiente de correlación lineal y el valor RMSE, con respecto a las anteriores, esto podría ser debido a que para estas profundidades hay gran densidad de superficies de erosión, indicándonos que la secuencia estratigráfica se ha perdido. De esta manera, la asociación realizada entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ con los parámetros de CS y χ estaría desfasada. Lo que nos hace pensar que haber tomado la hipótesis de una tasa de sedimentación constante es inadecuado, siendo así un factor de importancia el cual influye negativamente en la inferencia.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó la inferencia de $\delta^{18}\text{O}$ a partir de dos parámetros magnéticos (Cociente S y susceptibilidad magnética) medidos en muestras del pozo Saltarín 1A (Colombia), mediante el uso del método computacional de redes neuronales difusas. Para construir el sistema neuro-difuso se consideraron tres combinaciones de valores de entrada ($\delta^{18}\text{O} - \text{CS}$; $\delta^{18}\text{O} - \chi$; $\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$). Llegando a las siguientes conclusiones:

- En los estudios bioestratigráficos no se encontró la presencia de foraminíferos, esto puede ser debido a que las condiciones para que estos microorganismos cohabiten en un paleoambiente deposicional como el de los estratos del Pozo Saltarín 1A, no eran las apropiadas. De esta forma, ante la imposibilidad de llevar a cabo una correlación directa entre los niveles estratigráficos del pozo y sus valores correspondientes de $\delta^{18}\text{O}$, debimos considerar la hipótesis de una tasa de sedimentación constante entre dos únicos amarres de edades palinológicas disponibles separados por 305 metros aproximadamente (tope del Mioceno inferior y medio).
- En los estudios de SEM y EDX observamos, a niveles someros pertenecientes a la Formación Guayabo, framboides de minerales magnéticos típicamente autigénicos, los cuales podrían ser el resultado de procesos diagenéticos tardíos inducido en un ambiente netamente reductor por el yacimiento petrolífero subyacente. Sin embargo, para los niveles de profundidad pertenecientes a la Formación León y Carbonera, los minerales magnéticos no presentan rasgos morfológicos característicos de óxidos o sulfuros de Fe autigénicos vinculados al yacimiento. Esto

nos hace pensar que para el intervalo de datos en el cual se llevó a cabo la inferencia del $\delta^{18}\text{O}$ (305 a 610 metros de profundidad) las mineralogías magnéticas presentes en las muestras son principalmente de carácter primario o productos de una diagénesis temprana contemporánea con la sedimentación.

- Los resultados obtenidos de la inferencia de las RND, indican que la mejor inferencia del $\delta^{18}\text{O}$ se obtiene mediante la combinación de valores de entrada $\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$, con ecuaciones del tipo: $\delta^{18}\text{O} = a\text{CS} + b\chi + c$. En estos resultados es evidente que la utilización de los dos parámetros magnéticos para construir el sistema difuso e inferir valores de $\delta^{18}\text{O}$, es lo apropiado ya que ambos parámetros se complementan mutuamente en el registro fósil de los cambios climáticos globales que pudieran haber afectado la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia. El cociente S estaría más ligado a los cambios climáticos y cambios eustáticos globales, ya que este nos mide la proporción relativa entre minerales ferrimagnéticos de baja coercividad (magnetita) y antiferrimagnéticos de alta coercividad (hematita) cuantificando así las condiciones óxido reductoras del ambiente sedimentario o de diagénesis temprana en estas rocas. Mientras que la susceptibilidad magnética medida en rocas sedimentarias nos da una idea de la concentración de minerales ferrimagnéticos (magnetita y maghemita), la cual está relacionada a procesos principalmente erosivos ligados principalmente a eventos tectónicos locales.
- En las cuatro sub-divisiones, realizadas para estimar cuán realista resultaba una acumulación constante de 305 metros de sedimentos en un intervalo de tiempo de aproximadamente 4.4 Ma, observamos que las secciones 1 y 3 presentan una mejor inferencia a diferencia de la sección 4, en donde la inferencia desmejora notablemente. Esto puede deberse a que en esta última sección existe una gran densidad de superficies de erosión (Bayona et al, 2008), indicándonos que gran parte de la continuidad en la secuencia estratigráfica se ha perdido. De esta manera, la asociación realizada entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ con los parámetros de CS y χ no se

correspondería adecuadamente resultando así inadecuada la hipótesis de una tasa de sedimentación constante, la cual podría estar influyendo negativamente en la inferencia.

BIBLIOGRAFIA

ALDANA, M.; COSTANZO, V.; VITIELLO, D.; DÍAZ M.; SILVA P. (1996). **Estudios de curvas de magnetismo remanente isotermal (IRM) y resonancia paramagnética electrónica (EPR) en muestras de dos pozos del campo La Victoria.** 8° Congreso Venezolano de Geofísica.

ALDANA, M.; COSTANZO, V.; VITIELLO, D.; COLMENARES, L.; GÓMEZ, G., (1996). **Framboidal magnetic minerals and their possible association to hydrocarbons: La Victoria oil field, Southwestern Venezuela.** Geofísica Internacional. 38, 137-152.

ALLEGRE, Claude (2005). **Isotope Geology.** Editions Belin, Paris.

ALEGRET, L.; ARZ, J.; MOLINA, E. **El uso didáctico de los foraminíferos en la enseñanza de ciencias de la tierra: su distribución paleoceanográfica en el transito cretácico - terciario.** Pagina web (consultada 20/04/09): <http://www.raco.cat/index.php>

BAYONA, G., VALENCIA, A., MORA, A., RUEDA, M., ORTIZ, J., MONTENEGRO, O. (2008). **Estratigrafía y procedencia de las rocas del Mioceno en la parte distal de la cuenca antepaís de los Llanos de Colombia.** Geología Colombiana, Vol. 33, p. 23 - 46.

BUTLER, Robert (1998). **Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes.** Electronic Editions.

CAMPOS, J.; MELÉNDEZ, W.; RAMÍREZ, A.; YÁNEZ, C.; BARRIOS, C. (2005). **Análisis morfológico de minerales pesados presentes en el yacimiento de bauxita de los pijiguaos, estado Bolívar.** Acta Microscópica. Vol. 14, pp. 10-14.

COSTANZO - ÁLVAREZ, V.; ALDANA, M.; VITIELLO, D. (2000). **Study of magnetic contrasts in the Guafita oil field (south-western Venezuela)**. Physics and chemistry of the earth. Vol. 25, pp. 437-445.

CROWLEY, Thomas; NORTH, Gerald (1991). **Paleoclimatology**. Oxford University Press, New York.

CUDDY, S.; GLOVER, P. (2000). **The Application of Fuzzy Logic and Genetic Algorithms to Oil Exploration, In: Developments in Soft Computing**, Physica Verlag, pp. 167-174.

DA SILVA, A.; COSTANZO-ÁLVAREZ, V.; HURTADO, N.; GUZMÁN, O.; ALDANA, M.; LÓPEZ, D. (2009). **Estudio preliminar de una posible correlación entre cambios globales ($\delta^{18}\text{O}$) y cociente S medidos en muestras de pozo (Saltarín 1A), mediante el uso de redes neuronales difusas**. 1ª Reunión de la Asociación Latinoamericana de paleomagnetismo y geomagnetismo (LATINMAG)

EVANS, Michael; HELLER, Friedrich (2003). **Environmental Magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics**. Elsevier Science, USA.

FINOL, J., GUO, Y., JING, X. (2001). **Fuzzy Partioning Systems for Electrofacies Classification: a case study from the Maracaibo Basin**. Journal of Petroleum Geology, Vol. 24(4). pp. 441-548.

FINOL, J.; JING, X. (2002). Predicting Petrophysical Parameters in a Fuzzy Environment in Soft Computing for Reservoir Characterisation and Modeling, P.Wong, F. Aminzadeh and M. Nikravesh (eds.), Physica-Verlag Studies in Fuzziness and Soft Computing, Vol.80, p. 183-217

GONZÁLEZ, Mario A. (2006). **Utilización de Jats y lógica difusa en el análisis de dos perfiles de refracción sísmica en el área 75 de Bauxilum Puerto Ordaz, Estado Bolívar**. Trabajo especial de grado. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas.

HALL, S.; EVANS, I. (1995). **Paleomagnetic and rock magnetic properties of hydrocarbon reservoir rocks from the Permian basin, southeastern New Mexico in paleomagnetism applications in hydrocarbon exploration and production**. Edited by P. Turner and A. Turner. Geological Society Special Publication.

HAMBALEX, N. (2003). **Lógica Difusa aplicada a la predicción de Litofacies y Permeabilidad**. Tesis de Magister Scientiarum en Ciencias Geológicas. Universidad Central de Venezuela.

HARRIS, S.E. y MIX, A. (2002) Climatic and tectonic influences on continental erosion of tropical South America, 0-13 Ma. *Geology* Vo. 30, N 5, 447-450.

HURTADO, N., ALDANA, M., TORRES J. (2008): **Comparison between neuro-fuzzy and fractal models for permeability prediction**. *Computational Geosciences*. Vol. 13, No 2, p. 181 – 186.

JANG, R.; SHING, J. (1993). **ANFIS: Adaptive-Network Based Fuzzy Inference System**. Pagina web (Consultada: 7/05/09):

<http://ece.ut.ac.ir/Classpages/S86/ECE406/Papers/ANFIS.pdf>

LÓPEZ, D. (2009). **Caracterización de litofacies en el pozo Saltarín 1A a través de la determinación experimental de parámetros magnéticos y su inferencia por medio de la técnica de redes neuronales difusas**. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Caracas.

LÓPEZ, D.; COSTANZO-ÁLVAREZ, V.; HURTADO, N.; GUZMÁN, O.; ALDANA, M.; DA SILVA, A. (2009). **Determinación experimental de parámetros magnéticos y su inferencia vías redes neuronales difusas en el pozo Saltarín 1A, Colombia**. 1ª Reunión de la Asociación Latinoamericana de paleomagnetismo y geomagnetismo (LATINMAG)

MEJÍA, Alejandra (2005). **Reconstrucción de la dinámica oceánica superficial en el Atlántico tropical nororiental durante el último ciclo climático.** Trabajo especial de grado. Universidad de Salamanca. Facultad de Ciencias. Departamento de Geología.

MORENO, Ana (2002). **Registro del aporte de polvo de origen sahariano y de la productividad oceánica en la Cuenca del Norte de Canarias y en el Mar de Alborán.** Universidad de Barcelona.

MOYA ALONSO, Noemí. **Sistemas Neuro-Fuzzy.** Pagina web (Consultada: 28/04/09)
<http://www.infor.uva.es/~calonso/IAII/Aprendizaje/TrabajoAlumnos/NFmemoria.pdf>

VERA TORRES, Juan A. (1994). **Estratigrafía. Principios y Métodos.** Editorial Rueda, S.L. Madrid.

APÉNDICE

APÉNDICE 1

VALORES EXPERIMENTALES DE $\delta^{18}\text{O}$, COCIENTE S (CS) Y SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ), UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO COMPUTACIONAL DE REDES NEURONALES DIFUSAS

| Formación | Secciones | Profundidad (m) | Edad (Ma) | $\delta^{18}\text{O}$ (%ppm) | Cociente S (SI) | Susceptibilidad magnética (SI) |
|-----------|-----------|-----------------|-----------|------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| Guayabo | Sección 1 | 304,75 | 11,6081 | 1,33 | 0,57957746 | 21,8351 |
| | | 315,32 | 11,8081 | 1,16 | 0,38232323 | 17,0960 |
| | | 320,08 | 12,0081 | 2,26 | 0,08673472 | 19,5263 |
| | | 329,85 | 12,0881 | 1,075 | 0,84147287 | 14,0035 |
| | | 351,39 | 12,3681 | 1,28 | 0,86989796 | 27,7537 |
| | | 355,30 | 12,4081 | 1,15 | 0,93105381 | 23,9033 |
| | | 360,82 | 12,4881 | 1,27 | 0,91832669 | 23,9009 |
| | | 370,18 | 12,6081 | 1,21 | 0,9005102 | 25,5925 |
| | | 375,33 | 12,6881 | 1,07 | 0,90590406 | 21,2371 |
| | | 388,10 | 12,8881 | 1,13 | 0,83467742 | 20,5104 |
| | | 395,11 | 12,9681 | 0,92 | 0,83817427 | 14,9692 |
| León | Sección 2 | 403,39 | 13,0881 | 1,23 | 0,94607843 | 13,0012 |
| | | 407,54 | 13,1281 | 1,64 | 0,93548387 | 21,3674 |
| | | 413,49 | 13,2481 | 1,62 | 0,86257928 | 29,8364 |
| | | 442,42 | 13,6081 | 1,59 | 0,94583333 | 24,3919 |
| | | 444,94 | 13,6481 | 1,72 | 0,93943944 | 25,3472 |
| | | 447,97 | 13,6881 | 1,71 | 0,86055777 | 23,0645 |
| | | 450,45 | 13,7281 | 1,45 | 0,98854962 | 19,7837 |
| | | 453,65 | 13,7681 | 1,81 | 0,94863014 | 19,8122 |
| | | 458,85 | 13,8081 | 1,67 | 0,94272727 | 22,2124 |
| | | 462,43 | 13,8881 | 1,28 | 0,94121005 | 46,5978 |
| | | 475,15 | 14,0881 | 1,35 | 0,94444444 | 22,9367 |
| León | Sección 3 | 484,35 | 14,2481 | 1,9 | 0,94774194 | 19,2992 |
| | | 487,80 | 14,2881 | 1,6 | 0,94050218 | 23,1750 |
| | | 492,05 | 14,3281 | 1,6 | 0,9591195 | 22,4483 |
| | | 494,14 | 14,3681 | 1,78 | 0,96099291 | 28,2484 |
| | | 497,93 | 14,4081 | 1,78 | 0,96296296 | 22,8289 |
| | | 511,97 | 14,6081 | 1,68 | 0,97524752 | 23,6610 |

| Formación | Secciones | Profundidad (m) | Edad (Ma) | $\delta^{18}\text{O}$ (%ppm) | Cociente S (SI) | Susceptibilidad magnética (SI) | |
|-----------|-----------|-----------------|-----------|---------------------------------|--------------------|-----------------------------------|---------|
| León | Sección 3 | 520,35 | 14,7281 | 1,48 | 0,97777778 | 19,0402 | |
| | | 527,26 | 14,8081 | 1,79 | 0,94749596 | 16,2025 | |
| | | 531,05 | 14,8881 | 1,74 | 0,94833948 | 18,8323 | |
| | | 534,44 | 14,9281 | 1,9 | 0,98101266 | 21,4881 | |
| | | 536,89 | 14,9681 | 1,52 | 0,94794721 | 12,1534 | |
| | Carbonera | Sección 4 | 541,75 | 15,0081 | 1,32 | 0,93878719 | 31,4349 |
| | | | 549,80 | 15,1281 | 1,36 | 0,60491071 | 21,3582 |
| | | | 561,27 | 15,2881 | 1,38 | 0,97713598 | 22,4483 |
| | | | 564,50 | 15,3281 | 1,51 | 0,95934959 | 20,2809 |
| | | | 565,14 | 15,3681 | 1,52 | 0,82821497 | 0,0000 |
| 572,35 | | | 15,4481 | 1,1 | 0,95827725 | 1,9315 | |
| 579,24 | | | 15,5281 | 1,48 | 0,92900302 | 0,0000 | |
| 585,10 | | | 15,6481 | 1,93 | 0,84848485 | 3,6335 | |
| 590,94 | | | 15,7281 | 1,95 | 0,92348993 | 4,8447 | |
| 596,16 | | | 15,8081 | 1,43 | 0,9504717 | 12,2718 | |
| | | 610,20 | 16,0081 | 1,77 | 0,96797153 | 13,9284 | |

APÉNDICE 2

CARACTERÍSTICAS DE LAS MINERALOGÍAS PRESENTES EN LAS MUESTRAS DEL POZO SALTARÍN 1A, ANALIZADAS MEDIANTE MICROSCOPIA ÓPTICA

| Muestras | Profundidad (m) | Mineralogía | Cociente S |
|-----------------|------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 1 | 6,20 | Cuarzo | 0,6108 |
| 2 | 16,89 | Cuarzo, Óxidos de Fe | No se realizó la medida |
| 3 | 27,04 | Cuarzo, Óxidos de Fe | 0,5476 |
| 4 | 51,44 | Cuarzo, Óxidos de Fe | 0,6744 |
| 5 | 57,85 | Cuarzo, Óxidos de Fe | No se realizó la medida |
| 6 | 73,75 | Cuarzo | No se realizó la medida |
| 7 | 94,16 | Cuarzo, Magnetita | 0,8759 |
| 8 | 114,61 | Cuarzo, Magnetita | No se realizó la medida |
| 9 | 166,40 | Cuarzo, Magnetita | 0,8427 |
| 10 | 178,80 | Cuarzo | 0,8555 |
| 11 | 201,75 | Cuarzo | 0,7792 |
| 12 | 224,31 | Cuarzo, Carbonato | 0,7607 |
| 13 | 255,19 | Cuarzo, Magnetita | 0,9033 |
| 14 | 269,02 | Cuarzo | No se realizó la medida |
| 15 | 281,24 | Cuarzo | 0,7500 |
| 16 | 302,16 | Cuarzo | 0,9077 |
| 17 | 320,08 | Cuarzo, Óxidos de Fe | 0,0867 |
| 18 | 355,30 | Cuarzo | 0,9311 |
| 19 | 364,55 | Cuarzo, Óxidos de Fe | No se realizó la medida |
| 20 | 379,26 | Cuarzo, Carbonato | No se realizó la medida |
| 21 | 395,11 | Cuarzo, Óxidos de Fe | 0,8382 |
| 23 | 426,39 | Cuarzo, Carbonato | No se realizó la medida |
| 23 | 439,59 | Cuarzo, Carbonato | No se realizó la medida |
| 24 | 458,85 | Cuarzo, Carbonato, Magnetita | 0,9427 |
| 25 | 484,35 | Cuarzo, Carbonato, Pirita | No se realizó la medida |
| 26 | 502,78 | Cuarzo, Carbonato, Pirita | No se realizó la medida |
| 27 | 520,35 | Cuarzo, Carbonato, Pirita | 0,9778 |
| 28 | 546,50 | Cuarzo, Glauconita | No se realizó la medida |
| 29 | 561,27 | Cuarzo, Glauconita | 0,9771 |
| 30 | 610,20 | Cuarzo, Carbonato | 0,9680 |

| Muestras | Profundidad (m) | Mineralogía | Cociente S |
|-----------------|------------------------|--------------------|-------------------|
| 31 | 633,55 | Cuarzo, Carbonato | 0,7137 |
| 32 | 654,97 | Cuarzo | 0,9735 |
| 33 | 669,57 | Cuarzo, Magnetita | 0,9775 |

APÉNDICE 3

ERRORES REPORTADOS POR EL PROGRAMA MATLAB DESPUÉS DE CADA ENTRENAMIENTO NEURO DIFUSO PARA LAS CUATROS SUB-SECCIONES

| Secciones | Datos de Entrada | Total de reglas difusas | Reglas asignadas a CS | Reglas asignadas a χ | Error |
|-----------|--|-------------------------|-----------------------|---------------------------|----------|
| Sección 1 | $\delta^{18}\text{O} - \text{CS}$ | 2 | 2 | -- | 0.103730 |
| Sección 2 | | 2 | 2 | -- | 0.173290 |
| Sección 3 | | 2 | 2 | -- | 0.120870 |
| Sección 4 | | 2 | 2 | -- | 0.202520 |
| Sección 1 | $\delta^{18}\text{O} - \chi$ | 2 | --- | 2 | 0.246770 |
| Sección 2 | | 2 | --- | 2 | 0.122460 |
| Sección 3 | | 2 | --- | 2 | 0.120280 |
| Sección 4 | | 2 | --- | 2 | 0.095957 |
| Sección 1 | $\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$ | 2 | 2 | 1 | 0.050164 |
| | | 2 | 1 | 2 | 0.082772 |
| Sección 2 | | 2 | 2 | 1 | 0.145610 |
| | | 2 | 1 | 2 | 0.088467 |
| Sección 3 | | 2 | 2 | 1 | 0.093221 |
| | | 2 | 1 | 2 | 0.066786 |
| Sección 4 | | 2 | 2 | 1 | 0.200510 |
| | | 2 | 1 | 2 | 0.141170 |

APÉNDICE 4

GRÁFICOS CRUZADOS DEL $\delta^{18}\text{O}$ INFERIDO VS. $\delta^{18}\text{O}$ EXPERIMENTAL PARA LAS CUATRO SUB-SECCIONES, ENTRENANDO LA RED CON LOS CONJUNTOS DE ENTRADA DE: $\delta^{18}\text{O} - \text{CS}$, $\delta^{18}\text{O} - \chi$ Y $\delta^{18}\text{O} - \text{CS} - \chi$

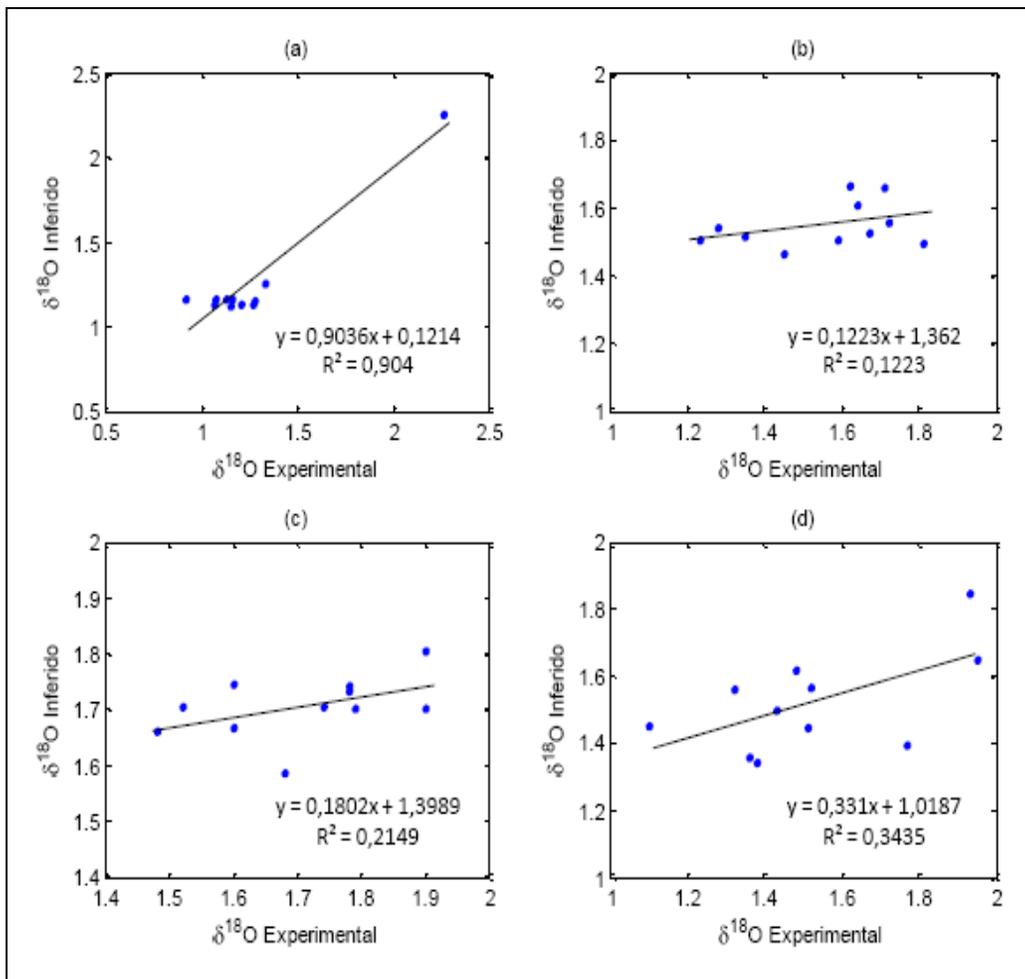


Figura 4.1.- Inferencia del $\delta^{18}\text{O}$ inferido en función del $\delta^{18}\text{O}$ experimental entrenando la red con $\delta^{18}\text{O}$ y CS, para: (a) Sección 1, (b) Sección 2, (c) Sección 3 y (d) Sección 4.

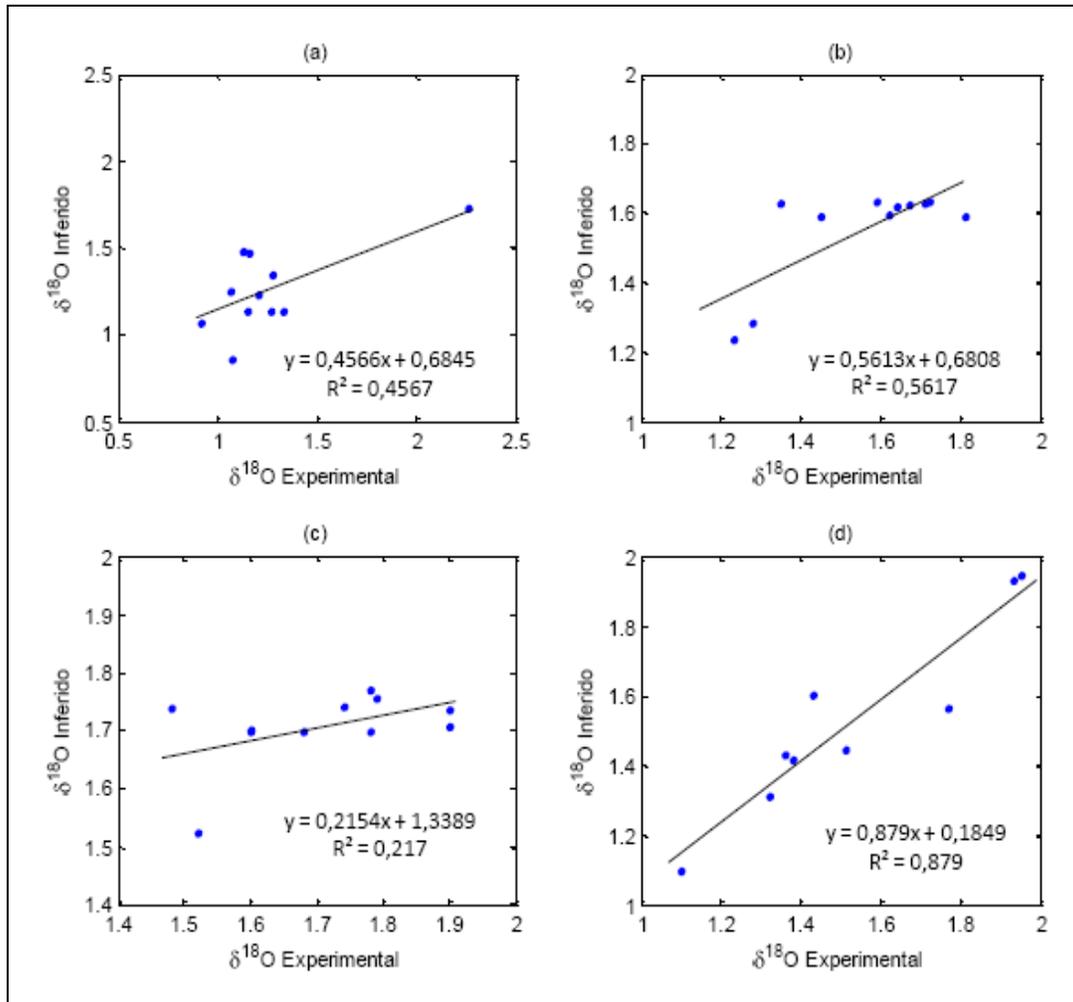


Figura 4.2.- Inferencia del $\delta^{18}\text{O}$ inferido en función del $\delta^{18}\text{O}$ experimental entrenando la red con $\delta^{18}\text{O}$ y χ , para: (a) Sección 1, (b) Sección 2, (c) Sección 3 y (d) Sección 4.

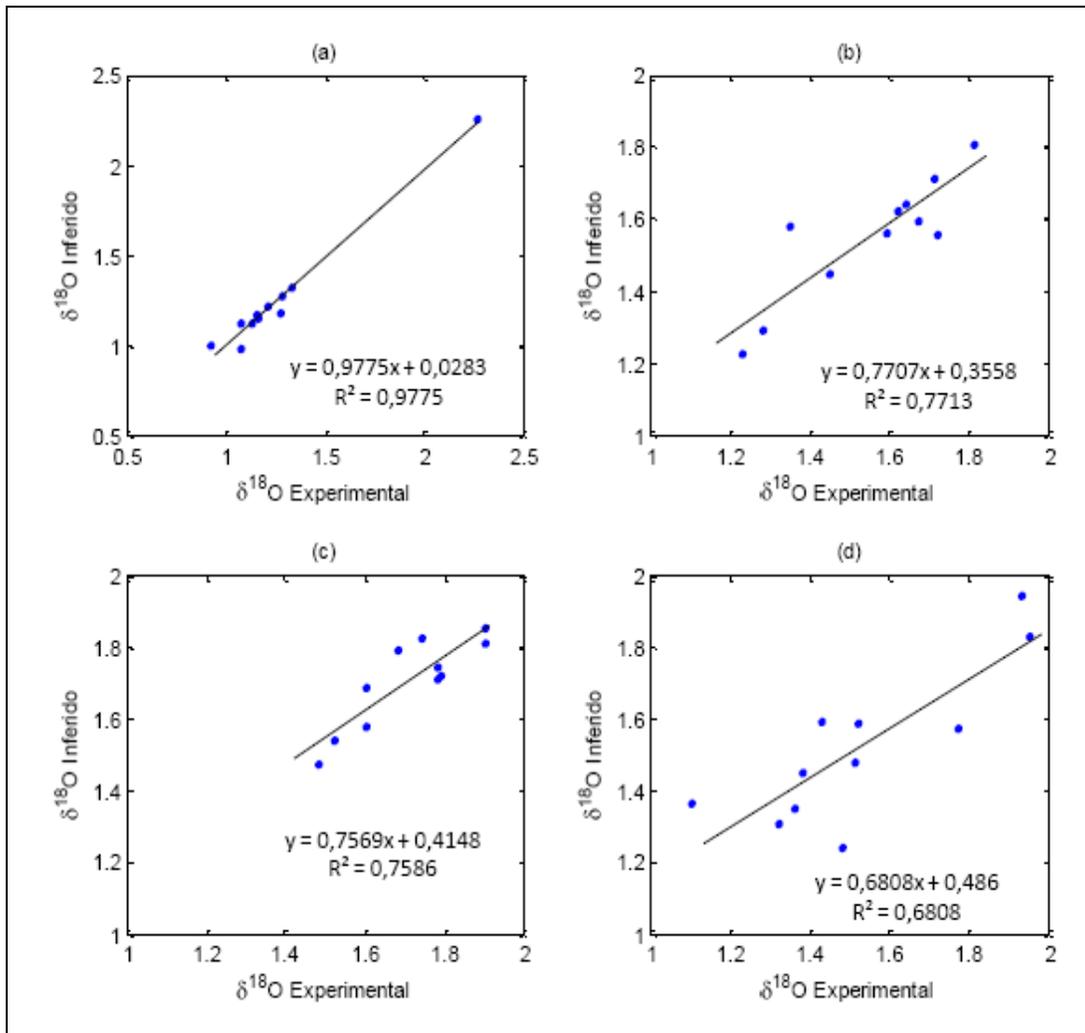


Figura 4.3.- Inferencia del $\delta^{18}\text{O}$ inferido en función del $\delta^{18}\text{O}$ experimental entrenando la red con $\delta^{18}\text{O}$, CS y χ , para: (a) Sección 1, (b) Sección 2, (c) Sección 3 y (d) Sección 4.