

Universidad Central de Venezuela

Facultad de Ciencias

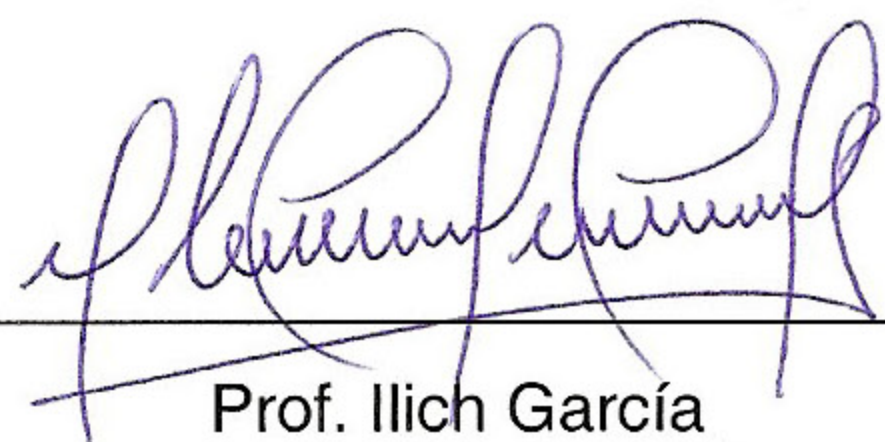
Escuela de Física

VEREDICTO

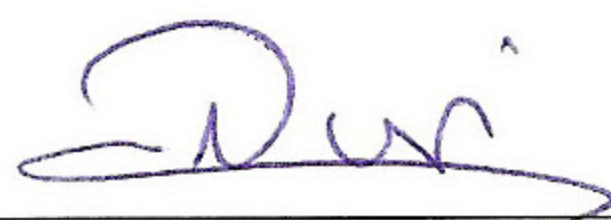
Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Física de la Facultad de Ciencias, en la sesión del día 09-03-2009, para examinar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Br. **Diego López**, portador de la cédula de identidad N° **V-16.032.473**, y titulado "*Caracterización 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*", 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 de que finalizada la defensa pública del trabajo, realizada el día 4 del mes de mayo del 2009, a las 10:00 a.m., el jurado deliberó en privado y por unanimidad decidió **Aprobar** el trabajo.



Prof. Ernesto Medina



Prof. Ilich García



Prof. Nuri Hurtado (UCV)

Tutora



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ciencias
Escuela de Física

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

Realizado por: Diego López

Trabajo Especial de Grado presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela como requisito parcial para optar al Título de Licenciado en Física

Caracas, Mayo de 2009



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ciencias
Escuela de Física

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

Realizado por: Diego López

Trabajo Especial de Grado presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela como requisito para optar al Título de Licenciado en Física

Realizado bajo la tutoría de:

Tutora: Prof. Nuri Hurtado

Tutor: Prof. Vincenzo Costanzo

Caracas, Mayo de 2009

DEDICATORIA

A mi madre, mi abuela y mis hermanos

A todas aquellas personas que a lo largo de todos estos años de esfuerzo me
ayudaron...

Gracias

AGRADECIMIENTOS

El orden de las personas que a continuación se mencionan no obedece ningún parámetro, ya que sin la ayuda y colaboración de cada una de ellas este trabajo no hubiese sido el mismo.

Mis más sinceros agradecimientos y respetos...

...Al Geólogo Alejandro Mora de HOCOL S.A. (Bogotá, Colombia) y al Dr. Germán Bayona de la Corporación Geológica ARES (Bogotá, Colombia), quienes suministraron las muestras de roca y toda la información necesaria acerca de las mismas. Sin estas muestras no se hubiese podido desarrollar el presente trabajo. Muchas Gracias...

...Al Dr. Carlos Jaramillo, del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales en Panamá, quien suministro información valiosa, fundamental e interesante sobre las edades geológicas de las muestras de roca. Muchas Gracias...

...Al personal del Laboratorio de Paleomagnetismo del Departamento de Geociencias de la Universidad de Edimburgo (Reino Unido), quienes brindaron la oportunidad de usar sus instrumentos e instalaciones para las mediciones del cociente S. Muchas Gracias...

...Al Ing. Glen Rodríguez del Laboratorio de Superficies del Departamento de Ciencia de los Materiales, Sección de Microscopía Electrónica de la Universidad Simón Bolívar, quien obtuvo los análisis de microscopía y espectrometría de las muestras. Muchas Gracias...

...A la Dr. Milagrosa Aldana, Profesora de la Universidad Simón Bolívar, quien brindo su total colaboración a cada momento. Muchas gracias...

Las siguientes palabras no serán suficientes para expresar mi agradecimiento a mis tutores, la Dr. Nuri Hurtado y el Dr. Vincenzo Costanzo. Gracias por darme la oportunidad de realizar este trabajo de investigación, gracias por siempre ofrecerme todos los recursos que necesite a lo largo de la investigación, gracias por todo lo que me enseñaron, gracias por su paciencia, gracias por su ayuda y apoyo en todas las situaciones y circunstancias que se presentaron... Muchas gracias...

RESUMEN

En este trabajo, hemos estudiado el potencial del análisis neuronal difuso en la inferencia de relaciones matemáticas entre parámetros magnéticos, tales como cociente S y susceptibilidad magnética. Hemos realizado medidas de susceptibilidad magnética (χ) y del cociente S (S) en 134 muestras que abarcaron aproximadamente 670 metros de profundidad, en un pozo petrolero al este de Colombia, cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales. Estas muestras contienen areniscas y limolitas de las formaciones Guayabo, León y Carbonera (Mioceno Superior/Medio/Inferior y Plioceno Superior). El método de redes neuronales difusas ha sido usado previamente para obtener otras propiedades petrofísicas, tales como permeabilidad a partir de valores experimentales de porosidad. Sin embargo, esta es la primera vez que esta técnica se aplica a propiedades magnéticas. Los resultados obtenidos de esta inferencia, fueron comparados e integrados con los valores experimentales. La diferencia entre los valores inferidos y los datos experimentales del cociente S, disminuye al alimentar la red neuronal difusa con datos previamente clasificados y agrupados según: división operacional en campo, edades geológicas (envolventes transgresivas) y por ambiente reductor. Esta técnica además nos ha permitido identificar cambios de las condiciones paleoambientales durante la formación de la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales (Colombia).

Palabras clave: Redes neuronales difusas, susceptibilidad magnética, cociente S, magnetoestratigrafía, paleoambiente.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido	Pág.
CAPITULO I	
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO.....	6
I. Bases teóricas experimentales.....	6
A. Susceptibilidad magnética (χ).....	6
Susceptibilidad magnética en rocas.....	9
Descripción de la técnica utilizada para la medición de susceptibilidad.....	13
Método de corriente alterna (C.A.).....	15
Mediciones con el susceptómetro MS2.....	16
B. Cociente S (S).....	18
C. Microscopio electrónico de barrido (SEM).....	21
D. Espectroscopía de rayos X por dispersión de electrones secundarios (EDX).....	24
II. Bases teóricas de redes neuronales difusas.....	25
A. Lógica difusa.....	25
Conjunto difuso.....	28
Función de pertenencia.....	28
Reglas difusas.....	32
B. Redes neuronales.....	33
C. Redes neuronales difusas.....	35
Entrenamiento de las redes neuronales difusas. Retropropagación.....	37
D. ANFIS (Adaptive Neuro-Based Fuzzy Inference System).....	38
Arquitectura de ANFIS.....	39
CAPITULO III	
INFORMACIÓN GEOLÓGICA.....	44
I. Las muestras.....	44
II. Descripción geológica de las formaciones.....	45
A. Formación Guayabo.....	46
B. Formación León.....	48
C. Formación Carbonera.....	49
III. Ciclos eustáticos.....	52
IV. Divisiones de las muestras.....	54
A. División operacional de campo.....	54
B. División por edades geológicas (envolventes transgresivas).....	55
C. División por edades geológicas (envolventes transgresivas) y ambientes reductores.....	57

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO	58
I. Metodología experimental	58
A. Preparación de muestras para la medición de parámetros magnéticos	58
B. Medidas de susceptibilidad magnética (χ)	60
C. Medidas de cociente S	62
D. Preparación de muestras. Microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectrometría de rayos X (EDX)	66
II. Metodología computacional	71
A. Optimización de parámetros	71
B. Metodología para el análisis computacional enfocado a la división operacional de campo	81
C. Metodología para el análisis computacional enfocado en las edades geológicas	88
D. Metodología para el análisis computacional de los datos seleccionados según ambiente netamente reductor, usando la división por edades geológicas	88

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTALES	91
I. Resultados de la medición de la susceptibilidad magnética (χ) y del cociente S (S)	91
II. Resultados de la medición por microscopia electrónica de barrido (SEM) y espectrometría de rayos X por difracción de electrones secundarios (EDX)	94
III. Conclusiones de los resultados experimentales	111

CAPÍTULO VI

RESULTADOS COMPUTACIONALES	113
I. Análisis de resultados en el contexto del marco geológico	113
A. Resultados para los datos seleccionados según la división operacional de campo	113
B. Resultados para los datos seleccionados según la división por edades geológicas	122
C. Resultados para los datos seleccionados por ambiente reductor sobre las divisiones por edades geológicas	131
II. Conclusiones de los resultados computacionales	141

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y LIMITACIONES	143
------------------------------------	-----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147
-----------------------------------	-----

ANEXOS

ANEXO 1. Datos experimentales de susceptibilidad magnética (χ) y cociente S (S) usados para el tratamiento computacional con redes neuronales difusas.....	152
ANEXO 2. Valores de los errores reportados para cada entrenamiento según los parámetros escogidos de la red neuronal difusa.....	157
ANEXO 3. Resultados computacionales. Gráficas del cociente s inferido y experimental en función de la profundidad del pozo divididos según la división operacional de campo	178
ANEXO 4. Resultados computacionales. Gráficas del cociente s inferido y experimental en función de la profundidad del pozo divididos según las edades geológicas (envolventes transgresivas).....	184
ANEXO 5. Resultados computacionales. Gráficas del cociente s inferido y experimental en función de la profundidad del pozo divididos según ambientes reductores ($S \geq 0.66$) y edades geológicas (envolventes transgresivas).....	189

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
CAPÍTULO II	
Figura 2.1. Muestra de un material entre dos bobinas diferentes sometidas a potenciales V_1 y V_2	14
Figura 2.2. Susceptómetro MS2 (Bartington Instruments) utilizado para las mediciones de susceptibilidad magnética.....	17
Figura 2.3. Esquema de la aplicación de dos campos antiparalelos (4,0 T y 0,4T) para la determinación del cociente S en una muestra determinada (cilindro de color azul).....	20
Figura 2.4. Conjuntos de lógica referente a la clasificación según el valor del cociente S. (a) Escala convencional con límites precisos. Sólo dos estados son posibles: membresía o no membresía, (b) posible conjunto difuso basado en el valor del cociente S. Los límites permiten parcial membresía, y la membresía en más de una clase simultáneamente.....	28
Figura 2.5. Funciones de pertenencia (membership function, mf). (a) Trimf, (b) trapmf, (c) gbellmf, (d) gaussmf, (e) gauss2mf, (f) pimf, (g) dsigmf, (h) psigmf.....	33
Figura 2.6. Red neuronal artificial simple con n neuronas de entrada, m neuronas en su capa oculta y una neurona de salida.....	34
Figura 2.7. Red neuronal híbrida adaptable con 5 capas.....	40
CAPÍTULO III	
Figura 3.1. Ubicación del pozo Saltarín 1A (cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales, Colombia).....	44
Figura 3.2. Ciclos eustáticos para el pozo Saltarín 1A.....	53
Figura 3.3. Imagen izquierda muestra los ciclos eustáticos para el pozo Saltarín 1A. A la derecha se muestra el perfil del cociente S en función de la profundidad. Las flechas rojas indican los amarres en edades fijadas por bioestratigrafía a 305 m y 610 m.....	54
Figura 3.4. Envolventes transgresivas establecidas para el pozo Saltarín 1A, mediante el amarre por medio de dos edades (vía bioestratigráfica) y que corresponden a una profundidad de 305 y 610 m (líneas azules horizontales).....	56

CAPÍTULO IV

Figura 4.1. Recipientes de plástico o porta muestras de roca triturada.....	59
Figura 4.2. Susceptómetro MS2 (Bartington Instruments) utilizado para las mediciones de susceptibilidad magnética.....	60
Figura 4.3. (a) Consola de medición; (i) botón para realizar la medición de la susceptibilidad magnética; (ii) botón para la calibración del cero; (iii) pantalla; (iv) selector de encendido y selector de unidades (CGS o SI); (v) selector de batería y ordenes de magnitud de medición; (vi) cable dirigido al sensor (Figura (b)); (vii) base del instrumento. Figura 4.3 (b) Sensor de medición: (i) porta muestras; (ii) dispositivo para levantar y bajar el porta muestras.....	61
Figura 4.4. Esquema gráfico del procedimiento seguido para la medición de susceptibilidad magnética con el susceptómetro MS2 para cada una de las 134 muestras de roca. (PROM. significa promedio).....	62
Figura 4.5. Electroimán de pulso, marca ASC Scientific, modelo IM-10-30. (i) Ejemplo de las bobinas utilizadas por el equipo para generar un campo magnético en particular; (ii) porta muestras; (iii) porta muestras del magnetizador; (iv) botones para encendido/apagado, trigger, etc; (v) rueda o perilla que cambia el voltaje que posee la bobina, modificando así, la intensidad del campo; (vi) pantalla.....	64
Figura 4.6. Magnetómetro. (i) Orificio para la entrada de la muestra dentro del instrumento; (ii) material aislante del campo magnético terrestre actual; (iii) mecanismo para la introducción de la muestra dentro del instrumento para su medición.....	65
Figura 4.7. Platina circular de cobre (porta muestra) y cinta adhesiva de grafito sobre la cual es colocada la gota de fracción magnética (disuelta en alcohol isopropílico) de la muestra de roca; para los análisis de microscopía electrónica y espectroscopia de rayos X.....	69
Figura 4.8. Instrumental para la aplicación del recubrimiento de oro para el análisis de microscopía electrónica y espectroscopia de rayos X. Nombre del equipo: Sputerin Hochspannung.....	69
Figura 4.9. Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM – 6390; y sonda de rayos X o dispersor de energía Oxford Instruments, modelo 7582.....	70
Figura 4.10. Total de pruebas efectuadas para Guayabo/León/Carbonera = 256.....	76
Figura 4.11. Total de pruebas efectuadas para Guayabo = 128.....	77
Figura 4.12. Total de pruebas efectuadas para León = 64.....	78

Figura 4.13. Total de pruebas efectuadas para Carbonera = 64.....	79
Figura 4.14. Total de pruebas efectuadas para León/Carbonera = 80.....	80
Figura 4.15. Perfil completo (0m – 670m). Representación de datos experimentales (línea negra punteada) del cociente S, en función de la profundidad, según entrenamiento para: (a) $\chi - S$, (b) $\chi - \log (S)$, (c) $\log (\chi) - S$, (d) $\log (\chi) - \log (S)$; así como las inferencias del cociente S, mostradas en líneas continuas, para: 2 (color rojo) y 9 (color azul) reglas difusas.....	83
Figura 4.16. Formación Guayabo (0m – 442m). Representación de datos experimentales (línea negra punteada) del cociente S, en función de la profundidad, según entrenamiento para: (a) $\chi - S$, (b) $\chi - \text{Log} (S)$, (c) $\text{Log} (\chi) - S$, (d) $\text{Log} (\chi) - \text{Log} (S)$; así como las inferencias del cociente S, mostradas en líneas continuas, para: 2 (color rojo) y 5 (color azul) reglas difusas.....	84
Figura 4.17. Formación León (442m – 569m). Representación de datos experimentales (línea negra punteada) del cociente S, en función de la profundidad, según entrenamiento para: (a) $\chi - S$, (b) $\chi - \text{Log} (S)$, (c) $\text{Log} (\chi) - S$, (d) $\text{Log} (\chi) - \text{Log} (S)$; así como la inferencia del cociente S, mostrada en línea continuas, para 2 (color azul) reglas difusas.....	85
Figura 4.18. Formación Carbonera (569m – 670m). Representación de datos experimentales (línea negra punteada) del cociente S, en función de la profundidad, según entrenamiento para: (a) $\chi - S$, (b) $\chi - \text{Log} (S)$, (c) $\text{Log} (\chi) - S$, (d) $\text{Log} (\chi) - \text{Log} (S)$; así como la inferencia del cociente S, mostrada en línea continuas, para 2 (color azul) reglas difusas.....	86
Figura 4.19. Formación León y Carbonera (442 m – 670 m). Representación de datos experimentales (línea negra punteada), así como las inferencias del cociente S (líneas continuas) del cociente S, en función de la profundidad, según entrenamiento para: (a) $\chi - S$, (b) $\chi - \text{Log} (S)$, (c) $\text{Log} (\chi) - S$, (d) $\text{Log} (\chi) - \text{Log} (S)$., para: 2 (color rojo) y 5 (color azul) reglas difusas. Las inferencias del cociente S, según la cantidad de reglas difusas son: (a) y (b) 2 (rojo), 4 (azul); (c) y (d) 2 (rojo) 3 (azul).....	87

CAPÍTULO V

Figura 5.1. Valores experimentales (en unidades de SI) versus profundidad, para las mediciones en el Pozo Saltarín 1A (0 m – 670 m) de: (a) Susceptibilidad Magnética, (b) Cociente S.....	92
Figura 5.2 Muestra: 110.37 m (a), $\chi = 107.69$, Cociente S = 0.95.....	96
Figura 5.3 Muestra: 110.37 m (b), $\chi = 107.69$, Cociente S = 0.95.....	97
Figura 5.4 Muestra: 127.40 m, $\chi = 100.81$, Cociente S = No se realizó medida.....	98
Figura 5.5 Muestra: 139.31 m, $\chi = 52.39$, Cociente S = 0.96.....	99

Figura 5.6 Muestra: 147.25 m (a), $\chi = 57.10$, Cociente S = 0.90.....	100
Figura 5.7 Muestra: 147.25 m (b), $\chi = 57.10$, Cociente S = 0.90.....	101
Figura 5.8 Muestra: 462.43 m, $\chi = 46.60$, Cociente S = 0.94.....	102
Figura 5.9 Muestra: 479.55 m (a), $\chi = 31.17$, Cociente S = No se realizó medida.....	103
Figura 5.10 Muestra: 479.55 m (b), $\chi = 31.17$, Cociente S = No se realizó medida.....	104
Figura 5.11 Muestra: 541.75 m, $\chi = 31.44$, Cociente S = 0.94.....	105
Figura 5.12 Muestra: 616.48 m (a), $\chi = 19.52$, Cociente S = 0.99.....	106
Figura 5.13 Muestra: 616.48 m (b), $\chi = 19.52$, Cociente S = 0.99.....	107
Figura 5.14 Muestra: 616.48 m (c), $\chi = 19.52$, Cociente S = 0.99.....	108
Figura 5.15 Muestra: 627.36 m (a), $\chi = 14.04$, Cociente S = No se realizó medida.....	109
Figura 5.16 Muestra: 627.36 m (b), $\chi = 14.04$, Cociente S = No se realizó medida.....	110

CAPÍTULO VI

Figura 6.1. Todo el pozo (0m – 670m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.....	110
Figura 6.2. Formación Guayabo (0m – 442m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.....	111
Figura 6.3. Formación León (442m – 569m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.....	112
Figura 6.4. Formación Carbonera (569m – 670m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.....	119
Figura 6.5. Formaciones León y Carbonera (442m – 670m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.....	114

Figura 6.6. División Operacional de Campo. Representación de los datos de cociente S, experimentales (línea punteada) e inferidos con el máximo de reglas difusas (línea continua), en función de la profundidad, de la división operacional de campo para: (a) 100% de los datos experimentales, (b) formación Guayabo, (c) formación León, (d) formación Carbonera y (e) formaciones León y Carbonera. Los datos inferidos del cociente S se han obtenido usando como datos de entrada: (a) cociente S y $\log(\chi)$, (b) cociente S y $\log(\chi)$, (c) cociente S y χ , (d) cociente S y $\log(\chi)$, y (e) cociente S y χ116

Figura 6.7. Primera envolvente transgresiva (0m – 320m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.....120

Figura 6.8. Segunda envolvente transgresiva (320m – 610m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.....121

Figura 6.9. Tercera envolvente transgresiva (610m – 670m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.....122

Figura 6.10. Segunda y tercera envolventes transgresivas (320m – 670m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.....123

Figura 6.11. Representación de los datos de cociente S, experimentales (línea punteada) e inferidos con el máximo de reglas difusas (línea continua), en función de la profundidad, de la división según edades geológicas (envolventes transgresivas) para: (a) 100% de los datos experimentales (son los mismos datos que para la división operacional de campo), (b) primera envolvente transgresiva, (c) segunda envolvente transgresiva, (d) tercera envolvente transgresiva y (e) segunda y tercera envolventes transgresivas. Los datos inferidos del cociente S se han obtenido usando como datos de entrada: (a) cociente S y $\log(\chi)$, (b) cociente S y $\log(\chi)$, (c) cociente S y χ , (d) cociente S y $\log(\chi)$, y (e) cociente S y χ125

Figura 6.12. Representación de los datos de cociente S, experimentales (línea punteada) e inferidos con el máximo de reglas difusas (línea continua), en función de la profundidad, de los ambientes reductores, para las divisiones según edades geológicas (envolventes transgresivas): (a) 100% de los datos experimentales (son los mismos datos que para la división operacional de campo), (b) primera envolvente transgresiva, (c) segunda envolvente transgresiva, (d) tercera envolvente transgresiva y (e) segunda y tercera envolventes transgresivas. Los datos inferidos del cociente S se han obtenido usando como datos de entrada: (a) cociente S y $\log(\chi)$, (b) cociente S y $\log(\chi)$, (c) cociente S y χ , (d) cociente S y $\log(\chi)$, y (e) cociente S y χ132

Figura 6.13. División operacional de campo. Se muestran las inferencias de cociente S para: (a) pozo completo, (b) Formación Guayabo, (c) Formación León, (d) Formación Carbonera y (e) Formaciones León – Carbonera. Línea negra punteada: valores experimentales de cociente S; línea continua azul muestra la inferencia del cociente S.....134

Figura 6.14. División por edades geológicas. Se muestran las inferencias de cociente S para: (a) pozo completo, (b) 1^{ra} envolvente transgresiva, (c) 2^{da} envolvente transgresiva, (d) 3^{ra} envolvente transgresiva y (e) 2^{da} y 3^{ra} envolventes transgresivas. Línea negra punteada: valores experimentales de cociente S; línea continua azul muestra la inferencia del cociente S.....135

Figura 6.15. Ambiente reductor (cociente $S \geq 0.66$). Se muestran las inferencias de cociente S para: (a) sobre el pozo completo, (b) sobre la 1^{ra} envolvente transgresiva, (c) sobre la 2^{da} envolvente transgresiva, (d) 3^{ra} envolvente transgresiva y (e) sobre las 2^{da} y 3^{ra} envolventes transgresivas. Línea negra punteada: valores experimentales de cociente S; línea continua azul muestra la inferencia del cociente S.....136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
CAPÍTULO II	
Tabla 2.1. Máximas coercitividades para diferentes minerales magnéticos (Lucena, G. 2001).....	19
CAPÍTULO IV	
Tabla 4.1. Errores de los entrenamientos usando la función de pertenencia pimf para las 4 combinaciones de los parámetros y para las 5 divisiones consideradas según la división operacional de campo. Para las formaciones León y Carbonera, 3 reglas difusas representa un porcentaje mayor al 10% con respecto a la cantidad de valores experimentales usados, pero igual se coloca para tener un dato con el cual comparar el error de 2 reglas difusas (10%).....	75
Tabla 4.2. Cantidad de datos experimentales y número de reglas difusas, tanto para toda la profundidad del pozo (considerando las tres formaciones), como para cada formación según la división operacional de campo. (*) La discrepancia entre la cantidad de datos experimentales para una misma división se debe a valores de susceptibilidad magnética cero, por lo que su logaritmo en base 10 no tiene sentido. Estos datos fueron descartados del entrenamiento. En todas las pruebas se utilizó la función de pertenencia pimf, una tolerancia de 0.0 y una salida de tipo lineal híbrida.....	82
Tabla 4.3. Cantidad de datos experimentales y número de reglas difusas, tanto para toda la profundidad del pozo (considerando las tres formaciones), como para cada formación según la división por edades geológicas (envolventes transgresivas). (*) La discrepancia entre la cantidad de datos experimentales para una misma división se debe a valores de susceptibilidad magnética cero, por lo que su logaritmo en base 10 no tiene sentido. Estos datos fueron descartados del entrenamiento. En todas las pruebas se utilizó la función de pertenencia pimf, una tolerancia de 0.0 y una salida de tipo lineal híbrida.....	89
Tabla 4.4 Cantidad de datos experimentales y número de reglas difusas, tanto para toda la profundidad del pozo (considerando las tres formaciones), como para cada formación según la división por ambiente reductor ($S \geq 0.66$) y edades geológicas (envolventes transgresivas). (*) La discrepancia entre la cantidad de datos experimentales para una misma división se debe a valores de susceptibilidad magnética cero, por lo que su logaritmo en base 10 no tiene sentido. Estos datos fueron descartados del entrenamiento. En todas las pruebas se utilizó la función de pertenencia pimf, una tolerancia de 0.0 y una salida de tipo lineal híbrida.....	90

CAPÍTULO V

Tabla 5.1. Muestras analizadas con microscopia electrónica de barrido y espectrometría por dispersión de electrones secundarios.....	94
--	----

CAPÍTULO VI

Tabla 6.1. Valores en profundidad según la división operacional de campo.....	113
---	-----

Tabla 6.2. Resumen de los errores reportados por la red neuronal difusa de MatLab para cada una de las formaciones según la división operacional de campo. Los menores errores se encuentran en las celdas sombreadas.....	119
--	-----

Tabla 6.3. Valores en profundidad para la división por edades geológicas (envolventes transgresivas).....	123
---	-----

Tabla 6.4. Resumen de los errores reportados por la red neuronal difusa de MatLab para cada una de las formaciones según la división por envolventes transgresivas. Los menores errores se encuentran en las celdas sombreadas.....	127
---	-----

Tabla 6.5. Resultados obtenidos para el pozo completo y ambiente reductor sobre todo el pozo para la inferencia del cociente S. Modelos para los datos de entrada y grado de inferencia (%).....	131
--	-----

Tabla 6.6. Resultados obtenidos para la formación Guayabo y 1 ^{ra} envolvente transgresiva para la inferencia del cociente S. Espesor en profundidad en metros, modelos para los datos de entrada y grado de inferencia (%).....	132
---	-----

Tabla 6.7. Resultados obtenidos para la formación León y 2 ^{da} envolvente transgresiva para la inferencia del cociente S. Espesor en profundidad en metros, modelos para los datos de entrada y grado de inferencia (%).....	132
--	-----

Tabla 6.8. Resultados obtenidos para la formación Carbonera y 3 ^{da} envolvente transgresiva para la inferencia del cociente S. Espesor en profundidad en metros, modelos para los datos de entrada y grado de inferencia (%).....	133
---	-----

Tabla 6.9. Resultados obtenidos para la formaciones León – Carbonera, 2 ^{da} y 3 ^{ra} envolvente transgresiva para la inferencia del cociente S. Espesor en profundidad en metros, modelos para los datos de entrada y grado de inferencia (%).....	133
---	-----

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El método computacional de redes neuronales difusas, es la unión de las técnicas de redes neuronales y lógica difusa. Por separado, la lógica difusa ha sido usada en varios trabajos para la obtención de información geológica extra de un área en particular. Tal es el caso del estudio de Hambalex (2003), el cual plantea el uso de lógica difusa con la finalidad de construir las secciones estratigráficas de varios pozos en el área de Casupal, ubicada en el límite entre los estados Monagas y Anzoátegui y enmarcada en la Subcuenca de Maturín, perteneciente a la Cuenca Oriental de Venezuela. Esta construcción y descripción de las secciones estratigráficas para la ubicación de posibles reservorios, se dificulta por procedimientos tradicionales (métodos geofísicos y petrofísicos), debido a la complejidad estructural presente en el área de Casupal. Hambalex (2003) alimenta al sistema difuso con parámetros petrofísicos, tales como: gamma ray (radiación emitida por ciertos minerales presentes en una roca, por ejemplo: potasio, torio y uranio), porosidad (porcentaje de volumen de poros con respecto al volumen total de la roca) y arcillosidad (cantidad de arcilla en una roca) para realizar la inferencia de la calidad de posibles reservorios para su explotación. En este estudio se concluye que la lógica difusa permite predecir con gran calidad las litologías, aún en áreas con poca información de núcleos.

Otro estudio similar acerca de la predicción de litofacies por medio de la técnica de lógica difusa y usando gamma ray, fue el realizado por Finol et al. (2001). En este

estudio se llega a la conclusión que la técnica de lógica difusa es capaz de predecir, con buenos resultados, las litofacies de un pozo, a partir del perfil de gamma ray.

Ahora bien, la técnica de redes neuronales difusas ha sido previamente usada con éxito, para inferir ciertas propiedades petrofísicas tales como permeabilidad a partir de valores experimentales de porosidad (Hurtado et al., 2008). Sin embargo, esta es la primera vez en donde esta técnica es aplicada a propiedades magnéticas.

En Hurtado et al. (2008) se usaron diferentes técnicas, tales como: la teoría fractal desarrollada por Pape et al. (1999) y el modelo de regresión lineal para la ecuación empírica de Tixier (ecuación que considera las relaciones entre saturación de agua y la presión capilar para obtener la permeabilidad a través de la porosidad y la saturación de agua irreducible); para la predicción de la permeabilidad en tres pozos del campo Bloque III, Lago de Maracaibo. Otra de las técnicas usadas por Hurtado et al. (2008) fue la de redes neuronales difusas. Los resultados de permeabilidad inferidos, fueron comparados con valores de permeabilidad de núcleos previamente medidos en el área. Se encontró que, cuando la cantidad de información de porosidad y permeabilidad de núcleo es lo suficientemente grande, el modelo producto de la red infiere la permeabilidad mejor que el resto de los modelos estudiados.

De forma general, en este estudio realizamos en primer lugar la medición experimental de la susceptibilidad magnética (χ) y del cociente S (S) para 134 muestras del pozo Saltarín 1A (principalmente lodolitas y areniscas de las formaciones Guayabo, León y Carbonera, que abarcan aproximadamente 670 metros de profundidad), el cual

está ubicado al este de Colombia en la Cuenca Sedimentaria de los Llanos Orientales. Estas muestras pasaron por una preparación previa antes de la medición. Posteriormente hemos usado la información sobre la división operacional en campo de las muestras para dividir los valores experimentales de ambos parámetros según las formaciones Guayabo, León y Carbonera. Según esta separación de los datos se realizaron pruebas computacionales con redes neuronales difusas para encontrar los modelos y parámetros de la red que permitiesen realizar la mejor inferencia de los valores experimentales del cociente S a partir de los de susceptibilidad magnética. Paralelamente a esto, fueron seleccionadas 9 de las 134 muestras por presentar anomalías (máximos) en el perfil de susceptibilidad magnética y en las cuales se realizó el estudio de SEM (Scanning Electron Microscopy) y EDX (Energy Dispersive X Ray Spectroscopy) con el objeto de establecer un vínculo entre las anomalías de los parámetros magnéticos y las diferentes litologías del pozo Saltarín 1A. A continuación, y con ayuda de información geológica relacionada con dos edades referenciales para el pozo (edades bioestratigráficas), se realizó otra clasificación de los datos experimentales (división por edades geológicas o envolventes transgresivas), y se analizó con redes neuronales difusas para conocer si según esta última división se generaba una mejor inferencia con respecto a la clasificación de los datos experimentales por la división operacional de campo. También fue realizado el análisis según una clasificación de los datos según ambiente reductor (valores de cociente $S \geq 0.66$). Finalmente toda la información de la aplicación de las redes neuronales difusas para las distintas divisiones realizadas a los datos experimentales, fue integrada y correlacionada con los resultados de SEM, EDX, ciclos eustáticos, entre otros; para así verificar el potencial de las redes neuronales difusas en la inferencia de parámetros

magnéticos y en la descripción de las posibles condiciones de sedimentación y características paleoambientales que conformaron las muestras del pozo Saltarín 1A.

En este trabajo hemos logrado inferir, por medio de la técnica de redes neuronales difusas, parámetros magnéticos tales como el cociente S (cociente de coercitividades que mide indirectamente la cantidad de hematita sobre la cantidad de magnetita en una muestra de roca), a partir de valores medidos de susceptibilidad magnética y cociente S, así como de demostrar que la utilización de estos dos parámetros magnéticos y dicha técnica conforman una metodología o herramienta objetiva y útil para la descripción de paleoambientes de sedimentación con el fin de identificar diferentes litofacies en una sección estratigráfica particular.

Con la aplicación de las redes neuronales difusas hemos podido detectar, con cierta precisión, los contrastes litológicos que se presentan a lo largo de la columna sedimentaria como consecuencia de cambios en los paleoambientes de depositación. Al usar el cociente S como único parámetro a inferir, estamos partiendo de la hipótesis de que tales contrastes litológicos obedecen principalmente a la variabilidad de las condiciones óxido reductoras al momento de la sedimentación ya que la hematita es estable en ambientes oxidantes mientras que la magnetita es estable en ambientes reductores. Sin embargo, cambios en las granulometrías magnéticas (distribución de tamaños y formas de los minerales magnéticos presentes en una roca) y en la concentración de minerales magnéticos, como consecuencia de una transición paleoambiental o variación de las fuentes de sedimentación, no son detectados por este parámetro magnético en particular. De esta forma se esperaría que, en aquellos

intervalos estratigráficos en donde ocurre un contraste litológico que involucra cambios en las condiciones químicas de sedimentación, contrastes granulométricos y concentraciones de minerales magnéticos, los datos experimentales e inferidos por medio de la red neuronal difusa, de cocientes S no coincidirían adecuadamente entre sí. En otras palabras, la red estaría detectando este contraste pudiéndose utilizar así, como una herramienta objetiva de interpretación estratigráfica.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo expondremos algunos de los conceptos más relevantes a ser utilizados a lo largo de este trabajo. Se ha dividido en dos secciones importantes, una referida a las técnicas experimentales usadas para las mediciones experimentales de la susceptibilidad magnética, cociente S , SEM (Scanning Electron Microscopy) y EDX (Energy dispersive X ray specttroscopy) en las muestras del pozo Saltarían 1A; y otra sección destinada a la técnica computacional en la cual se explica las principales características de un análisis en base a la técnica de redes neuronales difusas.

I. BASES TEÓRICAS EXPERIMENTALES

A. SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ)

La susceptibilidad magnética proporciona una idea de cómo se comporta la materia cuando ésta se encuentra en presencia de un campo magnético externo. Esta puede ser definida como la facilidad con la cual un material puede ser magnetizado.

Cuando un material es introducido en una región en la cual existe un campo magnético, éste se magnetiza y la magnitud de la magnetización depende de la intensidad del campo. A la magnitud de la magnetización del material se le designa por M (momento magnético total por unidad de volumen) y está relacionada con el campo externo aplicado H , por la expresión:

$$B = H + 4\pi M \quad (\text{En unidades CGS})$$

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

Las propiedades magnéticas de una sustancia son caracterizadas, no solo por la magnitud de M , sino también por la forma como ésta varía con H . El cociente de estas dos cantidades se denomina susceptibilidad magnética y es designada por la letra griega χ .

Ya que M cuantifica el número de dipolos por unidad de volumen, χ se refiere a la unidad de volumen y se le llama susceptibilidad volumétrica. Varias formas de definir la susceptibilidad magnética son:

Susceptibilidad volumétrica: $\chi_v = \chi/V$ Donde V es el volumen del material.

Susceptibilidad por masa: $\chi_p = \chi/\rho$ Donde ρ es la densidad del material.

Susceptibilidad molar: $\chi_M = \chi/M'$ Donde M' es el peso molecular del material.

Así, se puede caracterizar el comportamiento magnético de varias sustancias por sus correspondientes valores de χ .

En el espacio vacío: $\chi = 0$, por lo tanto no hay materia que magnetizar.

Sustancias diamagnéticas: χ es cercano a cero y negativa.

Sustancias para y antiferro-magnéticas: χ es cercano a cero y positiva.

Materiales ferri y ferromagnéticos: χ es un valor positivo que depende de H .

Las propiedades magnéticas de los sólidos son determinadas fundamentalmente por los átomos individuales y por los electrones asociados a estos. Dichos átomos pueden tener un número considerable de electrones, cada uno con un espín asociado y un momento angular orbital determinado, y un momento magnético asociado a cada uno de ellos. El momento magnético del átomo es la suma vectorial de todos los momentos magnéticos electrónicos; si los momentos magnéticos de todos los electrones están orientados de tal forma que se cancelan mutuamente, entonces el átomo como un todo no tiene momento magnético, esta condición conduce al diamagnetismo (diamagnetismo se refiere al momento magnético nuclear cuando el electrónico total se cancela completamente o es muy pequeño); y si los momentos magnéticos sólo se cancelan de forma parcial, el átomo queda con un momento magnético permanente. Las sustancias compuestas de átomos de esta clase pueden ser para, ferri, antiferro o ferromagnéticas.

Las sustancias diamagnéticas tienen una susceptibilidad magnética negativa. Todas las sustancias tienen un término diamagnético básico, pero puede ser apantallado por la susceptibilidad paramagnética. El diamagnetismo es independiente de la temperatura.

En materiales paramagnéticos, la magnetización que adquieren los sólidos al estar bajo un campo magnético externo depende linealmente del campo aplicado y esta

desaparece cuando el campo externo es removido. La susceptibilidad varía inversamente proporcional con la temperatura en estas sustancias.

Susceptibilidad magnética en rocas

Las medidas de susceptibilidad magnética en rocas son esenciales para las investigaciones en geofísica y geología.

La magnetometría es uno de los métodos más antiguos de la prospección geofísica, ésta se encarga del estudio del campo magnético terrestre y de las anomalías provocadas por las rocas y minerales magnetizados en el subsuelo a nivel local y regional. Las rocas intrusivas de composición básica y media, como el gabro y la diorita, así como las que contienen hierro o minerales ferrosos (magnetita, titanomagnetita, cuarzo ferroso o intrusivo) producen anomalías magnéticas locales que son separadas del componente regional del subsuelo o del componente del campo magnético terrestre dipolar axial (Delgado, 1983).

Muchos de estos datos son usados frecuentemente en los métodos de modelaje de inversión geológica en donde, a través de los datos experimentales se pueden inferir los parámetros numéricos desconocidos dentro de un modelo teórico propuesto sobre el sistema en estudio, previa separación de los componentes locales de los componentes regionales (Delgado, 1983).

Se sabe que los diferentes tipos de rocas pueden identificarse por medio de sus propiedades magnéticas, en efecto las de menor susceptibilidad magnética son, por lo general, sedimentarias y las de mayor susceptibilidad magnética son las ígneas básicas.

En la práctica este comportamiento depende de un pequeño grupo de minerales portadores de hierro en el material. Algunos minerales son mucho más magnéticos que otros y algunos materiales tienen más minerales magnéticos que otros.

En el ambiente natural la magnetización de un material da indicios sobre los minerales que se encuentran en suelos, rocas y sedimentos. De esta forma las mediciones de la susceptibilidad magnética pueden suministrar una información similar a la que suministran otras técnicas tales como la difracción por rayos X o el análisis de minerales pesados. Algunas de las aplicaciones de las mediciones de susceptibilidad magnética para muestras de roca, son las siguientes:

- Identificar los minerales presentes en una muestra.
- Calcular su concentración o volumen total.
- Clasificar diferentes tipos de materiales.
- Identificar los procesos de su formación o transporte.
- Indicios del tamaño de grano magnético presente en la muestra.
- La susceptibilidad magnética es utilizada frecuentemente para determinar la concentración de mineral magnético, con el fin de ayudar a identificar rocas y

sedimentos que han registrado fielmente el campo geomagnético de la Tierra a través de la magnetización remanente natural.

- En sedimentos lacustres y marinos la susceptibilidad puede ayudar a identificar zonas de perturbación, hiatos, sedimentos de aluvión, óxidos magnéticos formados en el mismo lugar y los efectos de la bioturbación en el registro geomagnético.
- La susceptibilidad magnética puede utilizarse para registrar los principales cambios estratigráficos en núcleos de sedimentos marinos profundos. Los registros de susceptibilidad han sido usados para establecer la relación entre el cambio climático y el campo geomagnético de la Tierra y además ayudar a la comprensión de las relaciones entre océano y clima.
- La correlación de capas sincrónicas entre núcleos de sedimentos de la misma cuenca es frecuentemente un aspecto muy importante de un estudio, para determinar cambios en la estratigrafía y en la acumulación de sedimentos y dónde los niveles de sedimentos tienen que ser combinados para análisis posterior.
- La susceptibilidad magnética está relacionada también con el tamaño de partícula de una muestra. En muestras alteradas por procesos geológicos, los minerales magnéticos tienden a tener el tamaño de partícula más próximo a sus dimensiones de cristal y este tamaño de sedimento tendrá normalmente el valor más alto de susceptibilidad. Si se conoce la susceptibilidad de las distintas fracciones dentro de una muestra, la información puede ser aplicada a otras muestras en bruto para determinar cambios relativos en el tamaño de partícula

(los minerales magnéticos en los suelos son heredados inicialmente del lecho rocoso meteorizado, pero también vienen de otras fuentes).

En las últimas décadas, los estudios aereomagnéticos de alta resolución sobre pozos petroleros y mediciones directas de la susceptibilidad magnética en suelos sedimentos y muestras de perforación, han sido propuestos como métodos para detectar anomalías magnéticas. Estas anomalías pueden ser debido a concentraciones atípicas 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 (por ejemplo: Foote, 1984, 1987, 1992, 1996; Saunders y Terry, 1985, Saunders et al., 1991, 1999). Tanto las facies magnéticas primarias como secundarias son importantes en la magnetoestratigrafía y en los estudios paleomagnéticos. De hecho, las magnetizaciones primarias en las cuencas sedimentarias podrían estar total o parcialmente relacionadas a los acontecimientos termoquímicos producidos, no sólo por los movimientos de fluidos asociados a eventos orogénicos, sino también por la migración de petróleo y gas (Hall y Evans, 1995).

Benthiem y Elmore (1987), McCabe et al. (1987) y Elmore et al. (1987, 1993) han identificado, por microscopía electrónica de barrido (scanning electronic microscopy, SEM), agregados esféricos de minerales submicrónicos de magnetita asociados a petróleo. Estos agregados parecen estar asociados a la biodegradación del crudo (McCabe et al. 1987, Elmore et al. 1987) o a procesos químicos inorgánicos en presencia de hidrocarburos (Elmore et al. 1993).

Muchos otros estudios tratan de examinar la relación causal entre los hidrocarburos y los agregados esféricos ricos en minerales de hierro, anteriormente mencionados (por ejemplo: Aldana et al., 1999; Costanzo-Álvarez et al., 2000, Díaz et al, 2000).

Descripción de la técnica utilizada para la medición de susceptibilidad

En la medición de la susceptibilidad magnética por corriente alterna (C.A.) existen varios procedimientos y metodologías. Una de ellos es medir la susceptibilidad dinámica, es decir, que ésta se mide aplicando un campo magnético oscilante con frecuencia ω .

Para la medición de esta forma, se utiliza un puente de inductancias mutuas llamado puente de Harstshorh. En este puente, similar al puente de Wheastone, existe una condición de equilibrio entre dos puntos particulares es nula. Esta condición ocurre para determinados valores de las inductancias que conforman el puente (Gutiérrez, 1990).

La autoinducción de una bobina o la inductancia mutua de un transformador depende del núcleo sobre el cual fue enrollado el cable, esta dependencia se puede encontrar de la forma que indica el transformador mostrado en la Figura 2.1, el potencial V_2 inducido en el secundario viene dado por:

$$V_2 = -M \frac{di}{dt} = \frac{1}{c} \frac{d\phi}{dt}$$

$$V_2 = \frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int B \cdot dS$$

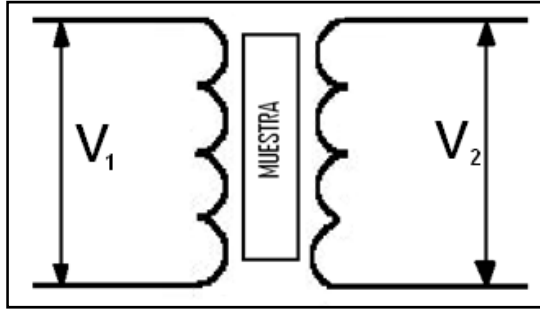


Figura 2.1. Muestra de un material entre dos bobinas diferentes sometidas a potenciales V_1 y V_2 .

Siendo S la superficie limitada por las espiras del secundario. Si la región entre primario y secundario es espacio vacío o aire $B = H$ y en consecuencia:

$$V_2 = \frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int H \cdot dS = -M \frac{di}{dt}$$

Si ahora se introduce entre primario y secundario un material cuya magnetización es M se tendrá entonces que:

$$V_2 = \frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int B \cdot dS = \frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int (H + 4\pi M) \cdot dS$$

Pero dado que $M = \chi H$ resulta:

$$V_2 = (1 + 4\pi\chi) M \frac{di}{dt} = M' \frac{di}{dt}$$

En resumen, se encuentra que al introducir un material entre las bobinas la inductancia de estas varía de M a:

$$M = (1 + 4\pi\chi)M$$

Cuando el puente de inductancias mutuas está en equilibrio y se introduce un material magnetizable en una de las bobinas, este sufrirá una variación como la mostrada anteriormente, desequilibrándose el puente, y estando la magnitud de este desequilibrio relacionada con la susceptibilidad magnética del material introducido.

Método de corriente alterna (C.A.)

Otro método de medida de susceptibilidad A.C. usado para muestras geológicas –como núcleos de rocas– se obtiene midiendo el cambio de inductancia ΔL de una bobina de aire al introducir la muestra dentro de ella. Este método proporciona una relación entre la variación de inductancia de la bobina con y sin la muestra y la diferencia en la susceptibilidad del medio χ_m y la muestra χ_s .

$$\Delta L = c(\chi_s - \chi_m)$$

Donde c es una constante de calibración que involucra los parámetros de forma de la bobina y la permeabilidad del espacio libre.

Una forma de medir la susceptibilidad magnética, a través de la determinación de la variación de la inductancia de una bobina es usándola como parte de un circuito resonante, donde la frecuencia de resonancia del circuito depende del valor de la inductancia.

Los métodos de puentes A.C. de medidas de susceptibilidad usan el cambio de inductancia de bobinas de núcleos de aire cuando se les introduce una muestra de roca. La relación de cambio de la inductancia $\Delta L/L$ para bobinas de núcleo de aire es linealmente proporcional a la susceptibilidad del espécimen y a la relación de volumen de la muestra y el espacio de aire de la bobina (Fuller, *The A.C. Bridge Method*, 1967).

Cuando una muestra se coloca dentro de una de las bobinas que forman parte del puente se crean corrientes y una magnetización en la muestra produciéndose un campo magnético secundario el cual induce un voltaje en la bobina y una señal de salida en el puente, la componente en fase (real), es principalmente dependiente de la susceptibilidad de la muestra, mientras que la componente fuera de fase (imaginaria) es dominada por la conductividad eléctrica (Puranen, 1994).

Mediciones con el susceptómetro MS2

Las mediciones de susceptibilidad magnética se realizaron con un susceptómetro MS2 de la compañía Bartington Instruments. Este está conformado por un medidor y un sensor conectados por un cable coaxial (Figura 2.2).

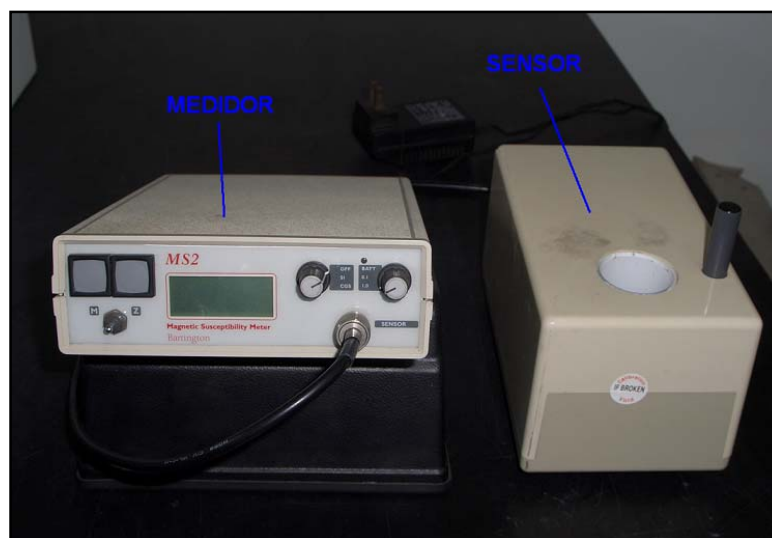


Figura 2.2. Susceptómetro MS2 (Bartington Instruments) utilizado para las mediciones de susceptibilidad magnética.

El medidor del MS2 suministra la energía necesaria al sensor y es el que se encarga de procesar la información de las mediciones del sensor, las cuales se obtienen de forma digital por medio de un procesamiento dependiente del tiempo.

El sensor del MS2 funciona bajo el principio de inducción de corriente alterna, técnica que fue explicada en páginas anteriores. El circuito oscilatorio (el cual posee una alta estabilidad térmica) se encuentra en el interior del sensor genera un campo magnético de aproximadamente 80 Amp/m (la intensidad de este campo es baja para impedir saturar la muestra y destruir la información de remanencia magnética que posee la roca). La muestra de roca que se coloque dentro de este campo magnético produce un cambio en la frecuencia de oscilación. Este cambio en la frecuencia es proporcional a la magnetización de la muestra.

El susceptómetro MS2 utiliza dos frecuencias: una de baja frecuencia (LF de 0,465 Hz) y otra de alta frecuencia (HF de 4,650 HZ).

Antes de las mediciones de las muestras de roca de esta investigación se usó la muestra de calibración del susceptómetro MS2. Esta muestra de calibración es una mezcla de magnetita (Fe_3O_4) de 1% y aluminio, dentro de un contenedor de plástico blanco de 10 cc de volumen, la cual tiene un valor predeterminado de susceptibilidad magnética de 293 en unidades de CGS.

Para realizar las mediciones de susceptibilidad magnética en las muestras, se procedió a realizar mediciones del aire, antes y después de la medición de cada una de las muestras (este procedimiento se explica en detalle en el Capítulo IV: Marco Metodológico).

B. COCIENTE S (S)

El principal objetivo al determinar el cociente S (Stober y Thompson, 1979; Bloemendal, 1983) es el de obtener una medida de las cantidades relativas entre los minerales de alta y baja coercitividad en una muestra de roca.

En muchos de los casos, las mediciones del cociente S estiman la importancia relativa entre minerales antiferromagnéticos (como la hematita) y los ferrimagnéticos (como la magnetita).

El procedimiento para obtener el cociente S consiste en aplicarle a una muestra un campo magnético elevado (para el caso de este trabajo de 4,0 Tesla) e inmediatamente medir la magnetización adquirida bajo la influencia de este campo.

Posteriormente se le aplica un campo de menor intensidad (0,4 Tesla) en sentido opuesto, pero en la misma dirección para medir luego, nuevamente la magnetización de la muestra. El cociente entre la magnetización presente después de la aplicación del campo de 4,0 T y la magnetización después de la aplicación del campo de 0,4 T es lo que da el valor del cociente S como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.3.

El cociente S presenta valores que van en el rango entre 0 y 1. Valores cercanos a 0 indican que la magnetización remanente de la muestra es debido a minerales magnéticamente pobres (alta coercitividad y baja susceptibilidad magnética), mientras que valores cercanos a 1 indican la presencia de minerales altamente magnéticos (baja coercitividad y alta susceptibilidad). En la Tabla 2.1 se muestran las coercitividades de diferentes minerales magnéticos.

Mineral Magnético	Máxima Coercitividad (SI)
Magnetita	0,3
Maghetita	0,3
Titanomagnetita ($\chi = 0,3$; 30% de Ti)	0,2
Titanomagnetita ($\chi = 0,6$; 60% de Ti)	0,1
Hematita	1,5 – 5
Pirrotita	0,5 – 1
Greigita	0,04 – 0,1
Goetita	>5

Tabla 2.1. Máximas coercitividades para diferentes minerales magnéticos (Lucena, G. 2001).

El cociente S tiene aplicaciones tales como las siguientes:

- Estimar la mineralogía magnética de la muestra (proporción relativa de hematita sobre magnetita).
- Estimado del tipo de ambiente: Oxidante – Reductor. Ejemplo:
Hematita $\rightarrow S \approx 0 \rightarrow$ Ambiente Oxidante.
Magnetita $\rightarrow S \approx 1 \rightarrow$ Ambiente Reductor.
- Cambios mineralógicos de estratos.

Ambientes principalmente oxidantes serían característicos, en principio, de sedimentación en aguas someras.

Ambientes principalmente reductores serían, en principio, de sedimentación en aguas profundas.

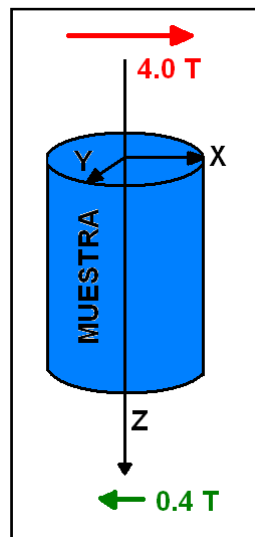


Figura 2.3. Esquema de la aplicación de dos campos antiparalelos (4,0 T y 0,4T) para la determinación del cociente S en una muestra determinada (cilindro de color azul).

C. MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

El microscopio electrónico de barrido (SEM, de sus siglas en inglés para Scanning Electron Microscopy), usa electrones en lugar de luz para formar una imagen. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra. También produce imágenes de alta resolución, lo que significa que características espacialmente cercanas en la muestra pueden ser examinadas a una alta magnificación. La preparación de las muestras es relativamente fácil pues la mayoría de SEM sólo requiere que éstas sean conductoras.

En el microscopio electrónico de barrido la muestra es recubierta con una capa de metal delgado, y es barrida con electrones enviados desde un cañón. Un detector mide la cantidad de electrones enviados que arroja la intensidad de la zona de muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones. Su resolución está entre 3 y 20 nm dependiendo del instrumento utilizado.

Inventado en 1931 por Ernst Ruska, permite obtener imágenes de gran resolución en materiales pétreos, metálicos y orgánicos. La luz se sustituye por un haz de electrones, las lentes por electroimanes y las muestras se hacen conductoras metalizando su superficie. Los electrones secundarios se asocian a una señal electrónica.

En el microscopio electrónico de barrido 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, donde se aceleran por una diferencia de potencial de 1.000 a 30.000 voltios. Al variar el potencial de aceleración del instrumento permite modificar el enfoque de la muestra ya que se modifica la longitud de onda asociada a los electrones. Esto se puede deducir de la relación de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v}$$

Donde h es la constante de Planck y p , m_e , λ son el momento lineal, la masa y la longitud de onda del electrón, respectivamente. Además, debido a que que:

$$e \cdot V = \frac{2p^2}{m_e}$$

Donde e es la carga del electrón y V el potencial acelerador. Entonces, al sustituir el momento lineal del electrón de la segunda expresión y sustituirlo en la primera, se obtiene que:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{\frac{eVm_e}{2}}}$$

Es decir que, según esta última expresión matemática, se puede disminuir la longitud de onda para ver objetos más pequeños aumentando el potencial acelerador del haz de electrones. Los electrones acelerados por un voltaje pequeño son utilizados para muestras muy sensibles, como por ejemplo las muestras biológicas sin

preparación adicional, o muestras muy aislantes. Los altos voltajes se utilizan para muestras metálicas, ya que éstas en general no sufren daños, y de esta manera se aprovecha la menor longitud de onda para tener una mejor resolución. Los electrones acelerados salen del cañón, y son enfocados por las lentes condensadoras y objetivas, 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. Por otra parte, la energía que pierden los electrones al interactuar con la muestra puede hacer que otros electrones salgan despedidos (electrones secundarios), y producir rayos X, electrones Auger, etc. El más común de éstos es el que detecta electrones secundarios, y es con el que se hacen la mayoría de las imágenes de microscopios de barrido.

Con ayuda de un detector de rayos X, se puede aprovechar la característica de que los rayos X caracterizan al elemento que los produjo, y por lo tanto se puede hacer un análisis químico.

D. ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X POR DISPERSION DE ELECTRONES SECUNDARIOS (EDX)

La espectroscopía por dispersión de rayos X (EDS, EDX o EDXRF) es una técnica analítica utilizada para el estudio elemental o químico de una muestra. Se basa en el análisis a través de las interacciones entre la radiación electromagnética (rayos X) y la materia (partículas cargadas). Su capacidad se debe al principio fundamental de que cada elemento tiene una estructura atómica que permite que los rayos X sean característicos de cada elemento.

Para estimular la emisión de rayos X característica de una muestra, un haz de alta energía de partículas cargadas tales como electrones, se centra en la muestra a ser estudiada. El haz incidente, excita un electrón en la muestra, el cual puede escapar del átomo dejándolo en un estado excitado. Eventualmente, con la absorción de otro electrón, este átomo regresará a su estado de equilibrio emitiendo rayos X, los cuales son detectados y analizados. 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). Los microscopios electrónicos de barrido están equipados con un cátodo y lentes magnéticas para lograr el enfoque de un haz de electrones. 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.

II. BASES TEÓRICAS DE REDES NEURALES DIFUSAS

Existen numerosos trabajos con la aplicación de la técnica de lógica difusa en la geociencia. El método de lógica difusa, permite la cuantificación de información cualitativa y el modelado de relaciones complejas no lineales y de sistemas que involucran incertidumbre no aleatoria. Al considerar los sistemas geológicos como sistemas de difícil modelado matemático, la lógica difusa parece ser una herramienta útil. La lógica difusa es simplemente una aplicación de técnicas estadísticas reconocidas.

A. LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa es una extensión de la lógica convencional booleana (0 y 1) desarrollada para manejar el concepto "verdadero" y "falso". Lotfi Zadeh en 1965 introdujo estas ideas como significado del modelo de incertidumbre. Esta interpretación verdadero o falso es usada por las computadoras que usan "bits", 1 ó 0, para su operatividad. Cuando el uso de las primeras computadoras, la lógica booleana fue adoptada como un mecanismo para realizar operaciones.

La lógica difusa puede dar sentido a los eventos aleatorios. Cuddy (2000) establece un ejemplo con respecto a una fracción de reservorio. Las rocas eólicas generalmente una porosidad de 20%, y las fluviales porosidad de 10%. Una roca con porosidad de 15% podría ser considerada tanto eólica como fluvial. Existe la probabilidad de que sea fluvial y también de ser eólica. Por otro lado, las rocas eólicas son generalmente limpias y las fluviales arcillosas o sucias. La misma muestra contiene 30% de minerales de arcilla. Pudiera ser igualmente eólica o fluvial sobre la base de esta medición.

Las ciencias geológicas y geofísicas se enfrentan con el error y la no completamente confiable correlación entre los datos. Las técnicas convencionales tratan de minimizar o ignorar el error, mientras que, la lógica difusa extrae información útil del error.

Desde el siglo XVIII, investigaciones geológicas dieron a conocer que muchos eventos cumplían un patrón. Se encontró un grado de regularidad en la variación de una observación con respecto a su media o valor promedio. Estas distribuciones están aproximadas por curvas referidas como "curvas normales de errores" y atribuidas a las leyes del azar. Estas curvas son llamadas también Gaussianas.

La distribución normal es completamente descrita con dos parámetros, la media (μ) y la varianza (σ^2). Para el caso de núcleos de una litofacies particular, ésta puede tener varias variables controlando su porosidad, pero su distribución de porosidad tenderá a ser normal en su forma y vendrá definida por su valor promedio o media y su

varianza o ancho de la distribución. Esta varianza depende de factores implícitos ocultos y de errores de medición. La varianza respecto a un valor promedio es la razón de la lógica difusa. La lógica difusa no requiere de una distribución normal para funcionar, cualquier tipo de distribución puede ser usada.

La inferencia usando lógica difusa está basada en la afirmación de que un particular tipo de hecho puede dar cualquier lectura de registro, aunque algunas lecturas son más probables que otras.

Un sistema difuso es un conjunto de reglas de lógica (premisas y conclusiones) que usa conjuntos difusos con límites imprecisos.

La lógica difusa está basada en el concepto de "fuzzy sets" (Zadeh 1965). Un conjunto difuso tiene límites difusos o imprecisos, en contraste con los conjuntos de la lógica convencional. Esto quiere decir, que un objeto puede tener parcial membresía o pertenencia en más de un conjunto difuso. En un conjunto convencional o de lógica tradicional, el valor uno (1) indica completa pertenencia, mientras que el valor cero (0) indica no pertenencia. Para un conjunto difuso, la pertenencia también puede ser representada por un número fraccionario entre cero y uno. La Figura 2.4 es la representación gráfica entre la diferencia de un conjunto de lógica convencional (Figura 2.4 (a)) y un conjunto difuso (Figura 2.4 (b)).

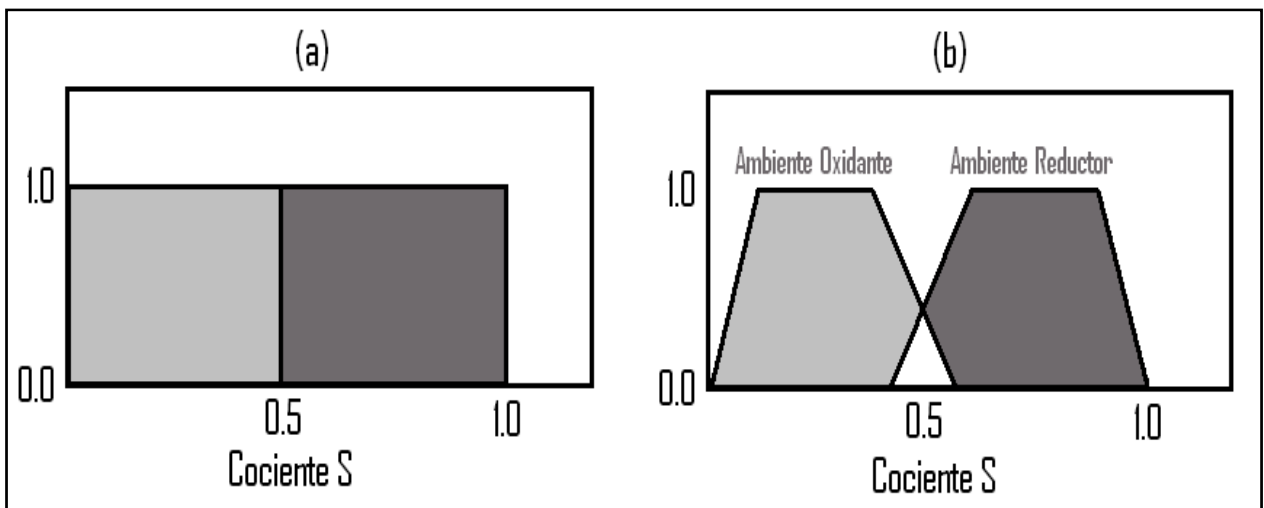


Figura 2.4. Conjuntos de lógica referente a la clasificación según el valor del cociente S . (a) Escala convencional con límites precisos. Sólo dos estados son posibles: membresía o no membresía, (b) posible conjunto difuso basado en el valor del cociente S . Los límites permiten parcial membresía, y la membresía en más de una clase simultáneamente.

Conjunto difuso

Se define sobre un conjunto de objetos o puntos 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.

Función de pertenencia

La función de pertenencia es una curva que define cada punto de un conjunto de entrada a un valor numérico correspondiente al grado de pertenencia entre 0 y 1. El grupo de valores que conforman el conjunto de entrada es llamado el universo del discurso.

La definición matemática de la función de pertenencia es: Si X es el universo de discurso y sus elementos son denotados por x , entonces un conjunto difuso A en X se define como un conjunto de pares ordenados: $A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in X\}$ donde $\mu_A(x)$ se llama función de pertenencia de x en A . La función de pertenencia le asigna a cada valor de X un valor entre 0 y 1. Existen varios tipos de funciones de pertenencia, algunas de ellas se muestran en la Figura 2.5.

Las funciones que se muestran en la Figura 2.5 fueron las 8 funciones de pertenencia que se utilizaron en este estudio. Estas son las siguientes:

- Función trimf (Triangular membership function): La función de pertenencia triangular es una función del vector x , y depende de los parámetros a , b y c ; y viene dada por:

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

- Función trapmf (Trapezoidal membership function): La función de pertenencia trapezoidal es una función del vector x y depende de cuatro parámetros escalares a , b , c y d ; y viene dada por:

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

- Función gbellmf (Generalized bell curve membership function): Esta función de pertenencia está representada por la función bell generalizada que depende de tres parámetros a, b y c; y viene dada por:

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

- Función gaussmf (Gaussian curve membership function): Esta función de pertenencia está representada por la función gaussiana generalizada, la cual depende de dos parámetros σ y c; y viene dada por:

$$f(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}$$

- Función gaussmf2 (Two sided Gaussian curve membership function): Esta función de pertenencia se representa por la misma expresión que la gaussmf, pero con la diferencia de que depende de otros dos parámetros, cada par de ellos modifica un lado de la curva gaussiana.

- Función pimf (Pi shaped curve membership function): Esta función de pertenencia se representa por la función spline, la cual, en el subcampo matemático del análisis numérico, está definida a trozos por polinomios.

En los problemas de interpolación, se utiliza la splines porque genera resultados similares requiriendo el uso de polinomios de grado bajo a la vez que evita las oscilaciones, que en la mayoría de las aplicaciones resultan indeseables y que aparecen al interpolar por polinomios de alto grado.

Para el ajuste de curvas, los splines se utilizan para aproximar formas complicadas. La simplicidad de la representación y la facilidad de cómputo de los splines los hacen óptimos para la representación de curvas en por ordenador.

- Función dsigmf (Difference of two sigmoid membership functions): Es la suma de las funciones sigmoideas. Muchos procesos naturales y curvas de aprendizaje de sistemas complejos muestran una progresión desde niveles bajos al inicio hasta un tope, pasando por una fuerte aceleración intermedia. La función sigmoide permite describir esta evolución. Esta función de pertenencia depende de los parámetros a y c ; y viene dada por la siguiente expresión:

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

- Función psigmf (Product of two sigmoidal membership functions): Esta función de pertenencia vienen dada por la multiplicación de dos funciones sigmoideas, cada una de las cuales se representan por la ultima expresión matemática mostrada, pero con valores distintos de sus parámetros característicos.

Reglas difusas

Combinan uno o más conjuntos borrosos de entrada (antecedentes o premisas) y les asocian un conjunto borroso de salida (consecuente o consecuencia).

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 borrosa (FAM), que son matrices que representan la consecuencia de cada regla definida para la combinación de dos entradas (Moya, 2008).

Hay dos tipos de formato para las reglas borrosas:

- Borroso puro o tipo Mamdani: Al consecuente le asocian a un conjunto borroso de otro universo de discurso.
- Tipo Sugeno: La función de salida es una combinación lineal de las variables de entrada o una función genérica de las mismas.

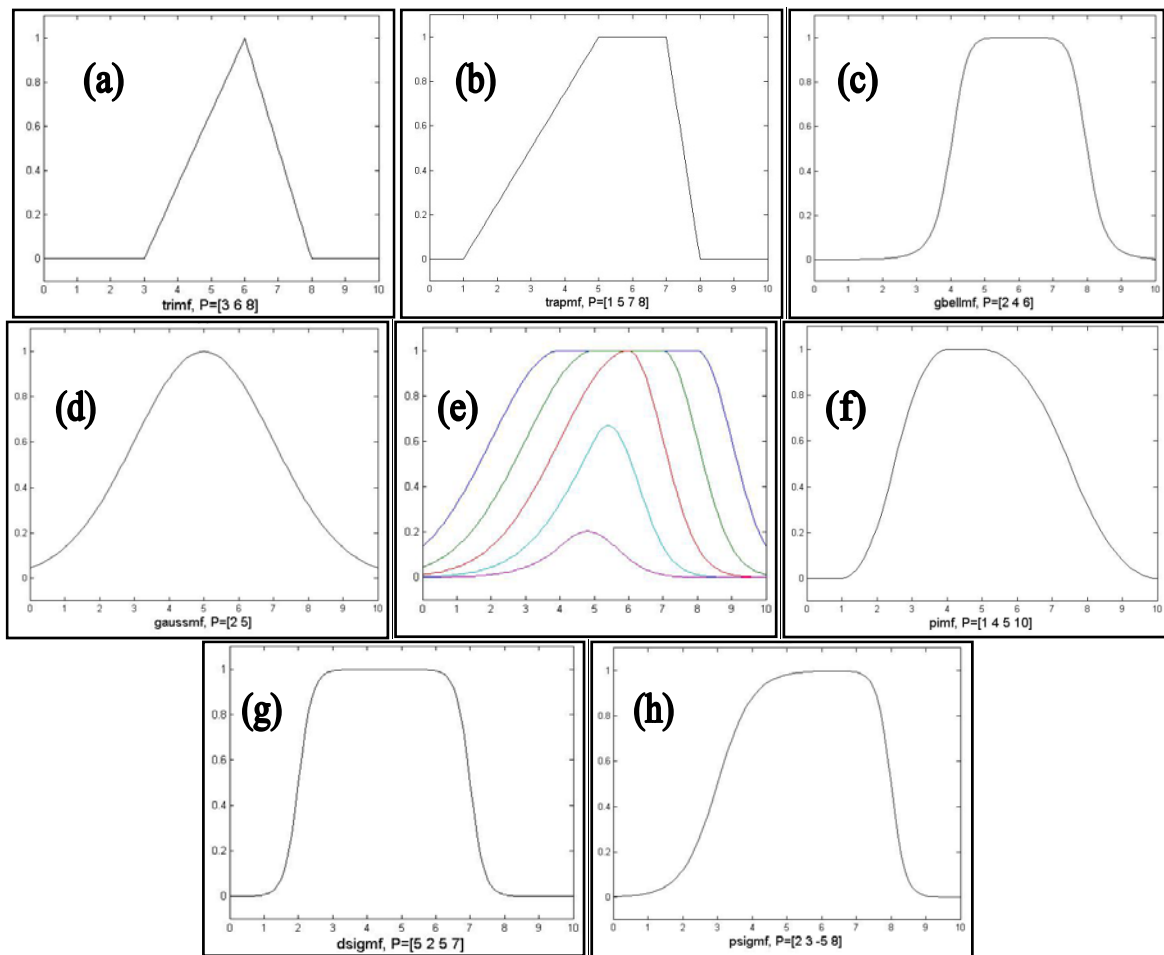


Figura 2.5. Funciones de pertenencia (membership function, mf). (a) Trimf, (b) trapmf, (c) gbellmf, (d) gaussmf, (e) gauss2mf, (f) pimf, (g) dsigmf, (h) psigmf.

B. REDES NEURONALES

Las redes neuronales tratan de imitar a pequeñísima escala la forma de funcionamiento de las neuronas que forman el cerebro humano. Entre los pioneros en el modelado de neuronas se encuentra Warren McCulloch y Walter Pitts. Estos dos investigadores propusieron un modelo matemático de neurona. En este modelo cada neurona estaba dotada de un conjunto de entradas y salidas. Cada entrada está afectada por un peso. La activación de la neurona se calcula mediante la suma de los productos de cada entrada y la salida es una función de esta activación. La principal

clave de este sistema se encuentra en los pesos de las diferentes entradas. Como se ha visto, las entradas son modificadas por el peso y las salidas son función de estas modificaciones. Esto nos lleva a concluir que los pesos influyen de forma decisiva en la salida y por lo tanto pueden ser utilizados para controlar la salida que se desea. Un ejemplo de una red neuronal se muestra en la Figura 2.6.

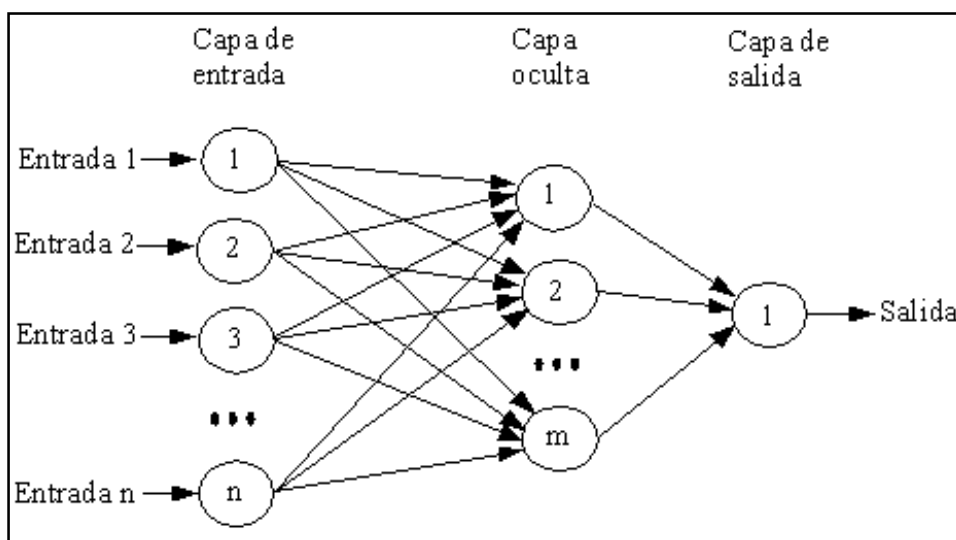


Figura 2.6. Red neuronal artificial simple con n neuronas de entrada, m neuronas en su capa oculta y una neurona de salida.

El objetivo es conseguir que las máquinas den respuestas similares a las que es capaz de dar el cerebro que se caracterizan por su generalización y su robustez.

Una red neuronal se compone de unidades llamadas neuronas. Cada neurona recibe una serie de entradas a través de interconexiones y emite una salida. Esta salida viene dada por tres funciones:

- Función de propagación (función de excitación): Por lo general consiste en el sumatorio de cada entrada multiplicada por el peso de su interconexión (valor

neto). Si el peso es positivo, la conexión se denomina excitatoria; si es negativo, se denomina inhibitoria.

- Función de activación: Modifica a la anterior. Puede no existir, siendo en este caso la salida la misma función de propagación.
- Función de transferencia: Que se aplica al valor devuelto por la función de activación. Se utiliza para acotar la salida de la neurona y generalmente viene dada por la interpretación que queramos darle a dichas salidas. Algunas de las más utilizadas son la función sigmoidea (valores en el intervalo $[0,1]$) y la tangente hiperbólica (para obtener valores en el intervalo $[-1,1]$).

C. REDES NEURONALES DIFUSAS

Existe una gran clase de problemas para los que la inteligencia humana es más eficiente que el procesamiento computacional. Tratando de atacar estas deficiencias surgieron áreas como la lógica difusa (Fuzzy Logic), redes neuronales artificiales (Artificial Neural Networks), entre otras. A medida que se fueron caracterizando las propiedades de cada herramienta llegaron a desarrollarse arquitecturas combinadas o híbridas usando lógica difusa y redes neuronales artificiales para ampliar la clase de problemas que cada una puede tratar por separado y mejorar la solución global encontrada.

El término neuro-fuzzy se refiere a un híbrido entre las redes neuronales artificiales y la lógica difusa. Los sistemas neuro-fuzzy (NFS) también reciben el nombre

de redes neuronales difusas (FNN), nombre que se utilizará a lo largo del presente estudio (Moya, 2008).

La forma en que estos sistemas incorporan el razonamiento humano es a través de conjuntos difusos y un modelo lingüístico formado por un conjunto de reglas difusas “si–antecedente, entonces–consecuente”.

Los sistemas difusos y las redes neuronales son modelos numéricos y sistemas dinámicos que comparten la capacidad de mejorar la inteligencia del sistema. Los sistemas difusos y las redes neuronales calculan ejemplos de funciones y se comportan tal como memorias asociadas. Ambos tienen una la capacidad de la estimación estadística y la aproximación del control adaptable de una función. Estos estiman una función sin necesidad de una descripción de la función matemática de donde la salida de la funcionalidad depende en la entrada.

Una red neuronal y la lógica difusa se usan cuando una o más variables son continuas y cuando un modelo matemático del proceso a estudiar no existe o existe pero es de difícil integración, es decir es tan complejo ser evaluado rápidamente para una operación en tiempo real.

Una red neuronal difusa aproxima una función n-dimensional que estará parcialmente definida por los datos de entrenamiento. Las reglas difusas que están codificadas dentro del sistema representan muestras y pueden verse como prototipos de los datos de entrenamiento. No se debe ver la red como un sistema experto.

Entrenamiento de redes neuronales difusas. Retropropagación

Hay varias posibilidades para entrenar las redes neuronales difusas, dentro de las más importantes tenemos: Retropropagación, algoritmos genéticos y mínimos cuadrados ortogonales. El método más utilizado es el de retropropagación.

El algoritmo de aprendizaje de retropropagación es el siguiente:

- 1) Presentar al sistema un ejemplo de entrada (mínimo 2 conjuntos de parámetros) y computar su salida.
- 2) Calcular el error entre la salida obtenida y la esperada (según el ejemplo presentado al sistema).
- 3) Ajustar los pesos de las conexiones y las funciones de pertenencia.
- 4) En un número concreto de etapas eliminar las reglas y las neuronas que no sean de utilidad y añadir otras nuevas.
- 5) Si el error que se ha calculado en el paso 2 es mayor que un nivel de tolerancia fijado se volverá al paso 1, en caso contrario se terminará el proceso.

Cuando el error cae por debajo de la tolerancia definida previamente, los pesos de interconexión finales reflejan los cambios en las reglas difusas iniciales y las funciones de pertenencia. En el caso de que el peso de una regla sea próximo a cero se puede eliminar esa regla ya que será insignificante en comparación con las otras.

D. ANFIS (ADAPTIVE NEURO-BASED FUZZY INFERENCE SYSTEM)

En 1993 J. R. Jang desarrolló un nuevo modelo para combinar reglas de razonamiento difuso. Esta nueva combinación se puede simular con base en redes neuronales (con funciones nodales adicionales a las funciones de los enlaces).

Un sistema de razonamiento difuso planteado como una red neuronal y diseñado con la capacidad de aprendizaje de dicha red recibe el nombre de ANFIS.

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

Este tipo de red esta direccionada hacia delante (feed forward) y consiste en nodos y enlaces direccionales. Los nodos son adaptivos si sus salidas dependen, no sólo de sus entradas, sino también de 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 especifica 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, retropropagación y la propagación del error hacia las capas internas de la 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 (que se representan en la topología de la red) 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.

Arquitectura de ANFIS

Este sistema híbrido neuronal difuso funciona de forma equivalente al mecanismo de inferencia Takagi–Sugeno (T–S). Para este sistema de inferencia de primer orden hay un conjunto de reglas fuzzy SI–ENTONCES en las que los niveles de activación se calculan utilizando el operador AND que puede modelarse por una t-norma continua (producto). Las salidas individuales de cada regla se obtienen como

una combinación lineal entre los parámetros del antecedente de cada regla. La salida de control del modelo se obtiene por la normalización de los grados de activación de las reglas multiplicado por la salida individual de cada regla (Moya, 2008).

Este tipo de inferencia se representa por medio de una red neuronal híbrida adaptable con 5 capas (Figura 2.7). Cada capa representa una operación del mecanismo de inferencia fuzzy.

Todos los nodos de una misma capa tienen la misma función (los nodos que están representados como cuadrados en la figura son los adaptables, sus parámetros son ajustables).

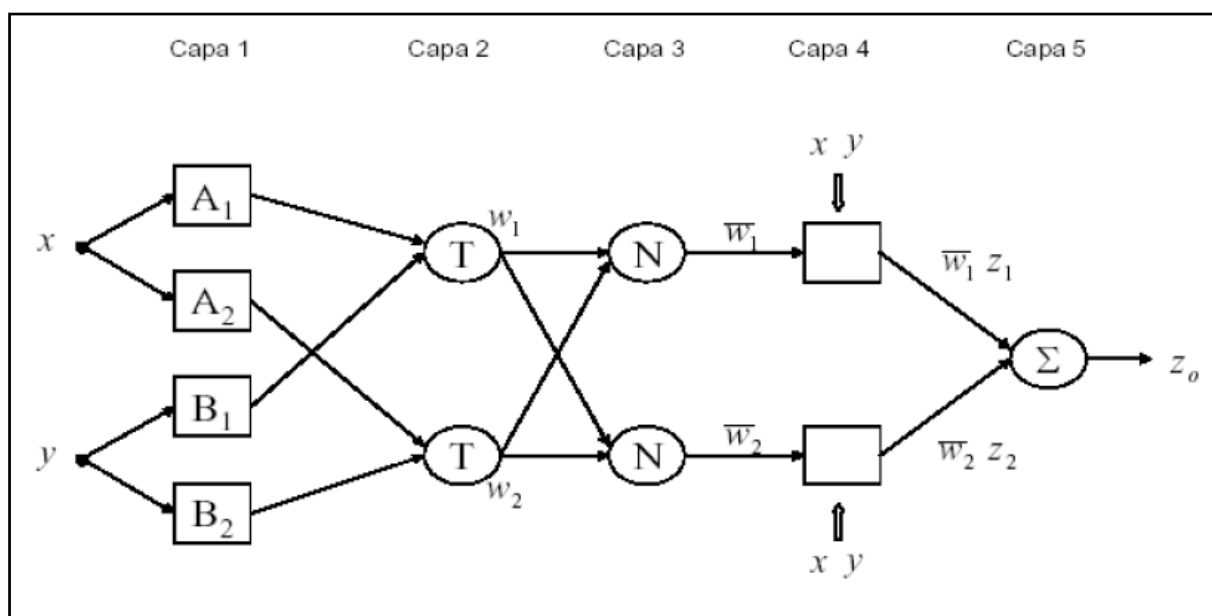


Figura 2.7. Red neuronal híbrida adaptable con 5 capas.

Se parte 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 y “y” es B_1 , entonces: $z_1 = p_1x + q_1y + r_1$

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

Las cinco capas de la estructura de la red ANFIS son las siguientes:

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.

Esta es una de las dos capas que tienen parámetros ajustables, como se ha dicho antes, 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.

Como función de pertenencia se suele elegir una de las que tienen forma de campana con valor máximo en 1 y mínimo en 0.

$$O_i^1 = A_i(x) \quad i = 1, 2, \dots$$

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. Se conocen como nodos de reglas.

El grado de activación de la regla se obtiene multiplicando las señales de entrada (salida de los nodos de la capa 1), aunque puede utilizarse un operador T–norma para calcularlo.

$$O_i^2 = w_i = A_i(x) \cdot B_i(y) \quad i = 1, 2, \dots$$

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.

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

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).

$$O_i^4 = \overline{w}_i z_i = \overline{w}_i (p_i x + q_i x + r_i) \quad i = 1, 2, \dots$$

Donde q_i , p_i , y r_i y forman el conjunto de parámetros. Los parámetros de esta capa se conocen como parámetros del consecuente.

Esos parámetros, como se puede ver, 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 (agregación) como la suma de todas sus señales de entradas individuales.

$$O_i^5 = \overline{w}_1 z_1 + \overline{w}_2 z_2$$

En resumen, cada una de las capas tiene una misión concreta dentro del sistema:

- La primera capa representa la capa de pertenencia.
- La segunda capa se usa para generar el grado de disparo de la regla (T-norma).
- La tercera capa actúa de normalizador.
- La cuarta capa calcula la salida.
- La última capa combina todas las salidas en una en su único nodo.

CAPITULO III

INFORMACIÓN GEOLÓGICA

I. LAS MUESTRAS

Este estudio se realizó con un conjunto de 134 muestras del pozo petrolero Saltarín 1A ubicado al este de Colombia en la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales, cercano al borde este con Venezuela (Figura 3.1).

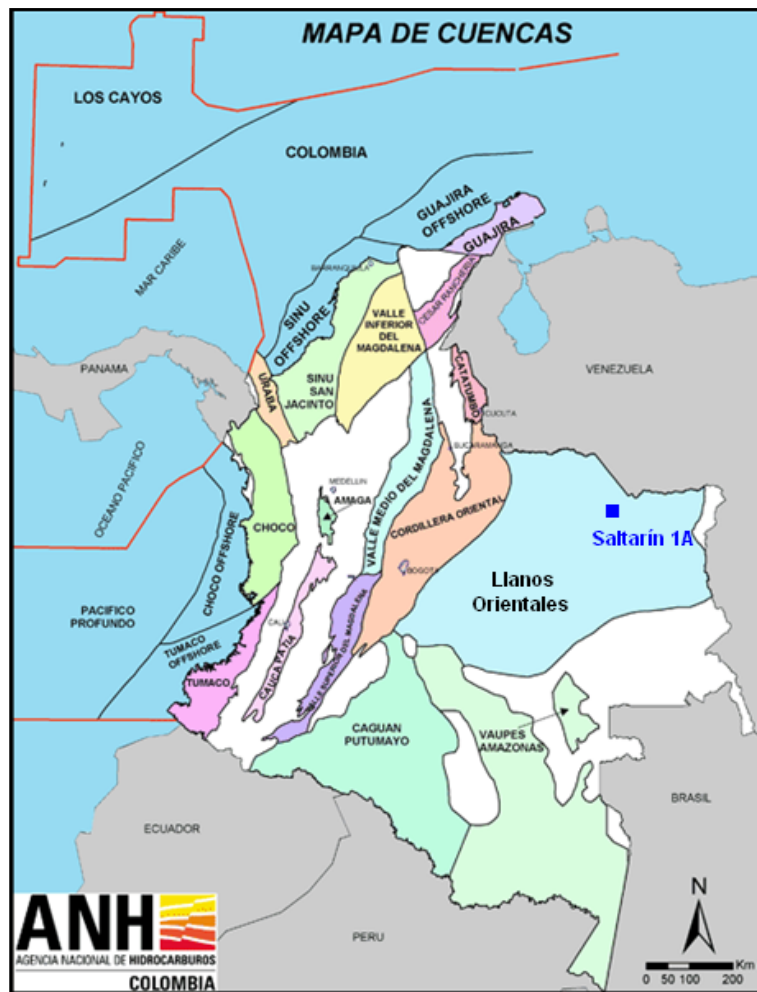


Figura 3.1. Ubicación del pozo Saltarín 1A (cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales, Colombia).

Estas muestras fueron suministradas por el Geólogo Alejandro Mora de HOCOL S.A. (Bogotá, Colombia) y el Dr. Germán Bayona de la Corporación Geológica ARES (Bogotá, Colombia). Ellas abarcan aproximadamente 670 metros de profundidad, interceptando las formaciones geológicas de: Guayabo, León y Carbonera (Plioceno Inferior, Mioceno Inferior/Medio/Superior y Oligoceno Superior). De forma aproximada, se dispone de una muestra de roca para cada cinco (5) metros de perforación.

Aunado al hecho de que, como se mencionó anteriormente, esta es la primera vez que la técnica de redes neuronales difusas es aplicada a datos magnéticos, se tienen el valor agregado de que se dispone de un número considerable de muestras frescas de un pozo petrolero, lavadas y en su mayoría consolidadas, para un intervalo casi continuo de 670 metros de perforación y aproximadamente distribuidas cada 5 metros a lo largo de todo el pozo.

II. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA DE LAS FORMACIONES

A continuación se muestra cierta información relevante sobre las formaciones que fueron atravesadas por el pozo Saltarín 1A, principalmente, una breve descripción litológica, edades geológicas, tipos de paleoambientes, y su importancia económica.

A. Formación Guayabo (62 muestras): Areniscas y lodolitas

TERCIARIO: Plioceno Inferior – Mioceno Superior

Paleo Ambiente Continental Marino de aguas someras

El Grupo Guayabo se identifica en la región suroccidental de la cuenca de Maracaibo, y en la región fronteriza de Cúcuta (Colombia), y en gran parte de la depresión del Táchira-Santo Domingo.

Según Liddle (1928), el Grupo Guayabo está compuesto en la parte superior, de arenas y arcillas moteadas rojas y blancas, intercaladas con arcillas abigarradas y arenas de colores pardo claro a grisáceo; por debajo de estas capas abigarradas, hay un tramo más potente de lutitas, localmente ligníticas, arenoso, de color gris; areniscas con estratificación cruzada, poco consolidada, de color amarillo, gris, pardo claro y conglomerados altamente ferruginosos. El Grupo Guayabo consiste de lodolitas en un 50% a 80%, y areniscas de grano grueso de origen no marino a parálco; en la región de Cúcuta-Uribante, Es característica importante de este grupo, el aumento de la granulometría de los sedimentos hacia la parte superior de cada una de las formaciones; en los cuerpos de areniscas de grano fino, cuyos espesores pueden alcanzar hasta 2 m, se presenta frecuentemente laminación y estratificación cruzada y buen escogimiento. Los cuerpos de arenas tabulares de grano medio a grueso, generalmente presentan estratificación cruzada y pequeños horizontes conglomeráticos de guijarros. Son frecuentes también las bioturbaciones en muchas areniscas que no presentan estratificación. Un 25% de las areniscas del Grupo Guayabo, son lito-arenitas ftaníticas; algunos conglomerados de guijarros contienen hasta 80% de ftanita; los

feldespatos potásicos y las plagioclasas se presentan en un bajo porcentaje (6,5% y 7%). Los fragmentos de rocas metamórficas constituyen hasta el 10%; son frecuentes además, los granos de zircón y turmalina. Las lodolitas son de color marrón, generalmente bioturbadas, carbonáceas y contienen delgadas capas de lignito; también se presentan variedades con diversos colores, constituidas por montmorillonita, illita y caolinita. Los horizontes delgados de oolitas ferríferas, usualmente se interestratifican con areniscas cuarzosas, generalmente sin estratificación definida, los oolitos casi siempre son de 0,25 a 0,5 mm de diámetro, aunque en algunos casos, pueden llegar hasta los 2 mm, y están constituidos por goetita y berthierine.

La formación Guayabo en Colombia está constituida principalmente por conglomerados, areniscas y lodolitas depositadas en un paleoambiente principalmente continental. Las litologías de Guayabo van desde grano muy fino en la base, sobre la formación León, hasta areniscas cuarzosas de grano medio hacia el tope.

Según González de Juana (1952), el Grupo Guayabo se depositó en un ambiente de carácter continental, según Van Houten y James (1984), los restos de fósiles indican un ambiente acuático-paráfico, las direcciones de paleocorrientes y las relaciones de facies en el Grupo El Guayabo, requieren de una provincia distributiva occidental. Se depositó en un plano aluvial inclinado hacia el este, en un delta lobulado, que progradaba hacia el mar, con un rango en las fluctuaciones de la marea menor de 0,5 m. El ambiente interdistributario fue cubierto ocasionalmente por aguas marinas y someras, donde fueron depositados los horizontes ferríferos oolíticos, los cuales fueron acumulados en procesos repetitivos durante períodos de escasa sedimentación y en las

etapas iniciales de transgresiones, antes que el aporte masivo de detritos fuera nuevamente restablecido. El episodio de máxima progradación (Formación Urimaco) refleja un aumento en la sedimentación, en la región subsidente del bloque de Maracaibo, y el aumento además en la tasa del levantamiento de la provincia distributiva.

Las arenas, areniscas y conglomerados del Grupo Guayabo, son utilizados por la industria de la construcción.

B. Formación León (62 muestras): Lodolitas

TERCIARIO: Mioceno Medio

La formación fue depositada entre aguas someras y profundas

En la depresión de Táchira, Heybroek (1953) describió la formación como una secuencia monótona de lutitas grises a negras, blandas, con numerosos niveles de concreciones de arcilita ferruginosa, oolitas ferruginosas y muchos restos de plantas. Fierro y Paredes (1987), en el flanco oeste del sinclinal del río Sarare, Depresión de Táchira, la describieron como una secuencia de lutitas gris verdosas, blandas a físis, glauconíticas, que se meteorizan a tonos rojizos y escarlatas, con muchas concreciones calcáreas (ferruginosas) y algunas capas de arenisca limolítica. Un tramo intermedio, con un espesor de 43 m, es mas arenoso y limolítico.

Por otra parte, la formación León en Colombia incluye lodolitas negras laminadas en la base que gradan hacia lodolitas multicolores y moteadas hacia el tope, imbricadas

con areniscas cuarzosas de tamaño de grano fino a medio y algunos fragmentos de carbón (Costanzo et al. 2006).

La formación fue depositada en un amplio ambiente de aguas salobres de salinidad normal y de poca profundidad.

El espeso cuello lutítica sirve de sello a yacimientos petroleros de la Formación Carbonera.

C. Formación Carbonera (10 muestras): Areniscas y lodolitas

TERCIARIO: Mioceno Inferior – Oligoceno Superior

Parece haberse desarrollado en una extensa llanura baja, similar al sur del Lago de Maracaibo

La Formación Carbonera se compone principalmente de arcillitas y lutitas grisáceas que meteorizan en tonos abigarrados de rojo y amarillo, irregularmente estratificadas, con areniscas arcillosas de 5 a 10 m de espesor. La formación contiene capas de lignito y algunas calizas con *Hannatoma* (González de Juana, et al., 1980).

Sutton (1946) indica que en la sección del río Omuquena las lutitas constituyen dos tercios de la unidad, caracterizada por una intercalación de lutitas carbonosas, a veces arenosas, de color gris verdoso a gris oscuro, con restos de plantas y de areniscas laminadas con rizaduras, de grano fino, carbonosas y con restos de plantas.

Las partes superior e inferior contienen capas de carbón lignítico y algunas calizas fosilíferas con moluscos de ambientes salobres a marinos de aguas someras.

En el campo de Tarra el Staff of Caribbean Petroleum Co. (1948) indican que a 140 pies (42,6 m) de la base se presenta una notoria capa de carbón sub-asfáltico de 1 a 3,3 m de espesor, liviano, negro mate, de fractura concoidea y con resina fósil, constituyendo un estrato guía en pozos y afloramientos, desde Colombia hasta el campo Los Manueles. Este carbón esta recubierto por el intervalo petrolífero denominado informalmente "Areniscas de El Cubo" de unos 500 pies (165 m); la parte inferior es petrolífera. En la parte superior de Carbonera se presentan otros niveles de carbones.

Azpiritzaga y Casas (1989) identificaron dentro de la secuencia estudiada una serie de facies que, agrupadas por sus características texturales, estructuras sedimentarias y relación vertical, convergen en dos unidades sedimentarias. La primera se caracteriza por presentar asociaciones de facies que constituyen una serie de secuencias de afinamiento de tamaño de grano hacia el tope; la segunda compuesta de areniscas, lutitas carbonosas, facies de carbón, que se presentan alternas, aumentando el espesor de las capas de carbón hacia el tope.

Se extiende a Táchira, Mérida y Zulia meridional; en los alrededores de San Antonio y de Cúcuta y en la región de El Arenal y Pozos Azules, entre otras muchas localidades. En el río Omuquena de Táchira nor-central aflora una buena sección, que

podría utilizarse como sección de referencia en Venezuela (González de Juana, et al., 1980).

El ambiente sedimentario de la Formación Carbonera parece haberse desarrollado en una extensa llanura baja similar a la existente hoy en el sur del Lago, con formación de pantanos, algunos con vegetación densa, lagunas con aguas salobres y con drenaje por ríos sinuosos que migraban por la llanura. Trump y Salvador (1964) señalan que tanto la fauna como la litología indican ambientes de aguas salobres con aguas progresivamente más profundas hacia el tope de la formación. Notestein et al. (1944) considera a los sedimentos de la Formación Carbonera (en gran parte) como no marinos. Colmenares et al., (1988) colocan a la unidad dentro de una llanura deltaica, sometida a la acción de las mareas y la influencia marina. Azpirixaga y Casas (1989) determinaron que la formación fue depositada en un ambiente de llanura deltaica alta por sus características sedimentológicas y análisis palinológicos efectuados; presenta depósitos de canal distributarios en su base y depósitos de llanura de inundación (pantanos y abanicos de rotura) hacia el tope.

Según Useche (1985) la Formación Carbonera, presenta buenos afloramientos de carbón, principalmente en la depresión de Rubio (Silla de Capote), Lobatera, Capacho (quebradas Guatera y Hato de la Virgen). De acuerdo a estudios de prospección geoeconómica, realizados a los yacimientos de carbón de la Silla de Capote, Rubio, distrito Junín, estado Táchira, la zona representa una reserva económica de carbón de gran importancia para la región. Bar y Peña (op. cit.) consideran que los carbones del yacimiento de Santo Domingo en el estado Táchira,

constituyen un buen combustible industrial y una materia adecuada para la industria carbo-química.

Los hidrocarburos que se producen en la parte norte de la cuenca de los Llanos Orientales, cerca de la frontera con Venezuela, tienen características muy similares a las de los campos Guafita y La Victoria situados en la cuenca Barinas Apure. Es decir valores de gravedad que van de 30 a 40° API (petróleo liviano). Las areniscas de la base de la formación Carbonera en Colombia son altamente productivas y responsables de aproximadamente un 80% de las reservas petrolíferas de la región.

En Venezuela, el petróleo de los campos Guafita y La Victoria, en la cuenca de Barinas Apure, pero con características de densidad (gravedad específica) similares al de la Cuenca de los Llanos orientales en Colombia, parece haber madurado durante el Mioceno medio (12 Ma) pero alcanzó su pico de productividad durante el Plioceno (3.8 Ma).

III. CICLOS EUSTÁTICOS

Los ciclos eustáticos indican los niveles, en altura con respecto a tierra, del mar en el pasado geológico y a escala global.

El pozo Saltarín 1A atraviesa tres (3) formaciones, Guayabo, León y Carbonera. Cada una de estas tres formaciones parece seguir un comportamiento, a escala geológica, de ciclos eustáticos. Esto se ve a continuación en la Figura 3.2 y 3.3.

En la Figura 3.2 se destacan dos líneas azules sobre el patrón de los ciclos eustáticos, estas marcas corresponden a las edades que fueron fijadas por la técnica de bioestratigrafía a las profundidades de 305 m y 610 m (flechas rojas en la Figura 3.3). Según estos “amarres” en las edades geológicas se podría hacer una nueva consideración de a cuales profundidad se esperaría estuviesen ubicadas las tres formaciones que atraviesa el pozo Saltarín 1A. Las flechas rojas de la Figura 3.3, para estas dos profundidades representan anomalías en el perfil del cociente S (máximos) indicando posibles de las características de los ambientes de sedimentación, principalmente cambios químicos oxido – reductores, los cuales afectan las condiciones mineralógicas de las rocas presentes.

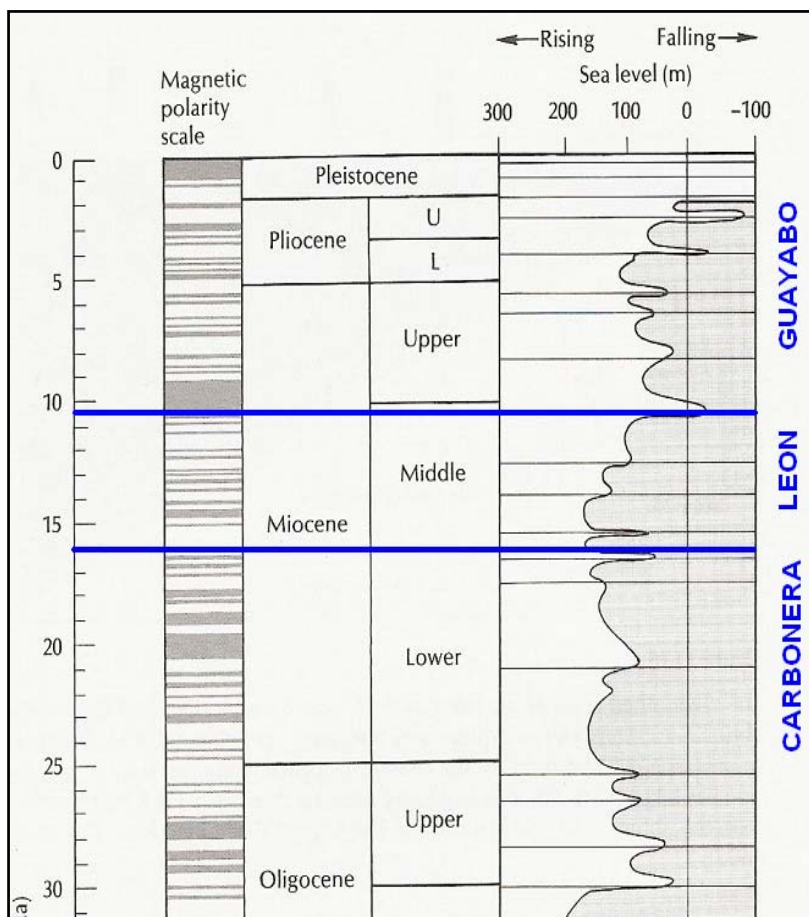


Figura 3.2. Ciclos eustáticos para el pozo Saltarín 1A.

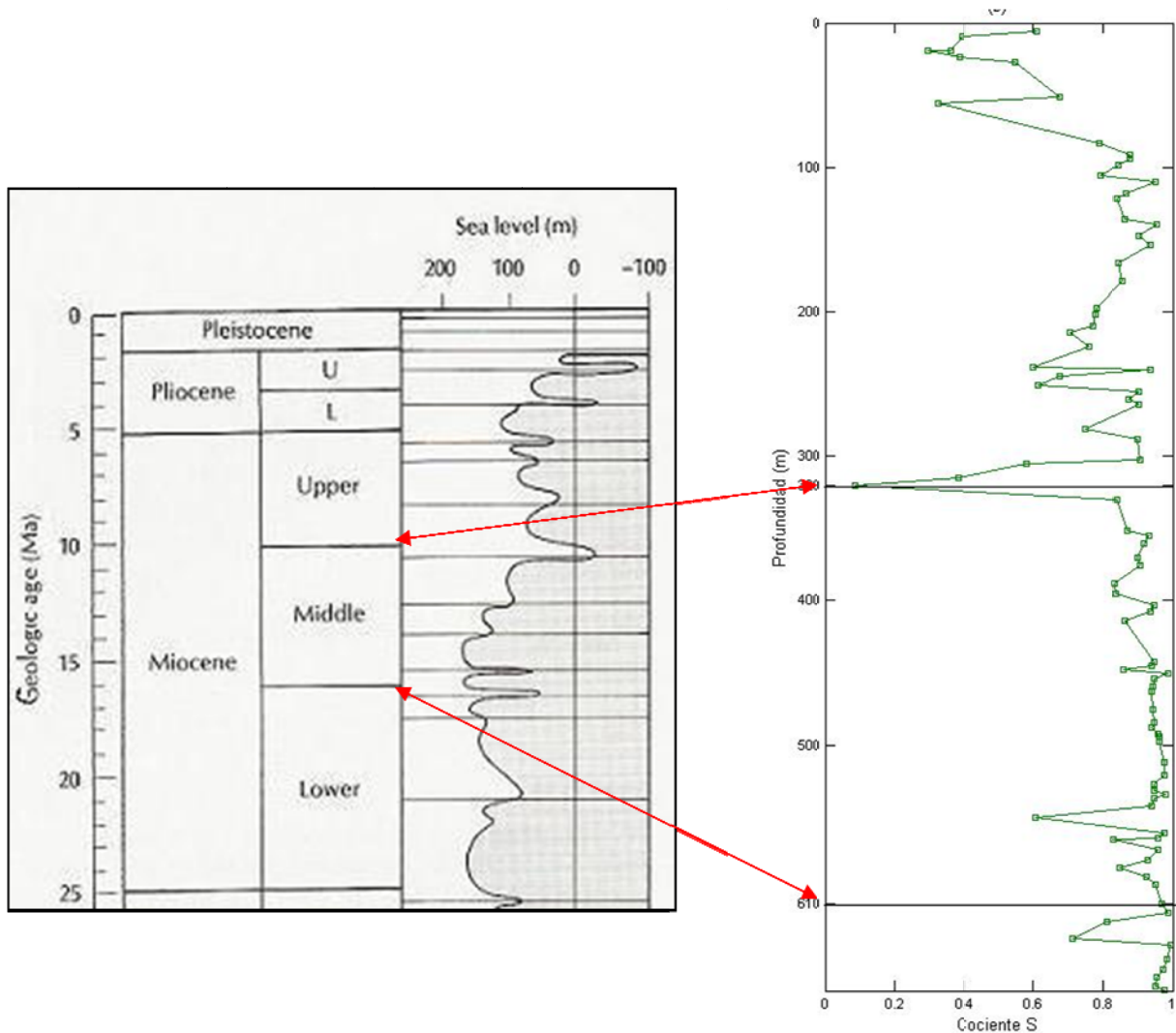


Figura 3.3. Imagen izquierda muestra los ciclos eustáticos para el pozo Saltarín 1A. A la derecha se muestra el perfil del cociente S en función de la profundidad. Las flechas rojas indican los amarres en edades fijadas por bioestratigrafía a 305 m y 610 m.

IV. DIVISIONES DE LAS MUESTRAS.

A. DIVISIÓN OPERACIONAL DE CAMPO

Al momento de realizar la perforación del pozo, se van obteniendo muestras de las diferentes profundidades a las que va llegando el taladro de perforación. Cuando se

observa un cambio brusco en las características de la roca perforada, se dice que hubo un cambio de formación, es decir, que se ha iniciado la perforación de una formación geológica distinta a la precedente de menor profundidad. La profundidad a la cual ocurre este cambio es registrada en campo (división operacional en campo). Según el procedimiento descrito anteriormente, el pozo Saltarín 1A fue dividido operacionalmente en campo, de la siguiente forma:

- Formación Guayabo (88 muestras): Areniscas y lodolitas. Desde 0 metros hasta 442 metros.
- Formación León (26 muestras): Lodolitas. Desde 442 metros hasta 569 metros.
- Formación Carbonera (20 muestras): Areniscas y lodolitas. Desde 569 metros hasta 670 metros.

B. DIVISIÓN POR EDADES GEOLÓGICAS (ENVOLVENTES TRANSGRESIVAS)

Para realizar esta división se utilizaron dos edades referenciales suministradas por el Dr. Carlos Jaramillo, del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales en Panamá. Estas edades bioestratigráficas ubican el tope del Mioceno medio a aproximadamente 305 metros de profundidad y el tope del Mioceno inferior a aproximadamente 610 metros de profundidad (ver Figura 3.4).

Estas dos edades geológicas coinciden aproximadamente con dos eventos regresivos globales establecidos en los perfiles de Vail et al. (1977). En la Figura 3.2 (a)

y (b) se muestra la columna de Vail et al. (1977) y en ella se indican las profundidades del pozo Saltarín 1A correspondientes a las edades bioestratigráficas disponibles (ver Figura 3.3). Ellas dividen el perfil de Vail et al. (1977) en tres secciones que parecen coincidir con tres envoltentes transgresivas de gran longitud de onda (ver Figura 3.4):

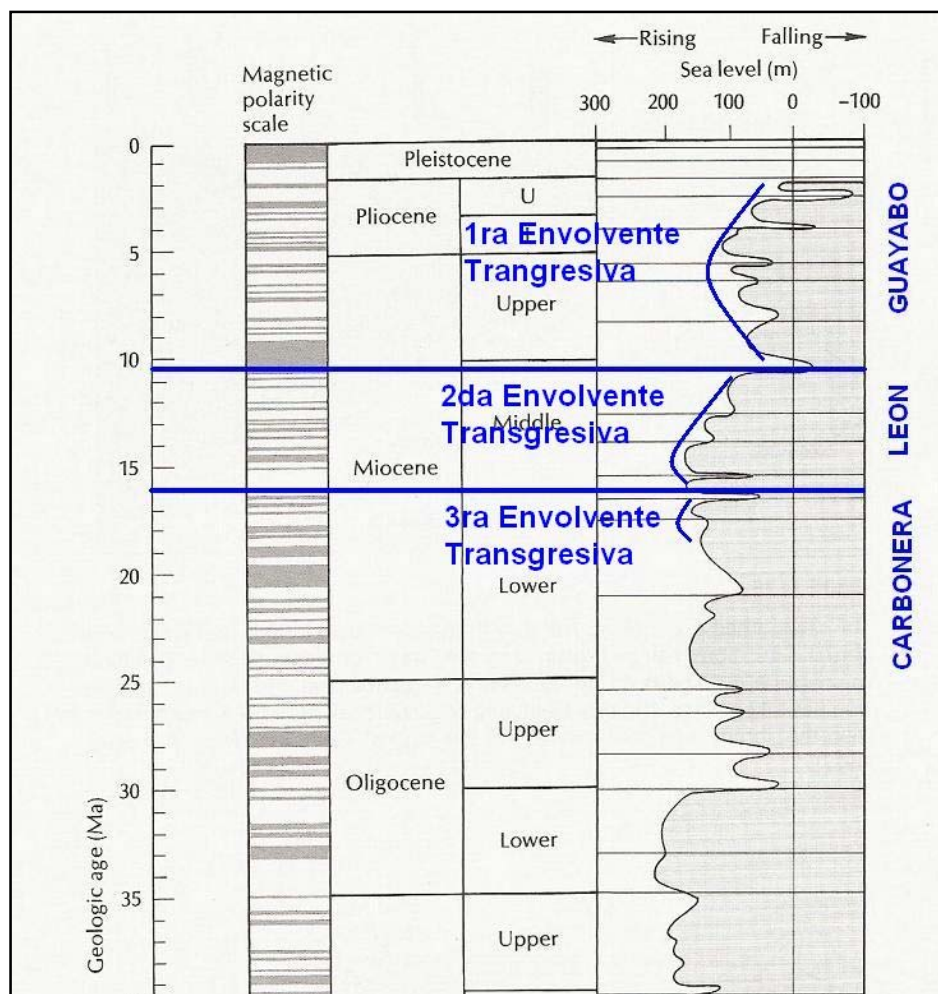


Figura 3.4. Envoltentes transgresivas establecidas para el pozo Saltarín 1A, mediante el amarre por medio de dos edades (vía bioestratigráfica) y que corresponden a una profundidad de 305 y 610 m (líneas azules horizontales).

- Envolvente transgresiva 1 (62 muestras): desde 0 metros hasta 305 metros.

Terciario: Plioceno Inferior – Mioceno Superior.

- Envolvente transgresiva 2 (62 muestras): desde 320 metros hasta 610 metros.
Terciario: Mioceno Medio.
- Envolvente transgresiva 3 (10 muestras): desde 610 metros hasta 670 metros.
Terciario: Mioceno Inferior – Oligoceno Superior.

C. DIVISIÓN POR EDADES GEOLÓGICAS (ENVOLVENTES TRANSGRESIVAS) Y AMBIENTES REDUCTORES

La clasificación de los datos según edades ambientes reductores, se basó en tomar la clasificación previa según las edades geológicas (envolventes transgresivas) y considerar los valores de cociente S mayores o iguales a 0.66 ($S \geq 0.66$), con lo cual se pretendió asegurar que las muestras seleccionadas correspondiesen a un ambiente netamente reductor.

CAPITULO IV

MARCO METODOLÓGICO

I. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A. PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS MAGNÉTICOS

Para las mediciones de susceptibilidad magnética y de cociente S , fue necesario hacer una preparación previa de las muestras. Las 134 muestras (todas con cantidades menores a 100 gramos), llegaron en pequeñas bolsas individuales para cada profundidad. El proceso de preparación realizado fue el siguiente:

- 1) Con ayuda de un martillo común y de un mortero de porcelana, se trituró cada una de las muestras, hasta obtener un polvo fino. En este paso se tuvo especial cuidado de evitar el contacto con la muestra de cualquier material metálico (por ejemplo, la cabeza de hierro del martillo), y así impedir la contaminación y su efecto sobre las mediciones magnéticas posteriores.
- 2) Al realizar la trituración de cada muestra, se procedió a limpiar el material y los instrumentos utilizados, así se evitó la contaminación cruzada entre muestras de diferentes profundidades.
- 3) El peso en polvo fino de cada una de las muestras, fue de entre 14,0 y 15,0 gramos, lo cual se constató por medio de una balanza electrónica de laboratorio

con una apreciación de 0,1 gramos. Esto con la finalidad de obtener mediciones normalizadas en peso de los parámetros magnéticos.

- 4) El peso estándar en polvo fino de cada una de las muestras, se introdujo y compactó en pequeños recipientes cilíndricos de plástico o porta muestras (dimensiones: 15 mm de diámetro, 30 mm de altura). Los recipientes fueron de plástico para evitar afectar las mediciones magnéticas. Ejemplo de estos recipientes se muestran en la Figura 4.1.
- 5) Una vez fue introducido el polvo de roca triturada en los porta muestras, se tapó con plastilina la parte superior de este (la plastilina tampoco afecta las mediciones magnéticas).
- 6) El procedimiento anterior se realizó para cada una de las 134 muestras.

La preparación de las muestras fue realizada en el Laboratorio de Paleomagnetismo y Magnetismo de Rocas de la Universidad Simón Bolívar, Departamento de Ciencias de la Tierra (Caracas, Venezuela).

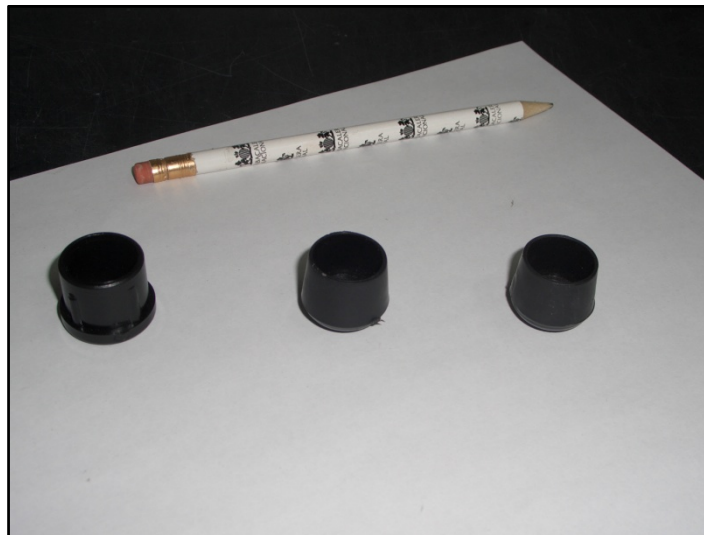


Figura 4.1. Recipientes de plástico o porta muestras de roca triturada.

B. MEDIDAS DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ)

Las mediciones de susceptibilidad magnéticas fueron realizadas con el susceptómetro magnético MS2 de la compañía Bartington Instruments. Dicho instrumento se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4.2. Susceptómetro MS2 (Bartington Instruments) utilizado para las mediciones de susceptibilidad magnética.

Las mediciones se hicieron cumpliendo el siguiente procedimiento:

- 1) Se calibró el instrumento para realizar las mediciones en unidades CGS (ver Figura 4.3 (a)).
- 2) El susceptómetro MS2 posee una muestra de calibración de las medidas realizadas. Para la medición de susceptibilidad magnética de cada una de las muestras de roca, fue necesario hacer antes, la medición de la susceptibilidad magnética de la muestra de referencia o calibración. Para obtener la medida real de susceptibilidad magnética, se realizó una simple conversión lineal usando el valor de la muestra de calibración (293 CGS), la medida tomada por

Medida de la muestra de calibración dado por el MS2	-----	293 CGS
Medida de la muestra de roca dado por el MS2	-----	X

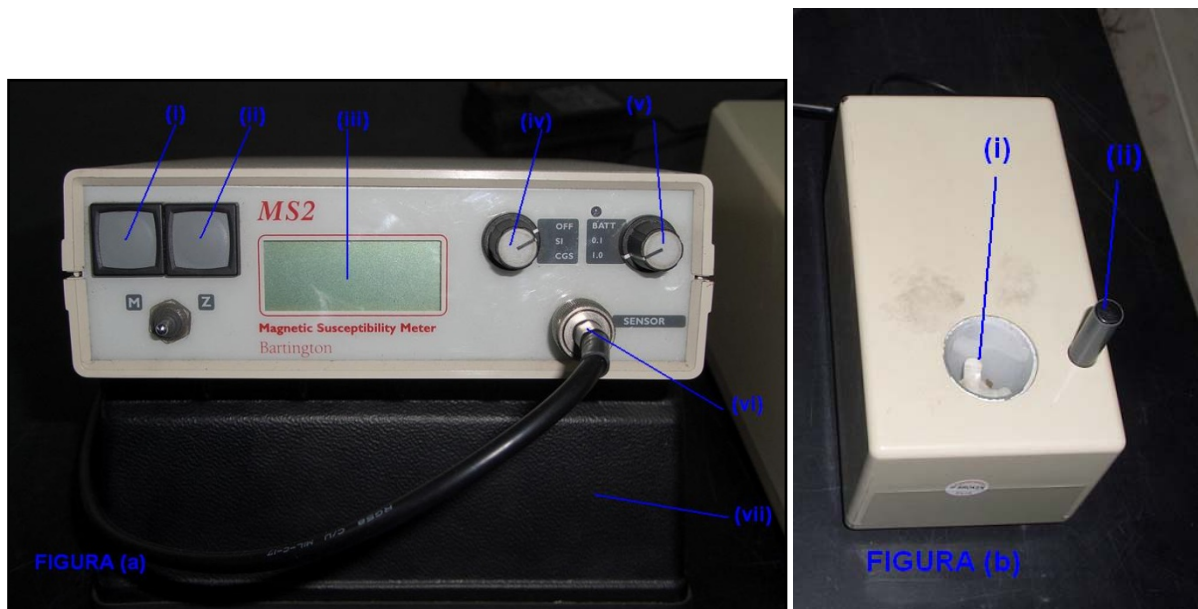


Figura 4.3. (a) Consola de medición; (i) botón para realizar la medición de la susceptibilidad magnética; (ii) botón para la calibración del cero; (iii) pantalla; (iv) selector de encendido y selector de unidades (CGS o SI); (v) selector de batería y ordenes de magnitud de medición; (vi) cable dirigido al sensor (Figura (b)); (vii) base del instrumento. Figura 4.3 (b) Sensor de medición: (i) porta muestras; (ii) dispositivo para levantar y bajar el porta muestras.

- 3) Para cada una de las muestras, la metodología para la medición fue la siguiente: se midió la susceptibilidad de la muestra de calibración (293 CGS), se midió luego la susceptibilidad del aire (sin muestra), posteriormente la de la muestra de roca, y de nuevo la susceptibilidad magnética del aire. Este triplete de mediciones aire–muestra–aire se realizó 5 veces en cada caso, es decir, 15 mediciones para cada una de las 134 muestras (aprox. 2000 mediciones).

- 4) Se procesaron los datos obtenidos de la siguiente forma: se promediaron los valores de las mediciones del aire antes y después de la muestra; ese promedio se restó al valor de la susceptibilidad de la muestra de roca. Es decir, de 15 mediciones iniciales por muestra de roca, sólo quedaron 5 valores, los cuales se promediaron (ver esquema de la Figura 4.4).

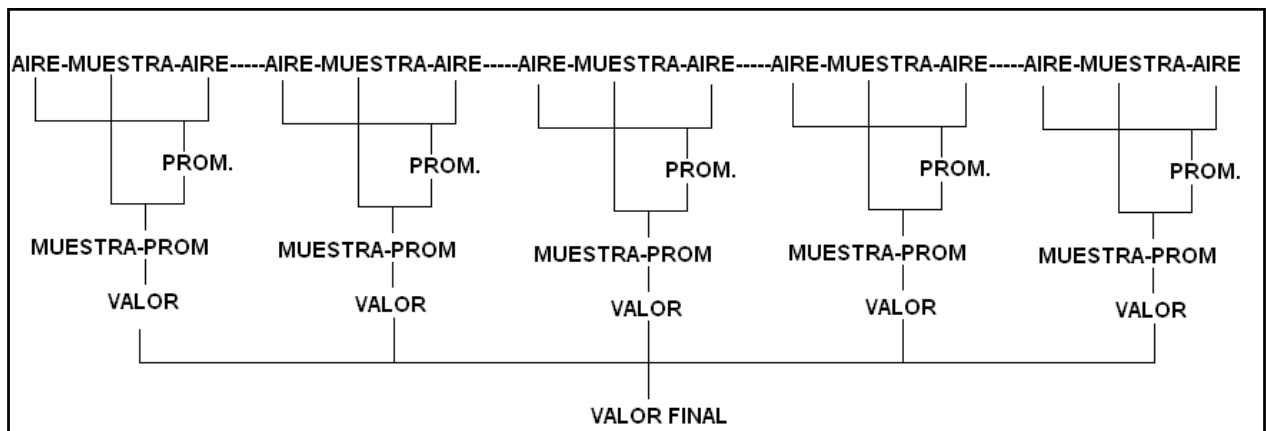


Figura 4.4. Esquema gráfico del procedimiento seguido para la medición de susceptibilidad magnética con el susceptómetro MS2 para cada una de las 134 muestras de roca. (PROM. significa promedio).

Las mediciones de susceptibilidad magnética, así como los instrumentos utilizados para las mismas, fueron realizadas en el Laboratorio de Paleomagnetismo y Magnetismo de Roca de la Universidad Simón Bolívar.

C. MEDIDAS DE COCIENTE S

Con las muestras previamente preparadas, como se indicó anteriormente, se procedió a realizar las medidas del cociente S, las cuales fueron realizadas en el Magnetómetro Criogénico 2G del Laboratorio de Paleomagnetismo del Departamento

de Geociencias de la Universidad de Edimburgo (Reino Unido), por los Doctores V. Costanzo y M. Aldana de la Universidad Simón Bolívar.

Para la medición del cociente S se cumplió con el siguiente procedimiento:

- 1) Para lograr las magnetizaciones de las muestras (las cuales fueron necesarias para la medición del cociente S), se usó un electroimán de pulso marca ASC Scientific, modelo IM-13-30, el cual se muestra en la Figura 4.5. Este instrumento genera campos magnéticos de corta duración (posee bobinas que alcanzan distintos rangos de magnitud de campo magnético). El campo magnético que genera este instrumento se produce por una descarga eléctrica de un capacitor a través de la bobina que se muestra en la Figura 4.5, y es paralelo al eje cilíndrico de ésta. En el interior de dicha bobina se introdujo la muestra a magnetizar por medio del porta-muestra del instrumento, que permitió posicionar los recipientes cilíndricos de la muestra de roca en diferentes direcciones.
- 2) Cada una de las muestras se introdujo dos veces en la bobina del electroimán. La primera vez se le aplicó un campo magnético de 4,0 Tesla, en una dirección determinada por la posición de la muestra en el interior de la bobina. Este campo fue ajustado en dicha magnitud moviendo la rueda o perilla de selección de voltaje del magnetizador (ver Figura 4.5), luego con una gráfica calibradora de intensidad del campo magnético en función del voltaje aplicado a la bobina, se seleccionó el voltaje necesario para obtener el campo magnético requerido.

3) Una vez aplicado el primer campo (4,0 Teslas), se magnetizó la muestra, y se midió la magnetización inducida con el magnetómetro criogénico 2G Enterprises Cryogenic Magnetometer, –con una sensibilidad de 10^{-11} A/m–. Este es un instrumento que tiene la capacidad de medir la intensidad y dirección de la magnetización de materiales magnéticamente débiles. Además, tiene la capacidad de aislar la muestra del campo magnético terrestre actual, con la finalidad de que no interfiera con las mediciones de alta precisión, para magnetizaciones muy bajas, que en él se llevan a cabo. El instrumento se muestra en la Figura 4.6.

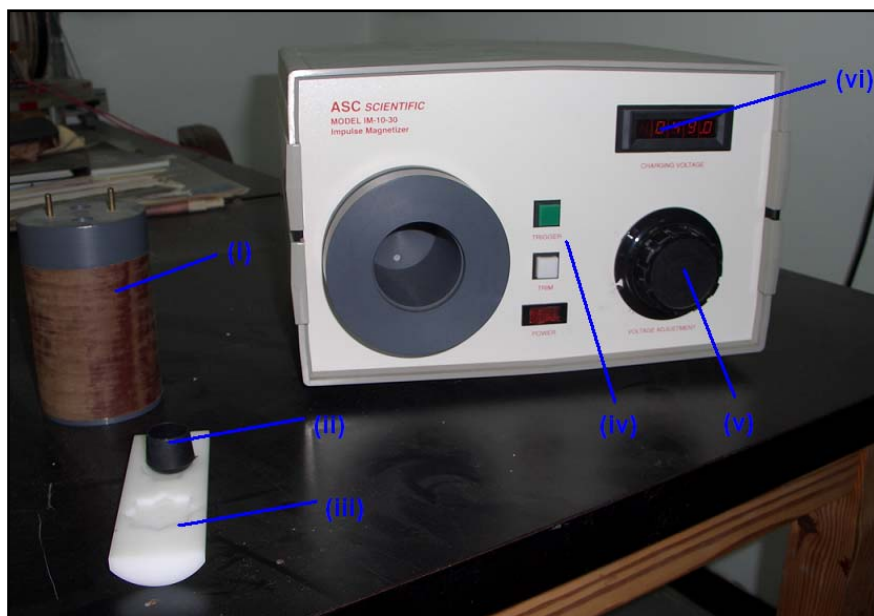


Figura 4.5. Electroimán de pulso, marca ASC Scientific, modelo IM-10-30. (i) Ejemplo de las bobinas utilizadas por el equipo para generar un campo magnético en particular; (ii) porta muestras; (iii) porta muestras del magnetizador; (iv) botones para encendido/apagado, trigger, etc; (v) rueda o perilla que cambia el voltaje que posee la bobina, modificando así, la intensidad del campo; (vi) pantalla.

4) Una vez fue medida la magnetización de la muestra, se volvió a introducir en el magnetizador ASC IM-13-30, pero esta vez fue orientada de forma opuesta a como se ubicó la primera oportunidad que se magnetizó. La magnitud del

campo magnético aplicado en esta segunda magnetización fue de 0,4 Teslas. En otras palabras, lo que se hizo fue aplicar dos campos magnéticos de diferentes magnitudes (4,0 T y 0,4 T) y en direcciones mutuamente antiparalelas.



Figura 4.6. Magnetómetro. (i) Orificio para la entrada de la muestra dentro del instrumento; (ii) material aislante del campo magnético terrestre actual; (iii) mecanismo para la introducción de la muestra dentro del instrumento para su medición.

- 5) Magnetizada la muestra con este segundo campo magnético, se midió su magnetización de la misma forma que en los pasos anteriores.
- 6) Este procedimiento experimental se llevó a cabo para 90 de las 134 muestras del pozo.
- 7) La determinación del cociente S , a partir de los datos medidos, resultó considerablemente laborioso y complejo. Para ello se realizó una corrección al valor de la magnetización resultante, la cual toma en cuenta la alineación de los minerales magnéticos de la muestra. Esta corrección se llevó a cabo

proyectando las declinaciones resultantes de los minerales para el campo magnético de 4,0 T (valores en ángulos en una gráfica) y la declinación de los minerales para el campo de 0,4 T. Cuando ambas declinaciones quedaron en un mismo cuadrante se consideraron paralelas, y la magnetización resultante se expresó como $M_R^{Paralelo}$, y cuando quedaron en cuadrantes diferentes la magnetización resultante se expresó como $M_R^{Antiparalelo}$. Por lo tanto las correcciones que se realizaron para cada caso fueron las siguientes:

$$M_R^{Paralelo} = \frac{M_{4.0T} - M_{0.4T}}{2}$$

$$M_R^{Antiparalelo} = \frac{M_{4.0T} + M_{0.4T}}{2}$$

D. PREPARACIÓN DE MUESTRAS. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) Y ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X POR DISPERSIÓN DE ELECTRONES SECUNDARIOS (EDX)

Del total de 134 muestras, se seleccionaron 9 de ellas con el fin de aplicarles estos dos ensayos experimentales. El criterio usado para la selección de las mismas obedeció al hecho de que ellas representan los niveles de profundidad en donde se hallaron los valores máximos de susceptibilidad magnética. De esta forma se garantizó obtener la mayor cantidad de minerales magnéticos al momento de separar la fracción magnética de la no magnética en las muestras a analizar. Las 9 muestras utilizadas

para este estudio se indican en el Capítulo V, en la parte de Resultados de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).

Para la aplicación de estas dos técnicas fue necesario realizar primero la separación de la fracción magnética de cada una de las 9 muestras seleccionadas, la cual se realizó de la siguiente forma:

- 1) Se colocaron aproximadamente unos 20 gramos de muestra en un mortero de porcelana.
- 2) Se sumergió la muestra en acetona dentro del mortero para facilitar el proceso de abrasión de la misma.
- 3) Se procedió a triturar la muestra con el martillo del mortero, hasta obtener un polvo fino.
- 4) Se utilizó un imán de mano, el cual fue cubierto con plástico para no contaminar la muestra, el cual se sumergió en la acetona haciendo contacto completamente con la muestra triturada. Se hicieron varias vueltas y pasadas con el imán de mano sobre la muestra sumergida.
- 5) Realizadas varias pasadas y vueltas del imán, se llevó éste sobre una hoja de papel limpia sobre la cual se colocó el separado magnético unido a la cubierta de plástico protectora del imán. Este procedimiento de sumergir, realizar las pasadas y acumular en la hoja de papel la fracción magnética se llevó a cabo un promedio de 7 veces como mínimo para cada una de las muestras, con la finalidad de obtener la mayor cantidad de separado magnético y así aumentar

las posibilidades de obtener buenos resultados en las técnicas de microscopía y espectroscopía.

- 6) El separado magnético se colocó en pequeños frascos de vidrio, identificando la muestra por el nivel de la profundidad del cual ésta proviene.
- 7) El resto de la fracción no magnética, se separó de la acetona en la cual estaba sumergida y se colocó en frascos independientes, en caso de que pudiesen ser necesarias para posibles estudios posteriores.

El análisis de SEM (Scanning Electron Microscopy) se realizó en el Laboratorio de Superficies del Departamento de Ciencia de los Materiales, Sección de Microscopía Electrónica de la Universidad Simón Bolívar. Este análisis estuvo a cargo del Ing. Glen Rodríguez.

- 1) El separado magnético en los frascos de vidrio fue disuelto con alcohol isopropílico y le fue aplicado un baño ultrasónico (equipo: Ultrasonido Ultramot 2003 Buehler), por unos pocos minutos.
- 2) Se seleccionó una gota de muestra homogénea del separado magnético disuelta en el etanol, la cual fue tomada con una pequeña inyectora (todo el material de preparación para cada una de las muestras fue cambiado entre una y otra, para evitar la contaminación cruzada de las mismas). Esta gota fue colocada en un porta muestra (platina circular de cobre, sobre una cinta adhesiva de grafito (pequeños rectángulos de color negro que se observan en la Figura 4.7).

- 3) Con un equipo especial (equipo: Sputerin Hochspannung), se le dio un recubrimiento en metal (oro) a la muestra a estudiar (ver Figura 4.8).

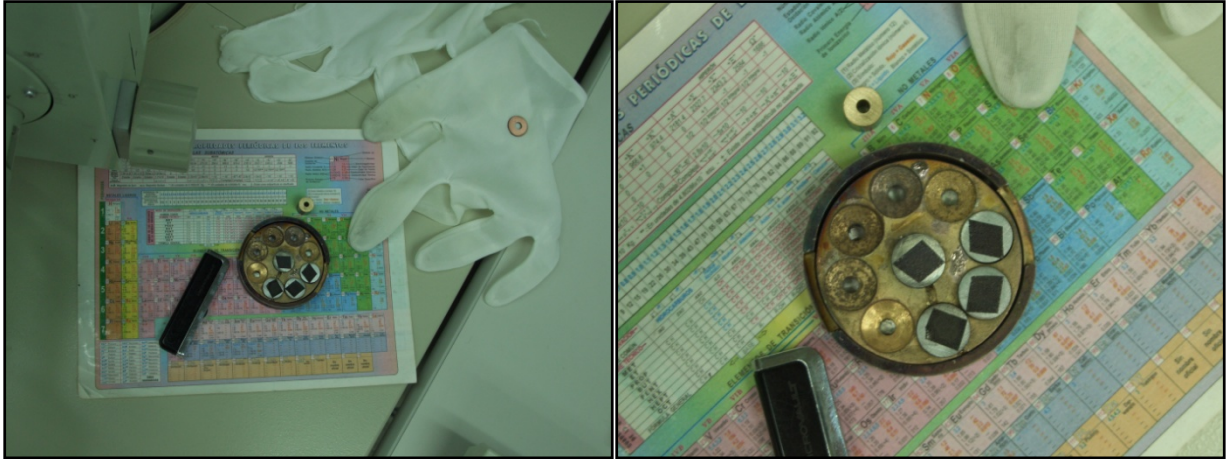


Figura 4.7. Platina circular de cobre (porta muestra) y cinta adhesiva de grafito sobre la cual es colocada la gota de fracción magnética (disuelta en alcohol isopropílico) de la muestra de roca; para los análisis de microscopía electrónica y espectroscopia de rayos X.



Figura 4.8. Instrumental para la aplicación del recubrimiento de oro para el análisis de microscopía electrónica y espectroscopia de rayos X. Nombre del equipo: Sputerin Hochspannung.

- 4) Se realizó el procedimiento anterior para cada una de las 9 muestras escogidas, las cuales fueron luego colocadas en el interior del microscopio electrónico de barrido mostrado en la Figura 4.9 (equipo: Microscopio Electrónico de Barrido

JEOL JSM – 6390; y sonda de rayos X o dispersor de energía Oxford Instruments, modelo 7582) para su análisis microscópico así como espectroscópico. Las imágenes del escaneo y de EDX de aquellos cristales de los 9 separados magnéticos analizados con mayor contenido de hierro (Fe) se presentan en el Capítulo V.



Figura 4.9. Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM – 6390; y sonda de rayos X o dispersor de energía Oxford Instruments, modelo 7582.

- 5) Los patrones de dispersión de energía usados en la espectroscopía de rayos X fueron procesados por el programa NORA Systems Six. Estos datos comprenden tanto imágenes del microscopio electrónico como del análisis químico–composicional del separado magnético de las muestras.
- 6) Toda esta información fue almacenada en forma digital.

II. METODOLOGÍA COMPUTACIONAL

A. OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS

En esta parte del trabajo, mostramos la metodología empleada utilizando diversas condiciones de entrada, como por ejemplo, las diferentes funciones de pertenencia, variaciones en el número de reglas difusas, divisiones de los datos de entrada, con el fin de determinar los parámetros óptimos a ser empleados.

Hicimos el análisis neuronal difuso bajo el modelo lineal híbrido que propone la arquitectura ANFIS del programa MatLab en su versión 7.0.

Dado que se tenían 134 medidas experimentales de susceptibilidad magnética, y 90 del cociente S, el primer paso que hicimos, antes de la selección de los parámetros óptimos, fue escoger de los 134 datos de susceptibilidad magnética, los 90 valores de igual profundidad de las medidas del cociente S existentes. Así se construyó una tabla de 90 valores experimentales de susceptibilidad magnética (χ) y cociente S (S) para la misma profundidad (ver Anexo 1).

Para el tratamiento de los datos de entrada se aplicó la función logaritmo tanto a la susceptibilidad magnética como al cociente S, ya que esta función permite linealizar ecuaciones potenciales, pudiendo mejorar el análisis neuronal difuso de la red. Las 4 combinaciones de datos de entrada utilizadas en este trabajo son:

1) Modelo simple. Entrenamiento: $\chi - S$

$$S = a \chi + b$$

2) Modelo semi-logarítmico. Entrenamiento: $\text{Log}(\chi) - S$

$$S = a \text{Log}(\chi) + b$$

3) Modelo semi-logarítmico. Entrenamiento: $\chi - \text{Log}(S)$

$$\text{Log}(S) = a \chi + b$$

4) Modelos logaritmo-logaritmo. Entrenamiento: $\text{Log}(\chi) - \text{Log}(S)$

$$\text{Log}(S) = a \text{Log}(\chi) + b$$

Las constantes a y b son parte del resultado arrojado por el programa después de cada entrenamiento. Se obtienen tantos pares de constantes como reglas difusas se apliquen durante el entrenamiento. Cada par de constantes, de cada función lineal, caracterizan un conjunto según las reglas establecidas para la inferencia.

Los valores experimentales de susceptibilidad magnética y de cociente S en profundidad, fueron divididos de tres formas distintas: División operacional de campo, división por edades geológicas y división según ambiente reductor (un ambiente reductor se clasificó según un cociente $S \geq 0.66$). Para la selección de los parámetros óptimos (parámetros que permiten la menor diferencia entre los datos inferidos del cociente S con respecto a su contraparte experimental) de la red neuronal difusa, únicamente se utilizaron los datos divididos operacionalmente en campo.

Las pruebas realizadas en esta etapa, se hicieron considerando: (a) El total de los datos del perfil, es decir, 90 valores experimentales, (b) La formación Guayabo

(dividida operacionalmente desde 0 m hasta 442 m), (c) La formación León (dividida operacionalmente desde 442 m a 569 m), (d) La formación Carbonera (dividida operacionalmente desde 569 m hasta 670 m), (e) La unión de las formaciones León y Carbonera (dividida operacionalmente desde 442 m hasta 670 m).

Es importante mencionar que el entrenamiento de las redes neuronales difusas se hizo, en el caso de la totalidad de los datos (100%), y la división operacional de campo, no sólo se hicieron con los valores de $\chi - S$, sino que también se realizaron todas las pruebas combinando las entradas de estos datos: (a) $\log(\chi) - S$, (b) $\chi - \log(S)$ y (c) $\log(\chi) - \log(S)$ (Tabla 4.1).

El programa MatLab (versión 7.0), el cual fue utilizado para realizar el análisis neuronal difuso, posee de forma automática 8 funciones de pertenencia: trimf, trapmf, gbellmf, gaussmf, gauss2mf, pimf, dsigmf, psigmf (ver Capítulo II: Marco Teórico, para una descripción de cada una de estas funciones de pertenencia), se hicieron pruebas con cada una de ellas. Así mismo, se probó con diferentes números de reglas difusas, desde 2, que es el número mínimo permitido por el programa, hasta un número máximo en cada caso. Para determinar el número máximo, se sacó el 10% a la cantidad total de datos, y se tomó la parte entera de este valor como número máximo de reglas difusas (ver Tabla 4.1) de esta forma, nos aseguramos que cada regla se aplica como máximo a un 10% de los datos a la vez. Para las formaciones León y Carbonera, no se dispusieron de suficientes datos para aplicar más de 2 reglas difusas, por lo tanto se aplicaron 2 y 3 reglas para que se pudiese realizar comparaciones entre los errores. En la Tabla 4.2 se muestran los datos y los entrenamientos que fueron utilizados, así como

el error reportado por Matlab, respecto a los valores experimentales e inferidos, para cada cantidad de reglas (ver Anexo 2).

Es importante resaltar que la tolerancia –uno de los parámetros de la red neuronal difusa que puede ser modificado y que indica el error que es aceptable para el usuario durante el entrenamiento– se escogió como 0.0 para todos los entrenamientos realizados. Fijando una tolerancia 0 se le “dice” a la red que haga el entrenamiento con la menor diferencia posible entre los valores inferidos y experimentales, pudiendo saber así cual es la mejor respuesta o modelo que puede ofrecer la red.

La discrepancia en la cantidad de valores experimentales para los conjuntos de datos de $\chi - S$ y $\chi - \log(S)$ con respecto a $\log(\chi) - S$ y $\log(\chi) - \log(S)$, se debe a que de los 90 datos utilizados para la susceptibilidad magnética algunos de los datos (a lo largo de toda la profundidad) valen cero (0), por lo que al aplicarle el logaritmo no se obtiene ninguna información.

Según los errores obtenidos se encuentra que al aumentar la cantidad de reglas difusas el error disminuye, como era de esperarse.

Divisiones	Combinaciones logarítmicas de los parámetros magnéticos			Errores de cada entrenamiento			
	Datos de entrada		Datos inferido s	Mínima cantidad de reglas difusas		Máxima cantidad de reglas difusas	
				Cantidad de reglas	Error	Cantidad de reglas	Error
Total de los datos	X	S	S	2	0,18201	9	0,16223
	X	Log (S)	Log (S)	2	0,15099	9	0,13618
	Log (X)	S	S	2	0,17218	9	0,16224
	Log (X)	Log (S)	Log (S)	2	0,14608	9	0,14094
Formación Guayabo (0m – 442m)	X	S	S	2	0,17445	5	0,15949
	X	Log (S)	Log (S)	2	0,16442	5	0,15383
	Log (X)	S	S	2	0,16611	5	0,12901
	Log (X)	Log (S)	Log (S)	2	0,15992	5	0,08812
Formación León (442m – 569m)	X	S	S	2	0,07465	3	0,07305
	X	Log (S)	Log (S)	2	0,04159	3	0,04067
	Log (X)	S	S	2	0,07494	3	0,07183
	Log (X)	Log (S)	Log (S)	2	0,04158	3	0,04000
Formación Carbonera (569m – 670m)	X	S	S	2	0,07200	3	0,06429
	X	Log (S)	Log (S)	2	0,03658	3	0,03253
	Log (X)	S	S	2	0,05155	3	0,01413
	Log (X)	Log (S)	Log (S)	2	0,02677	3	0,00646
Formaciones León- Carbonera (442m – 670m)	X	S	S	2	0,07496	4	0,07107
	X	Log (S)	Log (S)	2	0,04027	4	0,03804
	Log (X)	S	S	2	0,07210	3	0,06266
	Log (X)	Log (S)	Log (S)	2	0,03935	3	0,03477

Tabla 4.1. Errores de los entrenamientos usando la función de pertenencia pimf para las 4 combinaciones de los parámetros y para las 5 divisiones consideradas según la división operacional de campo. Para las formaciones León y Carbonera, 3 reglas difusas representa un porcentaje mayor al 10% con respecto a la cantidad de valores experimentales usados, pero igual se coloca para tener un dato con el cual comparar el error de 2 reglas difusas (10%).

Esquemáticamente las pruebas realizadas con la red neuronal difusa se muestran en las Figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14. En estas figuras se tiene que: FP1 = trimf, FP2 = trapmf, FP3 = gbellmf, FP4 = gaussmf, FP5 = gauss2mf, FP6 = pimf, FP7 = dsigmf y FP8 = psigmf, lo cual representan las ocho (8) funciones de pertenencia utilizadas en los entrenamientos de la red neuronal difusa (ver Anexo 2 para ver el mínimo error alcanzado, combinando iteraciones, funciones de pertenencia, etc.).

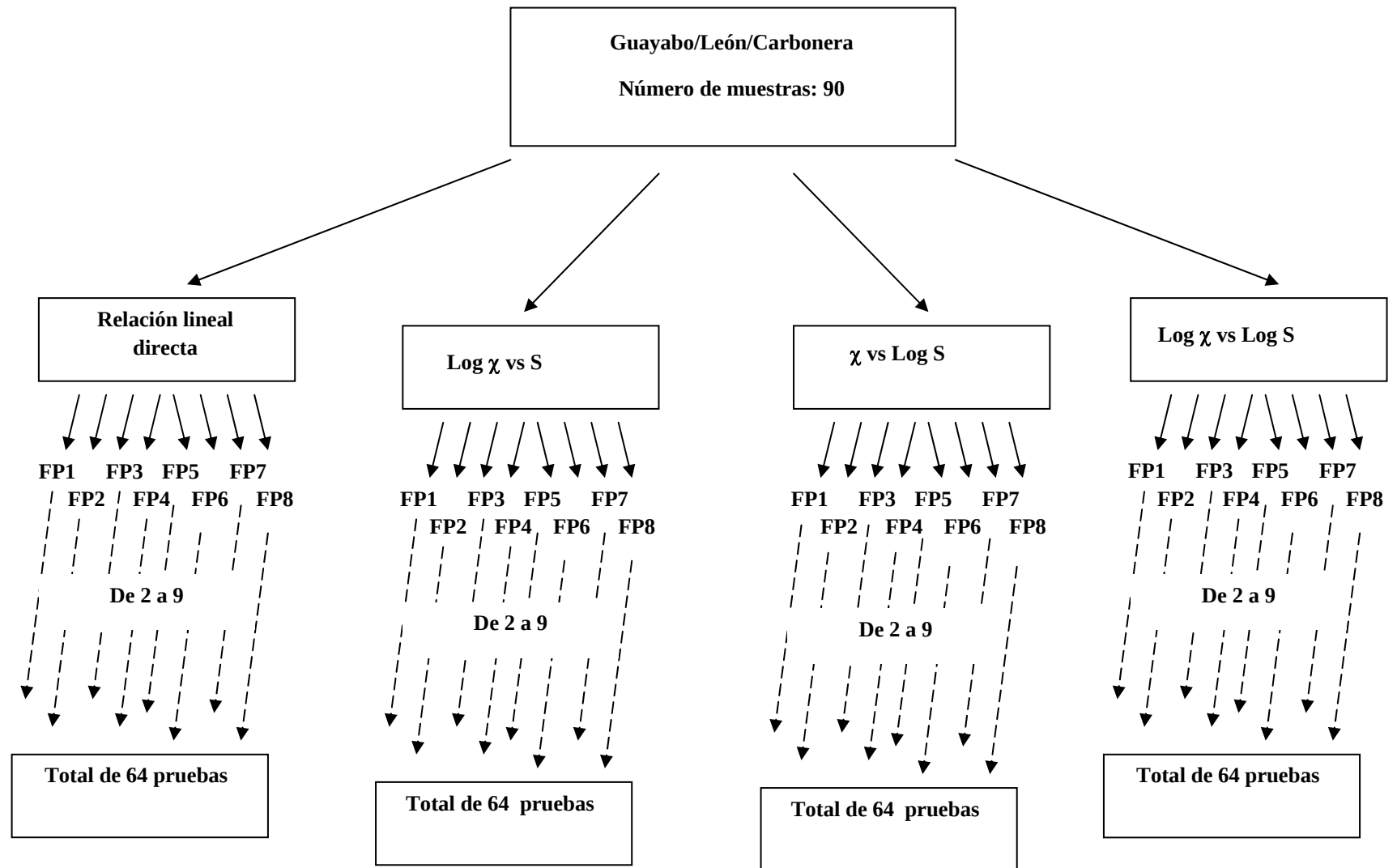


Figura 4.10. Total de pruebas efectuadas para Guayabo/León/Carbonera = 256.

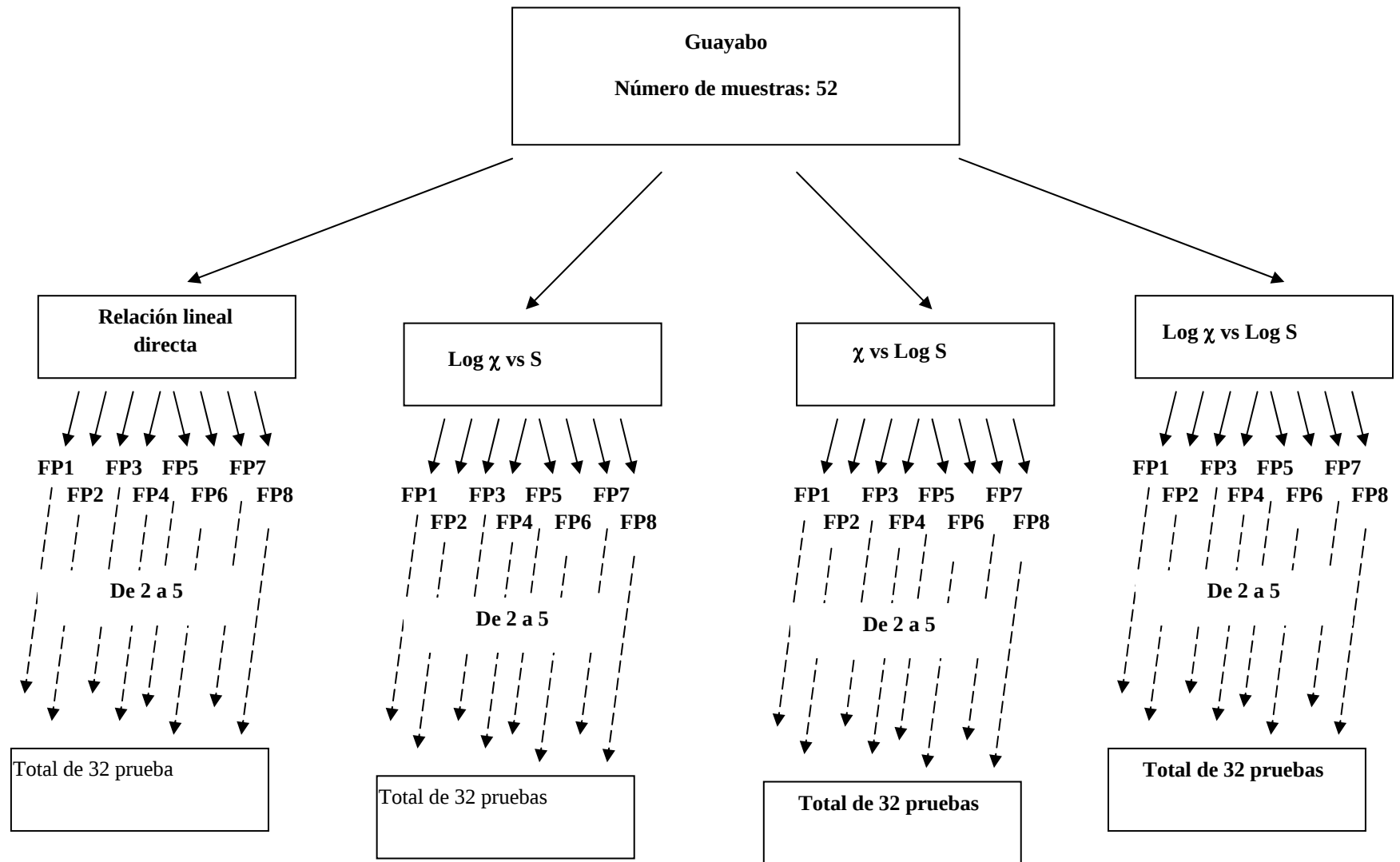


Figura 4.11. Total de pruebas efectuadas para Guayabo = 128.

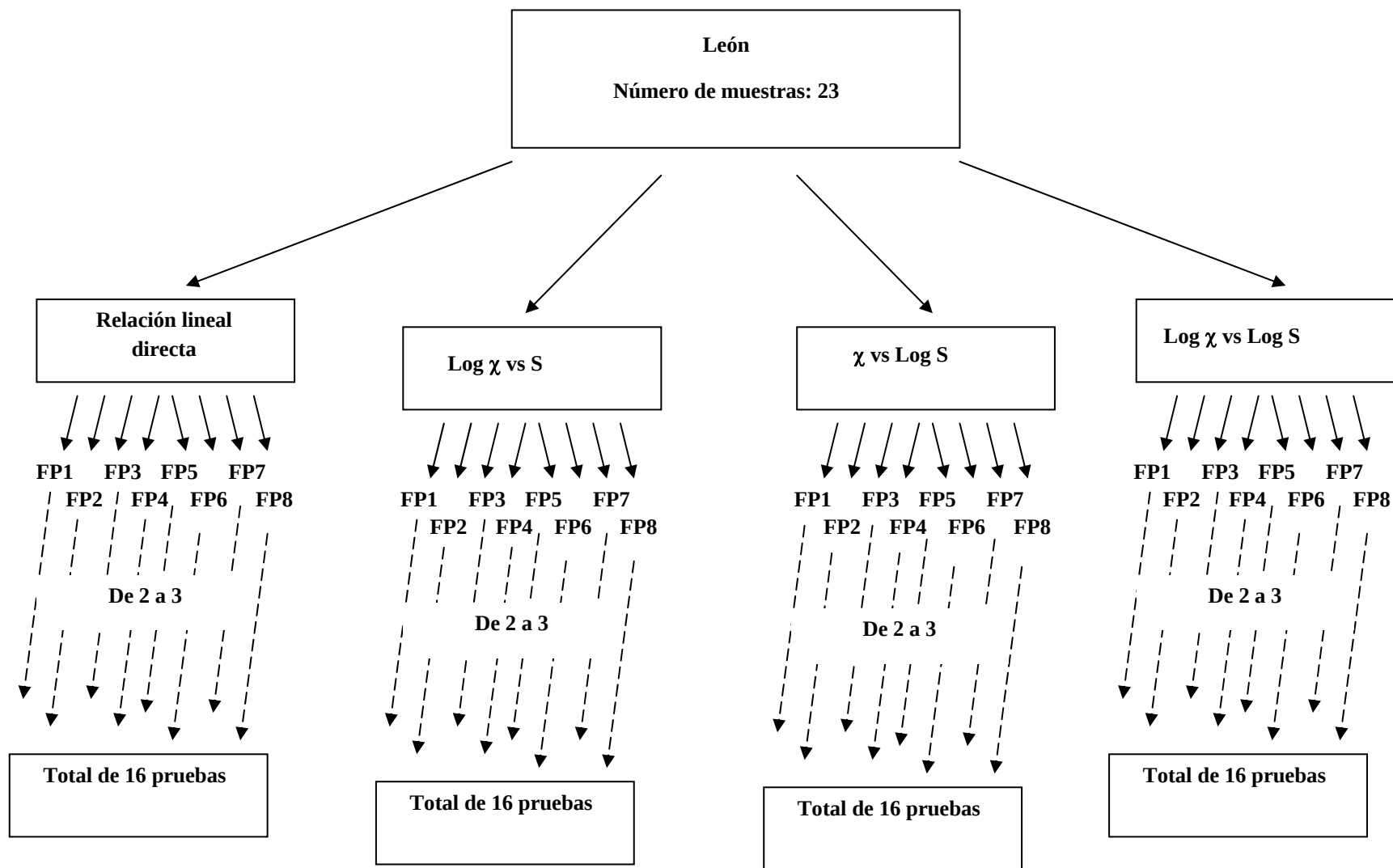


Figura 4.12. Total de pruebas efectuadas para León = 64.

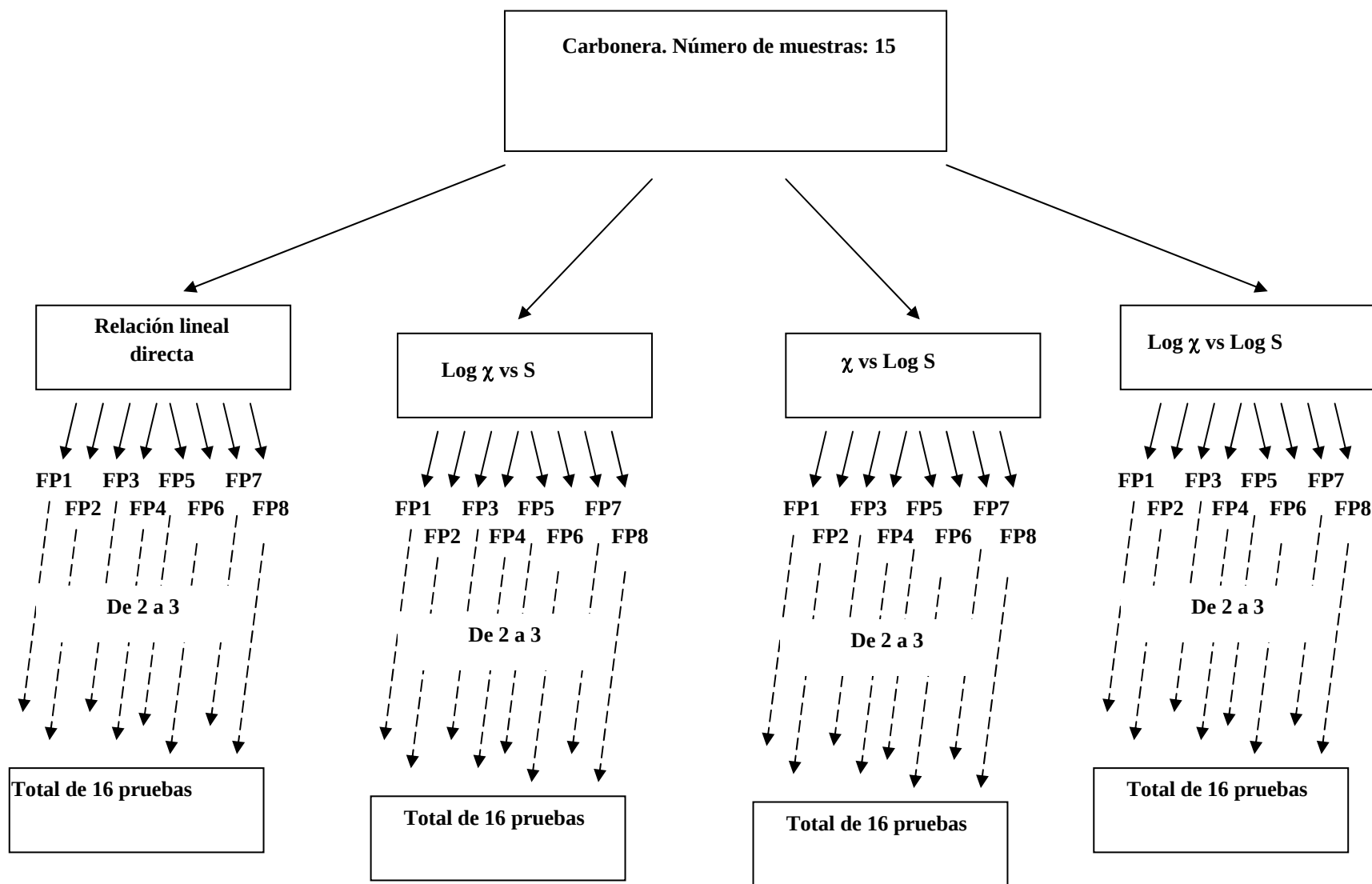


Figura 4.13. Total de pruebas efectuadas para Carbonera = 64.

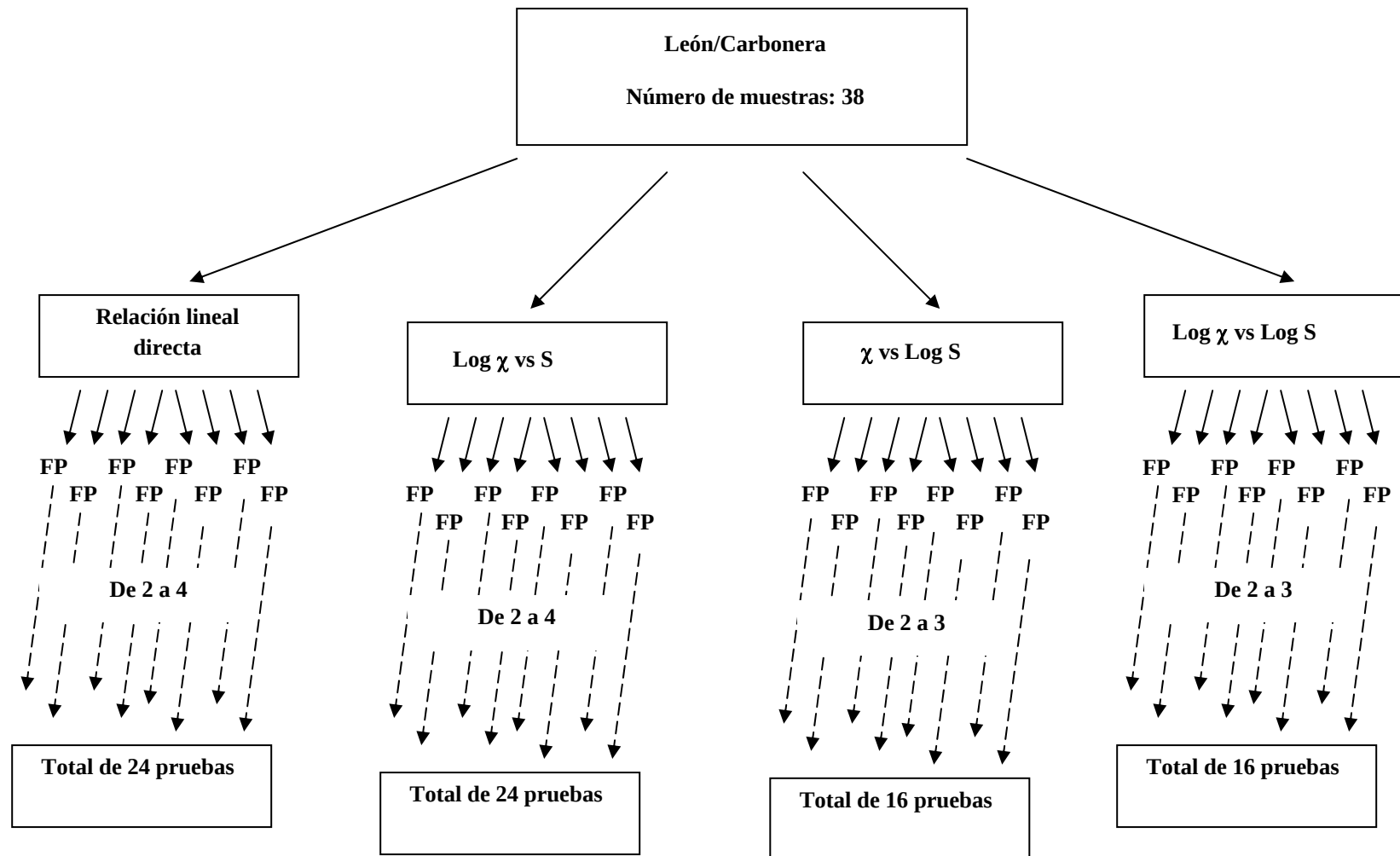


Figura 4.14. Total de pruebas efectuadas para León/Carbonera = 80.

Después de realizados todas las pruebas de entrenamiento de la red neuronal difusa, para cada conjunto de entrada, se escogió la mejor función de pertenencia y las dos mejores combinación de los conjuntos de datos: χ – cociente S y $\log(\chi)$ – cociente S. Las pruebas se realizaron sólo para estos dos conjuntos de entradas, ya que en líneas generales en las pruebas iniciales fueron con las que se obtuvieron mejores resultados para el cociente S inferido respecto a sus contrapartes experimentales. El total de pruebas de entrenamientos realizadas fue de 592 (ver Tabla 4.1).

B. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS COMPUTACIONAL ENFOCADO EN LA DIVISIÓN OPERACIONAL DE CAMPO

En el entrenamiento de las redes neuronales difusas para los datos experimentales según la división operacional de campo, y para los casos en los que se consideró la totalidad de los datos (100%) y las formaciones Guayabo, León, Carbonera y León – Carbonera, se realizaron las mismas pruebas mostradas en la parte anterior, pero probando sólo con 3 y el máximo de reglas difusas determinadas para cada conjunto de datos. Para estas pruebas, se usó la función de pertenencia óptima: pimf (π membership function). Los entrenamiento sólo se realizaron combinando las entradas de la red para los conjuntos: χ – S y $\log(\chi)$ – S (ver Tabla 4.2). El total de pruebas de entrenamiento realizadas fue de 20.

Divisiones	Combinaciones logarítmicas de los parámetros magnéticos			Cantidad de datos experimentales (*)	Se usaron 3 y 20% de reglas difusas, que corresponde en cada caso a:	Función de pertenencia utilizada (mf: membership function).
	Datos de entrada		Datos inferidos			
Total de los datos	χ	S	S	90	18	pimf
	Log (χ)	S	S	85	17	
Formación Guayabo (0m – 305m)	χ	S	S	52	5	
	Log (χ)	S	S	51	5	
Formación León (305m – 610m)	χ	S	S	23	2	
	Log (χ)	S	S	22	2	
Formación Carbonera (610m – 670m)	χ	S	S	15	2	
	Log (χ)	S	S	12	2	
Formaciones León-Carbonera (305m – 670m)	χ	S	S	38	4	
	Log (χ)	S	S	34	3	

Tabla 4.2. Cantidad de datos experimentales y número de reglas difusas, tanto para toda la profundidad del pozo (considerando las tres formaciones), como para cada formación según la división operacional de campo. (*) La discrepancia entre la cantidad de datos experimentales para una misma división se debe a valores de susceptibilidad magnética cero, por lo que su logaritmo en base 10 no tiene sentido. Estos datos fueron descartados del entrenamiento. En todas las pruebas se utilizó la función de pertenencia pimf, una tolerancia de 0.0 y una salida de tipo lineal híbrida.

En las Figuras 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19, se muestran los resultados del entrenamiento para: La totalidad de los 90 datos experimentales, formación Guayabo, formación León, formación Carbonera y formaciones León – Carbonera, respectivamente, considerando, en todos los casos, los siguientes parámetros: función de pertenencia pimf, entre 2 y 9 reglas difusas (10% de los datos experimentales usados). Estas pruebas se realizaron, inicialmente, para los 4 conjuntos de datos: (a) χ – cociente S, (b) χ – log (cociente S), (c) log (χ) – cociente S y log (χ) – log (cociente S)).

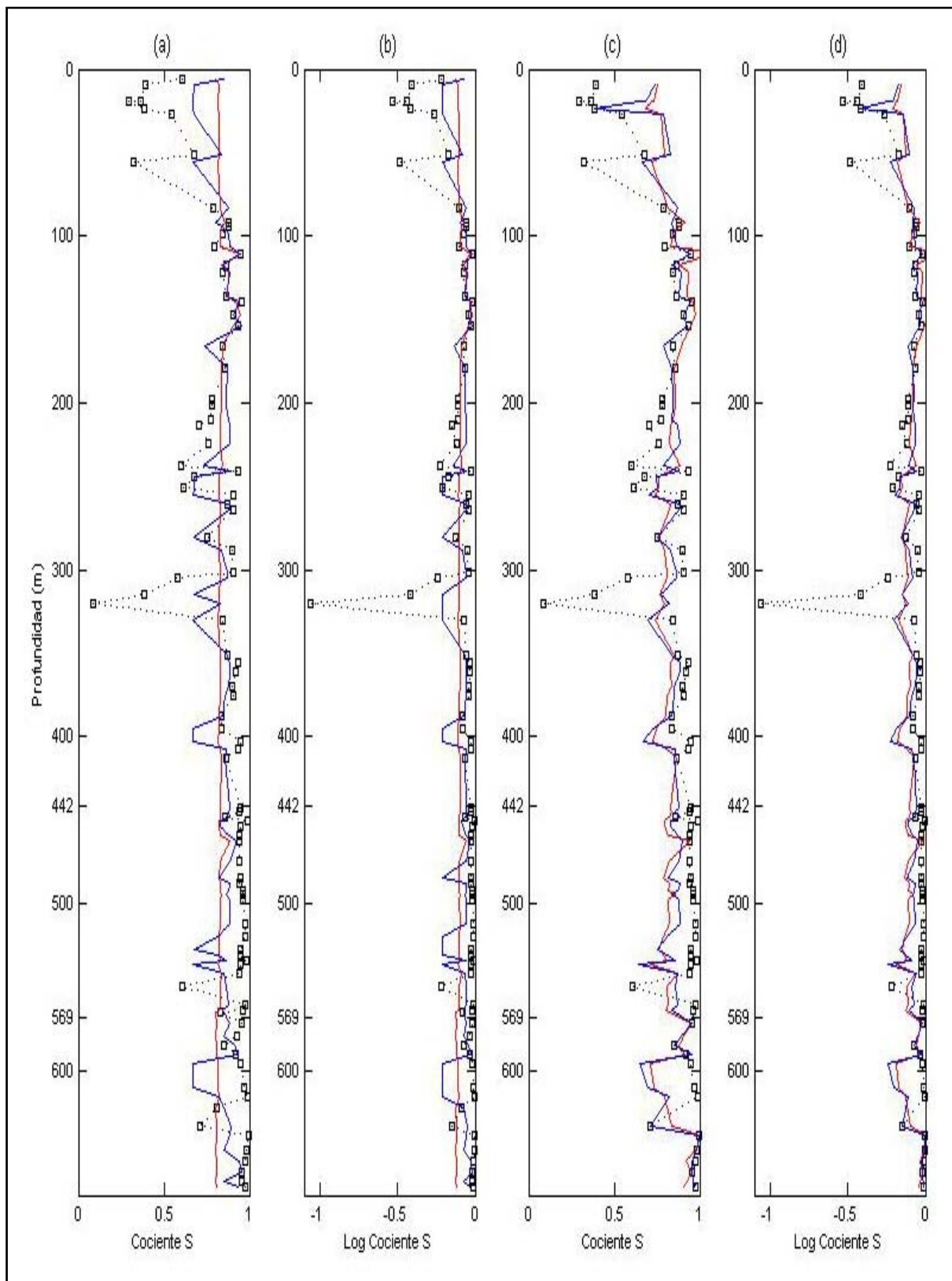


Figura 4.15. Perfil completo (0m – 670m). Representación de datos experimentales (línea negra punteada) del cociente S, en función de la profundidad, según entrenamiento para: (a) $\chi - S$, (b) $\chi - \log(S)$, (c) $\log(\chi) - S$, (d) $\log(\chi) - \log(S)$; así como las inferencias del cociente S, mostradas en líneas continuas, para: 2 (color rojo) y 9 (color azul) reglas difusas.

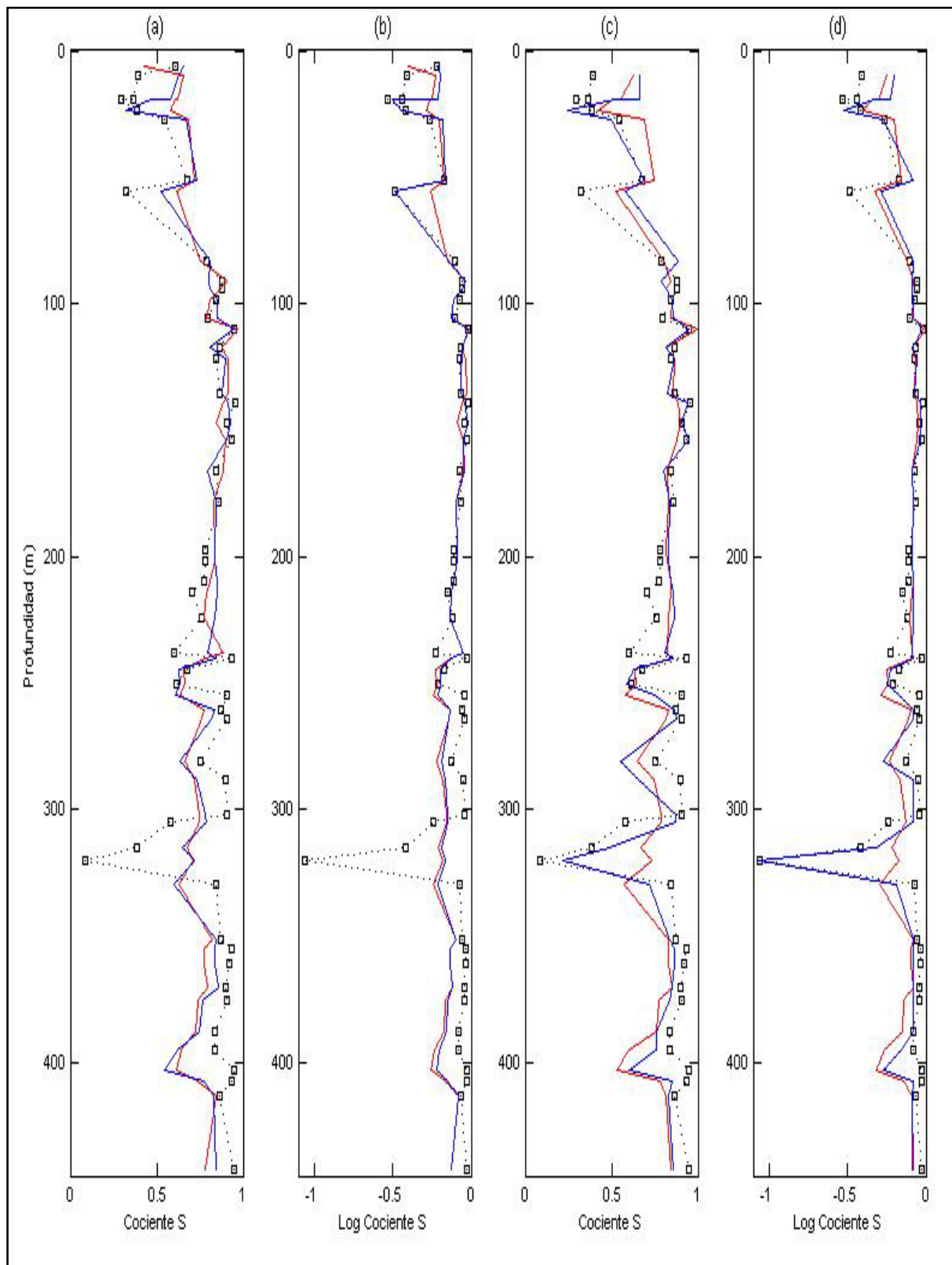


Figura 4.16. Formación Guayabo (0m – 442m). Representación de datos experimentales (línea negra punteada) del cociente S , en función de la profundidad, según entrenamiento para: (a) $\chi - S$, (b) $\chi - \text{Log}(S)$, (c) $\text{Log}(\chi) - S$, (d) $\text{Log}(\chi) - \text{Log}(S)$; así como las inferencias del cociente S , mostradas en líneas continuas, para: 2 (color rojo) y 5 (color azul) reglas difusas.

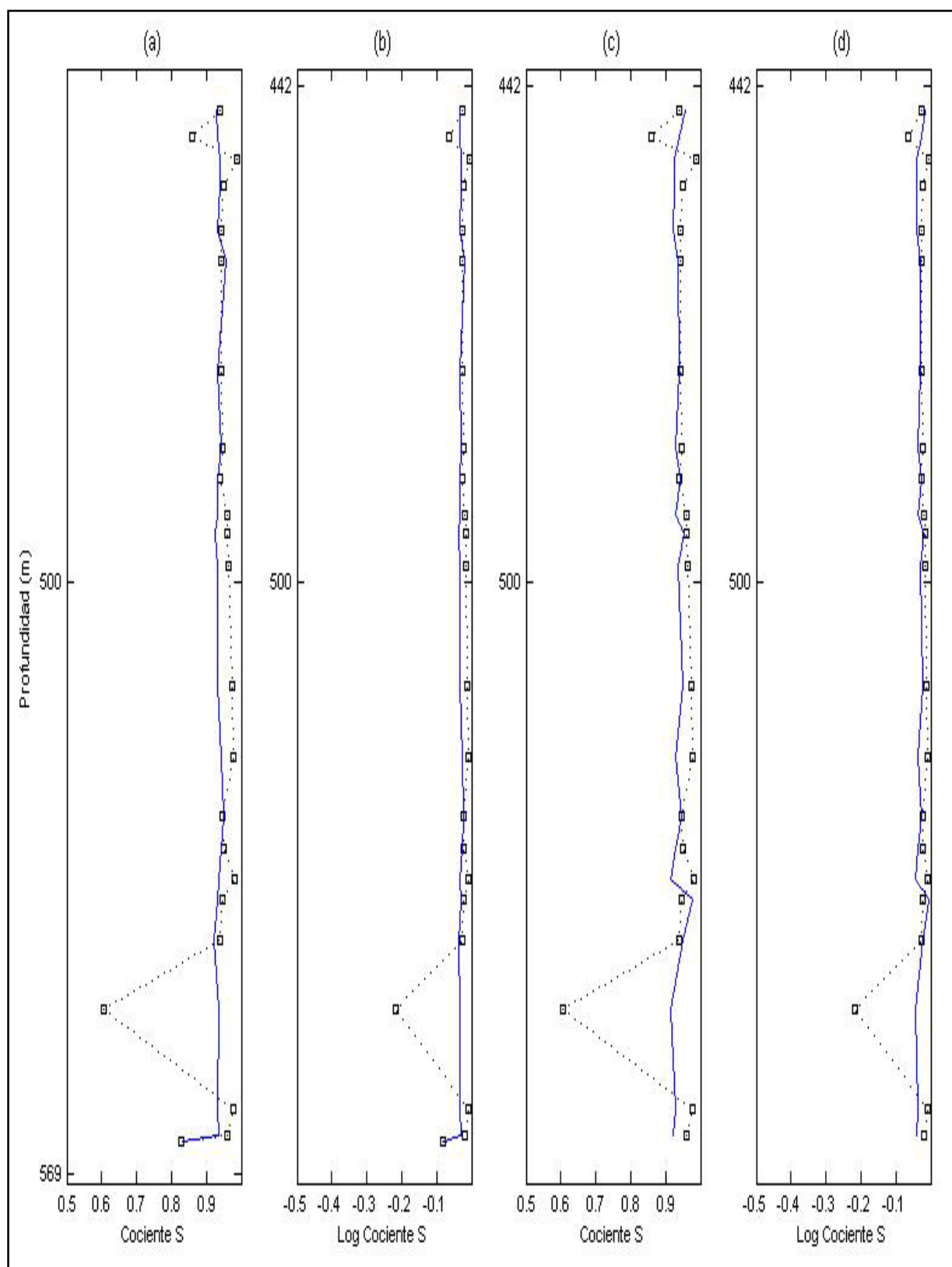


Figura 4.17. Formación León (442m – 569m). Representación de datos experimentales (línea negra punteada) del cociente S , en función de la profundidad, según entrenamiento para: (a) $\chi - S$, (b) $\chi - \text{Log}(S)$, (c) $\text{Log}(\chi) - S$, (d) $\text{Log}(\chi) - \text{Log}(S)$; así como la inferencia del cociente S , mostrada en línea continuas, para 2 (color azul) reglas difusas.

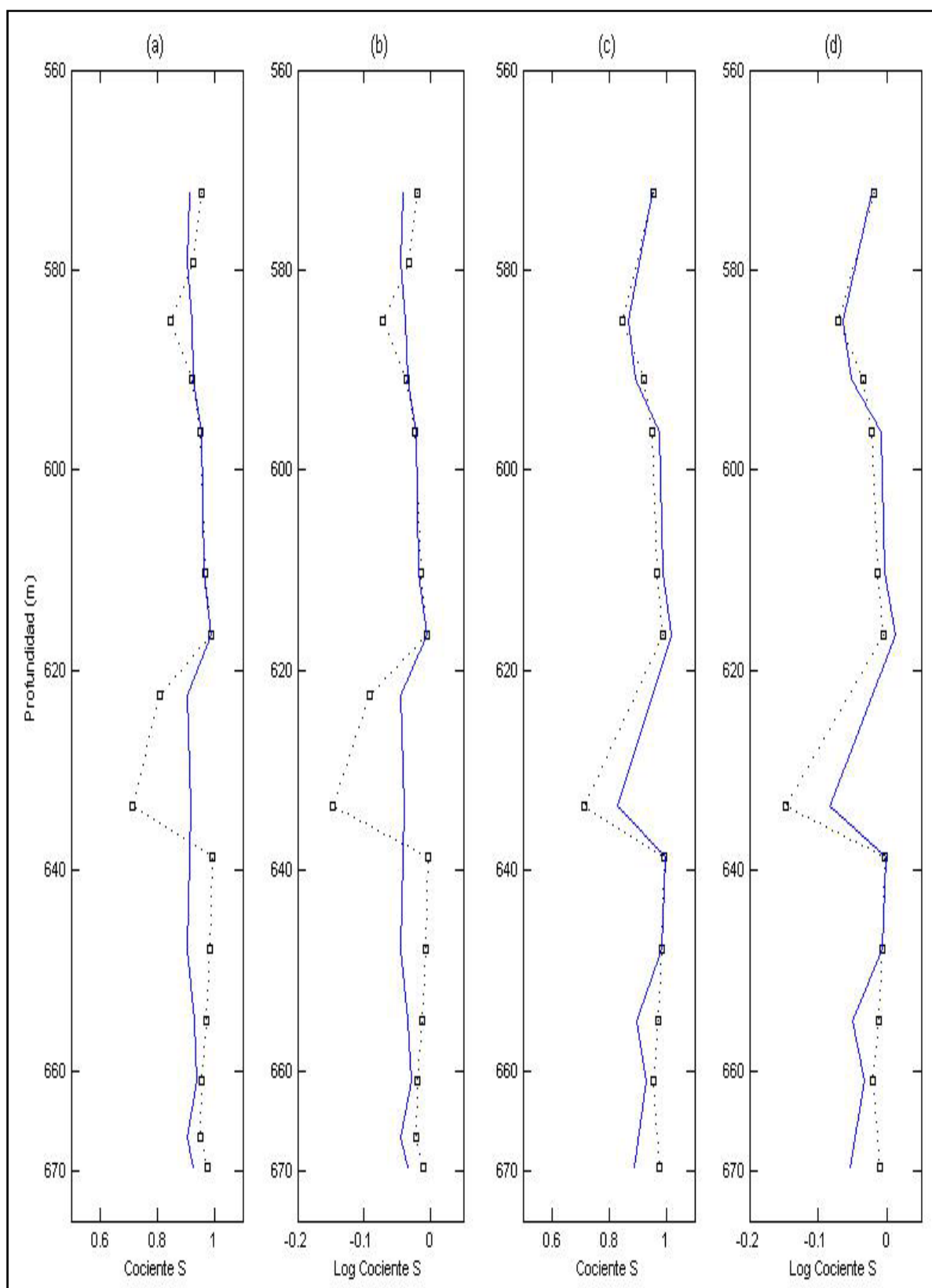


Figura 4.18. Formación Carbonera (569m – 670m). Representación de datos experimentales (línea negra punteada) del cociente S , en función de la profundidad, según entrenamiento para: (a) $\chi - S$, (b) $\chi - \text{Log}(S)$, (c) $\text{Log}(\chi) - S$, (d) $\text{Log}(\chi) - \text{Log}(S)$; así como la inferencia del cociente S , mostrada en línea continuas, para 2 (color azul) reglas difusas.

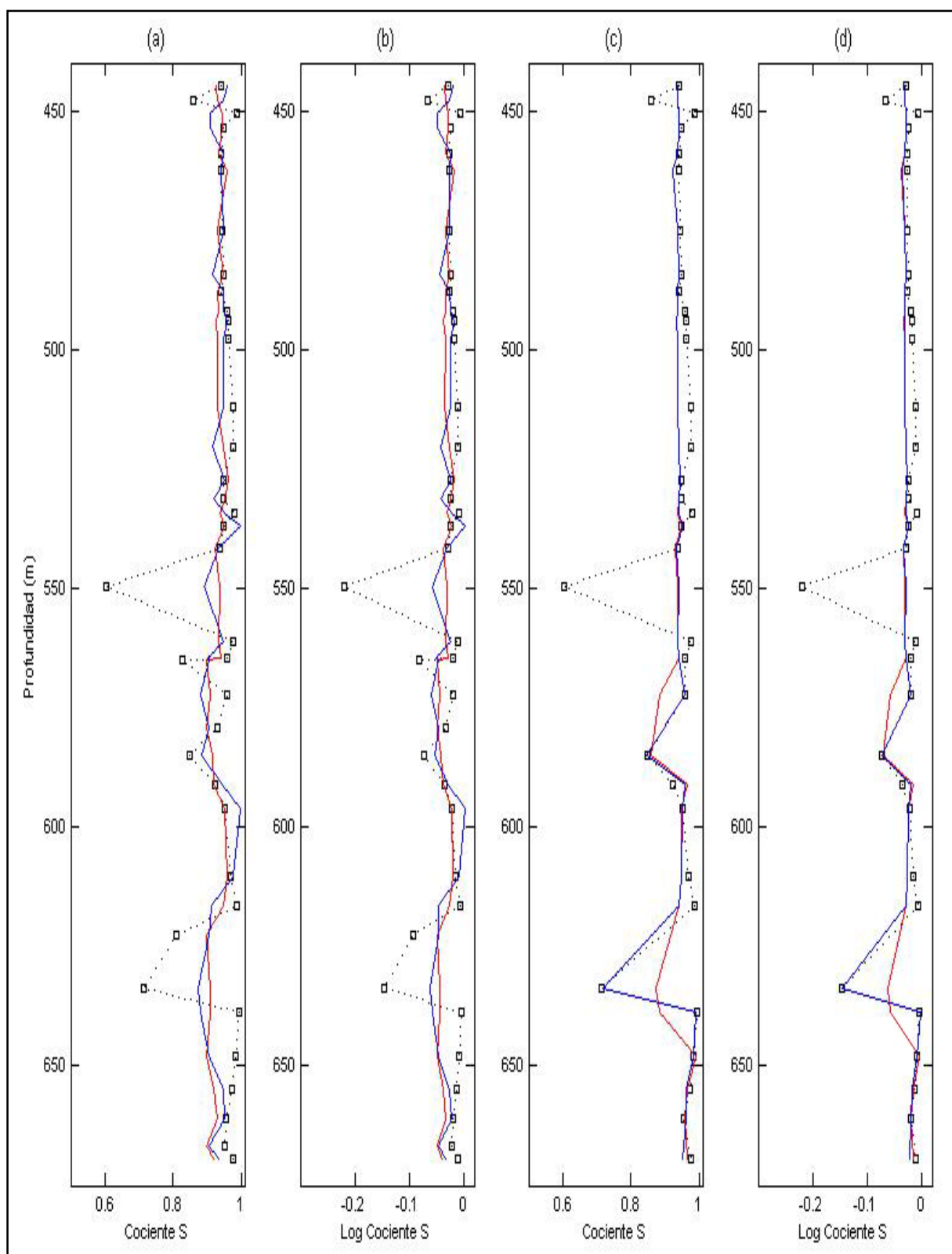


Figura 4.19. Formación León y Carbonera (442 m – 670 m). Representación de datos experimentales (línea negra punteada), así como las inferencias del cociente S (líneas continuas) del cociente S , en función de la profundidad, según entrenamiento para: (a) $\chi - S$, (b) $\chi - \text{Log}(S)$, (c) $\text{Log}(\chi) - S$, (d) $\text{Log}(\chi) - \text{Log}(S)$, para: 2 (color rojo) y 5 (color azul) reglas difusas. Las inferencias del cociente S , según la cantidad de reglas difusas son: (a) y (b) 2 (rojo), 4 (azul); (c) y (d) 2 (rojo) 3 (azul).

C. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS COMPUTACIONAL ENFOCADO EN LAS EDADES GEOLÓGICAS

En el entrenamiento de las redes neuronales difusas para la división según edades geológicas (envolventes transgresivas) para los casos en los que se consideró la totalidad de los datos (100%) y las envolventes transgresivas 1, 2, 3 y 2 – 3, se realizaron las mismas pruebas de entrenamiento mostrados en la parte anterior (división operacional de campo) pero probando con un número de reglas difusas de 3 y un 20% con respecto a la cantidad de datos experimentales usados en cada caso. Para estas pruebas sólo fue usada la función de pertenencia óptima: pimf. Como en los casos anteriores los entrenamiento sólo se realizaron combinando las entradas de la red para los conjuntos: $\chi - S$ y $\log(\chi) - S$ (ver Tabla 4.3). El total de pruebas de entrenamiento realizados fue de 20.

D. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LOS DATOS SELECCIONADOS SEGÚN AMBIENTE NETAMENTE REDUCTOR, USANDO LAS DIVISIONES POR EDADES GEOLÓGICAS

En el entrenamiento de las redes neuronales difusas para la división según ambiente netamente reductor (cociente $S \geq 0.66$) en divisiones por edades geológicas para los casos en los que se consideró la totalidad de los datos (100%) y las envolventes transgresivas 1, 2, 3 y 2 – 3, se realizaron los mismos entrenamientos utilizados para las otras dos divisiones anteriores, probando con un número de reglas difusas de 3 y un 20% con respecto a la cantidad de datos experimentales usados en

cada caso. Para estos entrenamientos sólo fue usada la función de pertenencia pimf. Igual que en los casos anteriores, los entrenamientos sólo se realizaron combinando las entradas de la red para los conjuntos: $\chi - S$ y $\log (\chi) - S$ (ver Tabla 4.4). El total de pruebas de entrenamiento realizados fue de 20.

Divisiones	Combinaciones logarítmicas de los parámetros magnéticos			Cantidad de datos experimentales (*)	Se usaron 3 y 20% de reglas difusas, que corresponde a:	Función de pertenencia utilizada (mf: membership function).
	Datos de entrada		Datos inferidos			
Total de los datos	χ	S	S	90	18	pimf
	$\log (\chi)$	S	S	85	17	
Formación Guayabo (0m – 305m)	χ	S	S	40	8	
	$\log (\chi)$	S	S	39	8	
Formación León (305m – 610m)	χ	S	S	41	8	
	$\log (\chi)$	S	S	41	8	
Formación Carbonera (610m – 670m)	χ	S	S	9	2	
	$\log (\chi)$	S	S	7	2	
Formación es León-Carbonera (305m – 670m)	χ	S	S	50	10	
	$\log (\chi)$	S	S	46	9	

Tabla 4.3. Cantidad de datos experimentales y número de reglas difusas, tanto para toda la profundidad del pozo (considerando las tres formaciones), como para cada formación según la división por edades geológicas (envolventes transgresivas). (*) La discrepancia entre la cantidad de datos experimentales para una misma división se debe a valores de susceptibilidad magnética cero, por lo que su logaritmo en base 10 no tiene sentido. Estos datos fueron descartados del entrenamiento. En todas las pruebas se utilizó la función de pertenencia pimf, una tolerancia de 0.0 y una salida de tipo lineal híbrida.

Divisiones	Combinaciones logarítmicas de los parámetros magnéticos		Cantidad de datos experimentales (*)	Se usaron 3 y 20% de reglas difusas, que corresponde en cada caso a:	Función de pertenencia utilizada (mf: membership function).
	Parámetro a partir del cual se infiere	Parámetro a inferir			
Total de los datos	χ	S	77	15	pimf
	Log (χ)	S	73	15	
Formación Guayabo (0m – 305m)	χ	S	28	6	
	Log (χ)	S	28	6	
Formación León (305m – 610m)	χ	S	39	8	
	Log (χ)	S	37	7	
Formación Carbonera (610m – 670m)	χ	S	10	2	
	Log (χ)	S	8	2	
Formaciones León-Carbonera (305m – 670m)	χ	S	49	10	
	Log (χ)	S	45	9	

Tabla 4.4 Cantidad de datos experimentales y número de reglas difusas, tanto para toda la profundidad del pozo (considerando las tres formaciones), como para cada formación según la división por ambiente reductor ($S \geq 0.66$) y edades geológicas (envolventes transgresivas). (*) La discrepancia entre la cantidad de datos experimentales para una misma división se debe a valores de susceptibilidad magnética cero, por lo que su logaritmo en base 10 no tiene sentido. Estos datos fueron descartados del entrenamiento. En todas las pruebas se utilizó la función de pertenencia pimf, una tolerancia de 0.0 y una salida de tipo lineal híbrida.

CAPITULO V

RESULTADOS EXPERIMENTALES

I. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) Y DEL COCIENTE S (S)

Los resultados experimentales obtenidos de la medición de la susceptibilidad magnética y del cociente S, en función de la profundidad de las muestras del pozo Saltarín 1A (Cuenca Sedimentaria de los Llanos Orientales, Colombia) se presentan gráficamente en la Figura 5.1 (ver también Anexo 1).

Los valores experimentales de la susceptibilidad magnética se obtuvieron de mediciones a temperatura ambiente para cada una de las 134 muestras. Estos valores se presentan en el sistema SI. El perfil de susceptibilidad magnética en función de la profundidad de la Figura 5.1 (a), muestra regiones anómalas de mayor χ , que pueden estar asociadas a la presencia de minerales magnéticos primarios y contrastes litológicos (anomalías tipo B), así como a una zona reductora (anomalía tipo A) con minerales magnéticos autigénicos secundarios, inducida por el yacimiento de hidrocarburo subyacente (Costanzo Alvares et al. 2000).

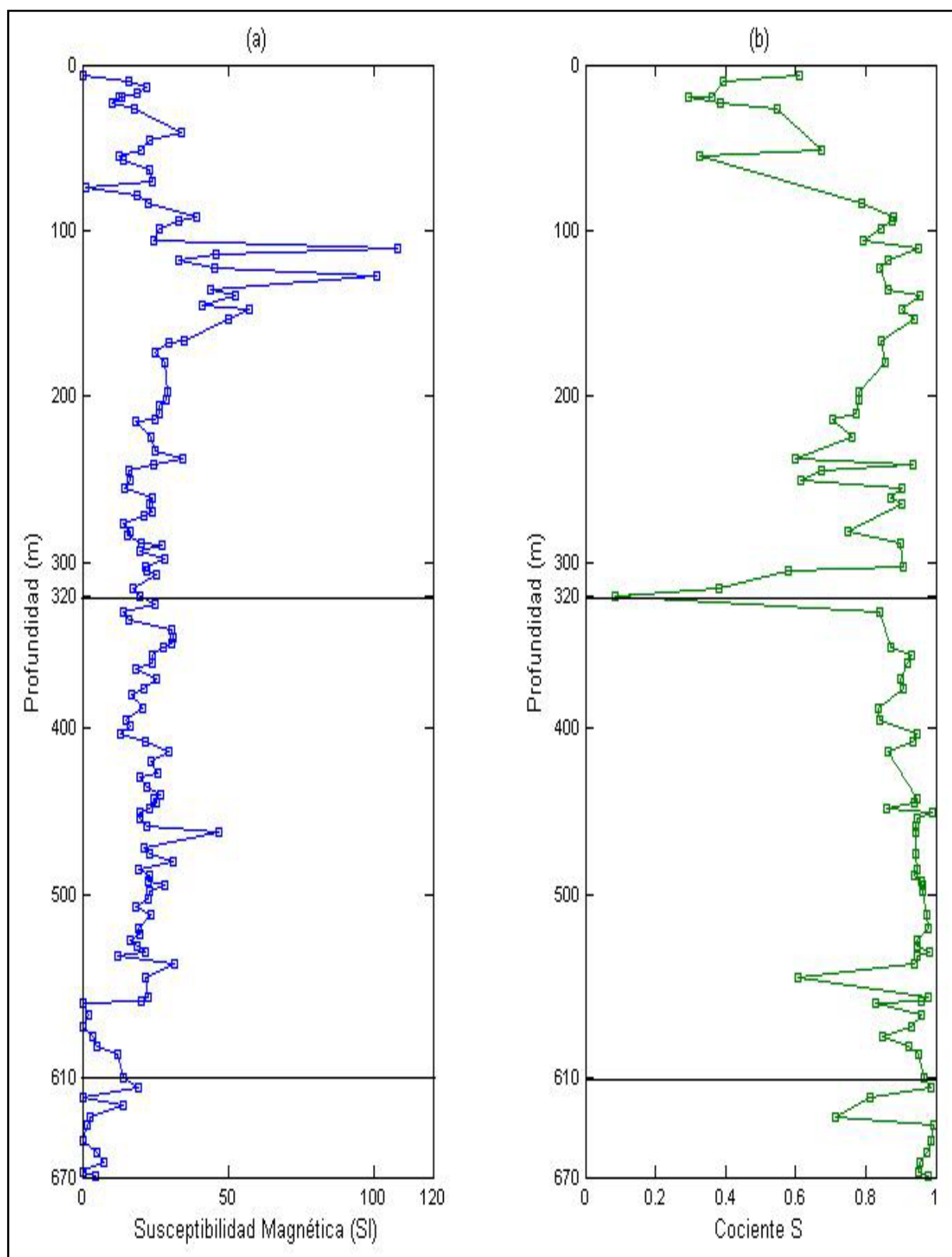


Figura 5.1. Valores experimentales (en unidades de SI) versus profundidad, para las mediciones en el Pozo Saltaín 1A (0 m – 670 m) de: (a) Susceptibilidad Magnética, (b) Cociente S.

Nota: La profundidad de 305 m, corresponde a la base de la primera envolvente transgresiva, pero en la gráfica y en todo el análisis posterior de los datos experimentales se considerará como la base de la envolvente transgresiva 1 a 320 m, con la finalidad de incluir en dicha envolvente, el máximo o anomalía que se observa a dicha profundidad en el perfil del cociente S.

En los perfiles de susceptibilidad magnética y cociente S que se muestran en la Figura 5.1 (a) y 5.1 (b), respectivamente, se indica la división por edades geológicas (envolventes transgresivas), la cual se basa en dos edades referenciales suministradas por el Dr. Carlos Jaramillo, del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales en Panamá. Estas edades bioestratigráficas ubican el tope del Mioceno Medio a aproximadamente 305 metros de profundidad y el tope del Mioceno Inferior a aproximadamente 610 metros de profundidad, lo cual divide a la profundidad total del pozo (aproximadamente 670 m) en tres (3) diferentes áreas llamadas envolventes transgresivas, lo cual es explicado en el Capítulo III. La formación Carbonera no finaliza a los 670 m, ésta continúa a mayores profundidades. Sin embargo, sólo se tienen muestras hasta la profundidad de 670 m.

Referente al perfil del cociente S, el cual es un parámetro que permite distinguir minerales magnéticos de alta coercitividad de los de baja coercitividad, se puede observar que predominan las fases magnéticas de baja coercitividad, ya que más del 80% de las muestras presenta un valor de cociente S mayor a 0.66 (valores de S de 1 o cercanos a 1 señalan la existencia de minerales de baja coercitividad, y valores de 0 o cercanos a 0 indican minerales de alta coercitividad).

II. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) Y ESPECTROMETRÍA DE RAYOS X POR DIFRACCIÓN DE ELECTRONES SECUNDARIOS (EDX)

Los estudios del SEM y EDX Para los estudios de microscopia electrónica de barrido y espectrometría por dispersión de rayos X por dispersión de electrones secundarios (EDX), se analizaron nueve (9) muestras (Tabla 5.1), usando el criterio de selección de tomar las muestras en los niveles anómalos más conspicuos presentes en las tres formaciones geológicas estudiadas.

Muestra	Profundidad (m)	Formación	Susceptibilidad Magnética, χ (SI)	Cociente S
1	110.37	Guayabo	107.69	0.95
2	127.40	Guayabo	100.81	No se realizó medida
3	139.31	Guayabo	52.39	0.96
4	147.25	Guayabo	57.10	0.90
5	462.43	León	46.60	0.94
6	479.55	León	31.17	No se realizó medida
7	541.75	León	31.44	0.94
8	616.48	Carbonera	19.52	0.99
9	627.36	Carbonera	14.04	No se realizó medida

Tabla 5.1. Muestras analizadas con microscopia electrónica de barrido y espectrometría por dispersión de electrones secundarios.

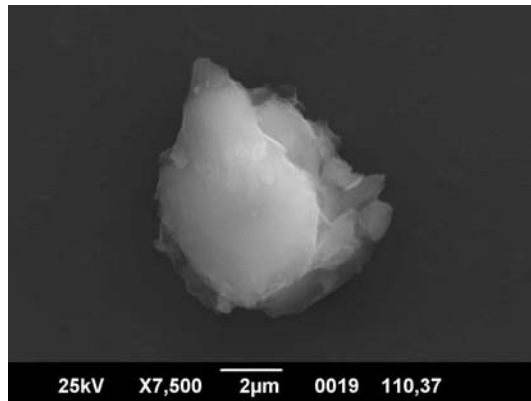
Las fotomicrografías SEM (imágenes topográficas de electrones secundarios), las cuales se muestran en las páginas siguientes, demuestran la presencia de minerales submicrónicos, los cuales fueron separados magnéticamente de las muestras originales.

Este estudio de SEM fue realizado a los siguientes niveles de profundidad: 110,37 m, 127,40 m, 139,31 m, 147,27 m, 462,43 m, 479,75 m, 541,75 m, 616,48 m y

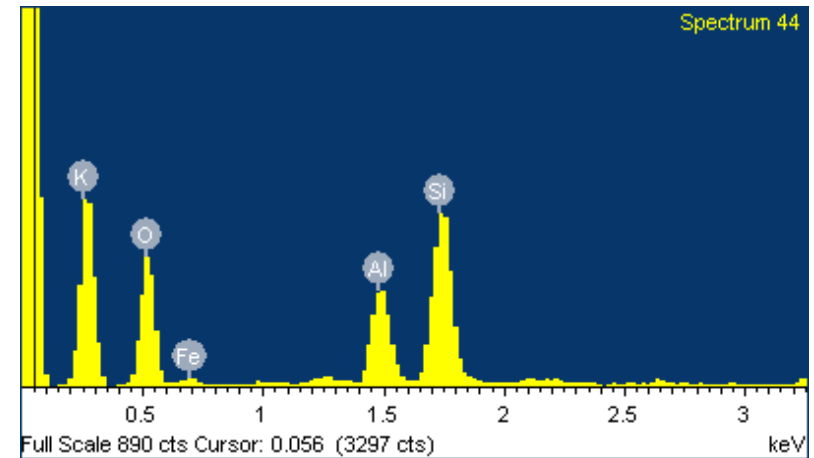
627,36 m. Los espectros de dispersión de rayos X (EDX) presentan, para la mayoría de los casos, cantidades variables de Fe y S, lo que sugiere que algunos de estos minerales podrían ser sulfuros de hierro. Los sulfuros de hierro han sido previamente reportados en ambientes marinos de sedimentación netamente reductores (Robert y Turner, 1993; Foley et al, 2001 y Viglioti et al, 1999, entre otros). Estos ambientes de sedimentación suelen tener una alta producción de materia orgánica junto con la lenta circulación de agua de fondo.

Los framboides que se observan a los niveles de profundidad 127,40 m y 147,27 m (Figuras 5.4 y 5.6, respectivamente), están compuestos por cristales magnéticos submicrónicos, siendo muy posiblemente productos autigénicos de un ambiente reductor inducido por el yacimiento subyacente (Aldana et al, 1999 y 2003; Costanzo Alvarez, et al., 2006; Díaz et al., 2006 y 2000, entre otros). Más aún, estos framboides podrían ser los responsables de los elevados valores de susceptibilidad magnética en las anomalías de 127,40 m y 147,27 m. A continuación se muestran los resultados de la aplicación de la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectrometría de Rayos X (EDX) a las muestras del pozo seleccionadas.

Figura 5.2 Muestra: 110.37 m (a), $\chi = 107.69$, Cociente S = 0.95.



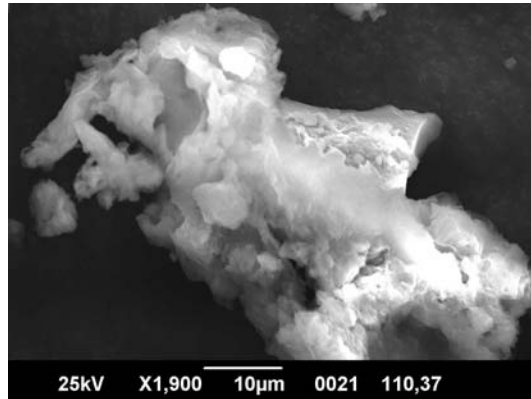
Fotomicrografía.



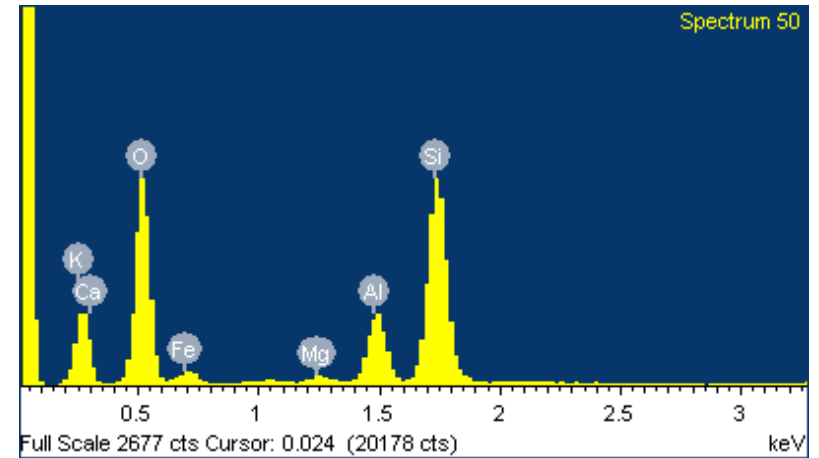
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	51.46	68.65
Al	Al ₂ O ₃	10.70	8.47
Si	SiO ₂	21.23	16.14
K	Feldespato	2.41	1.32
Fe	Fe	14.19	5.42
Total		100	

Figura 5.3 Muestra: 110.37 m (b), $\chi = 107.69$, Cociente S = 0.95.



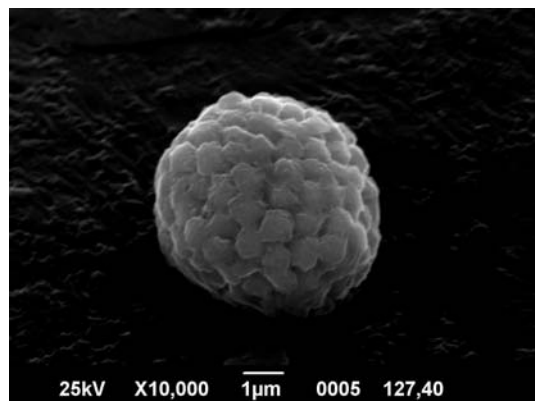
Fotomicrografía.



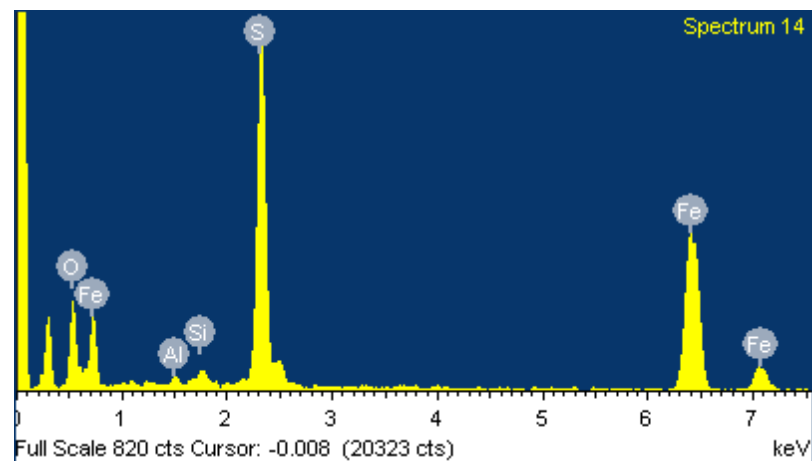
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	61.89	75.96
Mg	MgO	0.86	0.70
Al	Al ₂ O ₃	7.02	5.11
Si	SiO ₂	21.57	15.08
K	Feldespato	0.43	0.22
Ca	Wollastonita	0.33	0.16
Fe	Fe	7.90	2.78
	Total	100	

Figura 5.4 Muestra: 127.40 m, $\chi = 100.81$, Cociente S = No se realizó medida.



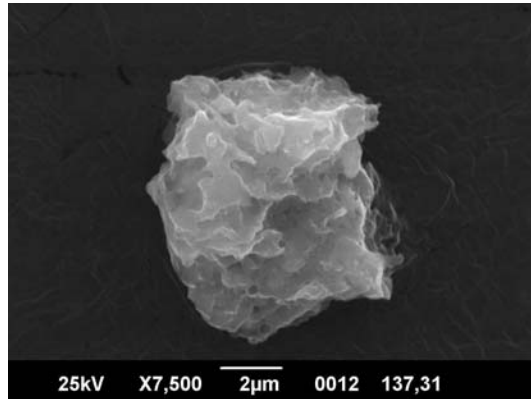
Fotomicrografía.



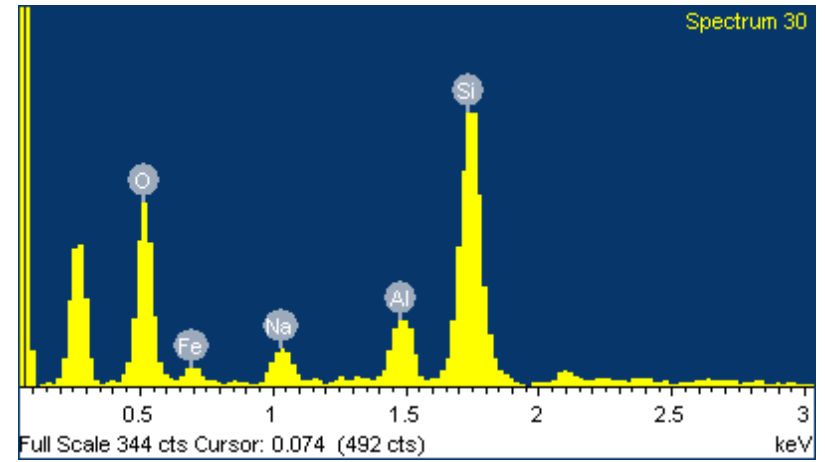
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	33.32	56.35
Al	Al ₂ O ₃	0.95	0.95
Si	SiO ₂	0.98	0.94
S	FeS ₂	28.88	24.37
Fe	Fe	33.87	17.38
Total		100	

Figura 5.5 Muestra: 139.31 m, $\chi = 52.39$, Cociente S = 0.96.



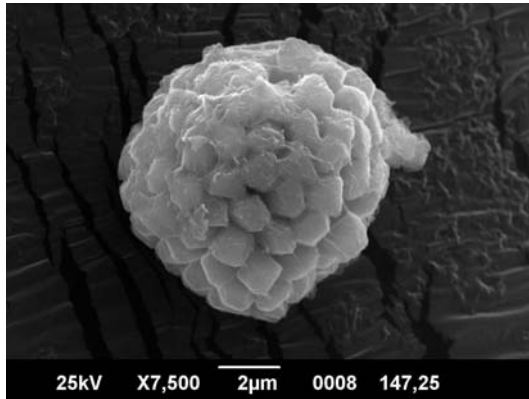
Fotomicrografía.



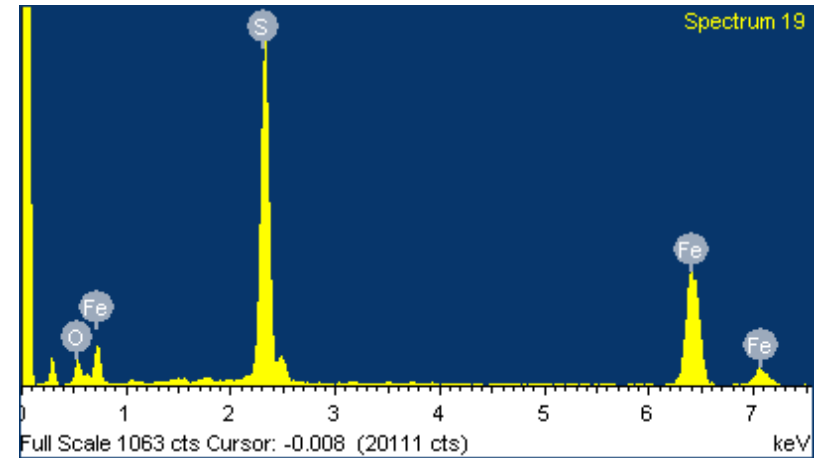
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	51.36	66.93
Na	Albita	6.27	5.69
Al	Al ₂ O ₃	6.22	4.81
Si	SiO ₂	24.62	18.27
Fe	Fe	11.53	4.30
Total		100	

Figura 5.6 Muestra: 147.25 m (a), $\chi = 57.10$, Cociente S = 0.90.



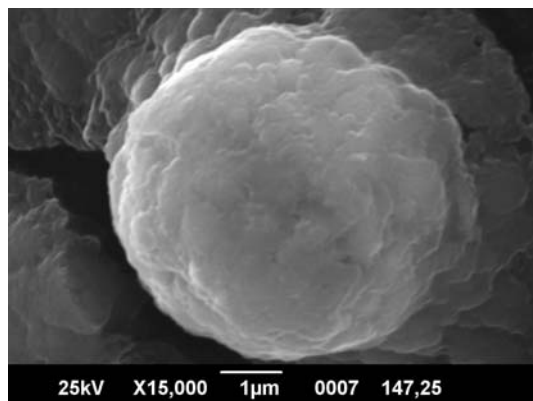
Fotomicrografía.



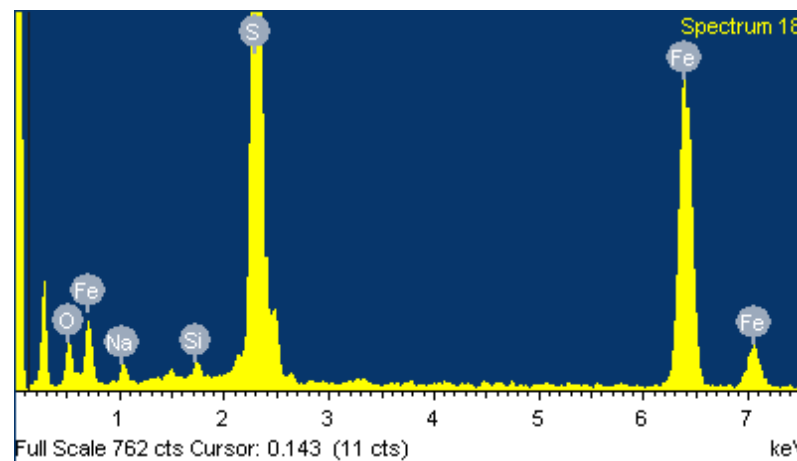
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	18.60	36.71
S	FeS ₂	41.18	40.55
Fe	Fe	40.21	22.73
Total		100	

Figura 5.7 Muestra: 147.25 m (b), $\chi = 57.10$, Cociente S = 0.90.



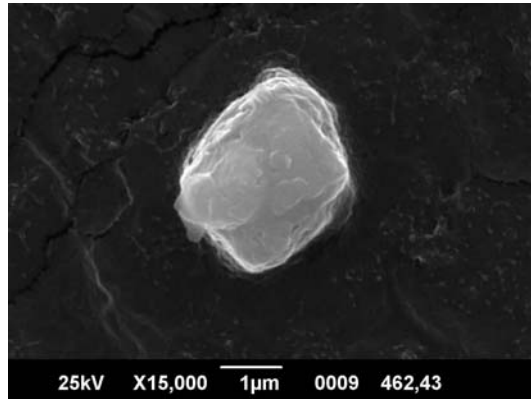
Fotomicrografía.



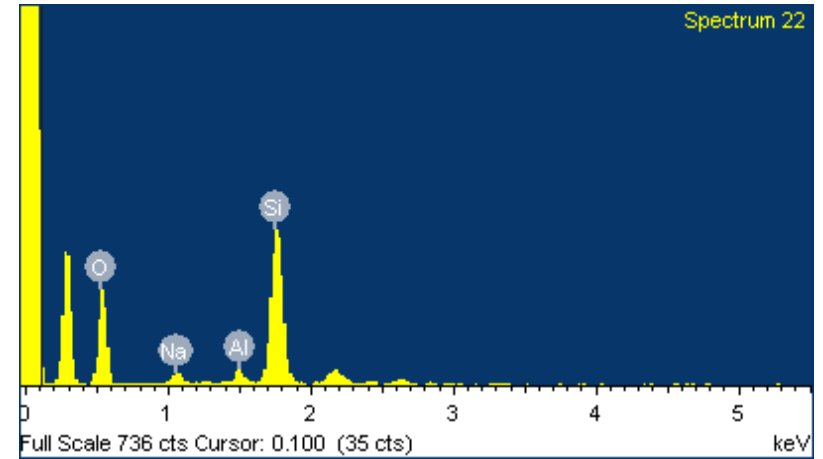
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	13.97	28.41
Na	Albita	2.14	3.03
Si	SiO ₃	0.82	0.95
S	FeS ₂	44.52	45.17
Fe	Fe	38.54	22.45
Total		100	

Figura 5.8 Muestra: 462.43 m, $\chi = 46.60$, Cociente S = 0.94.



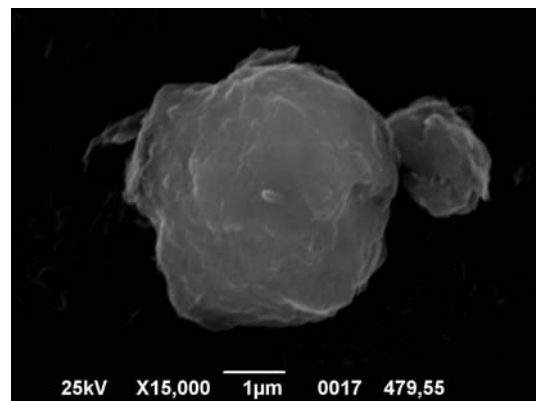
Fotomicrografía.



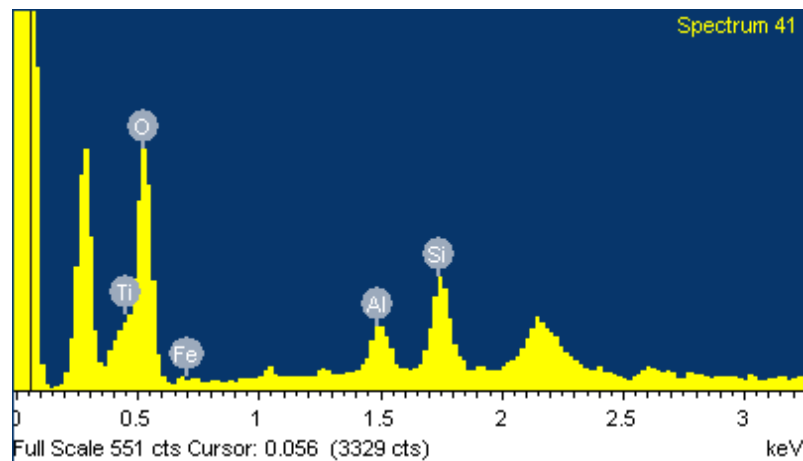
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	63.46	74.77
Na	Albita	4.28	3.51
Al	Al ₂ O ₃	2.31	1.62
Si	SiO ₂	29.95	20.10
Total		100	

Figura 5.9 Muestra: 479.55 m (a), $\chi = 31.17$, Cociente S = No se realizó medida.



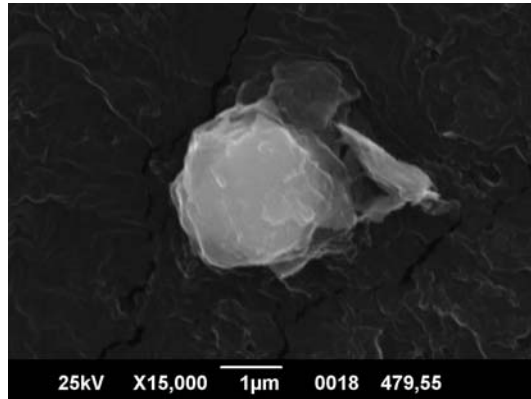
Fotomicrografía.



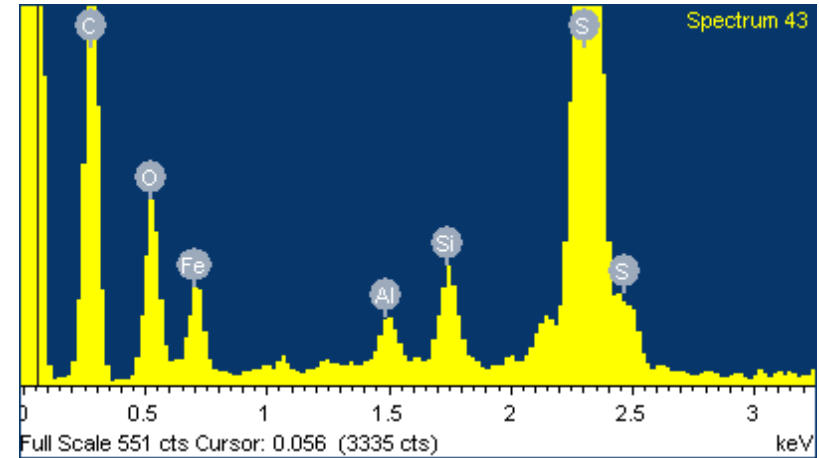
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	57.73	79.32
Al	Al ₂ O ₃	1.46	1.19
Si	SiO ₃	2.53	1.98
Ti	Ti	37.35	17.14
Fe	Fe	0.93	0.37
Total		100	

Figura 5.10 Muestra: 479.55 m (b), $\chi = 31.17$, Cociente S = No se realizó medida.



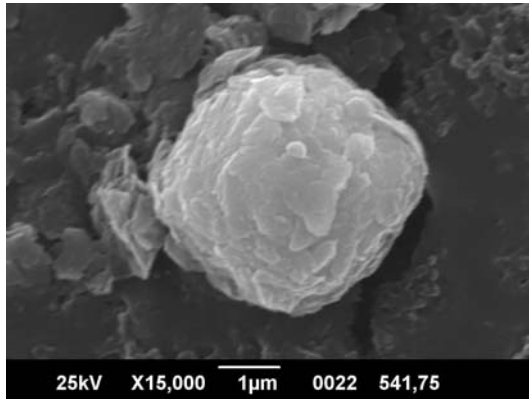
Fotomicrografía.



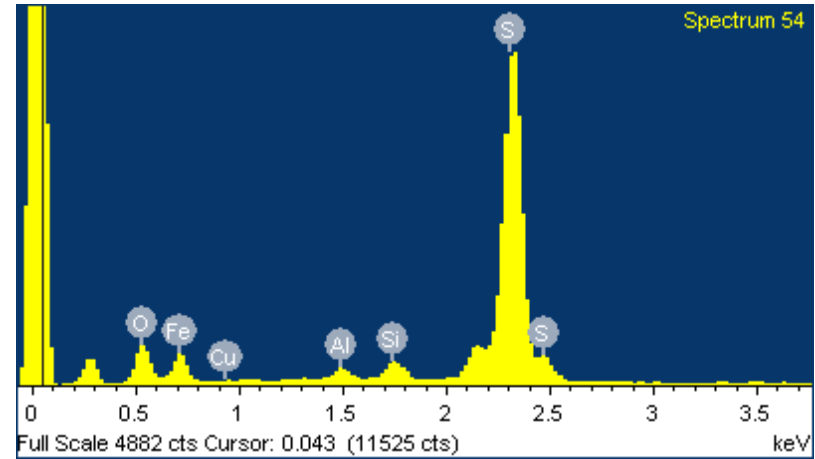
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
C	CaCO ₃	55.74	71.66
O	SiO ₂	19.41	18.74
Al	Al ₂ O ₃	0.49	0.28
Si	SiO ₂	0.92	0.51
S	FeS ₂	11.39	5.48
Fe	Fe	12.04	3.33
Total		100	

Figura 5.11 Muestra: 541.75 m, $\chi = 31.44$, Cociente S = 0.94.



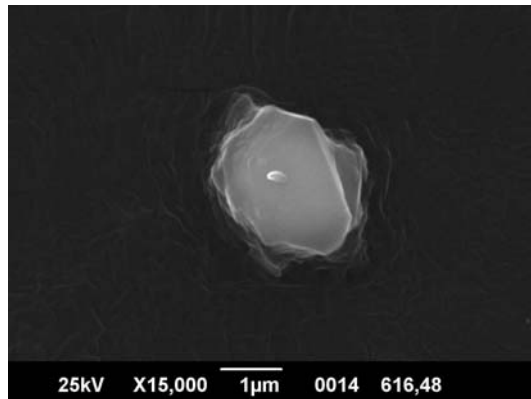
Fotomicrografía.



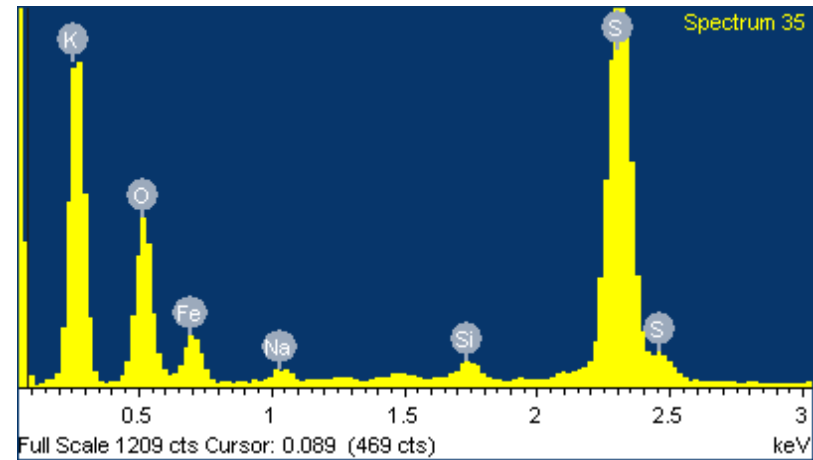
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	25.58	45.84
Al	Al ₂ O ₃	1.66	1.76
Si	SiO ₂	2.21	2.25
S	FeS ₂	36.67	32.80
Fe	Fe	33.08	16.99
Cu	Cu	0.80	0.36
Total		100	

Figura 5.12 Muestra: 616.48 m (a), $\chi = 19.52$, Cociente S = 0.99.



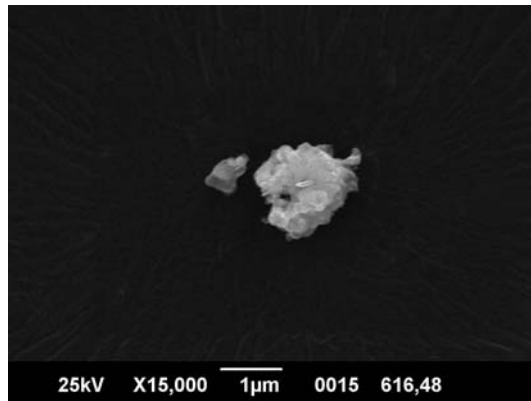
Fotomicrografía.



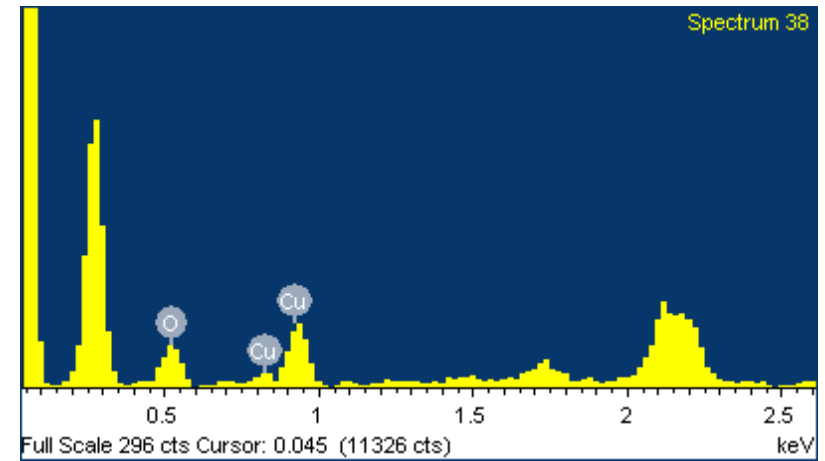
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	44.22	66.12
Na	Albita	2.07	2.15
Si	SiO ₂	1.21	1.03
S	FeS ₂	25.26	18.84
K	Feldespato	0.97	0.60
Fe	Fe	26.28	11.26
Total		100	

Figura 5.13 Muestra: 616.48 m (b), $\chi = 19.52$, Cociente S = 0.99.



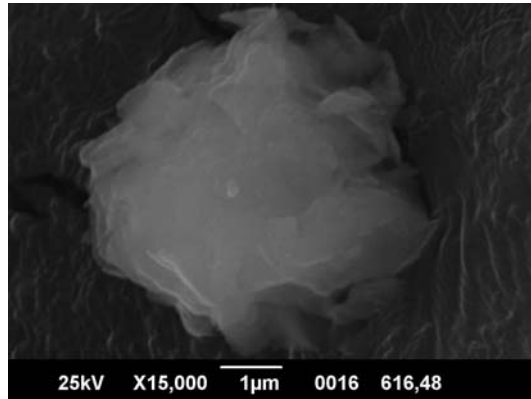
Fotomicrografía.



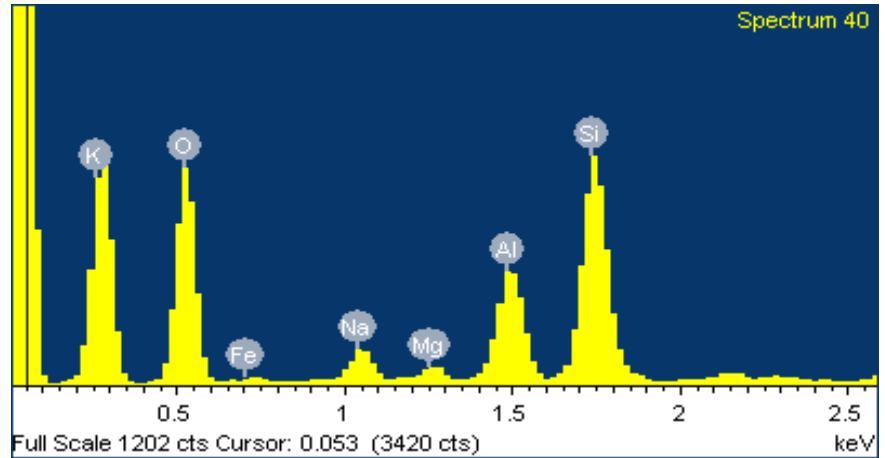
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	43.01	74.98
Cu	Cu	56.99	25.02
Total		100	

Figura 5.14 Muestra: 616.48 m (c), $\chi = 19.52$, Cociente S = 0.99.



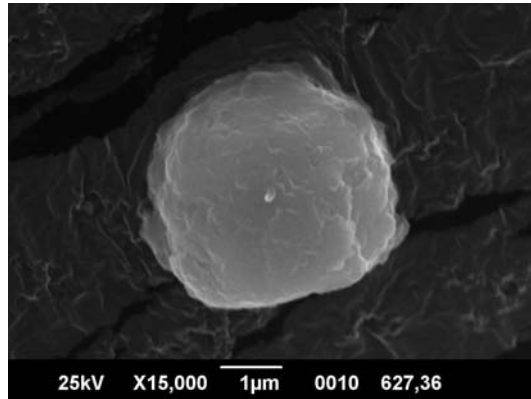
Fotomicrografía.



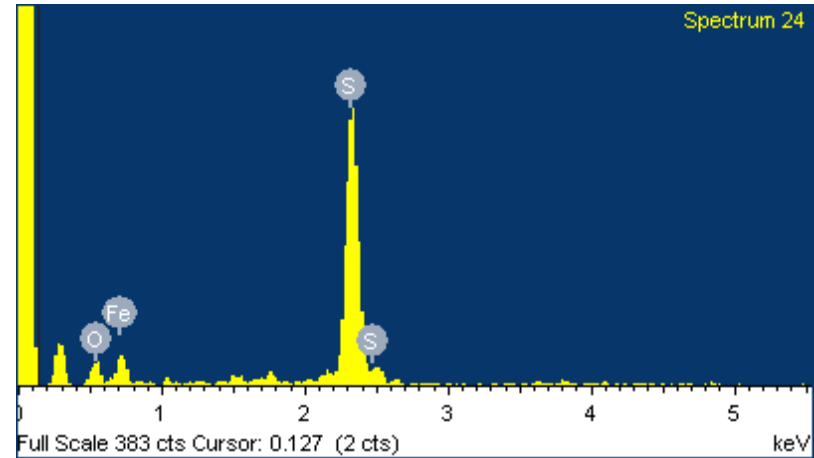
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	59.28	72.16
Na	Albita	4.94	4.18
Mg	MgO	1.35	1.08
Al	Al ₂ O ₃	9.35	6.75
Si	SiO ₂	19.63	13.61
K	Feldespato	2.15	1.07
Fe	Fe	3.30	1.15
Total		100	

Figura 5.15 Muestra: 627.36 m (a), $\chi = 14.04$, Cociente S = No se realizó medida.



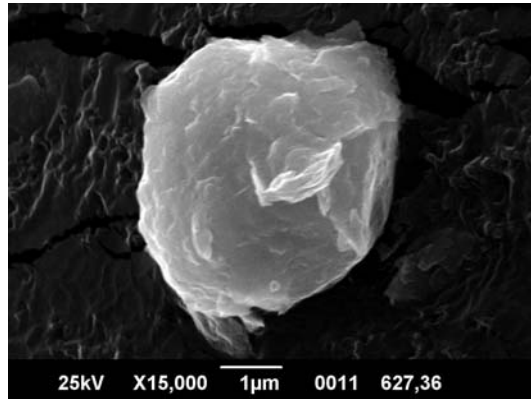
Fotomicrografía.



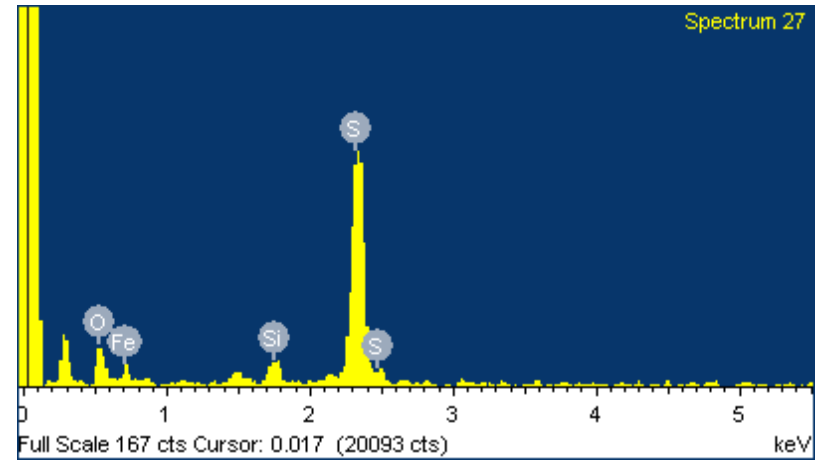
Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	22.49	42.25
S	FeS ₂	40.19	37.67
Fe	Fe	37.32	20.08
	Total	100	

Figura 5.16 Muestra: 627.36 m (b), $\chi = 14.04$, Cociente S = No se realizó medida.



Fotomicrografía.



Espectro de rayos X por difracción de electrones secundarios.

Estándar:	Compuesto químico:	% del peso:	% atómico:
O	SiO ₂	31.02	52.52
Si	SiO ₂	3.69	3.56
S	FeS ₂	34.06	28.77
Fe	Fe	31.23	15.15
Total		100	

III. CONCLUSIONES DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se mencionan algunas de las conclusiones a resaltar de este capítulo:

- El cociente S es una relación comparativa de coercividades magnéticas que mide indirectamente la cantidad de hematita sobre la cantidad de magnetita en una muestra de roca (el cociente S permite distinguir entre minerales magnéticos de alta y baja coercitividad presentes en una misma muestra). Para el pozo Saltarín 1A, en promedio, los valores de cociente S son relativamente altos, es decir, para el total de las muestras medidas, un 86% de ellas poseen un cociente $S \geq 0.66$ (ambiente reductor).
- Los estudios de EDX (Energy Dispersive X Ray Spectroscopy), realizados en 9 de las 134 muestras, indican la presencia de Fe en algunos de los minerales submicrónicos de las fracciones magnéticas utilizadas. La existencia de estos minerales submicrónicos podrían ser la causa de las anomalías (máximos), en los perfiles de la susceptibilidad magnética.
- La mayoría de las muestras a las cuales se le realizó el EDX, parecen presentar minerales magnéticos primarios (formas no framboidales típicas de procesos autigénicos), a excepción de los niveles de 127,40 m y 147,25 m.
- De las mediciones de susceptibilidad magnética, de cociente S y SEM (Scanning Electron Microscopy), pudimos deducir que, en las muestras del pozo Saltarín 1A existe una mezcla de variedades mineralógicas de alta y baja coercitividad con predominancia de minerales de baja coercitividad.

- Los análisis de EDX permitieron encontrar diferentes elementos presentes en estos minerales tales como: silicio (Si), azufre (S), cobre (Cu), aluminio (Al), entre otros.
- En el proceso de separación magnética de las muestras estudiadas para SEM y EDX, se encontró una alta concentración de minerales magnéticos, principalmente en las muestras correspondientes a valores altos de susceptibilidad magnética, lo cual resulta razonable.
- El ruido experimental de las mediciones del cociente S fue el mínimo posible, ya que ellas se llevaron a cabo en el 2G Enterprises cryogenic magnetometer de Edimburgo, el cuál posee una sensibilidad de 10^{-11} A/m, la cual es una sensibilidad baja comparada con otros equipos de medición.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS COMPUTACIONALES

I. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL CONTEXTO DEL MARCO GEOLÓGICO

A continuación mostramos los resultados obtenidos para cada una de las divisiones que hemos estudiado a lo largo del trabajo como lo son: (A) División Operacional de Campo, (B) División por Edades Geológicas, y (C) División por Ambiente Reductor, sobre las diferentes envolventes transgresivas.

Con la finalidad de escoger el conjunto de datos de entrada adecuado para las diferentes divisiones seleccionadas, utilizamos gráficos cruzados de valores inferidos versus valores experimentales, de cociente S. A continuación, mostramos algunos de esos resultados (para más detalles ver Anexos 3, 4 y 5).

A.RESULTADOS PARA LOS DATOS SELECCIONADOS SEGÚN LA DIVISIÓN OPERACIONAL DE CAMPO

Las formaciones consideradas en la división operacional de campo están divididas en profundidad de la siguiente manera:

	Tope (m)	Base (m)
Toda la profundidad	0	670
Guayabo	0	442
León	442	569
Carbonera	569	670
León y Carbonera	442	670

Tabla 6.1. Valores en profundidad según la división operacional de campo.

1) POZO COMPLETO (0 m – 670 m)

En la Figura 6.1 se muestran dos gráficas cruzadas de cociente S inferido, usando el modelo simple ($\chi - S$), versus cociente S experimental (Figura 6.1 (a)), así como el cociente S inferido usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental (Figura 6.1 (b)) para todos los datos del pozo:

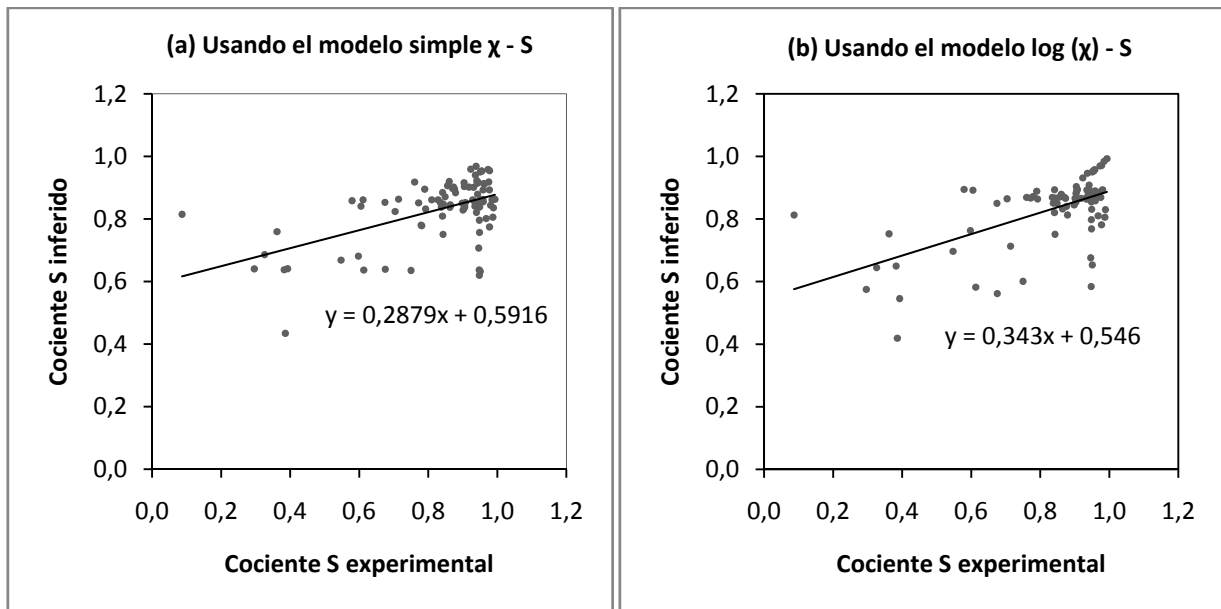


Figura 6.1. Todo el pozo (0m – 670m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.

Comparando las pendientes de las líneas de tendencia de las Figuras 6.1 (a) y 6.1 (b) se puede observar que ambos valores son parecidos, sin embargo en la Figura 6.1 (b) la pendiente se acerca un poco más a 1, por lo que decidimos utilizar el conjunto de datos $\log(\chi) -$ cociente S como el conjunto de datos de entrada apropiados para inferir el pozo completo, aunque la diferencia es apenas del 5%.

2) FORMACIÓN GUAYABO (0 m – 442 m)

El comportamiento del cociente S inferido, a partir del modelo simple (χ – cociente S), versus cociente S experimental para esta formación, es mostrado en la Figura 6.2 (a), así mismo, en la Figura 6.2 (b) podemos observar el comportamiento del cociente S inferido, a partir del modelo semi-log ($\log(\chi)$ – cociente S), versus cociente S experimental, para la formación Guayabo:

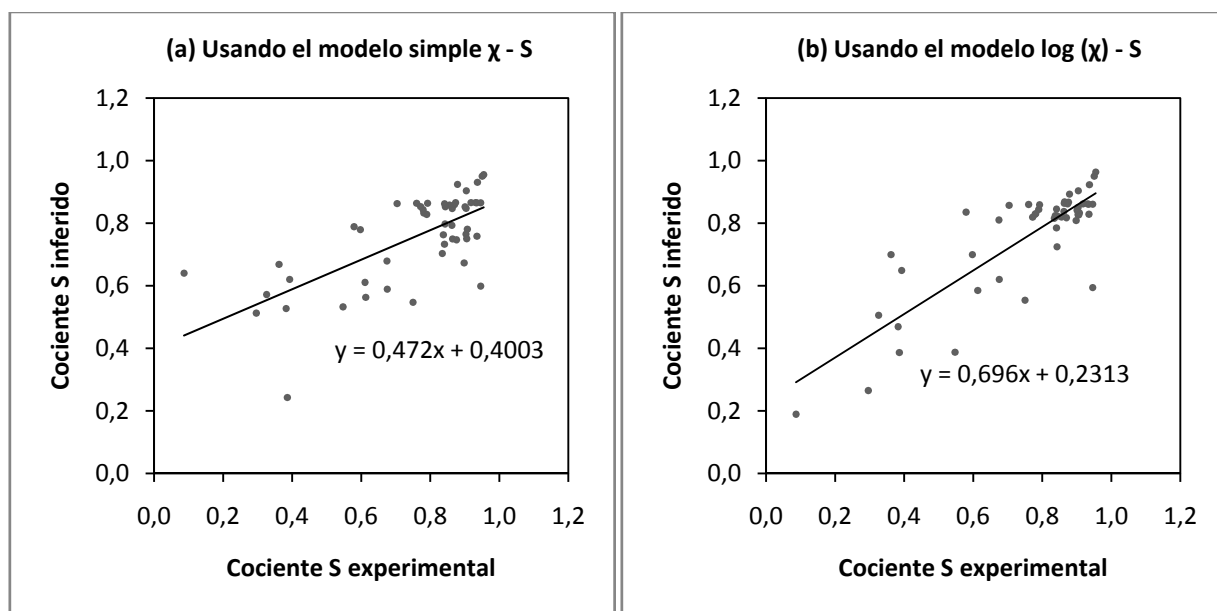


Figura 6.2. Formación Guayabo (0m – 442m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple (χ – S), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi)$ – S), versus cociente S experimental.

A diferencia de los resultados obtenidos con el perfil completo, la formación Guayabo presenta una clara mejoría (de un 20%) al utilizar, como datos de entrada para alimentar a la red, el modelos semi-log ($\log(\chi)$ – cociente S).

3) FORMACIÓN LEÓN (442 m – 569 m)

Con los resultados obtenidos en la formación León (ver Figura 6.3 (a) y 6.3 (b)) no podemos llegar a ninguna conclusión, ya que ambos modelos tienen un porcentaje de inferencia bajo (menor del 30%).

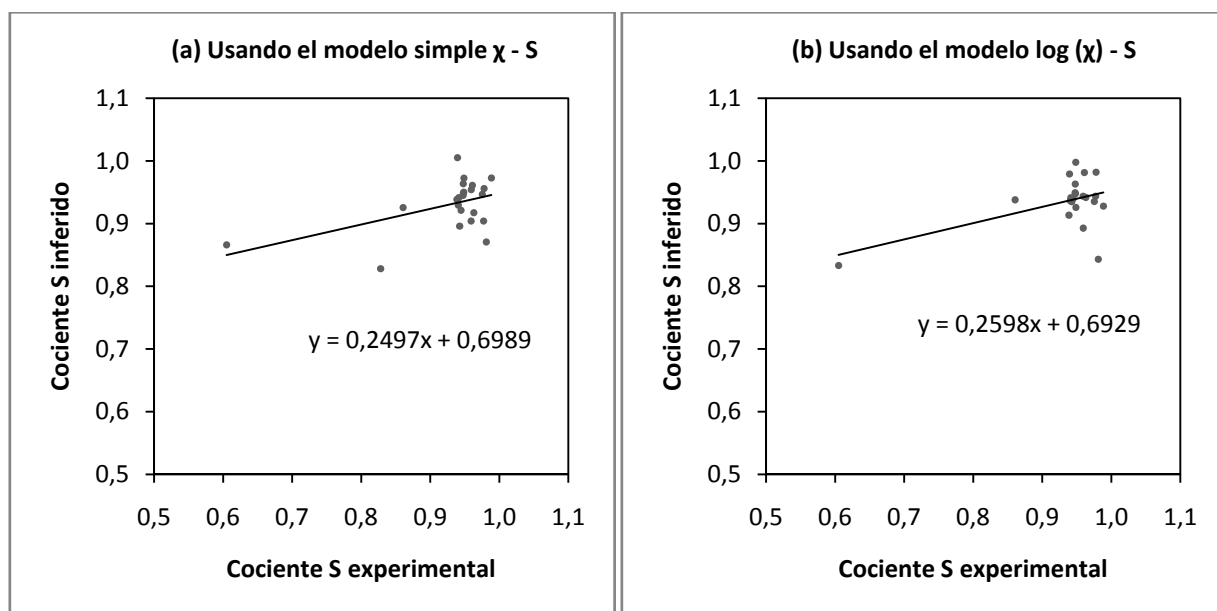


Figura 6.3. Formación León (442m – 569m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.

4) FORMACIÓN CARBONERA (569 m – 670 m)

Así como en la formación León este tratamiento no resultó satisfactorio, en la formación Carbonera ocurre exactamente lo contrario. La inferencia con los datos de entrada del tipo $\log(\chi) - S$ dan un resultado excelente, mejorando en casi un 70% a los resultados obtenidos con el modelo simple ($\chi - S$), como se muestra en las líneas de tendencia de las Figuras 6.4 (a) y 6.4 (b).

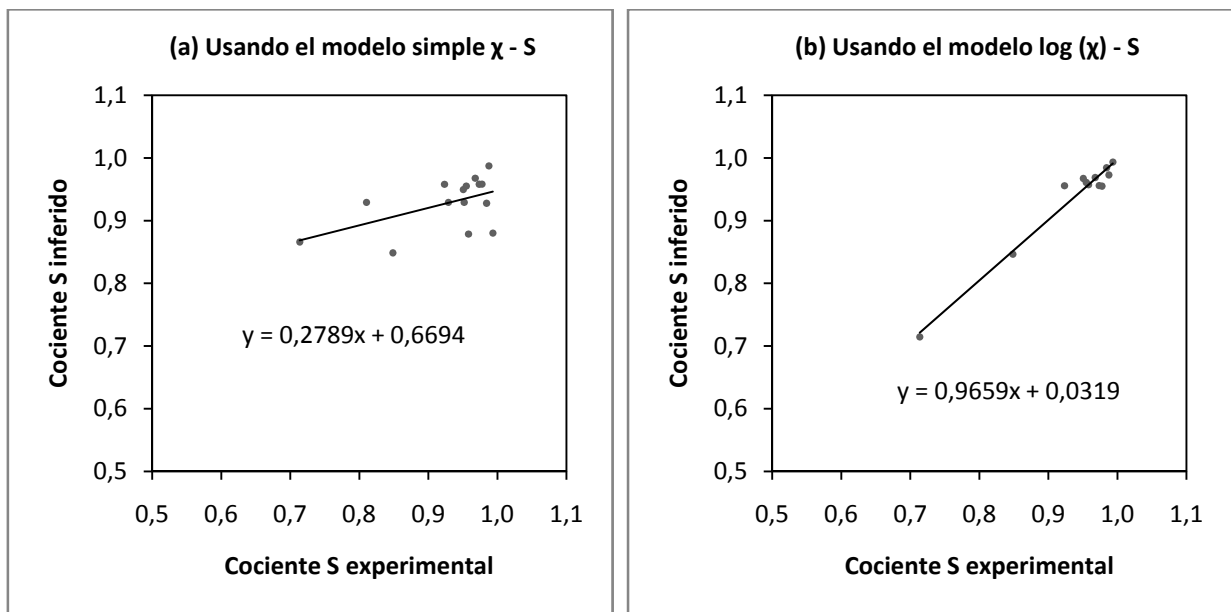


Figura 6.4. Formación Carbonera (569m – 670m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.

5) FORMACIONES LEÓN Y CARBONERA (442 m – 670 m)

Al combinar las formaciones León y Carbonera obtenemos que el mejor conjunto de datos de entrada se obtiene usando el modelo simple, a diferencia de lo que habíamos obtenido al estudiar sólo la formación Carbonera (ver Figura 6.5). El número de datos que poseemos de la formación León, es 1.5 veces mayor que la de Carbonera, por lo que asumimos que este conjunto de dos formaciones se está comportando con mayor influencia de la formación León, a esto le adjudicamos el hecho de que el modelo de los datos de entrada haya cambiado. La mejoría en la inferencia aumentó respecto a los resultados obtenidos para la formación León, pero disminuyó respecto a los resultados de la formación Carbonera.

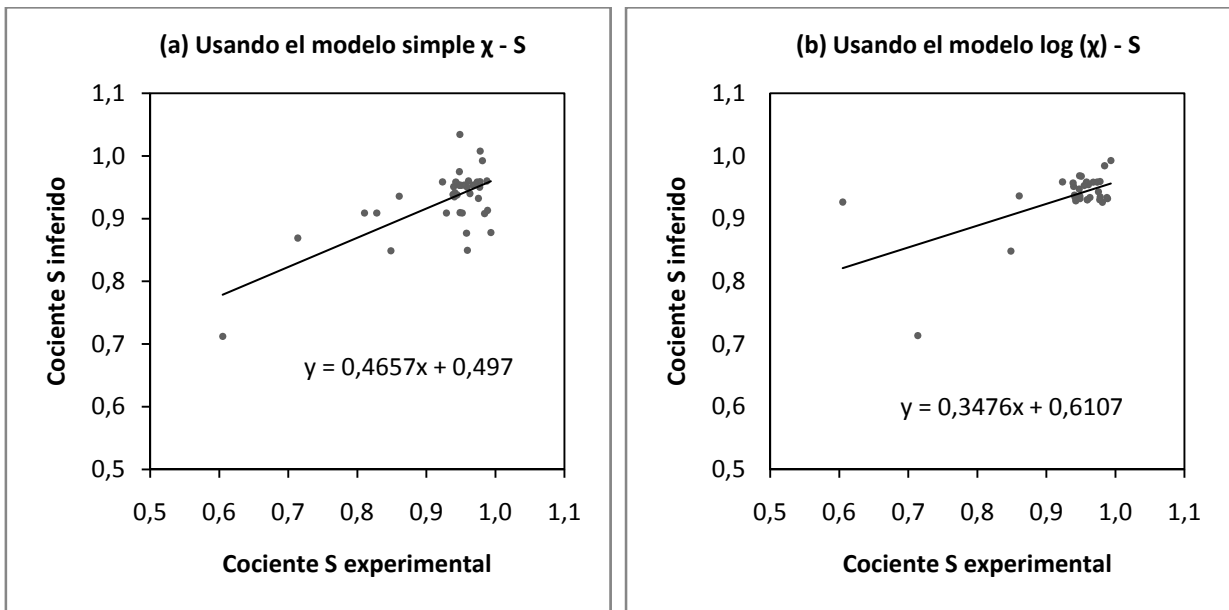


Figura 6.5. Formaciones León y Carbonera (442m – 670m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.

En la Tabla 6.2 son resumidos los resultados para la división operacional de campo, a partir de los errores reportados por Matlab, como por los resultados obtenidos del gráfico cruzado. A partir de los gráficos cruzados es posible dar un porcentaje de inferencia.

	Error reportado por MatLab			
	Datos de entrada: Susceptibilidad magnética – Cociente S		Datos de entrada: Logaritmo de la susceptibilidad magnética – Cociente S	
	3 reglas difusas	Máximo de reglas difusas usadas	3 reglas difusas	Máximo de reglas difusas usadas
100% de los datos (0 m – 670 m)	0.17585	0.15518	0.16877	0.15149
Formación Guayabo (0 m – 442 m)	0.16838	0.14837	0.1558	0.11305
Formación León (442 m – 569 m)	0.073053	0.067461	0.071827	0.065559
Formación Carbonera (569 m – 670 m)	0.064286		0.014126	
Formación León y Carbonera (442 m – 670 m)	0.074553	0.056316	0.062663	0.061813

Tabla 6.2. Resumen de los errores reportados por la red neuronal difusa de MatLab para cada una de las formaciones según la división operacional de campo. Los menores errores se encuentran en las celdas sombreadas.

Gráficamente (ver Figura 6.6) se pueden visualizar los resultados óptimos, para la división operacional de campo (los recuadros que están sombreados en la Tabla 6.2).

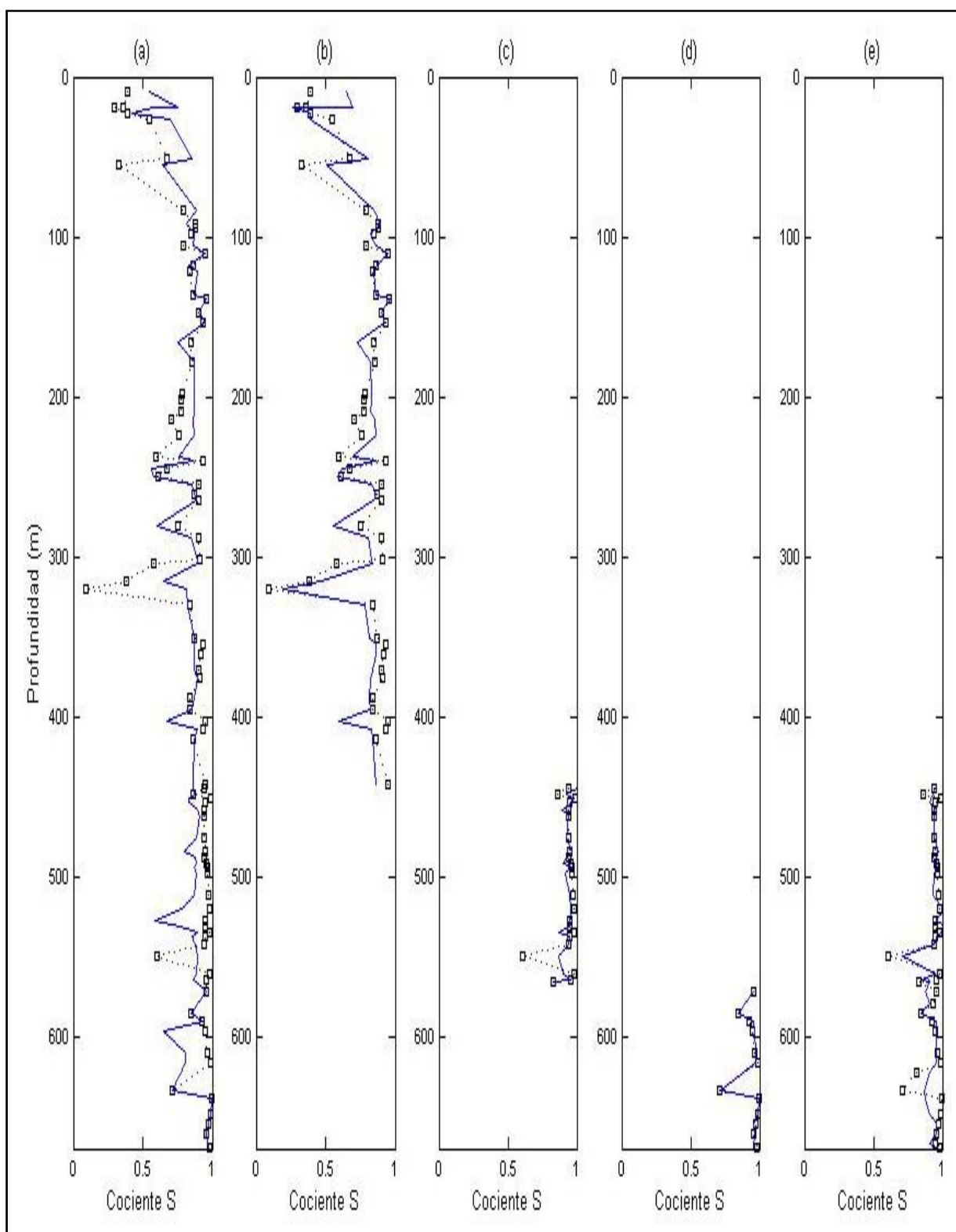


Figura 6.6. División Operacional de Campo. Representación de los datos de cociente S, experimentales (línea punteada) e inferidos con el máximo de reglas difusas (línea continua), en función de la profundidad, de la división operacional de campo para: (a) 100% de los datos experimentales, (b) formación Guayabo, (c) formación León, (d) formación Carbonera y (e) formaciones León y Carbonera. Los datos inferidos del cociente S se han obtenido usando como datos de entrada: (a) cociente S y $\log(\chi)$, (b) cociente S y $\log(\chi)$, (c) cociente S y χ , (d) cociente S y $\log(\chi)$, y (e) cociente S y χ .

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta sección, hemos encontrado que la relación existente entre la susceptibilidad magnética y el cociente S, varían según la formación en estudio, en particular, hemos encontrado que tanto en la formación Guayabo como en la formación Carbonera, la mejor inferencia se obtiene al usar el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$) como conjunto de datos de entrada, es decir, hemos logrado mejorar la inferencia con este conjunto de entrada, en un 20% para el caso de la formación Guayabo y un 70% para la formación Carbonera.

En la formación León no se observó mejoría con ninguno de los modelos usados. Los resultados en esta formación no son concluyentes. A diferencia de las otras dos formaciones, que están asociadas a ambientes de depositación de aguas someras, la formación León fue depositada en un ambiente transicional entre aguas someras y profundas (ver Información Geológica), esto pudiera explicar los resultados.

Las pruebas con las formaciones León – Carbonera, se hicieron para intentar mejorar la inferencia en León. Efectivamente se logra mejorar la inferencia respecto a los resultados de la formación León (mayor cantidad de datos), pero se desmejoran respecto a los resultados de la formación Carbonera (menor cantidad de datos). Consideramos que debido a la presencia de una mayor cantidad de datos de la formación León esta combinación de formaciones se comporta como la formación León y que por ello la inferencia mejora con el modelo simple, contrario a lo ocurrido en la formación Carbonera.

Estos resultados son consistentes con la disminución de los errores reportados por la red neuronal difusa (ver Tabla 6.2).

B.RESULTADOS PARA LOS DATOS SELECCIONADOS SEGÚN LA DIVISIÓN POR EDADES GEOLÓGICAS

Es importante recordar que, para realizar esta división se utilizaron dos edades referenciales que ubican el tope del Mioceno medio a aproximadamente 305 metros de profundidad y el tope del Mioceno Inferior aproximadamente 610 metros de profundidad. Estas edades geológicas limitan dos eventos regresivos globales establecidos en los perfiles de Vail et al. (1977), en tres secciones que parecen coincidir con tres envoltentes transgresivas de gran longitud de onda.

Dado los resultados obtenidos para la formación León en la sección anterior (división operacional de campo), se decidió hacer pruebas tomando en cuenta la división por edades geológicas, determinadas a partir de las edades bioestratigráficas determinadas a la profundidad de 305 m (320 m para la consideración del análisis de resultados computacionales) y a los 610 m, así como a los perfiles de Vail et al. (1977).

Las formaciones consideradas en esta sección, están divididas en profundidad de la manera en que se muestran en la Tabla 6.3:

	Tope (m)	Base (m)
Toda la profundidad	0	670
Envolvente transgresiva 1 (Guayabo)	0	320
Envolvente transgresiva 2 (León)	320	610
Envolvente transgresiva 3 (Carbonera)	610	670
Envolventes transgresivas 2 y 3 (León y Carbonera)	320	670

Tabla 6.3. Valores en profundidad para la división por edades geológicas (envolventes transgresivas).

1) PRIMERA ENVOLVENTE TRANSGRESIVA (0 m – 320 m)

En las dos gráficas de cociente S inferido, versus cociente S experimental, usando el modelo simple $\chi - S$ (Figura 6.7 (a)) y del modelo semi-log ($\log(\chi) - S$) (Figura 6.7 (b)), para la primera envolvente transgresiva; encontramos que con el uso del conjunto de entrada del tipo semi-log ($\log(\chi) - S$), podemos inferir los resultados de cociente S , con aproximadamente el 70% de éxito, frente al 60% para el modelo simple. Al comparar con los resultados obtenidos para la formación Guayabo, vemos que se mejora la inferencia para el modelo simple, en un 10%, pero para el modelo semi-log, los resultados son análogos.

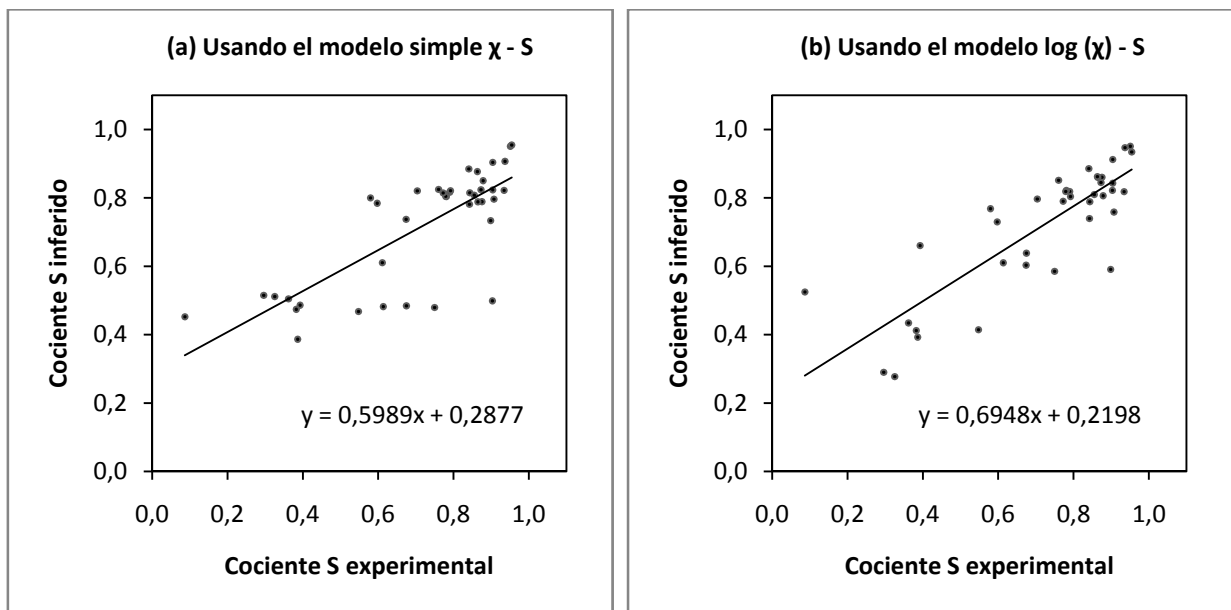


Figura 6.7. Primera envolvente transgresiva (0m – 320m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.

2) SEGUNDA ENVOLVENTE TRANSGRESIVA (320 m – 610 m)

En la segunda envolvente transgresiva, los resultados siguen siendo poco alentadores, sin embargo, es posible observar que con la utilización, como conjunto de entrada del modelo simple ($\chi - S$) se logra hacer una inferencia con un 36% de éxito (Figura 6.8 (a)), mientras que para el caso donde se ha usado el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$) como conjunto de entrada (Figura 6.8 (b)) el resultado de la inferencia es similar al obtenido en la formación León.

En el caso del modelo simple, los resultados de esta envolvente respecto a los de la formación León, mejoran en un 10% la inferencia.

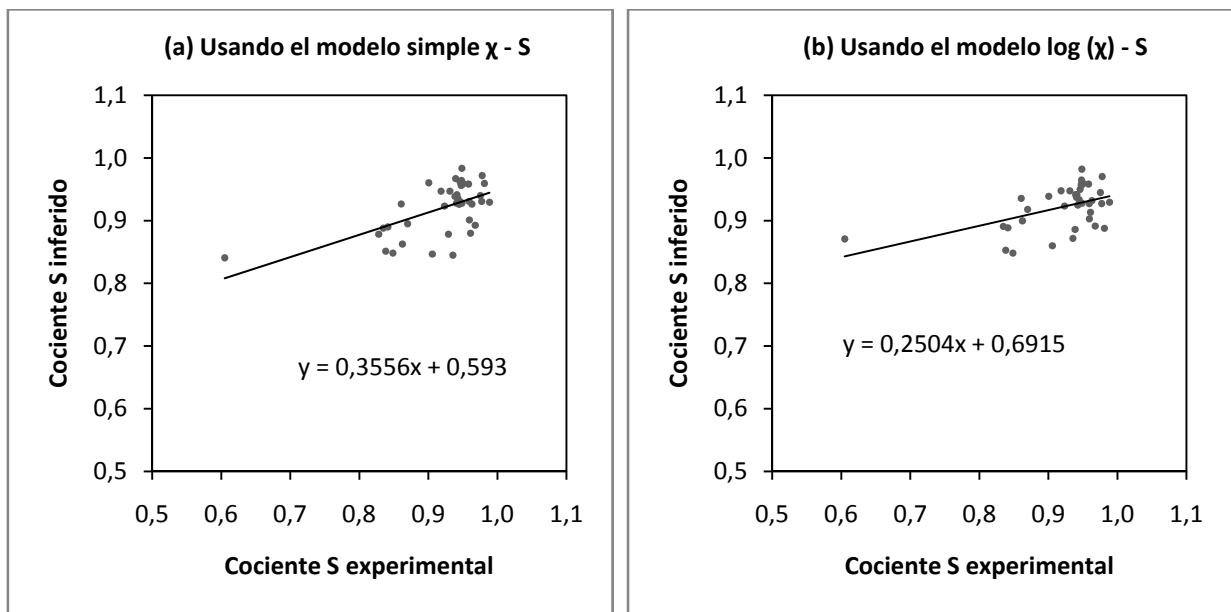


Figura 6.8. Segunda envolvente transgresiva (320m – 610m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.

3) TERCERA ENVOLVENTE TRANSGRESIVA (610 m – 670 m)

En la Figura 6.9 mostramos dos gráficas de cociente S inferido versus cociente S experimental, para el modelo simple ($\chi -$ cociente S) (Figura 6.9 (a)), y el modelo semi-log ($\log(\chi) -$ cociente S) (Figura 6.9 (b)), para la tercera envolvente transgresiva. Al igual que para la formación Carbonera, en la tercera envolvente transgresiva se observan excelentes resultados, al usar como conjunto de entrada el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$). En ambos casos el éxito en la inferencia es alto.

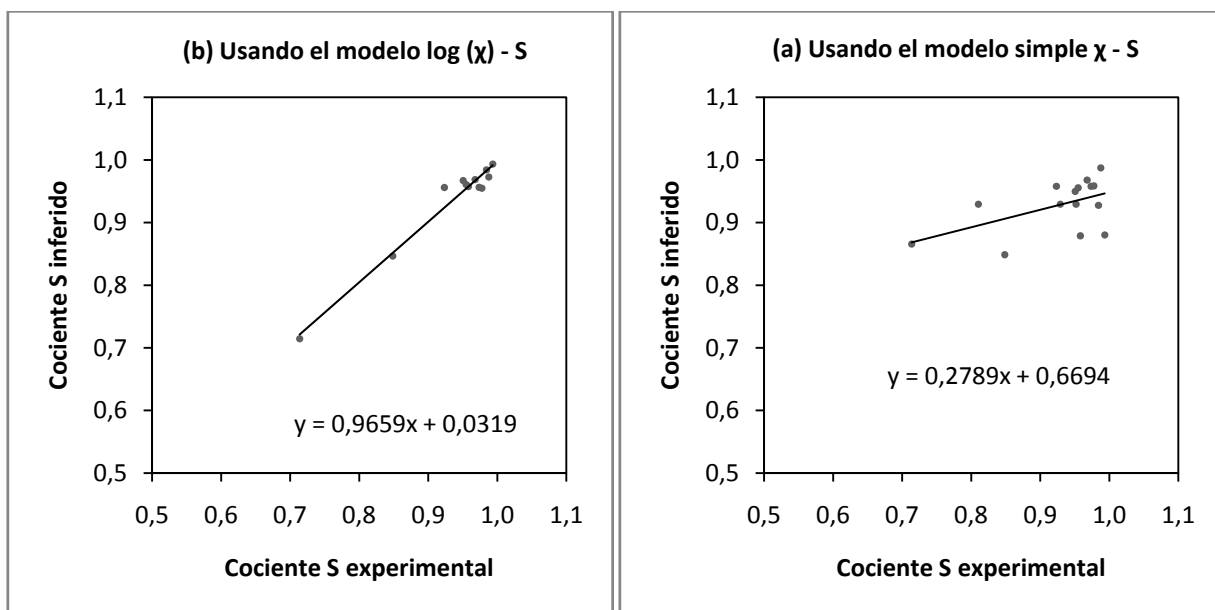


Figura 6.9. Tercera envolvente transgresiva (610m – 670m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.

4) PARA LAS DOS ENVOLVENTES TRANSGRESIVAS DE LA BASE DEL POZO (320 m – 670 m)

Los resultados de estas dos envolventes transgresivas son comparables a los análisis hechos a las formaciones León y Carbonera. En las gráficas de cociente S inferido versus cociente S experimental, para la segunda y tercera envolvente transgresiva, con el modelo simple ($\chi - S$) (Figura 6.10 (a)) y con el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$) (Figura 6.10 (b)), podemos observar que los resultados con ambos casos son exactamente iguales a los obtenidos en las formaciones León – Carbonera, con lo cual no se obtienen cambios con esta prueba.

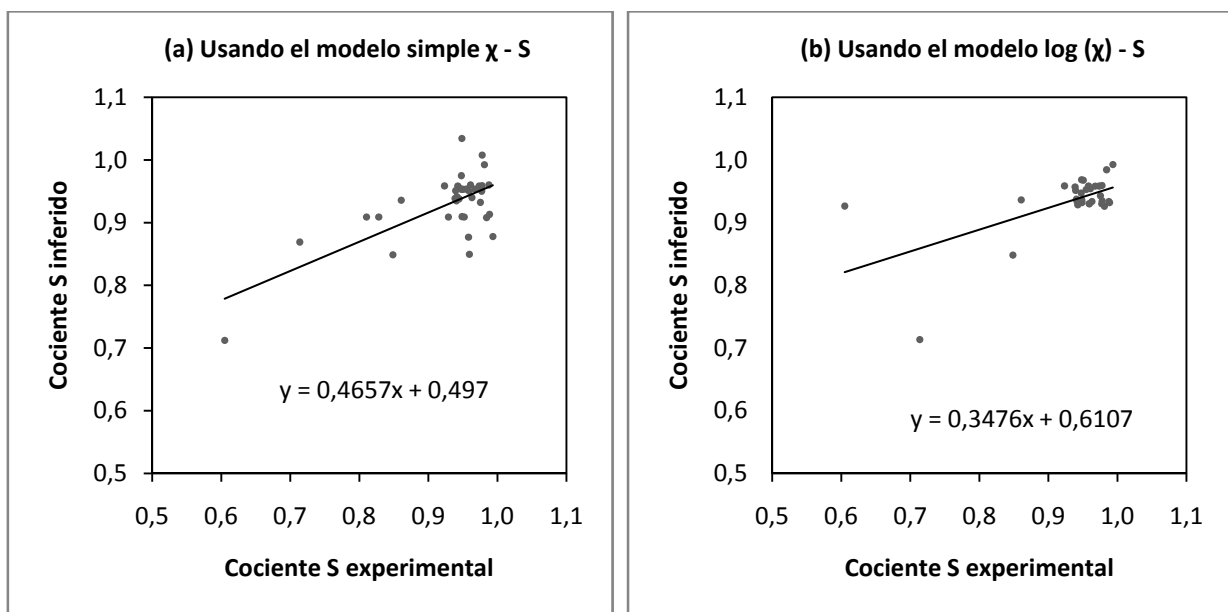


Figura 6.10. Segunda y tercera envolventes transgresivas (320m – 670m). Cociente S inferido, (a) usando el modelos simple ($\chi - S$), y (b) usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), versus cociente S experimental.

Resumiendo los resultados para la división por edades geológicas:

	Error reportado por MatLab			
	Datos de entrada: Susceptibilidad magnética – Cociente S		Datos de entrada: Logaritmo de la susceptibilidad magnética – Cociente S	
	3 reglas difusas	Máximo de reglas difusas	3 reglas difusas	Máximo de reglas difusas
100% de los datos (0 m – 670 m)	0.175885	0.15518	0.16877	0.15149
Primera envolvente transgresiva (0 m – 320 m)	0.15826	0.13652	0.13955	0.12021
Segunda envolvente transgresiva (320 m – 610 m)	0.065115	0.053286	0.06377	0.057484
Tercera envolvente transgresiva (610 m – 670 m)	0.087592		0.063867	
Segunda y tercera envolventes transgresivas (320 m – 670 m)	0.070652	0.052441	0.070174	0.060237

Tabla 6.4. Resumen de los errores reportados por la red neuronal difusa de MatLab para cada una de las formaciones según la división por envolventes transgresivas. Los menores errores se encuentran en las celdas sombreadas.

Gráficamente se pueden visualizar los resultados óptimos para la división por edades geológicas o envolventes transgresivas (los recuadros que están sombreados en la Tabla 6.4) de la siguiente forma:

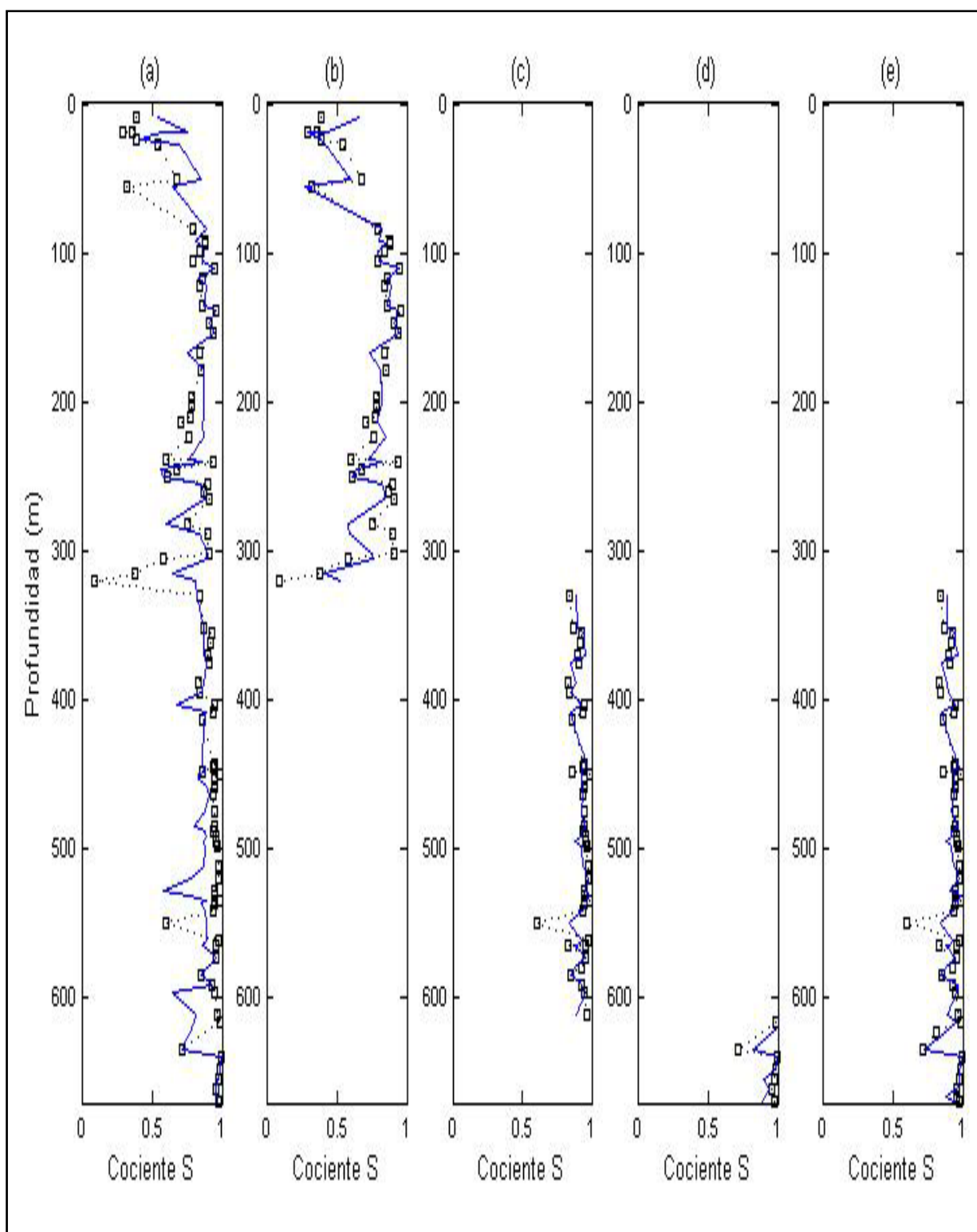


Figura 6.11. Representación de los datos de cociente S, experimentales (línea punteada) e inferidos con el máximo de reglas difusas (línea continua), en función de la profundidad, de la división según edades geológicas (envolventes transgresivas) para: (a) 100% de los datos experimentales (son los mismos datos que para la división operacional de campo), (b) primera envolvente transgresiva, (c) segunda envolvente transgresiva, (d) tercera envolvente transgresiva y (e) segunda y tercera envolventes transgresivas. Los datos inferidos del cociente S se han obtenido usando como datos de entrada: (a) cociente S y $\log(\chi)$, (b) cociente S y $\log(\chi)$, (c) cociente S y χ , (d) cociente S y $\log(\chi)$, y (e) cociente S y χ .

Los resultados arrojados en esta sección nos indican que las redes neuronales difusas han sido capaces de detectar diferencias sutiles con respecto a los datos divididos operacionalmente en campo, lo cual permitió, no solo encontrar una relación matemática capaz de inferir, en algunos casos con bastante éxito, los valores de cociente S , con el modelo simple o semi-log, sino que además permitió encontrar diferencias en las litofacies que conforman el pozo Saltarín 1A.

En el caso de la segunda envolvente transgresiva, se ha obtenido una respuesta de inferencia más aceptable del tipo de datos de entrada $\chi - S$, que mejoran a los valores inferidos de cociente S , con respecto al análisis de la formación León.

Se encontró que los datos de entrada para el entrenamiento, más adecuados, tanto para la primera así como para la tercera envolvente transgresiva, fue con el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), a diferencia de la segunda envolvente transgresiva, donde la mejor inferencia se obtuvo con datos del tipo $\chi - S$.

En principio no es raro encontrar que las formaciones tengan diferentes dependencias de estos datos magnéticos. Analizando las características de las tres formaciones, encontramos que tanto la primera como la tercera envolvente transgresiva están asociadas a paleoambientes de sedimentación de aguas someras, a diferencia de la segunda envolvente transgresiva, asociada más bien a paleoambientes de sedimentación de aguas profundas.

C. RESULTADOS PARA LOS DATOS SELECCIONADOS POR AMBIENTE REDUCTOR SOBRE LAS DIVISIONES POR EDADES GEOLÓGICAS

En esta parte, se usaron valores de χ y $\log(\chi)$ en aquellos casos en que $S \geq 0.66$, el cual representa un paleoambiente netamente reductor de depositación de sedimentos.

Con la finalidad de ver la influencia del tipo de ambiente en los resultados, hemos escogido los datos, para cada una de las formaciones, que caracterizan a un ambiente reductor (cociente $S \geq 0.66$). El análisis realizado en esta sección es equivalente al hecho en las secciones A y B de este capítulo. En las tablas 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 y 6.9 resumimos, comparativamente los resultados obtenidos para las distintas divisiones realizadas sobre los datos, a saber: Operacional de campo, por edades geológicas y por ambiente reductor sobre las divisiones de edades geológicas y del pozo completo.

	Modelos de los datos de entrada	Grado de inferencia (%)
Pozo completo	$\log(\chi) - S$	34
Ambiente reductor, pozo completo	$\log(\chi) - S$	37

Tabla 6.5. Resultados obtenidos para el pozo completo y ambiente reductor sobre todo el pozo para la inferencia del cociente S. Modelos para los datos de entrada y grado de inferencia (%).

	Espesor en profundidad (m)	Modelos de los datos de entrada	Grado de inferencia (%)
Formación Guayabo	0 m – 442 m	$\log (x) - S$	70
1 ^{ra} envolvente transgresiva	0 m – 320 m	$\log (x) - S$	69
Ambiente reductor para la 1 ^{ra} envolvente transgresiva	0 m – 320 m	$\log (x) - S$	55

Tabla 6.6. Resultados obtenidos para la formación Guayabo y 1^{ra} envolvente transgresiva para la inferencia del cociente S. Espesor en profundidad en metros, modelos para los datos de entrada y grado de inferencia (%).

	Espesor en profundidad (m)	Modelos de los datos de entrada	Grado de inferencia (%)
Formación León	442 m – 569 m	$x - S$	25
		$\log (x) - S$	26
2 ^{da} envolvente transgresiva	320 m – 610 m	$x - S$	36
Ambiente reductor para la 2 ^{da} envolvente transgresiva	320 m – 610 m	$x - S$	53

Tabla 6.7. Resultados obtenidos para la formación León y 2^{da} envolvente transgresiva para la inferencia del cociente S. Espesor en profundidad en metros, modelos para los datos de entrada y grado de inferencia (%).

	Espesor en profundidad (m)	Modelos de los datos de entrada	Grado de inferencia (%)
Formación Carbonera	569 m – 670 m	$\log(x) - S$	97
3 ^{ra} envolvente transgresiva	610 m – 670 m	$\log(x) - S$	97
Ambiente reductor para la 3 ^{ra} envolvente transgresiva	610 m – 670 m	$\log(x) - S$	52

Tabla 6.8. Resultados obtenidos para la formación Carbonera y 3^{da} envolvente transgresiva para la inferencia del cociente S. Espesor en profundidad en metros, modelos para los datos de entrada y grado de inferencia (%).

	Espesor en profundidad (m)	Modelos de los datos de entrada	Grado de inferencia (%)
Formaciones León – Carbonera	442 m – 670 m	$x - S$	47
2 ^{da} y 3 ^{ra} envolvente transgresiva	320 m – 670 m	$x - S$	47
Ambiente reductor para la 2 ^{da} y 3 ^{ra} envolvente transgresiva	320 m – 670 m	$x - S$	66

Tabla 6.9. Resultados obtenidos para la formaciones León – Carbonera, 2^{da} y 3^{ra} envolvente transgresiva para la inferencia del cociente S. Espesor en profundidad en metros, modelos para los datos de entrada y grado de inferencia (%).

El estudio del ambiente reductor nos ha permitido obtener algunas mejoras en la inferencia del cociente S para el pozo completo (en 2%), para la segunda envolvente transgresiva (en casi 20%) y para la combinación de la 2^{da} y 3^{ra} envolvente (en casi 20% también).

En la división por ambiente reductor, el mejoramiento en la inferencia del cociente S, del pozo completo es insignificante, sin embargo, para la 2^{da} envolvente, así como para la combinación de la 2^{da} y 3^{ra} envolvente, el considerar tan sólo el ambiente reductor fue de gran ayuda, en función del mejoramiento de la inferencia. Esto nos hace pensar que la segunda envolvente está influenciada por secciones de ambiente oxido-reductor, que impiden obtener una buena inferencia.

Ocurre lo contrario cuando se hace el análisis del ambiente reductor para la 1^{ra} y 3^{ra} envolvente transgresivas, donde la calidad de la inferencia disminuye en 15 y 45%, respectivamente.

Sin duda, el análisis de ambiente reductor es adecuado para la 2^{da} envolvente. Es evidente que en esta zona existen más parámetros que afectan la inferencia del cociente S.

Al considerar la segunda y tercera envolventes transgresivas, vemos que la mayor parte de los datos experimentales (49) considerados para el entrenamiento, pertenecen a la segunda envolvente, por lo que el comportamiento general corresponde a las características geológicas de la 2^{da} envolvente, de allí que el modelo más adecuado haya sido el modelo simple y no el modelo semi-log.

El cociente S describe solamente parte de la historia geológica del pozo, es decir los cambios en condiciones químicas de depositación, pero no describe lo referente a los cambios granulométricos y a los cambios en concentraciones de minerales

magnéticos, de aquí que los resultados de la inferencia obtenida a partir tan sólo de la susceptibilidad magnética (o su logaritmo) y cociente S es bastante satisfactoria.

En la Figura 6.12 mostramos los resultados obtenidos para el análisis del ambiente reductor considerando las divisiones por envolventes transgresivas.

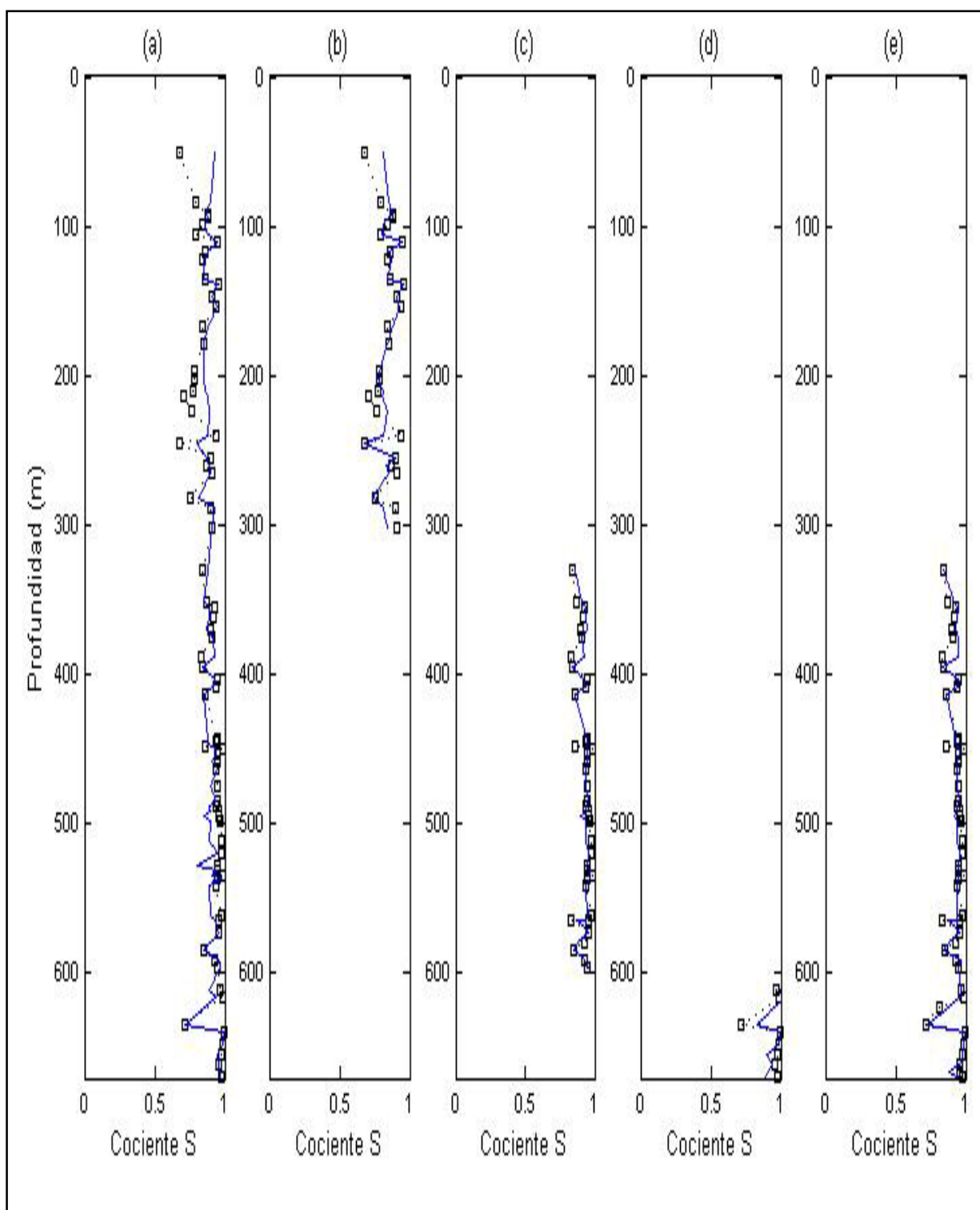


Figura 6.12. Representación de los datos de cociente S, experimentales (línea punteada) e inferidos con el máximo de reglas difusas (línea continua), en función de la profundidad, de los ambientes reductores, para las divisiones según edades geológicas (envolventes transgresivas): (a) 100% de los datos experimentales (son los mismos datos que para la división operacional de campo), (b) primera envolvente transgresiva, (c) segunda envolvente transgresiva, (d) tercera envolvente transgresiva y (e) segunda y tercera envolventes transgresivas. Los datos inferidos del cociente S se han obtenido usando como datos de entrada: (a) cociente S y $\log(\chi)$, (b) cociente S y $\log(\chi)$, (c) cociente S y χ , (d) cociente S y $\log(\chi)$, y (e) cociente S y χ .

Es importante destacar que las divisiones geológicas que se utilizaron en las diferentes pruebas, lejos de ser arbitrarias, obedecen a criterios ya fundamentados en el capítulo, permiten explicar porque los datos inferidos se ajustan mejor a los experimentales para ciertas divisiones.

En las Figuras 6.13, 6.14 y 6.15 mostramos los resultados gráficos correspondientes a las secciones A, B y C.

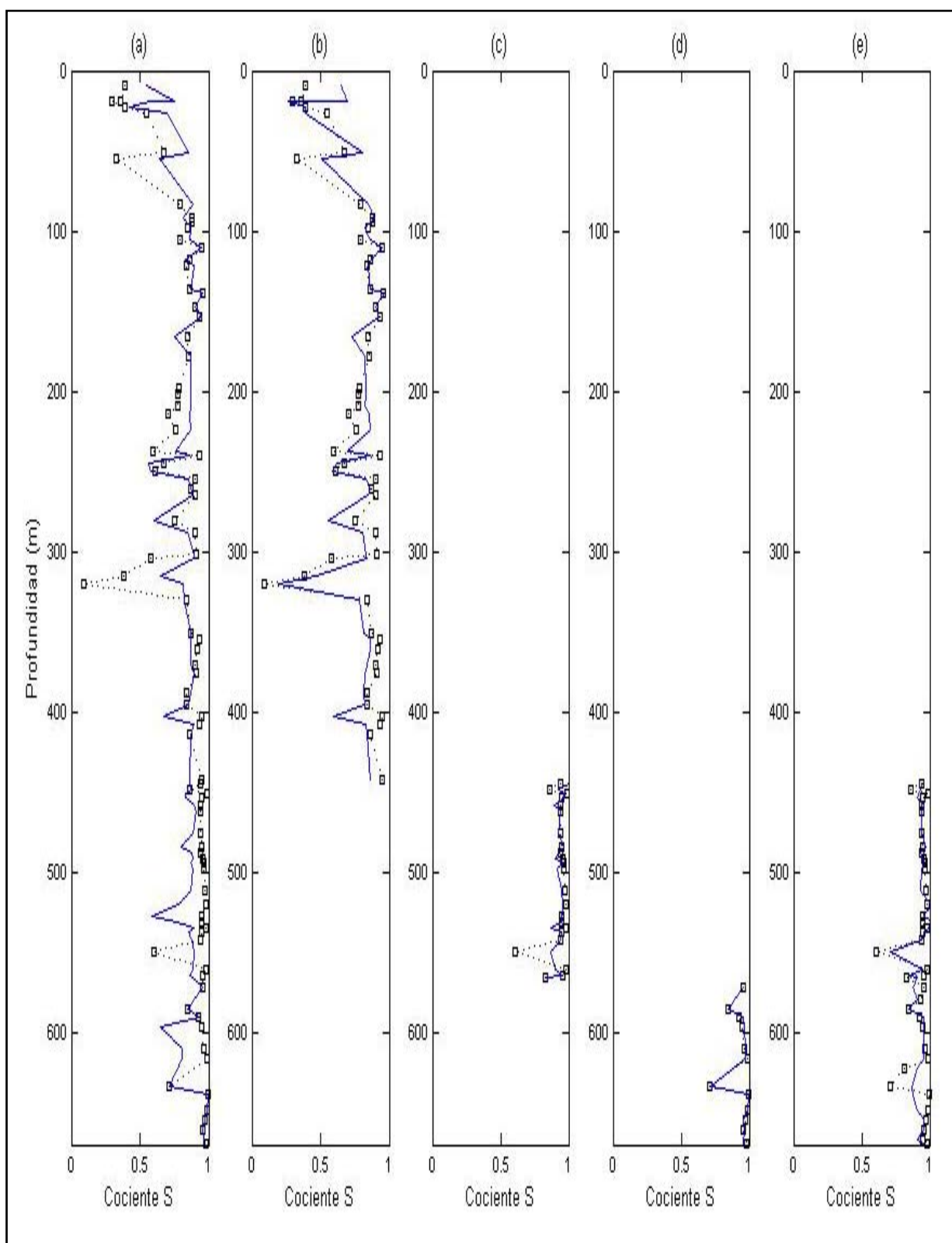


Figura 6.13. División operacional de campo. Se muestran las inferencias de cociente S para: (a) pozo completo, (b) Formación Guayabo, (c) Formación León, (d) Formación Carbonera y (e) Formaciones León – Carbonera. Línea negra punteada: valores experimentales de cociente S; línea continua azul muestra la inferencia del cociente S.

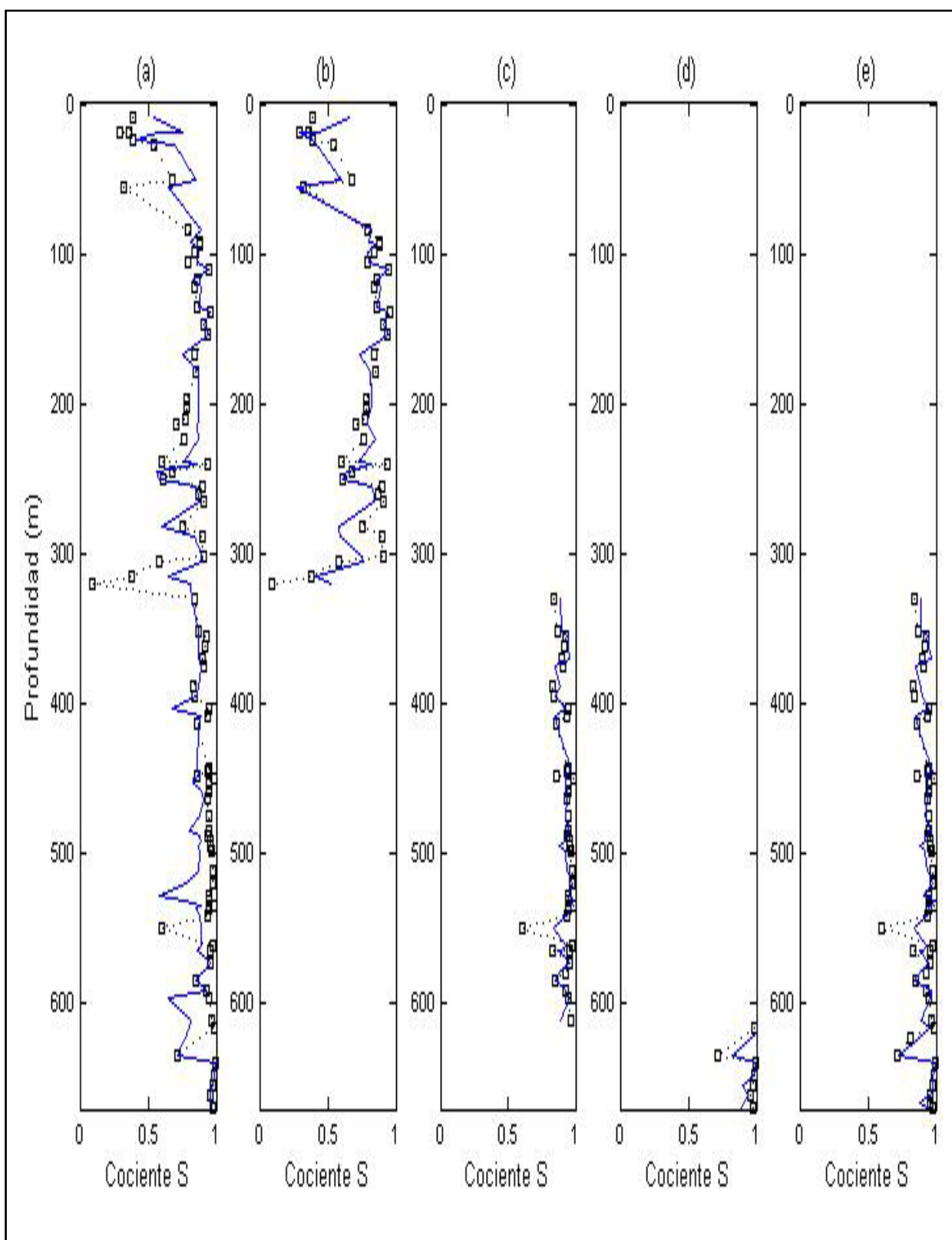


Figura 6.14. División por edades geológicas. Se muestran las inferencias de cociente S para: (a) pozo completo, (b) 1^{ra} envolvente transgresiva, (c) 2^{da} envolvente transgresiva, (d) 3^{ra} envolvente transgresiva y (e) 2^{da} y 3^{ra} envolventes transgresivas. Línea negra punteada: valores experimentales de cociente S; línea continua azul muestra la inferencia del cociente S.

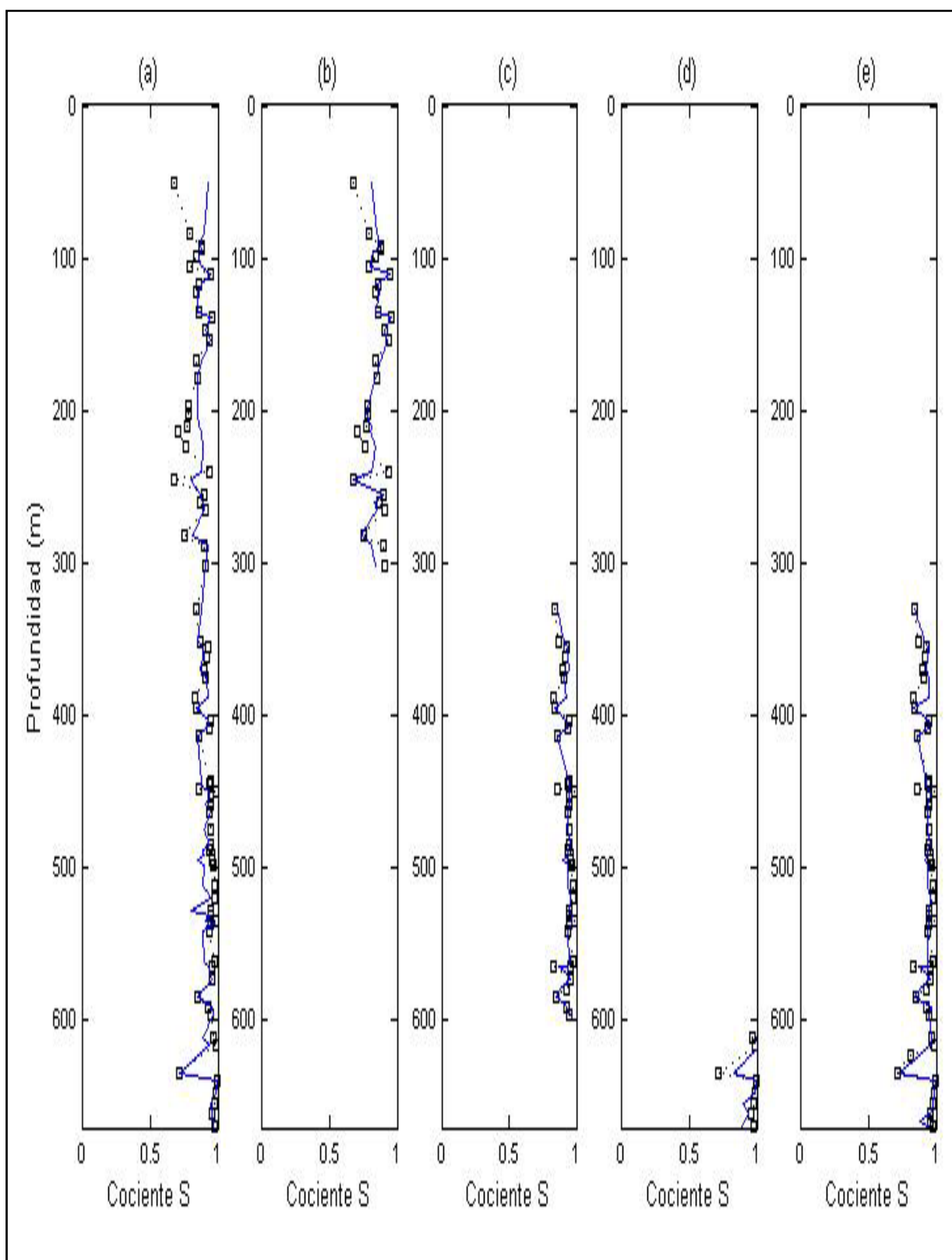


Figura 6.15. Ambiente reductor (cociente $S \geq 0.66$). Se muestran las inferencias de cociente S para: (a) sobre el pozo completo, (b) sobre la 1^{ra} envolvente transgresiva, (c) sobre la 2^{da} envolvente transgresiva, (d) 3^{ra} envolvente transgresiva y (e) sobre las 2^{da} y 3^{ra} envolventes transgresivas. Línea negra punteada: valores experimentales de cociente S ; línea continua azul muestra la inferencia del cociente S .

II. CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS COMPUTACIONALES

Algunas de las conclusiones de este capítulo son las siguientes:

- Hemos encontrado que tanto en la formación Guayabo como en la formación Carbonera, la mejor inferencia se obtiene al usar el modelo semi-log ($\log(X) - S$) como conjunto de datos de entrada. Estas formaciones están asociadas a ambientes de depositación de aguas someras.
- En la formación León no se observó mejoría con ninguno de los modelos usados. Los resultados en esta formación no son concluyentes. A diferencia de las otras dos formaciones, que están asociadas a ambientes de depositación de aguas someras, la formación León fue depositada en un ambiente transicional entre aguas someras y profundas.
- Las pruebas con las formaciones León – Carbonera, se hicieron para intentar mejorar la inferencia en la formación de León. Consideramos que debido a la presencia de una mayor cantidad de datos de la formación León esta combinación de formaciones se comporta como la formación León, y que por ello la inferencia mejora con el modelo simple, contrario a lo ocurrido en la formación Carbonera.
- Las redes neuronales difusas han sido capaces de detectar diferencias sutiles en los datos divididos por formaciones, lo cual permitió, no solo encontrar una relación matemática capaz de inferir los valores de cociente S, con el modelo simple o semi-log, sino que además permitió encontrar diferencias en las litofacies que conforman el pozo Saltarín 1A.

- En las divisiones por edades geológicas, para el caso de la segunda envolvente transgresiva, la inferencia del cociente S, usando el modelo simple, es mejor que el obtenido como resultado en la formación León.
- Tanto para la primera así como para la tercera envolvente transgresiva, encontramos una buena inferencia usando el modelo semi-log ($\log(\chi) - S$), tal y como se obtuvo en las formaciones Guayabo y Carbonera.
- En la división por ambiente reductor, se mejora sustancialmente la inferencia del cociente S para la 2^{da} envolvente, así como para la combinación de la 2^{da} y 3^{ra} envolvente. La segunda envolvente está influenciada por secciones de ambiente oxido-reductor, que impiden obtener una buena inferencia.
- Para la 1^{ra} y 3^{ra} envolvente transgresivas en ambiente reductor, la calidad de la inferencia disminuye en 15 y 45%, respectivamente.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

En líneas generales, en este trabajo se hicieron medidas experimentales de cociente S, así como su inferencia con el método de redes neuronales difusas (ANFIS de Matlab 7.0). Básicamente, los datos medidos experimentalmente fueron utilizados de acuerdo a divisiones operacionales de campo, edades bioestratigráficas y ambiente reductor, para alimentar la red neuronal difusa a fin de obtener las inferencias.

- Las muestras del pozo Saltarín 1A utilizadas, abarcan, según la división operacional hecha en campo, las formaciones: Guayabo (areniscas y lodolitas), León (lodolitas) y Carbonera (areniscas y lodolitas); para una profundidad aproximada de pozo de 670 metros.
- En el proceso de separación magnética de las muestras, se encontró una alta concentración de minerales magnéticos, principalmente en las muestras correspondientes a valores altos de susceptibilidad magnética, lo cual resulta razonable.
- De las mediciones de susceptibilidad magnética, cociente S y SEM (Scanning Electron Microscopy), pudimos deducir que, en las muestras del pozo Saltarín 1A existe una mezcla de variedades mineralógicas de alta y baja coercitividad con predominio de minerales de baja coercitividad.
- Los estudios de EDX (Energy Dispersive X Ray Spectroscopy), indican la presencia de hierro (Fe) en algunos de los minerales submicrónicos de las fracciones magnéticas utilizadas. La existencia de estos minerales

submicrónicos podrían ser la causa de las anomalías, en los perfiles de la susceptibilidad magnética (valores máximos). Así mismo, La mayoría de las muestras parecen presentar minerales magnéticos primarios (formas no framboidales típicas de procesos autigénicos) y azufre (S).

- Las redes neuronales difusas fueron capaces de detectar diferencias sutiles en los datos divididos por formaciones y por ambientes oxido-reductores, lo cual permitió, no solo encontrar una relación matemática capaz de inferir los valores de cociente S, con el modelo simple o semi-log, sino que además nos permitió encontrar diferencias en las litofacies que conforman el pozo Saltarín 1A. Por lo tanto, la técnica de redes neuronales difusas puede ser usada como una herramienta o ayuda para interpretar paleoambientes a partir de datos de cociente S y susceptibilidad magnética.
- Debido al alto potencial de la técnica de redes neuronales difusas, para la inferencia del los valores de cociente S, fue posible la integración de los resultados obtenidos, tanto experimentales como inferidos, en el contexto geológico de las formaciones Guayabo, León y Carbonera para la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales (Colombia), y su posible implicación en la variabilidad de los ambientes de sedimentación.
- De las características del pozo, encontramos que las formaciones Guayabo y Carbonera, corresponden a ambientes transicionales de aguas someras, mientras que la formación León corresponde a un paleoambiente de aguas profundas. Estas características transicionales en los paleoambientes de sedimentación pueden ser los responsables de producir procesos químicos oxido-reductores que son los responsables, a su vez, de generar cambios en la

mineralogía magnética, fenómeno que es descrito por los parámetros magnéticos considerados en este estudio y que fueron usados en el entrenamiento de las redes neuronales difusas, es decir, de la susceptibilidad magnética y del cociente S .

RECOMENDACIONES

Las propiedades magnéticas de las rocas sedimentarias, y de los diferentes paleoambientes varían de acuerdo a: granulometrías magnéticas (tamaño y forma de los granos magnéticos), concentraciones de minerales magnéticos y tipos de minerales magnéticos estables en ambientes oxidantes (hematita) o reductores (magnetita). Para lograr un estudio más completo se recomienda alimentar el modelo de redes neuronales difusas con parámetros que reflejen factores que intervengan en un contraste litológico o paleoambiental. De esa forma se esperaría que la red pudiese hacer automáticamente la separación de paleoambientes que se hacen en este trabajo, de acuerdo a criterios e información independientes tales como las divisiones operacionales de campo y las edades bioestratigráficas.

Algunos parámetros magnéticos que dependen de las granulometrías, y que serían útiles para complementar la información suministrada a la red serían por ejemplo los parámetros de histéresis de una muestra; H_C , fuerza coercitiva; H_{CR} , fuerza coercitiva de la remanencia de saturación; M_S , magnetización de saturación y M_{RS} , magnetización remanente de saturación. M_{RS}/M_S disminuye con el incremento del tamaño de granos de magnetitas y H_{CR}/H_C aumenta.

Otros parámetros, tales como registros de gamma ray, porosidad etc., pudieran ofrecer una mayor información acerca de las características litológicas del pozo, y así, al ser utilizados como parámetros de entrada en la alimentación de la red neuronal difusa, se podría obtener una inferencia más robusta a lo largo de todo el pozo e incluso obtener un menor error entre los valores inferidos y los experimentales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

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-Alvarez, V., Vitiello, D., Colmenares, L., and G. Gomez, (1999) *Framboidal magnetic minerals and their possible association to hydrocarbons: La Victoria oil field, Southwestern Venezuela*, Geofísica Internacional, 38, 137-152.

Azpirixaga, I y Casas, J. (1989). *Estudio sedimentológico de las formaciones Mirador y Carbonera en el río Lobaterita, estado Táchira, Venezuela*. Memorias 50° Aniversario de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Geos, (29): 1-17.

Bartington Instruments (2009). (7) *Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System*. Consultado en 12/01/2009 en <http://www.bartington.com/templates/asset-relay.cfm?frmAssetFileID=159>.

Bloemendal J. (1983). *Paleoenvironmental implications of the magnetic characteristics of sediments from DSDP site 514, southeast Argentine Basin*. In "Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project" (W.J. Ludwig, V.A. Krasheninnikov et al.) Vol 71, pp 1097-1108. U.S. Govt. Printing Office, Washington D.C.

Colmenares, O. y Terán, L. (1988). *Bioestratigrafía de secuencias Eoceno-Oligoceno en el estado Táchira*. Revista Técnica Intevep.

Costanzo-Alvarez, V., Aldana, M., Aristeguieta, O., Marcano, M., y Aconcha, E. (2000). *Studies of magnetic contrasts in the Guafita oil field (southwestern Venezuela)*, Phys. Chem. Earth (A), 25(5), 437–445, 2000.

Costanzo-Alvarez, V., Aldana, M., Aristeguieta, O., Marcano, M. y Aconcha, E. (2000) *Study of Magnetic Contrasts in the Guafita Oil Field (South-Western Venezuela)*. Phys. Chem. Earth (A) 25, No. 5, 437-445.

Costanzo-Alvarez, V., Aldana, M., Díaz, M., Bayona, G. and Ayala, C. (2006) *Hydrocarbon-induced magnetic contrasts in some Venezuelan and Colombian oil wells*. Earth, Planets and Space 58, 1401 – 1410.

Cuddy, S. (2000). *Litho-Facies and Permeability Prediction from electrical logs using fuzzy logic*. SPE Reservoir Eval & Eng. Vol.1.3, N° (4).p. 319-324.

Delgado, R. (1983). *Magnetometría*. La Habana, Cuba: Pueblo y Educación.

Díaz M., Aldana, M., Jiménez S., Sequera P. and Costanzo-Alvarez, V. (2006). *EPR and EOM studies in well samples from some Venezuelan oil fields: correlation with magnetic authigenesis*. Revista Mexicana de Física, S52(3), 63 - 65.

Díaz, M., Aldana, M., Costanzo-Alvarez, V., Silva, P., and A. Pérez (2000). *EPR and Magnetic Susceptibility studies in well samples from some Venezuelan oil fields*. Phys. Chem. Earth (A) 25, No. 5, 447-453.

Elmore, R., Engel, M., Crawford, L., Nick, K., Imbus, S. y Sofer, Z. (1987). *Evidence for a relationship between hydrocarbons and authigenic magnetite*. Nature 325, 428–430, 1987.

Elmore, R., Imbus, S., Engel, M., y Fruit, D. (1993). *Hydrocarbons and magnetizations in magnetite, Applications of Paleomagnetism to Sedimentary Geology*, SEPM Special Publication, 49, 181–191, 1993.

Fierro, I. y Paredes, J., (1987). *Estratigrafía regional del Paleoceno, Oligoceno, Mioceno, Plioceno y Cuaternario de los estados Táchira, Apure y Barinas*. Informe inédito de Servigeomin para Corpoven: 238 p.

Finol, J., Guo, Y. y Jing, X. (2001). *Fuzzy Partioning Systems for Electrofacies Classification: a case study from the Maracaibo Basin*. Journal of Petroleum Geology, vol. 24(4). October 2001. 441–548.

Foley, N., Southworth, S., Schultz, A., Ayuso, R., Robinson, G., Seal, R., (2001). *Geochemical, mineralogical, and enviromental characteristics of metamorphosed black shales of the Central Appalachians, with comparisons to metalliferous shales of the Northern Appalachians*.USGS Appalachian Region. Integrated Science Workshop Proceedings, Gatlinburg, Tenesse, US Geological Survey Open-File Report 01-406: 111-114.

Foote, R. (1984). *Significance of near-surface magnetic anomalies, in Unconventional Methods in Exploration for Petroleum and Natural Gas*. Editado por M. J. Davidson y B. M. Gottlied, Southern Methodist University, Institute for Study of Earth and Man, Dallas, pp. 12–24, 1984.

Foote, R. (1987). *Correlations of borehole rock magnetic properties with oil and gas producing areas*. Association of Petroleum Geochemical Explorationists Bulletin, 3, 114–134, 1987.

Foote, R., (1992). *Use of magnetic field aids oil search*. Oil & Gas Journal May, 4, 137–141, 1992.

Foote, R., (1996). *Relationship of near-surface magnetic anomalies to oil and gas producing areas, in Hydrocarbon Migration and its Near-surface*. Expression: AAPG Memoir, 66, edited by D. Schumacher and M. A. Abrams, pp. 111–126, 1996.

Fuller M. (1967). *The AC. Bridge Method. Methods in Paleomagnetism*.1967.

Fuller M., (1967). *Rock magnetism and paleomagnetism methods. Methods of Experimental Physics.*

González de Juana, C., (1952). *Introducción al estudio de la geología de Venezuela. Capítulo VI: El Oligoceno en la subcuenca del Lago de Maracaibo. Capítulo VII: El Mioceno en la subcuenca del Lago de Maracaibo. Capítulo VIII: El Plioceno y el Cuaternario en la subcuenca del Lago de Maracaibo.* Bol. Geol., Caracas, 2(5): 311-330.

Gutiérrez, H. (1990). *Diseño y puesta a punto de un equipo para la medición de susceptibilidad magnética AC.* (Tesis de Licenciado en Física, Universidad Central de Venezuela).

Hall, S., y Evans, I. (1995). *Palaeomagnetic and rock magnetic properties of hydrocarbon reservoir rocks from the Permian Basin, southeastern New Mexico in Paleomagnetic Applications in Hydrocarbon Exploration and Production*, edited by P. Turner and A. Turner, Geological Society Special Publication, 98, pp. 79–95, 1995.

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

Heybroek, F. (1953). *Geological report on the mountain range west of Block "B" (Eastern rim of the Cordillera Oriental, Táchira-Apure, western Venezuela).* Informe inédito Shell/Corpoven: 59 p.

Hurtado, N., Aldana, M., Torres J. (2008). *Comparison between neuro-fuzzy and fractal models for permeability prediction.* Comput. Geosci.

Jorge, José (2001). *Diseño y construcción de un equipo para la medida de susceptibilidad magnética en núcleos de rocas* (Tesis de Magister Scientiarum en Instrumentación, Universidad Central de Venezuela).

Liddle, R. (1928). *The geology of Venezuela and Trinidad.* J P MacGowan, Fort Worth, Texas, 552 p.

Lucena, G. (2001). *Estudio de contrastes magnéticos en muestras de superficie, Flanco Surandino* (Tesis de Ingeniero Geofísico, Universidad Simón Bolívar).

McCabe, C., Roger, S., y Saffer, B. (1987). *Occurrence of secondary magnetite within biodegraded oil.* Geology, 15, 7–10, 1987.

Moya, N. (2008). *Sistemas Neuro Fuzzy.* Consultado en Octubre del 2008 en <http://www.infor.uva.es/~calonso/IAII/Aprendizaje/TrabajoAlumnos/NFmemoria.pdf>.

Notestein, F., Hubman, C., y Bowler, J. (1944). *Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America,* Geol. Soc. Am., Bull., 55: 1165-1215.

Pape, H., Clauser, C. Iffland, J. (1999). *Permeability prediction based on fractal pore-space geometry*. Geophysics 64(5), 1447-1460.

Pérez, A. (1999). *Estudios de las Mineralogías Magnéticas Secundarias en Campos de Oriente y Occidente del País*. (Tesis de Licenciado en Física, Universidad Central de Venezuela).

Puranen R., Puranen M., Sulkanen K. (1994). *Inductive Resistivity Measurement with AC-bridge Apparatus*. Journal of Applied Geophysics, 32 (1994) 99-104.

Roberts, A.P., Turner, G.M., (1993). *Diagenetic formation of ferrimagnetic iron sulphide minerals in rapidly deposited marine sediments, South Island, New Zealand*. Earth Planet. Sci. Lett. 115: 257-273.

Saunders, D. y Terry, S. (1985). *Onshore exploration using the new geochemistry and geomorphology*. Oil & Gas Journal Sept. 16, 126–130, 1985.

Saunders, D., Burson, K. y Thompson C., (1991). *Observed relation of soil magnetic susceptibility and soil gas hydrocarbon analyses to subsurface hydrocarbon accumulations*, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 75, 389–408, 1991.

Saunders, D., Burson, K. y Thompson, C., (1999). *Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations*, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 83, 170–185, 1999.

Staff of Caribbean Petroleum Co. (1948). *Oil fields of Royal Dutch-Shell Group in western Venezuela*. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull, 32(4): 517-628.

Stober, J. y Thompson, R. (1979). *Magnetic remanence acquisition in Finnish Lake sediments*. Geophysics Journal Royal Astronomical Society. 57 727-739.

Sutton, F. A. (1946). *Geology of Maracaibo basin, Venezuela*, Am. Assoc. Geol., Bull., 30: 1621-1741.

Trump, G. y Salvador, W. (1964). *Guide book to the geology of western Táchira*. Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról. 25 p.

Useche, A. (1985). *Estudio geológico de los yacimientos de carbón en el área denominada "Silla de Capote", Rubio, Distrito Junín, estado Táchira*. VI Congreso Geológico Venezolano. Mem., 7: 4431.

Vail, P., Todd, R. y Sangree, J., (1977). *Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level: Part 5. Chronostratigraphic Significance of Seismic Reflections*. Section 2. Application of Seismic Reflection Configuration to Stratigraphic Interpretation Memoir 26, Pages 99 – 116.

Van Houten, F. y James, H. (1984). *Late Cenozoic Guayabo delta complex in southwestern Maracaibo Basin, northeastern Colombia. The Caribbean South American Plate Boundary and Regional Tectonics*. Geol. Soc. of América, Mem., 162: 325-332.

Vigliotti, L., Capotondi, L., Torii, M., 1999. *Magnetic properties of sediments deposited in suboxic-anoxic environments: relationships with biological and geochemical proxies*. D.H. Tarling and P. Turner (Editors). *Palaeomagnetism and Diagenesis in Sediments: Geological Society Special Publication*, 151: 71-83.

Vitiello D., Costanzo V., Gómez G. (1996). *Validación de una Nueva Técnica para Establecer Criterios de Ubicación y Evaluación de Pozos Mediante el Estudio de Mineralogías Magnéticas Secundarias en el Campo La Victoria, Corpoven S. A.* 8° Congreso Venezolano de Geofísica.

Zadeh, L., (1965). *Fuzzy Sets. Information and Control*. Vol. 8: 338-353.

ANEXO 1

**DATOS EXPERIMENTALES DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) Y
COCIENTE S (S) USADOS PARA EL TRATAMIENTO
COMPUTACIONAL CON REDES NEURONALES DIFUSAS**

Nº de muestra	Profundidad (m)	Susceptibilidad Magnética (χ) (SI)	Cociente S
1	6,20	0,00000	0,61080
2	9,51	15,69354	0,39254
3	13,80	22,21240	
4	16,89	18,69366	
5	19,16	13,52059	0,36216
6	19,36	12,35206	0,29630
7	23,40	10,33661	0,38627
8	27,04	17,76668	0,54756
9	40,64	33,68076	
10	45,20	22,92472	
11	51,44	20,13387	0,67443
12	55,44	12,79627	0,32569
13	57,85	14,21235	
14	63,41	23,06099	
15	70,90	24,02240	
16	73,75	1,29883	
17	78,57	18,81478	
18	83,39	22,48110	0,78998
19	91,57	39,35458	0,87861
20	94,16	32,98543	0,87586
21	98,58	26,18944	0,84354
22	105,95	24,62838	0,79199
23	110,37	107,69107	0,95084
24	114,61	45,94491	
25	117,62	33,10655	0,86449
26	121,97	45,39055	0,84106
27	127,40	100,81076	
28	135,95	43,70048	0,86335
29	139,31	52,39229	0,95490
30	145,35	41,22136	
31	147,25	57,10035	0,90415
32	153,55	49,90539	0,93698
33	166,40	34,80218	0,84270
34	167,35	29,45557	
35	172,85	25,10967	
36	178,80	28,03244	0,85550
37	197,45	29,09341	0,78094
38	201,75	28,85197	0,77917
39	205,70	26,18277	
40	209,58	26,31686	0,77241
41	213,91	24,74554	0,70417

42	214,60	18,36831	
43	224,31	23,65945	0,76074
44	232,95	24,98895	
45	237,93	34,16364	0,59727
46	240,46	24,38535	0,93431
47	244,51	15,90798	0,67522
48	250,43	16,17642	0,61343
49	255,19	14,24491	0,90333
50	260,69	23,90168	0,87325
51	264,60	22,92875	0,90395
52	269,02	23,78175	
53	272,12	21,14558	
54	276,02	14,09123	
55	281,24	16,41786	0,75000
56	284,07	15,63776	
57	288,59	20,03945	0,89847
58	288,94	27,42485	
59	292,86	19,81221	
60	297,88	28,01965	
61	302,16	21,72158	0,90768
62	304,75	21,83510	0,57958
63	307,70	25,37123	
64	315,32	17,09596	0,38232
65	320,08	19,52629	0,08673
66	325,18	24,74554	
67	329,85	14,00347	0,84147
68	334,92	15,66575	
69	340,35	30,36177	
70	345,25	31,21520	
71	348,58	30,66277	
72	351,39	27,75366	0,86990
73	355,30	23,90326	0,93105
74	360,82	23,90088	0,91833
75	364,55	18,33031	
76	370,18	25,59255	0,90051
77	375,33	21,23711	0,90590
78	379,26	16,90074	
79	388,10	20,51041	0,83468
80	395,11	14,96923	0,83817
81	397,90	16,36686	
82	403,39	13,00118	0,94608
83	407,54	21,36736	0,93548
84	413,49	29,83640	0,86258

85	419,18	23,66103	
86	426,39	26,06911	
87	429,54	19,79801	
88	435,01	21,97096	
89	439,59	26,56625	
90	442,42	24,39185	0,94583
91	444,94	25,34716	0,93944
92	447,97	23,06451	0,86056
93	450,45	19,78371	0,98855
94	453,65	19,81221	0,94863
95	458,85	22,21240	0,94273
96	462,43	46,59775	0,94121
97	471,55	20,88448	
98	475,15	22,93672	0,94444
99	479,55	31,16868	
100	484,35	19,29925	0,94774
101	487,80	23,17498	0,94050
102	492,05	22,44828	0,95912
103	494,14	28,24838	0,96099
104	497,93	22,82893	0,96296
105	502,78	22,56940	
106	506,93	18,33031	
107	511,97	23,66103	0,97525
108	520,35	19,04022	0,97778
109	524,37	19,55657	
110	527,26	16,20246	0,94750
111	531,05	18,83225	0,94834
112	534,44	21,48808	0,98101
113	536,89	12,15336	0,94795
114	541,75	31,43490	0,93879
115	549,80	21,35823	0,60491
116	561,27	22,44828	0,97714
117	564,50	20,28089	0,95935
118	565,14	0,00000	0,82821
119	572,35	1,93151	0,95828
120	579,24	0,00000	0,92900
121	585,10	3,63350	0,84848
122	590,94	4,84467	0,92349
123	596,16	12,27184	0,95047
124	610,20	13,92842	0,96797
125	616,48	19,41593	0,98750
126	622,47	0,00000	0,81034
127	627,36	14,03683	

128	633,55	2,42233	0,71369
129	638,71	1,87137	0,99343
130	647,86	0,06650	0,98444
131	654,97	4,94860	0,97348
132	660,95	7,26700	0,95503
133	666,62	0,00000	0,95201
134	669,59	4,55746	0,97754

En la columna de valores experimentales de cociente S, las celdas en blanco significan que no se realizaron medidas de dicho parámetro para esa profundidad.

ANEXO 2

**VALORES DE LOS ERRORES REPORTADOS PARA CADA
ENTRENAMIENTO SEGÚN LOS PARÁMETROS ESCOGIDOS DE LA
RED NEURONAL DIFUSA**

Tabla 2.1. División Operacional de Campo. Total de los datos (100% ó 90 datos experimentales). De 2 a 9 reglas difusas (10% del total de datos experimentales). Entrenamiento con: SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	90
10% máx. reglas difusas	9

		MNIMO						5 %						10 %			
		lt.	2 reglas	lt.	3 reglas	lt.	4 reglas	lt.	5 reglas	lt.	6 reglas	lt.	7 reglas	lt.	8 reglas	lt.	9 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	1000	0,18098	70	0,18077	50	0,17958	90	0,17326	70	0,17121	50	0,16456	45	0,16543	40	0,16827
	trapmf	215	0,18196	1000	0,17472	625	0,16946	1000	0,17023	850	0,16613	440	0,16607	90	0,16553	690	0,16417
	gbellmf	300	0,17835	510	0,16877	1000	0,16753	800	0,16700	300	0,16786	285	0,16414	205	0,16559	115	0,16582
	gaussmf	1000	0,18079	1000	0,17504	1000	0,16907	1000	0,16728	1000	0,16573	1000	0,16466	1000	0,15973	1000	0,16290
	gauss2mf	1000	0,18053	630	0,17710	1000	0,16673	1000	0,16659	850	0,16506	1000	0,16382	1000	0,16349	820	0,16231
	pimf	125	0,18201	1000	0,17585	1000	0,16872	1000	0,16927	1000	0,16477	1000	0,16456	800	0,16409	1000	0,16223
	dsigmf	65	0,18018	75	0,17094	365	0,16803	120	0,16462	180	0,16554	1000	0,16424	1000	0,16333	150	0,16465
	psigmf	60	0,18018	65	0,17094	1000	0,16523	100	0,16808	150	0,16570	1000	0,16424	1000	0,16333	900	0,15588

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.2. División Operacional de Campo. Total de los datos (100% ó 90 datos experimentales). De 2 a 9 reglas difusas (10% del total de datos experimentales). Entrenamiento con: SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – LOGARITMO DEL COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	90
10% máx. reglas difusas	9

		MNIMO						5 %						10 %					
		lt.	2 reglas	lt.	3 reglas	lt.	4 reglas	lt.	5 reglas	lt.	6 reglas	lt.	7 reglas	lt.	8 reglas	lt.	9 reglas		
Funciones de pertenencia	trimf	780	0,14996	1000	0,14475	75	0,14839	1000	0,14221	65	0,14258	55	0,14086	60	0,14058	75	0,13941		
	trapmf	400	0,15096	1000	0,14494	500	0,14176	600	0,14398	850	0,13998	600	0,14012	130	0,13937	290	0,13921		
	gbellmf	300	0,14749	500	0,14163	825	0,14136	970	0,14088	125	0,14168	140	0,14056	750	0,13680	800	0,13713		
	gaussmf	1000	0,14989	1000	0,14490	1000	0,14184	1000	0,14101	1000	0,14001	1000	0,13898	760	0,13894	1000	0,13805		
	gauss2mf	1000	0,14967	650	0,14629	850	0,14151	1000	0,14124	740	0,13966	1000	0,13913	1000	0,13728	670	0,13620		
	pimf	200	0,15099	100	0,14532	1000	0,14144	1000	0,14158	1000	0,13950	1000	0,13933	1000	0,13651	1000	0,13618		
	dsigmf	75	0,14934	70	0,14277	160	0,14165	165	0,14159	130	0,14073	1000	0,13916	250	0,13917	320	0,13884		
	psigmf	65	0,14934	75	0,14277	430	0,14150	150	0,14170	320	0,13959	1000	0,13916	800	0,13649	1000	0,13335		

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.3. División Operacional de Campo. Total de los datos (100% ó 85 datos experimentales). De 2 a 9 reglas difusas (10% del total de datos experimentales). Entrenamiento con: LOGARITMO DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	85
10% máx. reglas difusas	9

		MNIMO				5 %				10 %							
		It.	2 reglas	It.	3 reglas	It.	4 reglas	It.	5 reglas	It.	6 reglas	It.	7 reglas	It.	8 reglas	It.	9 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	288	0,17603	65	0,17827	45	0,16870	35	0,16608	25	0,16639	25	0,16538	25	0,16840	25	0,16566
	trapmf	75	0,17632	55	0,17452	71	0,17236	55	0,16944	45	0,16694	30	0,16845	40	0,16387	30	0,16571
	gbellmf	305	0,16845	130	0,17059	150	0,16680	110	0,16316	65	0,16435	120	0,16432	55	0,15937	50	0,16415
	gaussmf	210	0,17424	100	0,17097	210	0,16508	135	0,16691	115	0,16637	110	0,16422	50	0,16419	110	0,16424
	gauss2mf	290	0,17218	60	0,17011	75	0,16719	55	0,16583	40	0,16276	50	0,16403	35	0,16402	30	0,16467
	pimf	255	0,17218	100	0,16877	91	0,16752	85	0,16664	100	0,16471	190	0,16151	75	0,16208	80	0,16224
	dsigmf	1000	0,17574	93	0,17216	65	0,16709	70	0,16551	75	0,16336	120	0,16449	60	0,16398	60	0,16470
	psigmf	1000	0,17574	80	0,17217	80	0,16709	106	0,16551	77	0,16336	115	0,16449	60	0,16398	55	0,16470

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.4. División Operacional de Campo. Total de los datos (100% ó 85 datos experimentales). De 2 a 9 reglas difusas (10% del total de datos experimentales). Entrenamiento con: LOGARITMO DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – LOGARITMO DEL COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	90
10% máx. reglas difusas	9

		MNIMO				5 %										10 %	
		lt.	2 reglas	lt.	3 reglas	lt.	4 reglas	lt.	5 reglas	lt.	6 reglas	lt.	7 reglas	lt.	8 reglas	lt.	9 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	165	0,14808	180	0,14625	40	0,14345	35	0,14448	25	0,14266	30	0,14240	25	0,14390	30	0,14294
	trapmf	40	0,14831	60	0,14682	55	0,14606	60	0,14364	30	0,14561	30	0,14346	35	0,14117	40	0,14237
	gbellmf	270	0,14317	350	0,14444	105	0,14333	135	0,14190	67	0,14177	65	0,14169	55	0,13877	50	0,14174
	gaussmf	200	0,14704	90	0,14484	245	0,14285	110	0,14275	235	0,13978	90	0,13986	38	0,14113	45	0,13986
	gauss2mf	300	0,14611	50	0,14446	75	0,14354	40	0,14261	45	0,14086	35	0,14096	25	0,14115	25	0,14197
	pimf	250	0,14608	145	0,14449	175	0,14294	65	0,14253	95	0,14189	150	0,14003	50	0,14089	95	0,14094
	dsigmf	1000	0,14800	80	0,14538	65	0,14349	65	0,14246	85	0,14227	50	0,14074	55	0,14118	65	0,14201
	psigmf	1000	0,14800	85	0,14538	60	0,14349	65	0,14246	85	0,14227	50	0,14074	50	0,14118	55	0,14201

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.5. División Operacional de Campo. Formación Guayabo (52 datos experimentales). De 2 a 5 reglas difusas (10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	52
10% máx. reglas difusas	5

		MNIMO		5 %				10 %	
		lt.	2 reglas	lt.	3 reglas	lt.	4 reglas	lt.	5 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	1000	0,17464	1000	0,16994	1000	0,16477	80	0,16522
	trapmf	1000	0,17203	1000	0,16891	190	0,16344	950	0,15986
	gbellmf	1000	0,17395	1000	0,16205	480	0,16274	570	0,16246
	gaussmf	1000	0,17475	1000	0,16868	1000	0,16485	1000	0,16482
	gauss2mf	1000	0,17449	1000	0,16049	1000	0,15988	1000	0,15407
	pimf	1000	0,17445	1000	0,16838	1000	0,15886	1000	0,15949
	dsigmf	80	0,17444	55	0,17104	1000	0,15328	300	0,16043
	psigmf	50	0,17444	50	0,17101	1000	0,14303	1000	0,15864

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.6. División Operacional de Campo. Formación Guayabo (52 datos experimentales). De 2 a 5 reglas difusas (10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – LOGARITMO DEL COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	52
10% máx. reglas difusas	5

		MNIMO		5 %				10 %	
		lt.	2 reglas	lt.	3 reglas	lt.	4 reglas	lt.	5 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	1000	0,16409	1000	0,16066	180	0,15888	150	0,15788
	trapmf	1000	0,16336	450	0,16123	165	0,15719	1000	0,15167
	gbellmf	1000	0,16429	1000	0,15453	1000	0,15173	665	0,15661
	gaussmf	1000	0,16492	1000	0,16035	1000	0,15840	680	0,15864
	gauss2mf	1000	0,16468	1000	0,15383	1000	0,15335	1000	0,14940
	pimf	1000	0,16442	1000	0,15965	1000	0,15309	1000	0,15383
	dsigmf	60	0,16465	65	0,15772	815	0,10145	370	0,15447
	psigmf	60	0,16465	60	0,15772	520	0,10277	1000	0,15375

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.7. División Operacional de Campo. Formación Guayabo (51 datos experimentales). De 2 a 5 reglas difusas (10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: LOGARITMO DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	51
10% máx. reglas difusas	5

		MNIMO		5 %				10 %	
		It.	2 reglas	It.	3 reglas	It.	4 reglas	It.	5 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	65	0,16881	30	0,16575	30	0,16413	30	0,15446
	trapmf	70	0,16646	40	0,16121	45	0,15706	65	0,15204
	gbellmf	120	0,16677	65	0,16347	80	0,14792	70	0,13351
	gaussmf	85	0,16624	60	0,16131	45	0,14880	50	0,14873
	gauss2mf	50	0,16622	65	0,16068	45	0,14987	51	0,15117
	pimf	105	0,16611	65	0,15580	100	0,14279	105	0,12901
	dsigmf	80	0,16637	80	0,16136	45	0,15061	70	0,14093
	psigmf	70	0,16637	60	0,16136	45	0,15061	65	0,13984

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.8. División Operacional de Campo. Formación Guayabo (51 datos experimentales). De 2 a 5 reglas difusas (10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: LOGARITMO DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – LOGARITMO DEL COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	51
10% máx. reglas difusas	5

		MNIMO		5 %				10 %	
		It.	2 reglas	It.	3 reglas	It.	4 reglas	It.	5 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	75	0,16074	45	0,15986	30	0,15812	30	0,11183
	trapmf	40	0,16068	21	0,15107	80	0,14628	35	0,15314
	gbellmf	95	0,15894	95	0,15732	105	0,14150	65	0,09716
	gaussmf	115	0,15792	60	0,15420	55	0,14268	65	0,13721
	gauss2mf	45	0,15995	50	0,15376	45	0,14470	35	0,15014
	pimf	90	0,15992	75	0,14431	170	0,09407	95	0,08812
	dsigmf	90	0,16000	60	0,15558	45	0,14646	55	0,12082
	psigmf	70	0,16000	55	0,15558	42	0,14646	70	0,12134

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.9. División Operacional de Campo. Formación León (23 datos experimentales). De 2 a 3 reglas difusas (2 reglas es el 10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	23
10% máx. reglas difusas	2

		10%			
		It.	2 reglas	It.	3 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	505	0,07461	65	0,07339
	trapmf	1000	0,07466	560	0,07164
	gbellmf	1000	0,07385	320	0,07398
	gaussmf	1000	0,07497	1000	0,07394
	gauss2mf	1000	0,07414	740	0,07190
	pimf	1000	0,07465	1000	0,07305
	dsigmf	95	0,07484	170	0,07394
	psigmf	95	0,07484	190	0,07394

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.10. División Operacional de Campo. Formación León (23 datos experimentales). De 2 a 3 reglas difusas (2 reglas es el 10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – LOGARITMO DEL COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	23
10% máx. reglas difusas	2

		10 %			
		It.	2 reglas	It.	3 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	380	0,04159	75	0,04098
	trapmf	1000	0,04161	560	0,03988
	gbellmf	1000	0,04118	300	0,04122
	gaussmf	1000	0,04178	1000	0,04120
	gauss2mf	1000	0,04131	715	0,03994
	pimf	1000	0,04159	1000	0,04067
	dsigmf	85	0,04171	150	0,04120
	psigmf	90	0,04171	1000	0,03162

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.11. División Operacional de Campo. Formación León (22 datos experimentales). De 2 a 3 reglas difusas (2 reglas es el 10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: LOGARITMO DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	22
10% máx. reglas difusas	2

		10 %			
		It.	2 reglas	It.	3 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	75	0,07603	30	0,07534
	trapmf	60	0,07485	25	0,07334
	gbellmf	75	0,07140	30	0,07301
	gaussmf	60	0,07537	55	0,06770
	gauss2mf	45	0,07526	35	0,07286
	pimf	50	0,07494	40	0,07183
	dsigmf	35	0,07548	30	0,07364
	psigmf	35	0,07548	35	0,07364

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.12. División Operacional de Campo. Formación León (22 datos experimentales). De 2 a 3 reglas difusas (2 reglas es el 10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: LOGARITMO DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – LOGARITMO DEL COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	22
10% máx. reglas difusas	2

		10 %			
		lt.	2 reglas	lt.	3 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	50	0,04238	30	0,04197
	trapmf	35	0,04171	30	0,04078
	gbellmf	85	0,03969	40	0,04052
	gaussmf	55	0,04186	55	0,03785
	gauss2mf	38	0,04180	35	0,04033
	pimf	45	0,04158	40	0,04000
	dsigmf	35	0,04197	30	0,04094
	psigmf	35	0,04197	30	0,04094

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.13. División Operacional de Campo. Formación Carbonera (15 datos experimentales). De 2 a 3 reglas difusas (2 reglas es el 10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	15
10% máx. reglas difusas	2

		10%			
		It.	2 reglas	It.	3 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	73	0,07158	55	0,06812
	trapmf	500	0,07050	550	0,06447
	gbellmf	1000	0,06696	1000	0,06427
	gaussmf	1000	0,07151	640	0,06431
	gauss2mf	1000	0,06742	240	0,06429
	pimf	500	0,07200	365	0,06429
	dsigmf	520	0,07200	1000	0,06413
	psigmf	520	0,07200	1000	0,06413

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.14. División Operacional de Campo. Formación Carbonera (15 datos experimentales). De 2 a 3 reglas difusas (2 reglas es el 10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – LOGARITMO DEL COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	15
10% máx. reglas difusas	2

		10 %			
		It.	2 reglas	It.	3 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	35	0,03646	45	0,0347040
	trapmf	500	0,03578	620	0,0326210
	gbellmf	1000	0,03378	1000	0,0325310
	gaussmf	1000	0,03626	620	0,0325500
	gauss2mf	1000	0,03444	200	0,0325330
	pimf	400	0,03658	360	0,0325310
	dsigmf	180	0,03658	1000	0,0325330
	psigmf	190	0,03658	1000	0,0325330

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.15. División Operacional de Campo. Formación Carbonera (12 datos experimentales). De 2 a 3 reglas difusas (1 reglas es el 10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: LOGARITMO DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	12
10% de reglas difusas	1

		It.	2 reglas	It.	3 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	95	0,06980	130	0,02815
	trapmf	78	0,05153	125	0,03136
	gbellmf	400	0,05244	110	0,01431
	gaussmf	115	0,06354	125	0,01405
	gauss2mf	100	0,05669	110	0,01487
	pimf	55	0,05155	105	0,01413
	dsigmf	875	0,05210	140	0,01613
	psigmf	1000	0,05334	106	0,01613

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.16. División Operacional de Campo. Formación Carbonera (12 datos experimentales). De 2 a 3 reglas difusas (1 reglas es el 10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: LOGARITMO DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – LOGARITMO DEL COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	21
10% de reglas difusas	1

		It.	2 reglas	It.	3 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	50	0,03584	30	0,03580
	trapmf	50	0,02675	30	0,02893
	gbellmf	405	0,02726	125	0,00658
	gaussmf	105	0,03270	85	0,00660
	gauss2mf	70	0,02940	80	0,00670
	pimf	65	0,02677	80	0,00646
	dsigmf	900	0,02710	110	0,00744
	psigmf	1000	0,02771	115	0,00744

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.17. División Operacional de Campo. Formaciones León – Carbonera (38 datos experimentales). De 2 a 4 reglas difusas (10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	38
10% máx. reglas difusas	4

		5 %				10 %	
		It.	2 reglas	It.	3 reglas	It.	4 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	40	0,07497	70	0,07428	375	0,07454
	trapmf	1000	0,07495	1000	0,07470	1000	0,07249
	gbellmf	1000	0,07447	680	0,07413	970	0,06707
	gaussmf	1000	0,07512	1000	0,07432	1000	0,06737
	gauss2mf	1000	0,07490	800	0,07319	820	0,06151
	pimf	1000	0,07496	1000	0,07455	1000	0,07107
	dsigmf	1000	0,07335	135	0,07460	232	0,07227
	psigmf	110	0,07503	135	0,07459	235	0,07159

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.18. División Operacional de Campo. Formaciones León – Carbonera (38 datos experimentales). De 2 a 4 reglas difusas (10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – LOGARITMO DEL COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	38
10% máx. reglas difusas	4

		5 %				10 %	
		It.	2 reglas	It.	3 reglas	It.	4 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	40	0,04036	55	0,03992	220	0,04002
	trapmf	1000	0,04026	570	0,03973	440	0,03932
	gbellmf	1000	0,03999	560	0,03996	1000	0,03532
	gaussmf	1000	0,04036	1000	0,03983	1000	0,03579
	gauss2mf	1000	0,04011	790	0,03922	730	0,03228
	pimf	1000	0,04027	1000	0,03992	1000	0,03804
	dsigmf	95	0,04031	145	0,04004	240	0,03831
	psigmf	85	0,04031	135	0,04004	235	0,03800

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.19. División Operacional de Campo. Formaciones León – Carbonera (34 datos experimentales). De 2 a 3 reglas difusas (10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: LOGARITMO DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	34
10% máx. reglas difusas	3

		5 %		10 %	
		It.	2 reglas	It.	3 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	35	0,07524	40	0,07519
	trapmf	135	0,07290	133	0,06834
	gbellmf	690	0,07304	240	0,06259
	gaussmf	165	0,07275	90	0,06271
	gauss2mf	300	0,07210	70	0,06669
	pimf	205	0,07210	202	0,06266
	dsigmf	1000	0,07341	180	0,06265
	psigmf	1000	0,07341	160	0,06265

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

Tabla 2.20. División Operacional de Campo. Formaciones León – Carbonera (34 datos experimentales). De 2 a 3 reglas difusas (10% de los datos experimentales). Entrenamiento con: LOGARITMO DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (χ) – LOGARITMO DEL COCIENTE S (S).

Tolerancia	0
Iteraciones (It.)	Las necesarias
Total datos	34
10% máx. reglas difusas	3

		5 %		10 %	
		It.	2 reglas	It.	3 reglas
Funciones de pertenencia	trimf	35	0,04083	45	0,04079
	trapmf	110	0,04020	136	0,03764
	gbellmf	755	0,03975	230	0,03472
	gaussmf	170	0,03963	85	0,03480
	gauss2mf	310	0,03935	45	0,03669
	pimf	210	0,03935	240	0,03477
	dsigmf	1000	0,03994	150	0,03477
	psigmf	1000	0,03994	160	0,03477

Valores de iteraciones menores a 1000 significa que el error para esa iteración indicada es estable, es decir, no disminuye para mayores iteraciones.

ANEXO 3

**RESULTADOS COMPUTACIONALES. GRÁFICAS DEL COCIENTE S INFERIDO Y
EXPERIMENTAL EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL POZO DIVIDIDOS
SEGÚN LA DIVISIÓN OPERACIONAL DE CAMPO**

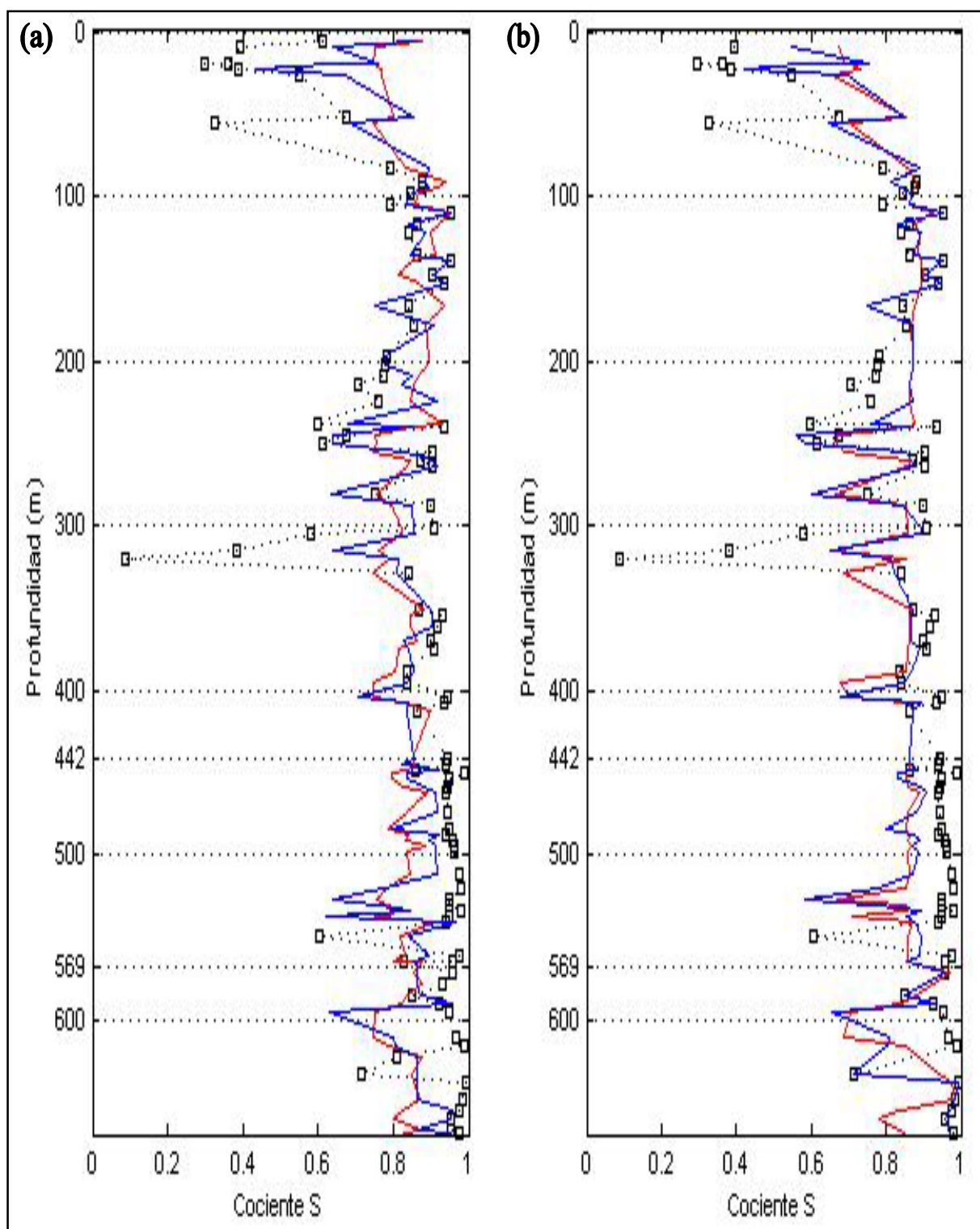


Figura 1. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 90 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 85 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S ; línea continua roja – valores inferidos de cociente S para 3 reglas difusas; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 18 reglas (b) 17 reglas.

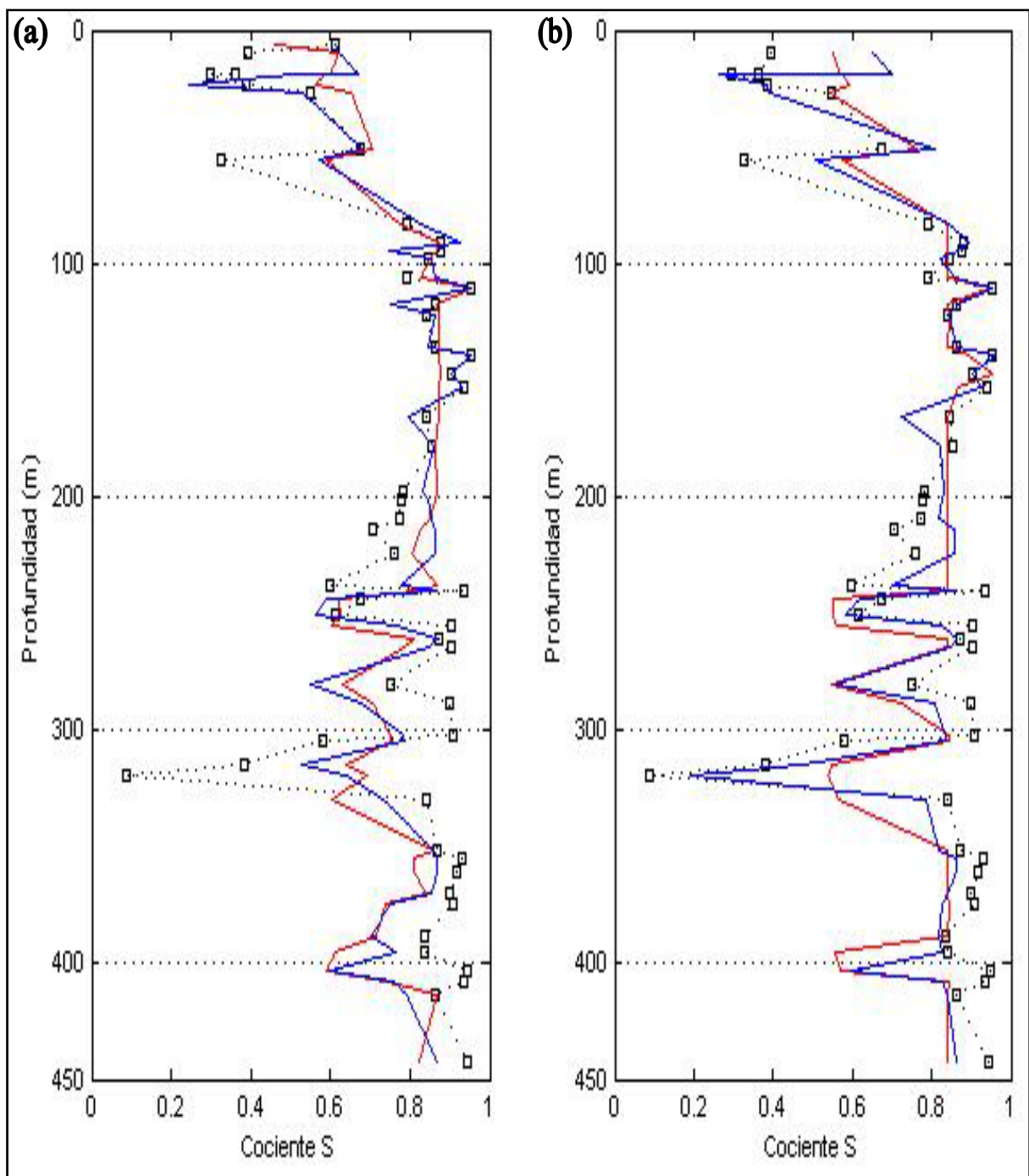


Figura 2. Formación Guayabo. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 52 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 51 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S; línea continua roja – valores inferidos de cociente S para 3 reglas difusas; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 10 reglas (b) 10 reglas.

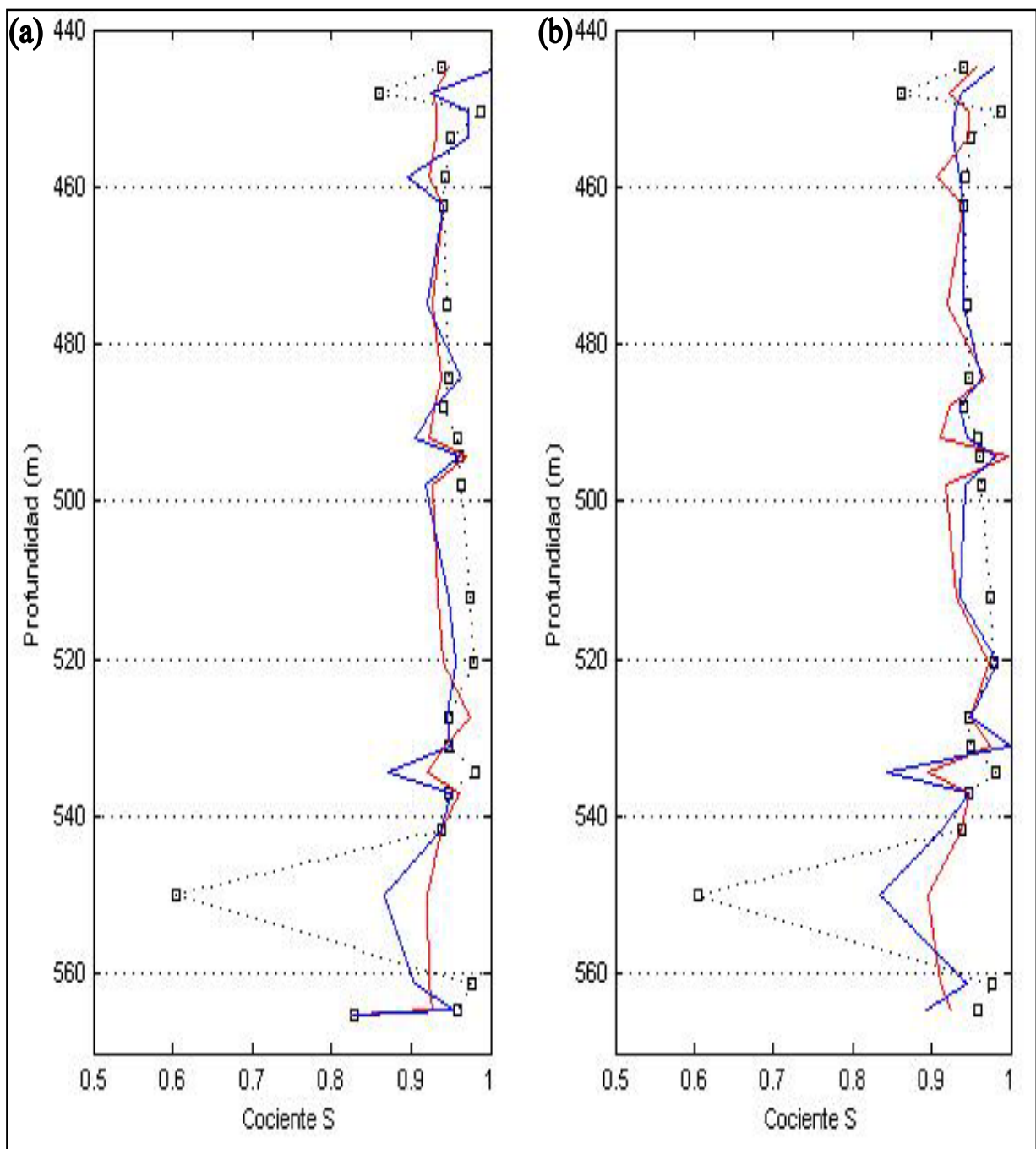


Figura 3. Formación León. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 23 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 22 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S; línea continua roja – valores inferidos de cociente S para 3 reglas difusas; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 5 reglas (b) 4 reglas.

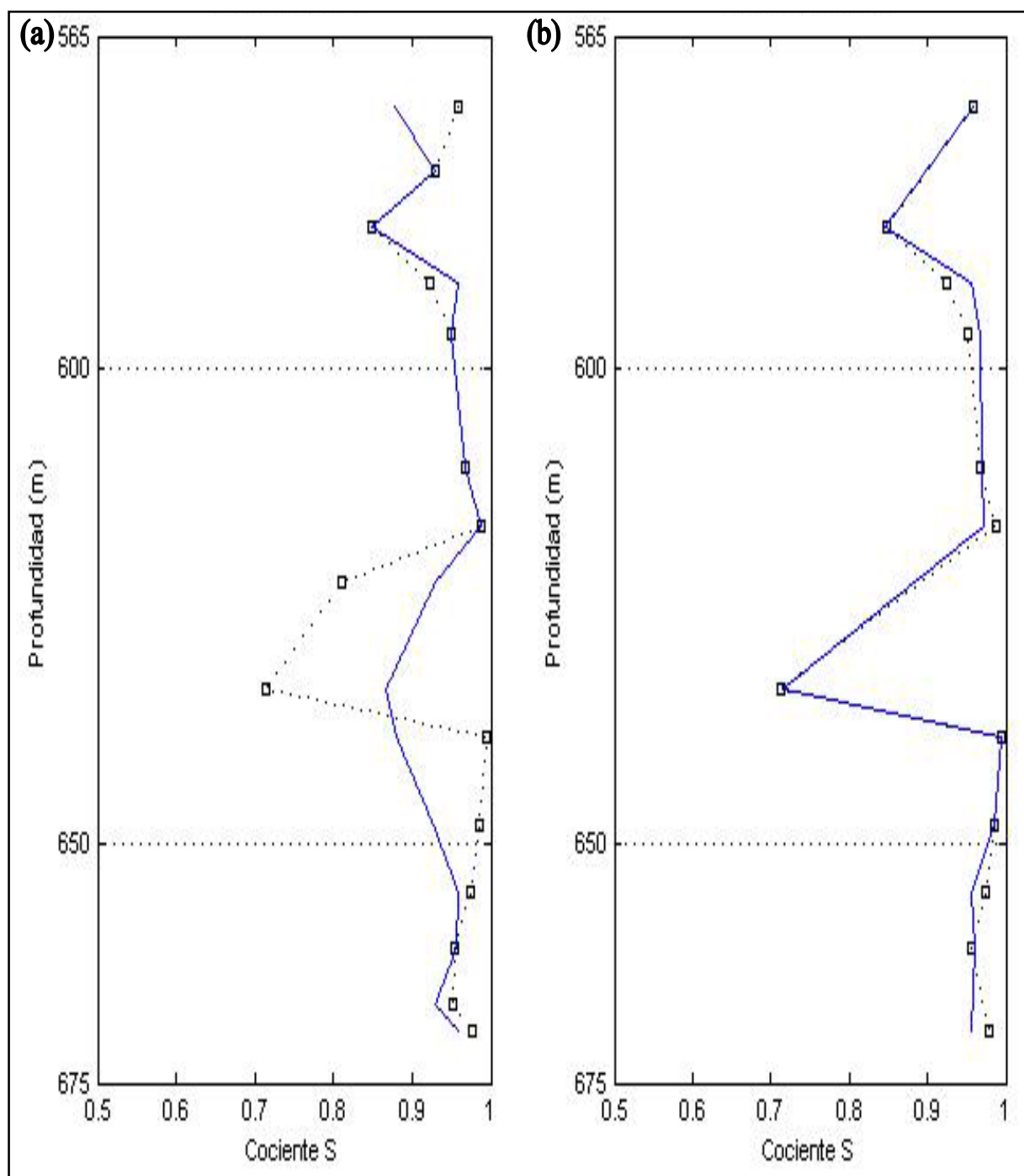


Figura 4. Formación Carbonera. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 15 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 12 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S ; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 3 reglas (b) 3 reglas.

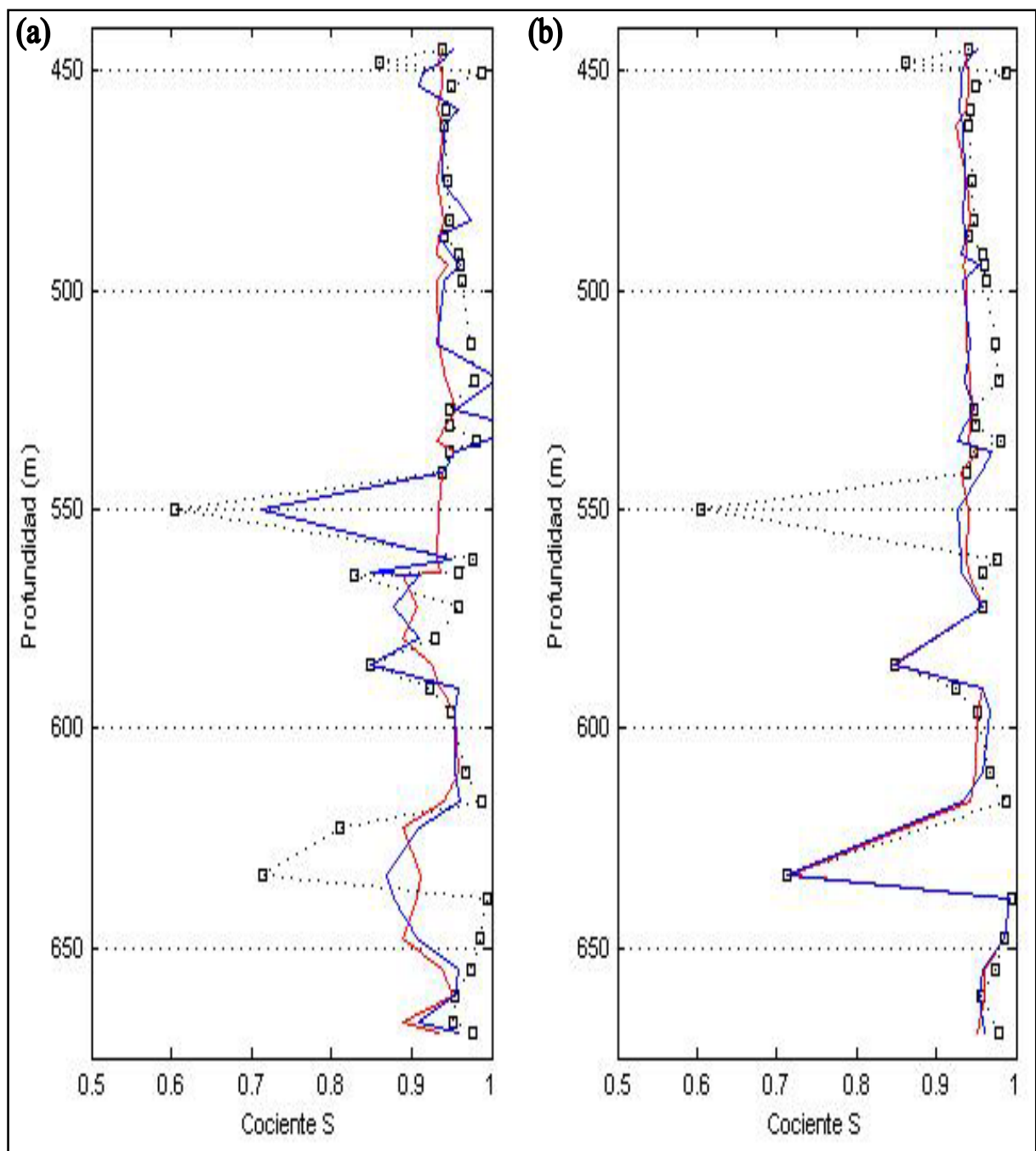


Figura 5. Formación León y Carbonera. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 38 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 34 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S; línea continua roja – valores inferidos de cociente S para 3 reglas difusas; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 8 reglas (b) 7 reglas.

ANEXO 4

**RESULTADOS COMPUTACIONALES. GRÁFICAS DEL COCIENTE S INFERIDO Y
EXPERIMENTAL EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL POZO DIVIDIDOS
SEGÚN LAS EDADES GEOLÓGICAS (ENVOLVENTES TRANSGRESIVAS)**

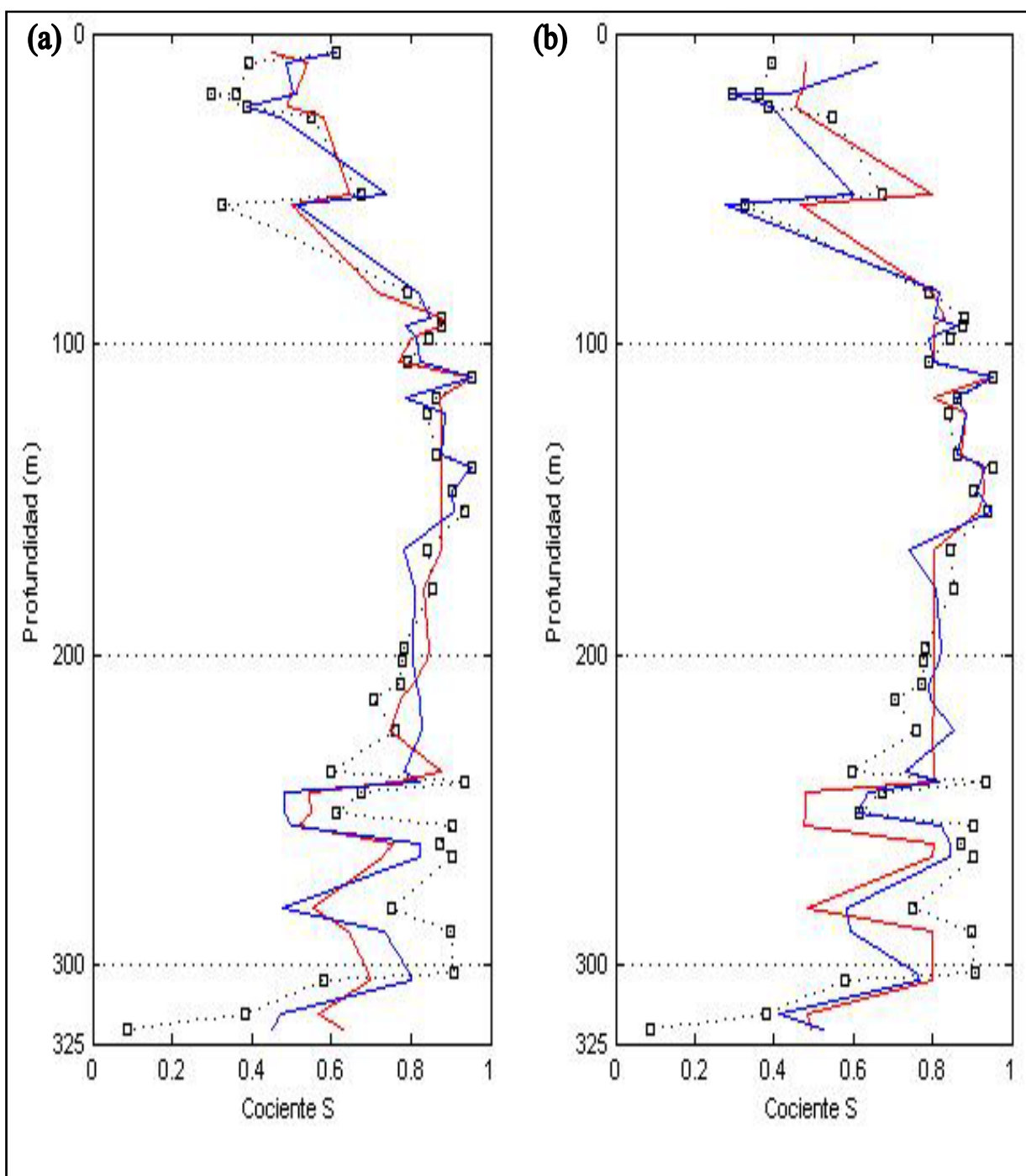


Figura 1. Formación Guayabo. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 40 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 39 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S; línea continua roja – valores inferidos de cociente S para 3 reglas difusas; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 8 reglas (b) 8 reglas.

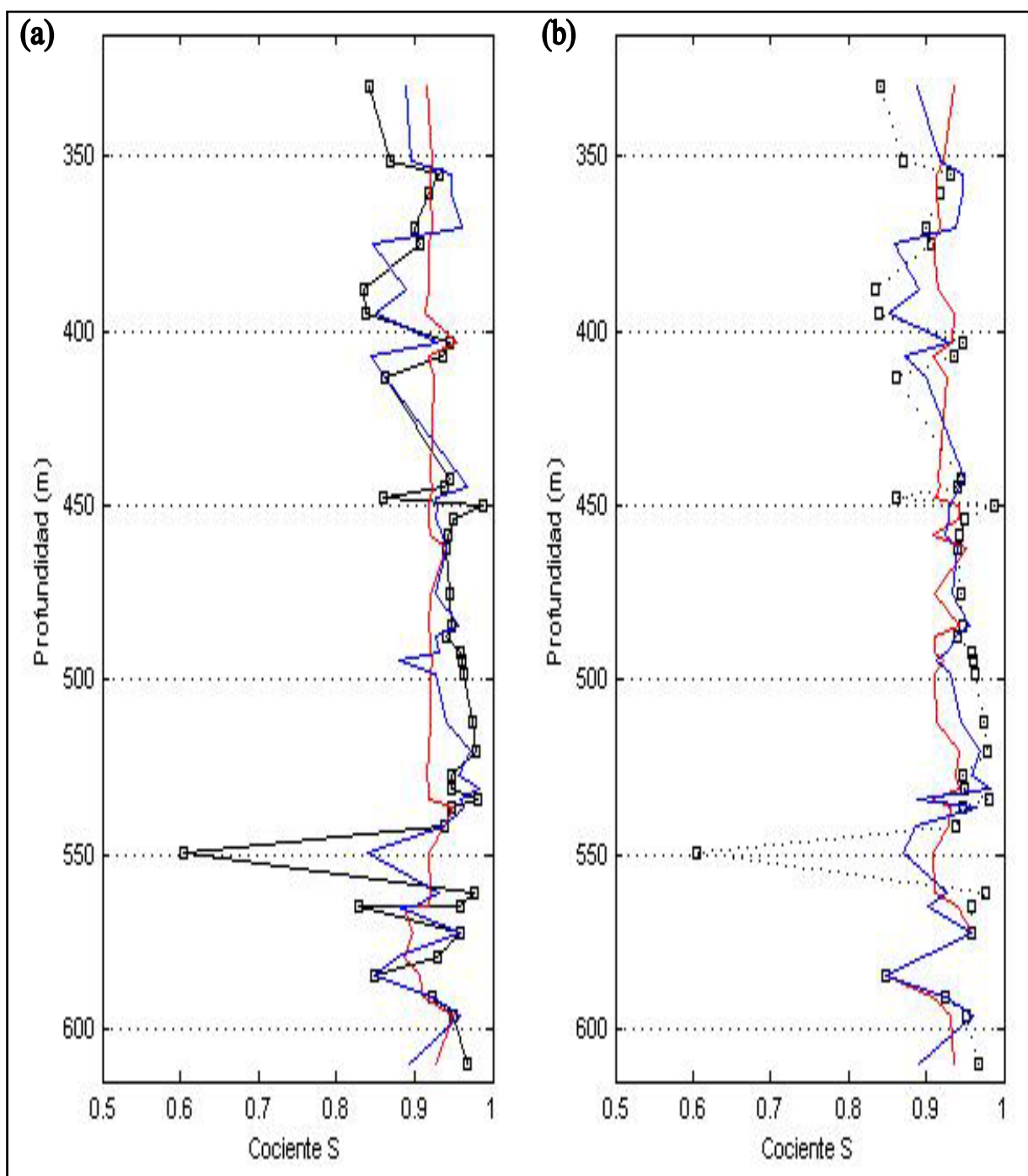


Figura 2. Formación León. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 41 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 39 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S; línea continua roja – valores inferidos de cociente S para 3 reglas difusas; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 8 reglas (b) 8 reglas.

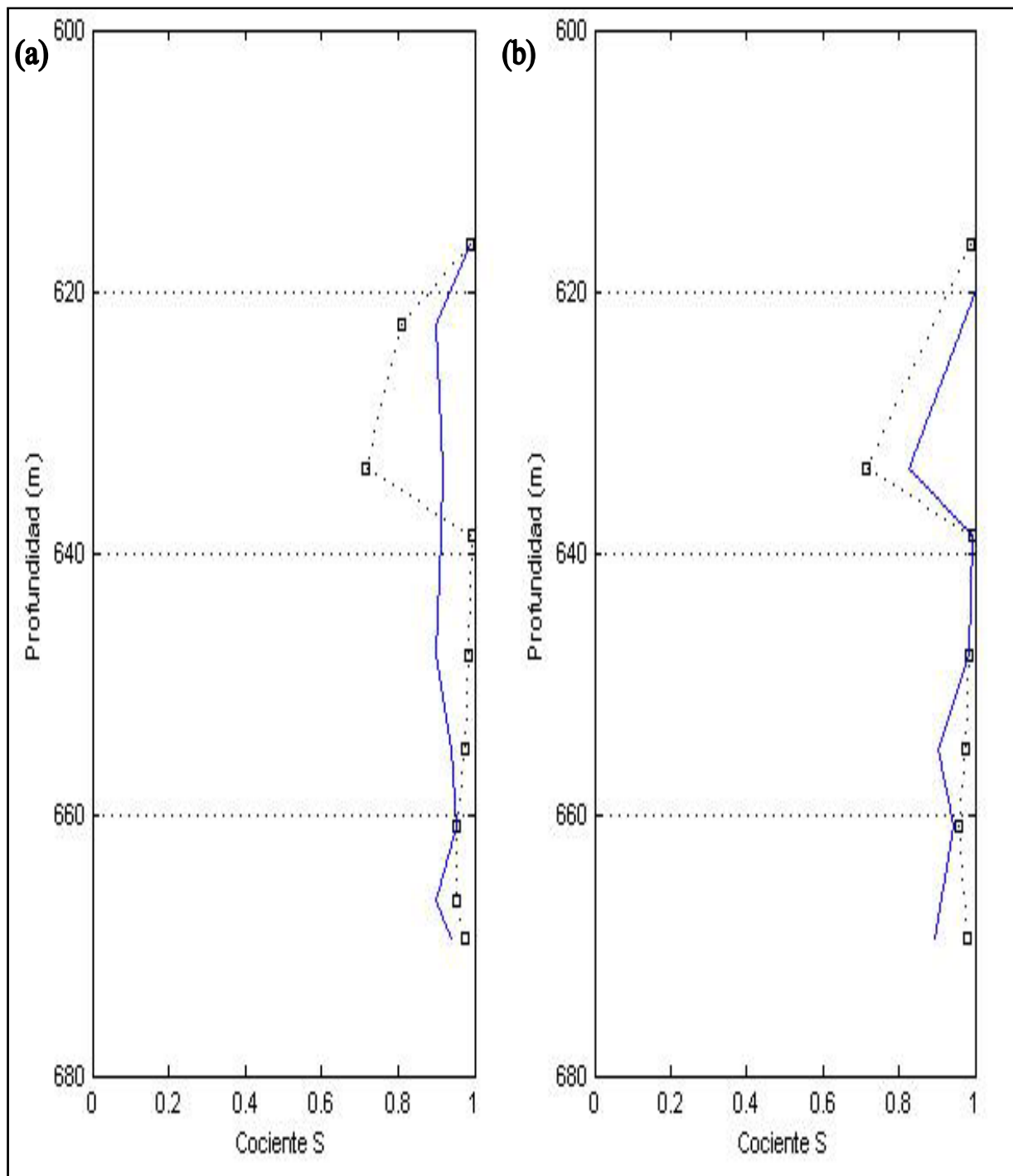


Figura 3. Formación Carbonera. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 9 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 7 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S ; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 2 reglas (b) 2 reglas.

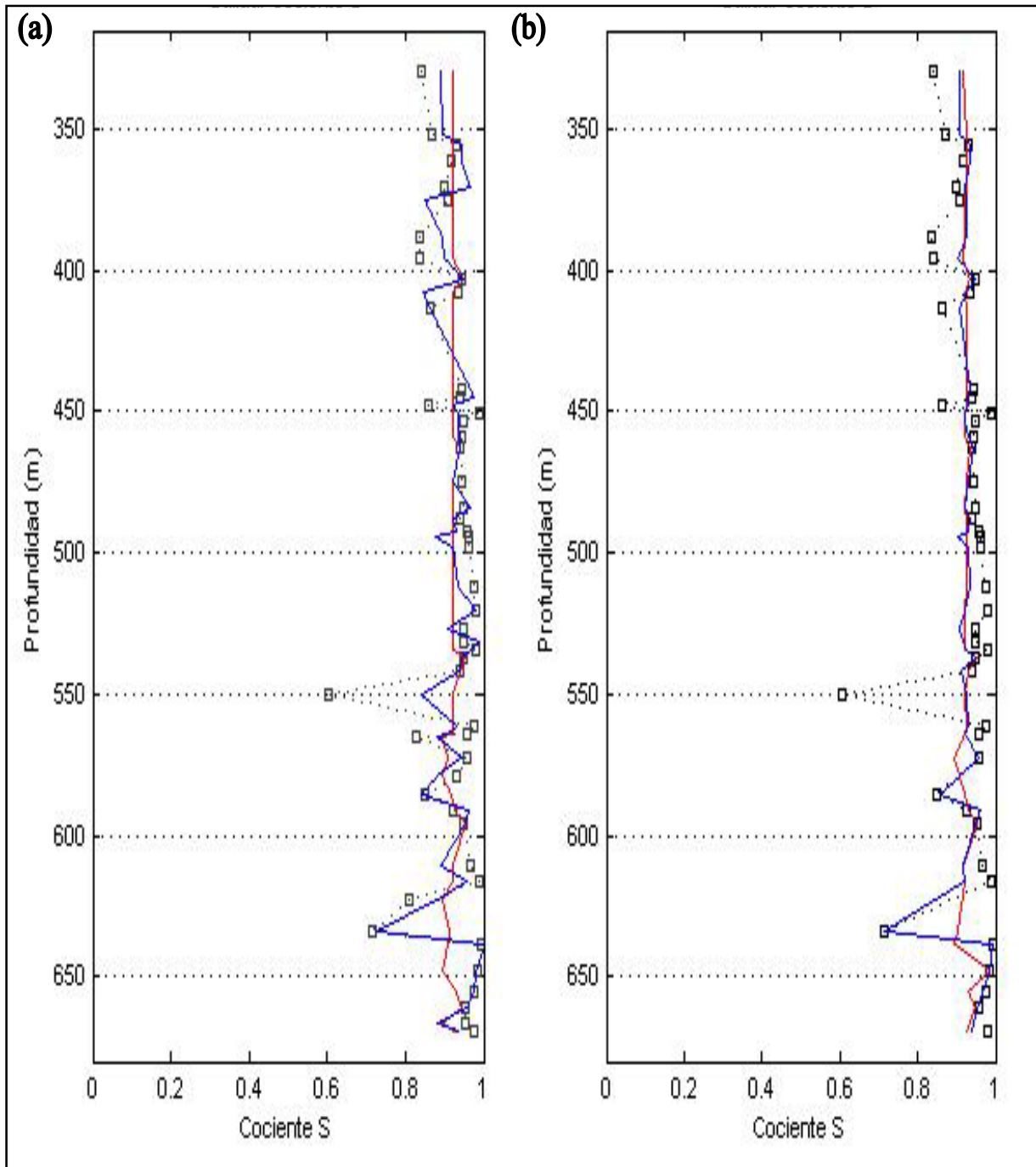


Figura 4. Formación León y Carbonera. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 50 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 46 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S ; línea continua roja – valores inferidos de cociente S para 3 reglas difusas; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 10 reglas (b) 9 reglas.

ANEXO 5

**RESULTADOS COMPUTACIONALES. GRÁFICAS DEL COCIENTE S INFERIDO Y
EXPERIMENTAL EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL POZO DIVIDIDOS
SEGÚN AMBIENTES REDUCTORES ($S \geq 0.66$) Y EDADES GEOLÓGICAS (ENVOLVENTES
TRANSGRESIVAS)**

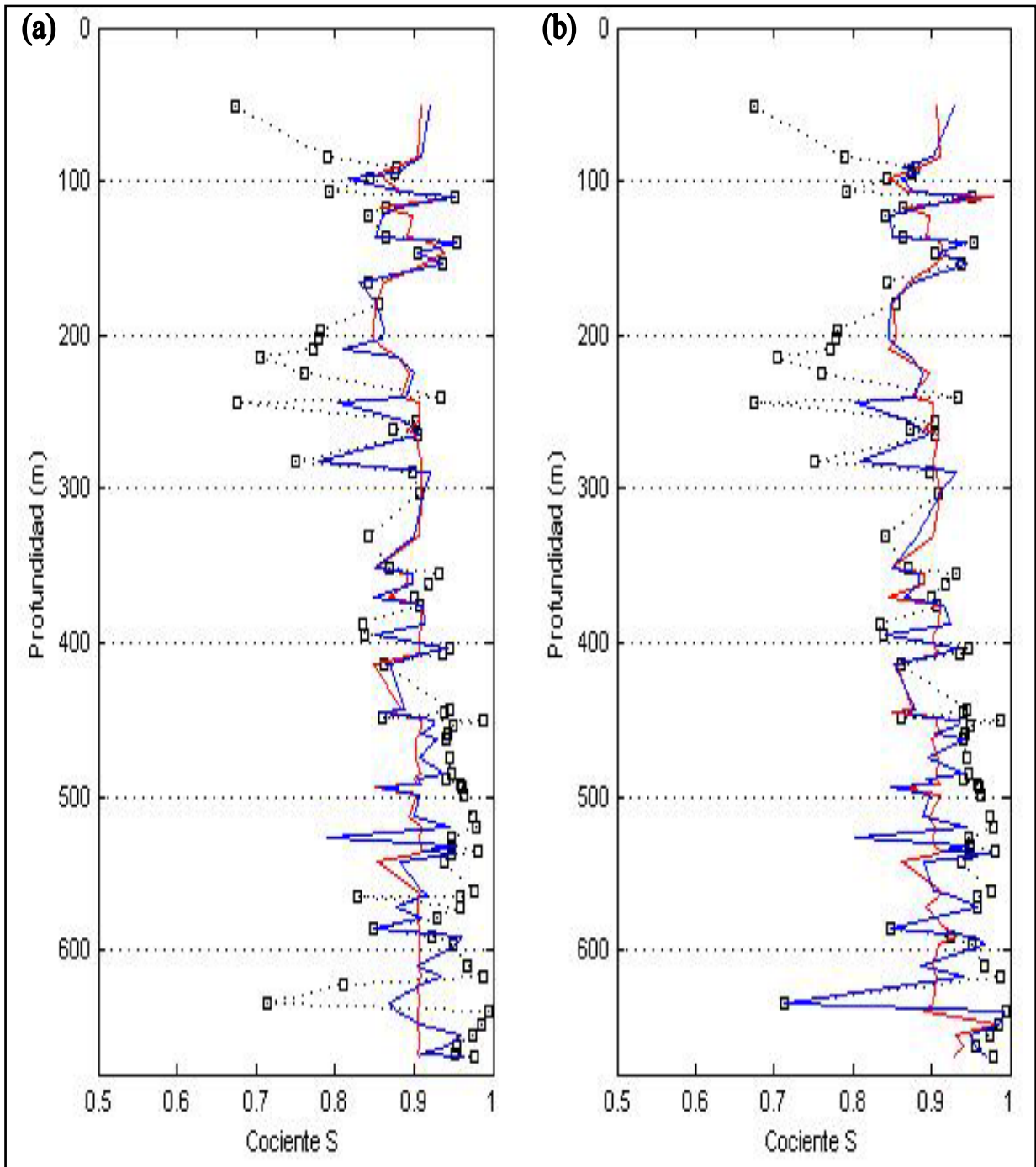


Figura 1. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 77 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 73 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S ; línea continua roja – valores inferidos de cociente S para 3 reglas difusas; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 15 reglas (b) 15 reglas.

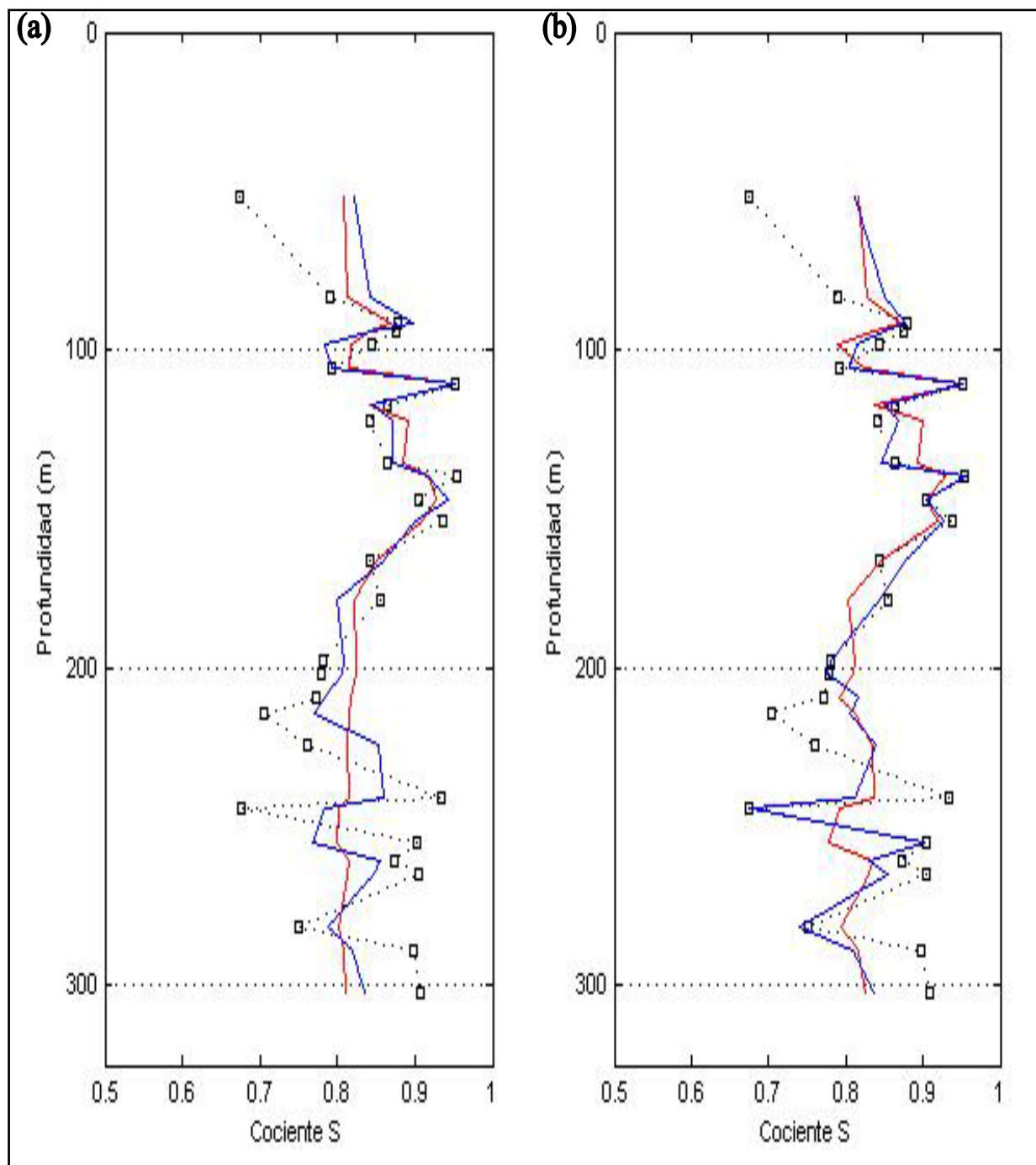


Figura 2. Formación Guayabo. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 28 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 28 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S ; línea continua roja – valores inferidos de cociente S para 3 reglas difusas; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 6 reglas (b) 6 reglas.

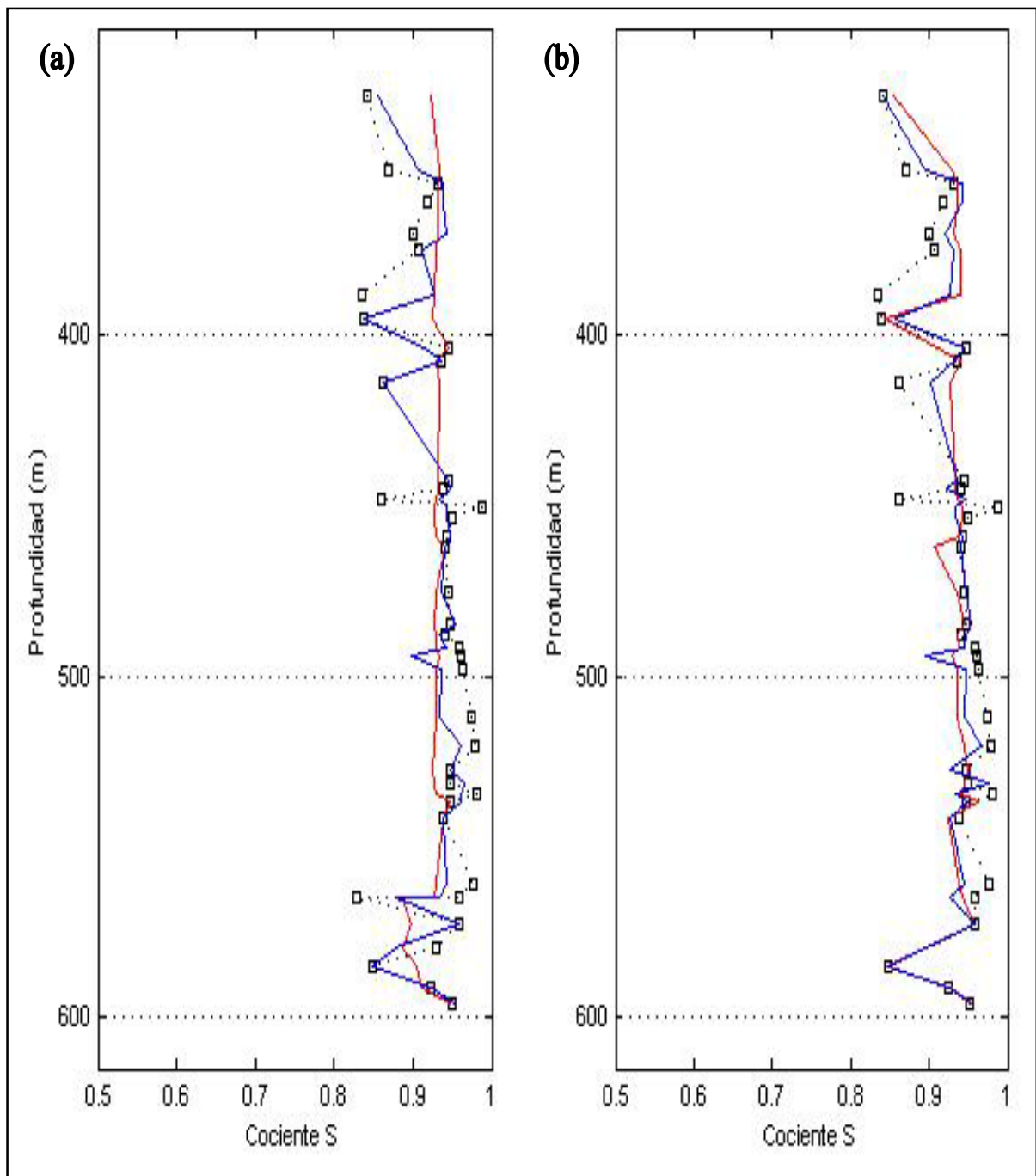


Figura 3. Formación León. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 39 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 37 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S ; línea continua roja – valores inferidos de cociente S para 3 reglas difusas; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 8 reglas (b) 7 reglas.

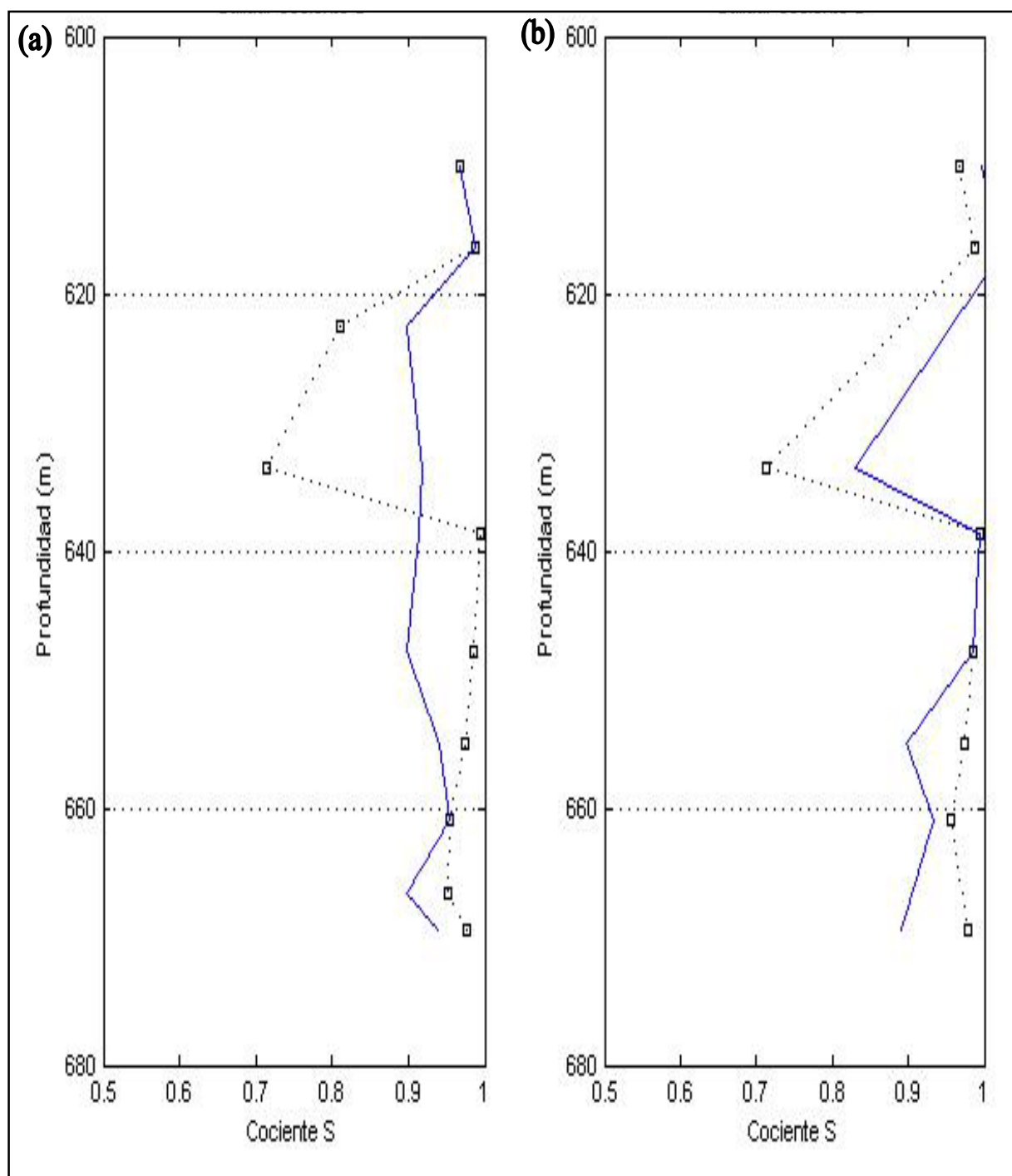


Figura 4. Formación Carbonera. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 10 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 8 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S ; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 2 reglas (b) 2 reglas.

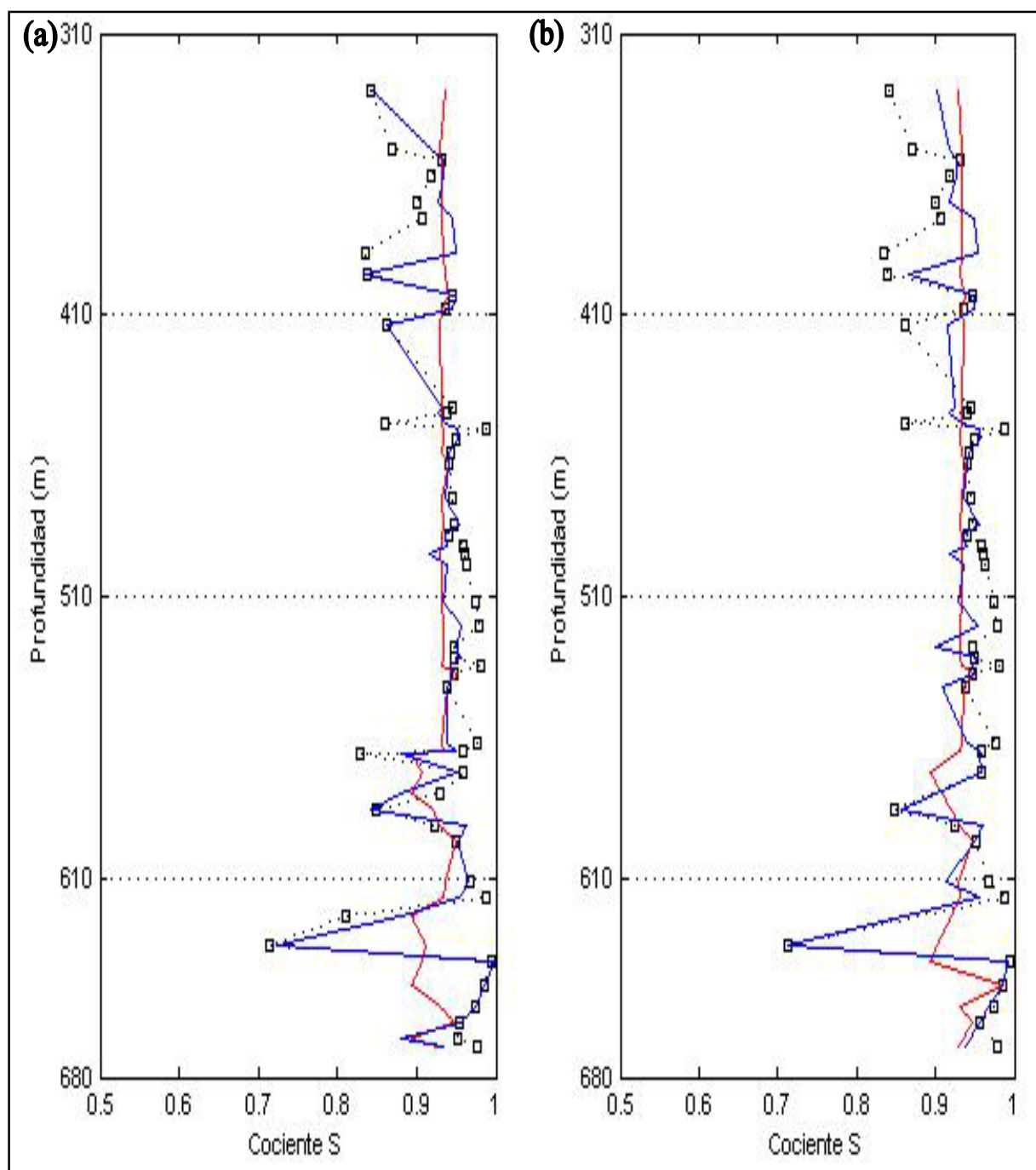


Figura 5. Formación León y Carbonera. (a) Cociente S inferido a partir de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 49 datos experimentales; y (b) cociente S inferido a partir del logaritmo de valores experimentales de susceptibilidad magnética en función de la profundidad (m) para 45 datos experimentales. Leyenda: (a) y (b) Línea negra punteada – valores experimentales del cociente S; línea continua roja – valores inferidos de cociente S para 3 reglas difusas; línea continua azul – valores inferidos de cociente S para 20% de reglas difusas con respecto a la cantidad de valores experimentales de cociente S (a) 10 reglas (b) 9 reglas.