



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**El pozo Mirador 2 y la metodología para
la interpretación de registros en
ambientes volcánicos**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Adrián Salcedo Florentino

DIRECTOR DE TESIS

M. C. José Luis Lezama Campos



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi director de tesis, el M.C. José Luis Lezama Campos, por su guía, paciencia y por sus enseñanzas a lo largo de todo el proceso. Sus conocimientos y orientación me ayudaron mucho para la realización de este trabajo.

A la UNAM y a la Facultad de Ingeniería, por brindarme una formación profesional de calidad y por contribuir a mi desarrollo personal y profesional. Al Dr. Eric Morales Casique y al Instituto de Geología, por proporcionarme un espacio de trabajo para la realización de esta tesis.

A mi familia, por su amor incondicional, su apoyo que me impulsó a seguir adelante y por brindarme una excelente educación. Sin ellos, este logro no habría sido posible.

Al Ingeniero Santiago Roberto Avelino Zumaya jefe de perforación de PEMEX, que dio las facilidades para el seguimiento de la perforación del pozo Mirador 2.

Índice

Resumen	15
1. Introducción	16
1.1. Antecedentes	17
1.1.1. Localización del pozo Mirador 2	17
1.1.2. Geología del área de estudio.....	17
1.1.3. Sierra de Santa Catarina	19
1.1.4. Cerro de la Estrella	21
1.1.5. La exploración profunda del Valle de México	21
1.1.6. Características del pozo Mirador 2	23
1.1.7. Resumen de los registros disponibles.	25
2. Registros geofísicos.....	26
2.1. Registro Potencial Espontaneo SP	26
2.2. Registros de Rayos Gamma	27
2.3. Espectroscopia de Rayos Gamma:	28
2.4. Registro de Inducción.....	29
2.5. Registro Sónico	32
2.6. Registros de litodensidad	34
2.7. Registros de Neutrones.....	35
2.8. Registro Caliper.....	37
2.9. Registros en formaciones volcánicas	38
3. Metodología	40
3.1. Interpretación cualitativa de los registros geofísicos del pozo Mirador 2.....	40
3.2. Teoría del análisis de grupos (Clúster).....	43
3.3. Metodología análisis.....	44
3.4. Metodología interpretación geológica.....	47
3.5. Análisis de muestras.	49
3.5.1. Núcleos Mirador 2.....	49
3.5.2. Análisis de los Núcleos del pozo Mirador 2	50
3.6. Revisión de bitácoras	56
4. Resultados.....	58

4.1.	Calibración de las herramientas de registro	58
4.1.1.	Registro de resistividad	59
4.1.2.	Registro de Rayos Gamma.....	60
4.1.3.	Registro Sónico	60
4.2.	Interpretación cualitativa del registro	62
4.2.1.	Primera Etapa.....	62
4.2.2.	Segunda Etapa.....	64
4.3.	Interpretación cuantitativa del registro.....	68
4.3.1.	Análisis de grupos basado en las características físicas de la roca	68
4.3.2.	Análisis de grupos basado en la composición de la roca	80
4.4.	Comparación interpretación cuantitativa y cualitativa.....	92
4.4.1.	Primera Etapa.....	92
4.4.2.	Segunda Etapa.....	94
4.5.	Identificación litológica de acuerdo al contenido de sílice	95
4.5.1.	Primera etapa	97
4.5.2.	Segunda Etapa.....	100
4.6.	Identificación de facies volcánicas mediante registros geofísicos	103
4.6.1.	Facies Volcánicas.....	103
4.6.2.	Litofacies de acuerdo a las características de distribución vertical.....	106
4.6.3.	Litofacies de acuerdo a las características de distribución horizontal.....	106
4.6.4.	Identificación y clasificación de litofacies en intervalos no nucleados	107
4.6.5.	Identificación de facies volcánicas del pozo Mirador 2	115
4.7.	Columna propuesta	129
4.7.1.	Primera etapa	134
4.7.2.	Segunda etapa	139
5.	Discusión y conclusiones.....	145
6.	Referencias.....	160

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación pozo Mirador 2.	17
Figura 2. Límites de las fallas normales, en la que se muestra la falla norte que delimita los volcanes del Cerro de la Estrella, Peñón del Marqués y Chimalhuacán, y en la falla sur la Sierra de Santa Catarina. Tomado y modificado de Montero (2024).	19
Figura 3. Ubicación de la Sierra de Santa Catarina. (Villalba, G. L. M., 2023).	20
Figura 4. Fotografía del volcán Yuhualixqui. Tomado de https://atlasmateriaprima.net/Volcan-Yuhualixqui	21
Figura 5. Mapa ubicación pozos profundos en el valle de México.	23
Figura 6. Estado mecánico programado para el pozo Mirador 2, cortesía de PEMEX.	25
Figura 7. Ejemplo de registro de SP. Tomado de Schlumberger (1990), y modificado de Montes (2020).	27
Figura 8. Ejemplo de registro de GR junto con un registro Neutrón, en donde se compara el cambio de la curva según la litología y la presencia de fluido. Tomado de Gómez (1975) en Ricco Macedo (2012).	28
Figura 9. Ejemplo de presentación de un registro de espectroscopia de rayos gamma y el registro de rayos gamma sin uranio. Tomado de Schulmberger (2008) en Ricco Macedo (2012).	29
Figura 10. Esquema que muestra el principio en el que se basa la configuración de bobinas de las herramientas de inducción. Tomado de Ricco Macedo (2012).	30
Figura 11. Ejemplo de la presentación del registro de inducción AIT. Tomado y modificado de Alatorre Gutiérrez (2009).	31
Figura 12. Ejemplo de los arribos de ondas de la herramienta Array-Sonic de 8 receptores. Tomado de Schlumberger (1990).	33
Figura 13. Ejemplo Registro sónico mono polar BHC (DTCO). Tomado y modificado de Garduza (2019).	33
Figura 14. Ejemplo de un registro de porosidad que muestra las curvas de densidad, el factor de corrección de densidad, la curva de efecto fotoeléctrico, curvas de espectroscopia de rayos gamma junto con una curva de rayos gamma y Caliper. Bassiouni (1994) en Ricco Macedo.	35
Figura 15. Ejemplo de un registro de porosidad Neutrón. Schlumberger (1990).	37
Figura 16. Ejemplo Registro Caliper. Tomado y modificado de Bassiouni (1994) en Ricco Macedo (2012).	38
Figura 17. Delimitación de los registros para la primera etapa, donde los datos validos pertenecen de la profundidad de 500 a 1010 md.	40
Figura 18. Delimitación de los registros para la segunda etapa, donde los datos validos pertenecen de la profundidad de 1100 a 2370 md.	41

Figura 19. Ejemplo de selección de curvas para la interpretación cualitativa.....	42
Figura 20. Ejemplo de la división de las zonas preliminares del registro para la primera etapa, a partir de los registros de resistividad, rayos gamma, densidad y sínico.	42
Figura 21. Boxplot del registro de resistividad (AT90) y densidad (RHOZ), correspondiente al intervalo de profundidad de 500 a 685 md.	43
Figura 22. Ejemplo de Dendograma con 5 grupos que proporciona la interfaz de IP. Tomado de Senergy, 2008.	44
Figura 23. Análisis de grupos correspondiente a la primera etapa, con una semilla de 18, y a partir de los registros de resistividad profunda (AT90), Rayos Gamma (GR), densidad (RHOZ) y sínico (DTCO).	45
Figura 24. Relación entre el registro sínico (DTCO) y la densidad (RHOZ), perteneciente al primer ejemplo del análisis de grupos con una semilla de 18, correspondiente a los datos de la primera etapa.	46
Figura 25. Relación entre el registro sínico (DTCO) y la densidad (RHOZ), perteneciente al segundo ejemplo del análisis de grupos con una semilla de 21, correspondiente a los datos de la primera etapa.	47
Figura 26. Ejemplo de la construcción de la columna de unidades correspondiente a la primera etapa.	48
Figura 27. Ejemplo caracterización del rango de valores, mediante la gráfica Boxplot para el registro de densidad (RHOZ).....	49
Figura 28. Ejemplificación del etiquetado de los núcleos del pozo Mirador2.....	50
Figura 29. Núcleo N-Mirador-2 T1-1 perteneciente a 1060.62 md.	50
Figura 30. Fragmento del Núcleo N-Mirador-2 T1-1 perteneciente a 1060.62 md.	50
Figura 31. Fragmentos del Núcleo N-Mirador-2 T1-1 perteneciente a 1060.62 md.	51
Figura 32. Núcleo N-Mirador-2 T1-2 perteneciente a 1062 md.	51
Figura 33. Fragmento perteneciente al núcleo N-Mirador-2 T1-2 en el cual se observa la presencia de un clasto redondeado.	51
Figura 34. Núcleo N-Mirador-2 T-6 perteneciente al intervalo de 1971.90 a 1973 md.	52
Figura 35. Fragmento perteneciente al núcleo N-Mirador-2 T-6 en el cual se observa la presencia de clastos angulosos grandes.....	52
Figura 36. Fragmento perteneciente al núcleo N-Mirador-2 T-6 en el cual se observa la presenta una coloración verdosa y estrías de falla.	53
Figura 37. Núcleo N-Mirador-2 T-4 perteneciente al intervalo de 1974 a 1975 md.	53
Figura 38. Fragmento perteneciente al núcleo N-Mirador-2 T-4 en el cual se observa la presencia de clastos pequeños redondeados.	54
Figura 39. Núcleo N-Mirador-2 T-3 perteneciente al intervalo de 1975 a 1976 md.	54

Figura 40. Fragmento perteneciente al núcleo N-Mirador-2 T-3 en el cual se observa la presencia de clastos pequeños sub-redondeados.	54
Figura 41. Núcleo N-Mirador-2 T-2 perteneciente al intervalo de 1976 a 1977 md.	55
Figura 42. Núcleo N-Mirador-2 T-2 reconstruido perteneciente al intervalo de 1976 a 1977 md.	55
Figura 43. Fragmento perteneciente al núcleo N-Mirador-2 T-2 en el cual se observa la presencia de clastos sub-redondeados.	55
Figura 44. Núcleo N-Mirador-2 T-1 perteneciente al intervalo de 1977 a 1978 md.	56
Figura 45. Núcleo N-Mirador-2 T-1 reconstruido perteneciente al intervalo de 1977 a 1978 md.	56
Figura 46. Núcleo N-Mirador-2 T-1 perteneciente al intervalo de 1977 a 1978 md.	56
Figura 47. Comparación de las calibraciones de Arena y Dolomita para el registro de resistividad profunda (AT90), donde el registro se dividió en 3 secciones para una mejor observación.	59
Figura 48. Comparación de las calibraciones de Arena y Dolomita para los registros de Rayos Gamma (GR) y registró sínico (DT).....	61
Figura 49. División cualitativa de las zonas preliminares del registro para la primera etapa, correspondiente al intervalo de 500 a 1010 md, mediante las curvas de resistividad profunda (AT90), resistividad somera (AT10), Rayos Gamma (GR), densidad (RHOZ), sínico (DTCO) y Caliper (HCAL).	62
Figura 50. División de las zonas preliminares del registro para la segunda etapa, correspondiente al intervalo de los datos validos del registro de 1100 a 2370 md, mediante las curvas de resistividad profunda (AT90), resistividad somera (AT10), Rayos Gamma (GR), densidad (RHOZ), porosidad neutrón (NPHI), sínico (DTCO) y Caliper (HCAL). ...	64
Figura 51. División de las intercalaciones identificadas, para la primera zona del registro, correspondiente a la segunda etapa, mediante las curvas de resistividad profunda (AT90), resistividad somera (AT10), Rayos Gamma (GR), densidad (RHOZ), porosidad neutrón (NPHI) y sínico (DTCO).....	67
Figura 52. Análisis de grupos correspondiente a la primera etapa.....	70
Figura 53. Relación entre Rayos Gamma (GR) y la resistividad (AT90), correspondiente a la primera etapa.	71
Figura 54. Relación entre el registro sínico (DTCO) y la densidad (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.	72
Figura 55. Separación del grupo 3 y 4 del diagrama de (DTCO) y (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.	73
Figura 56. Relación entre el registro de densidad (RHOZ) y la resistividad (AT90), correspondiente a la primera etapa.	73

Figura 57. Relación entre el registro Rayos Gamma (GR) y la densidad (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.	74
Figura 58. Análisis de grupos correspondiente a la segunda etapa.	76
Figura 59. Relación entre Rayos Gamma (GR) y la resistividad (AT90), correspondiente a la segunda etapa.	76
Figura 60. Relación entre el registro sónico (DTCO) y la densidad (RHOZ), correspondiente a la segunda etapa.	77
Figura 61. Relación entre el registro de densidad (RHOZ) y la resistividad (AT90), correspondiente a la segunda etapa.	78
Figura 62. Relación entre el registro de porosidad neutrón (NPHI) y el registro sónico (DTCO), correspondiente a la segunda etapa.	79
Figura 63. Análisis de grupos a partir del registro de espectroscopia de Rayos Gamma (contenido de torio (HTH0), contenido de uranio (HURA) y contenido de potasio (HFK)), junto con las curvas de resistividad (AT90), Rayos Gamma (GR) y el registro de densidad (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.	83
Figura 64. Relación entre el contenido de potasio (HFK) y el contenido de torio (HTHO), correspondiente a la primera etapa.	83
Figura 65. Relación entre el registro de Rayos Gamma (GR) y el registro de densidad (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.	84
Figura 66. Relación entre el contenido de uranio (HURA) y la densidad (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.	85
Figura 67. Relación entre el registro de Rayos Gamma (GR) y el registro de resistividad (AT90), correspondiente a la primera etapa.	86
Figura 68. Análisis de grupos a partir del registro de espectroscopia de Rayos Gamma (contenido de torio (HTH0), contenido de uranio (HURA) y contenido de potasio (HFK)), junto con las curvas de resistividad (AT90), Rayos Gamma (GR), registro de densidad (RHOZ) y porosidad neutrón (NPHI), correspondiente a la segunda etapa.	87
Figura 69. Relación entre el contenido de potasio (HFK) y el contenido de torio (HTHO), correspondiente a la segunda etapa.	88
Figura 70. Relación entre el registro de Rayos Gamma (GR) y el registro de densidad (RHOZ), correspondiente a la segunda etapa.	89
Figura 71. Relación entre el contenido de uranio (HURA) y la porosidad neutrón (NPHI), correspondiente a la segunda etapa.	90
Figura 72. Relación entre el registro de Rayos Gamma (GR) y el registro de resistividad (AT90), correspondiente a la segunda etapa.	91
Figura 73. Comparación de la división del registro con el análisis de grupos correspondiente a la primera etapa.	93

Figura 74. Comparación de la división del registro con el análisis de grupos correspondiente a la segunda etapa.	94
Figura 75. Diagrama TAS. (IUGS, Le Bas et al., 1986).	96
Figura 76. Contenido de sílice a partir del registro de Rayos Gamma, correspondiente a la primera etapa.	98
Figura 77. Relación entre el contenido de sílice (SiO_2) y la densidad (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.	99
Figura 78. Contenido de sílice a partir del registro de Rayos Gamma, correspondiente a la segunda etapa.	101
Figura 79. Relación entre el contenido de sílice (SiO_2) y la densidad (RHOZ), correspondiente a la segunda etapa.	102
Figura 80. Patrón de apilamiento vertical de facies volcánicas. Tomado de Ran et al., (2014).	106
Figura 81. Patrón de la distribución lateral de las facies volcánicas. Tomado de Ran et al., (2014).	107
Figura 82. Respuesta de los registros para las facies explosivas, correspondiente al pozo (DD1413). Tomado de Ran et al., (2014).	108
Figura 83. Respuesta de los registros para las facies efusivas, correspondiente al pozo (DD172). Tomado de Ran et al., (2014).	109
Figura 84. Respuesta de los registros para las facies extrusivas, correspondiente al pozo (XX2). Tomado de Ran et al., (2014).	110
Figura 85. Respuesta de los registros para las facies de conducto volcánico, correspondiente al pozo (XX8). Tomado de Ran et al., (2014).	111
Figura 86. Respuesta de los registros para las facies subvolcánicas, correspondiente al pozo (DD1813). Tomado de Ran et al., (2014).	112
Figura 87. Respuesta de los registros para las facies sedimentarias volcánicas, correspondiente al pozo (DD1414). Tomado de Ran et al., (2014).	113
Figura 88. Ubicación del pozo Mirador 2 con respecto a la estructura volcánica del cerro de la Estrella. Cortesía de Pemex 2018.	116
Figura 89. Ejemplo de identificación de facies efusivas en las curvas del registro, en el intervalo de 785 a 806 md correspondiente a la primera etapa.	118
Figura 90. Ejemplo de identificación de facies explosivas en las curvas del registro, en el intervalo de 621 a 690 md correspondiente a la primera etapa.	119
Figura 91. Ejemplo de identificación de facies volcánicas sedimentarias en las curvas del registro, en el intervalo de 935 a 1010 md correspondiente a la primera etapa.	120
Figura 92. Núcleos MIRADOR 2, pertenecientes a la primera etapa.	121

Figura 93. Litofacies volcánicas del pozo Mirador 2, correspondiente a la primera etapa.	122
Figura 94. Ejemplo de identificación de facies efusivas en las curvas del registro, en el intervalo de 1250 a 1330 md, correspondiente a la segunda etapa.	123
Figura 95. Ejemplo de identificación de 2 facies efusivas en las curvas del registro, delimitadas por las subfacies efusivas en el intervalo de 1585 a 1654 md y 1654 1728 md, correspondiente a la segunda etapa.	124
Figura 96. Ejemplo de identificación de facie volcánica sedimentaria re-transportada en las curvas del registro, en el intervalo de 1220 a 1240 md, correspondiente a la segunda etapa.	125
Figura 97. Ejemplo de identificación de facies explosivas en las curvas del registro, en el intervalo de 1537 a 1590 md, correspondiente a la segunda etapa.	126
Figura 98. Núcleos MIRADOR 2, pertenecientes a la segunda etapa.....	127
Figura 99. Ejemplo de identificación de facies volcánicas sedimentarias en las curvas del registro, en el intervalo de 1948 a 2370 md correspondiente a la segunda etapa.	128
Figura 100. Litofacies volcánicas del pozo Mirador 2, correspondiente a la segunda etapa.	129
Figura 101. Rango de densidad de diferentes rocas ígneas. (Schön, 2015).....	130
Figura 102. Construcción de la columna de unidades litológicas correspondiente a la primera etapa.	135
Figura 103. Columna unidades primera etapa.	139
Figura 104. Construcción de la columna de unidades litológicas correspondiente a la segunda etapa.....	140
Figura 105. Columna unidades segunda etapa.....	144
Figura 106. Presentación del registro para las primeras 3 unidades correspondientes a la primera etapa, donde se observa la separación de las curvas de resistividad somera (AT10) y profunda (AT90).....	149
Figura 107. Presentación del registro para las unidades 4, 5 y 6 correspondientes a la primera etapa, donde se observa fracturamiento en la unidad 5, y la separación de las curvas de resistividad somera (AT10) y profunda (AT90).	150
Figura 108. Presentación del registro para la unidad 7 correspondientes a la primera etapa.	151
Figura 109. Presentación del registro para las unidades (1, 3, 5, 7, 9, 11 y 12) correspondientes a la segunda etapa.	152
Figura 110. Presentación del registro para la unidad 2 correspondientes a la segunda etapa.	153
Figura 111. Presentación del registro para la unidad 4 correspondientes a la segunda etapa.	154

Figura 112. Presentación del registro para la unidad 6 correspondientes a la segunda etapa.	155
Figura 113. Presentación del registro para la unidad 8 correspondientes a la segunda etapa.	156
Figura 114. Presentación del registro para la unidad 10 correspondientes a la segunda etapa.	157
Figura 115. Presentación del registro para la unidad 13 correspondientes a la segunda etapa.	158

Índice de Tablas

Tabla 1. Descripción pozo Mirador 2.	24
Tabla 2. Rangos de valores del análisis de grupos a partir de los diagramas de dispersión, correspondiente a la primera etapa del registro 500 a 1010 md.	75
Tabla 3. Rangos de valores del análisis de grupos a partir de los diagramas de dispersión, correspondiente a la segunda etapa del registro 1100 a 2370 md.	80
Tabla 4. Características de respuesta de registros convencionales de rocas volcánicas con diferentes composiciones. Tomado de (Ran, Q et al., 2014).	81
Tabla 5. Rango de valores de las curvas de registros convencionales para rocas volcánicas con diferentes composiciones (Campo de gas XX). Tomado de (Ran, Q et al., 2014).	81
Tabla 6. Rango de valores de las curvas de registros convencionales para rocas volcánicas de diferentes petrogénesis (Bloque de pozo XX1). Tomado de (Ran, Q et al., 2014).	82
Tabla 7. Rangos de valores del análisis de grupos de espectroscopia, a partir de los diagramas de dispersión, correspondiente a la primera etapa del registro 500 a 1010 md.	87
Tabla 8. Rangos de valores del análisis de grupos de espectroscopia, a partir de los diagramas de dispersión, correspondiente a la segunda etapa del registro 1100 a 2370 md.	92
Tabla 9. Base de clasificación de rocas volcánicas con diferentes composiciones. Tomado de (Ran, Q et al., 2014).	96
Tabla 10. Clasificación de los grupos de acuerdo a su contenido de sílice, correspondiente a la primera etapa.	100
Tabla 11. Clasificación de los grupos de acuerdo a su contenido de sílice, correspondiente a la segunda etapa.	103
Tabla 12. Clasificación de Litofacies. Tomado de (Ran, Q et al., 2014).	104
Tabla 13. Características Facies y subfacies volcánicas.	114

Tabla 14. Promedio de valores isotr3picos de estroncio para rocas seleccionadas de arcos volc3nicos y continentales. Carmichael, 2017.....	130
Tabla 15. Contenido de Th, U y K de rocas 3gneas. Sch3n, (2015).	131
Tabla 16. Contenido de Th, U y K de rocas 3gneas. Sch3n, (2015).	132
Tabla 17. Contenido de Th, U y K de algunas rocas 3gneas. (Sch3n, 2015).	133
Tabla 18. Rango de valores de cada unidad litol3gica, correspondiente a la primera etapa.	138
Tabla 19. Rango de valores de cada unidad litol3gica, correspondiente a la segunda etapa.	143

Abreviaturas

SP	Registro de potencial espontaneo.
GR	Registro de Rayos Gamma.
THOT	Registro concentración de torio de la formación.
HURA	Registro concentración de uranio de la formación.
HFK	Registro concentración de potasio de la formación.
V/V	Unidad adimensional en los registros geofísicos.
AT10	Registro de inducción, curva de resistividad profundidad de 10 pulgadas.
AT90	Registro de inducción, curva de resistividad profundidad de 90 pulgadas.
DTCO	Registro de tiempo de tránsito de la onda compresional.
US/F	Unidad micro segundos sobre pie.
RHOZ	Registro de densidad de la formación.
g/cm³	Unidad de densidad.
DPHZ	Registro porosidad-densidad de la formación.
NPHI	Registro de porosidad de neutrones termales.
HCAL	Registro de Caliper.
md	Metros desarrollados.
SiO₂%	Porcentaje de contenido de sílice.
AIT	Herramienta de registro de inducción eléctrica.
BGL	Herramienta de registro de geometría de pozo.
LDL	Herramienta de registro de litodensidad.
DSI	Herramienta de registro sínico dipolar.
HGNS	Herramienta de registro de espectroscopia de Rayos Gamma.

Resumen

En la Cuenca de México se han realizado dos campañas de perforación profunda, con diversos objetivos. La primera, realizada en la década de los ochentas, los pozos se perforaron con el propósito de caracterizar las secuencias estratigráficas y tener un mejor entendimiento de la propagación de las ondas sísmicas, a partir del sismo ocurrido en 1985. La segunda campaña, hecha en años más recientes (2016-2022), se realizó con el objetivo de estudiar un posible acuífero profundo y caracterizar sus propiedades. Cada una de estas perforaciones se acompañó con la adquisición de diversos registros geofísicos que han ayudado al entendimiento de la geología de la cuenca y sus características. Sin embargo, no existe una interpretación a detalle de estos registros, donde se haga una relación entre la respuesta de los registros y el tipo de litología y propiedades petrofísicas específicas, únicamente se ha realizado de forma cualitativa o inferida, principalmente sujeta a los pocos núcleos existentes. Esta interpretación a detalle también se ha visto obstaculizada debido a que la mayor parte de la metodología de interpretación de los registros geofísicos se ha enfocado en la industria del petróleo, por lo que los métodos y relaciones existentes pertenecen mayoritariamente a rocas sedimentarias. Por estos motivos, el análisis y la interpretación de registros geofísicos para formaciones en rocas ígneas, especialmente las de la cuenca de México, requiere de adaptaciones y nuevos criterios. En este trabajo se propone una metodología para la interpretación de registros geofísicos de pozo, utilizando los datos del pozo Mirador 2, uno de los últimos pozos perforados en la Cuenca.

La metodología propuesta, utiliza inicialmente la interpretación convencional, por lo que se dividió el registro en secciones donde se presentan cambios en las características de las curvas y así obtener zonas del pozo donde las respuestas del registro son semejantes. Posteriormente, se realizó un análisis de grupos, la cual es una técnica estadística que permite agrupar un conjunto de datos y reorganizarlos de manera que se dividan en un número de grupos más manejable, donde los datos de un grupo comparten características similares entre sí. Este análisis de grupos dio como resultado agrupaciones de datos en facies. Estas nuevas agrupaciones se graficaron mediante diagramas de dispersión, y se obtuvieron rangos de valores de las propiedades petrofísicas de estas facies. Estas dos metodologías se comparan con el fin de buscar la mejor manera de poder complementarlas entre sí. Posteriormente estas agrupaciones se cruzaron con tipos de litología, principalmente, utilizando el contenido de Sílice que se relacionó de manera directa con el contenido de Rayos Gamma y los rangos de resistividad y densidad.

Una vez caracterizada la litología, la interpretación se complementó con los estudios de Ran, Q. et al. (2014), para la identificación de facies volcánicas a partir de registros geofísicos convencionales, donde mediante las características de las curvas de los registros, se identifican litofacies volcánicas y se configuran en una columna de litofacies volcánicas a partir de los datos del registro del pozo. Finalmente, toda esta información recabada de las diferentes metodologías se junta para realizar una interpretación más completa, que da como resultado una columna de unidades que servirá como información geológica de la zona de estudio, y mediante esta información poder distinguir las diferentes unidades con posibilidad de aprovechamiento y explotación de agua.

1. Introducción

La Cuenca de México es una altiplanicie, rodeada de sierras volcánicas. El pozo Mirador 2 se ubica en las cercanías de la estructura volcánica conocida como el Cerro de la Estrella en la alcaldía Iztapalapa en la Ciudad de México.

El pozo Mirador 2 atraviesa formaciones volcánicas debido a su proximidad al Cerro de la Estrella, por lo que la interpretación del registro se realizó con base a este hecho. Una de las problemáticas es que la mayor parte de la metodología de interpretación de registros geofísicos proviene de la industria petrolera, donde los estudios se han centrado predominantemente en caracterizaciones de formaciones sedimentarias. Como resultado las metodologías desarrolladas y ciertos criterios de interpretación están diseñados para trabajar con propiedades específicas para las rocas sedimentarias. Por lo que, el análisis y la interpretación enfocada en formaciones de rocas ígneas, requiere de adaptaciones y nuevos criterios.

Una de las metodologías más comunes en la interpretación de registros, es la interpretación cuantitativa, que se utiliza para calcular parámetros y propiedades de las formaciones atravesadas por el pozo, como lo es el cálculo de contenido de arcilla, la resistividad de agua, la salinidad, saturación de agua, hidrocarburos, entre otros. El cálculo de estos parámetros está enfocado para formaciones sedimentarias, y para el caso de formaciones ígneas, algunos parámetros no aplican o requieren de ciertas adaptaciones para realizar el cálculo. Por estas razones, es que para el caso de la interpretación del pozo Mirador 2, no se realizó el cálculo de estos parámetros, puesto que requeriría de más tiempo y que por sí solo la adaptación de los cálculos para obtener estos parámetros podría ser una Tesis aparte. De modo que en este trabajo se plantea una metodología alternativa para la interpretación litológica de las formaciones del pozo.

El primer pozo profundo fue el pozo Texcoco-1 (Oviedo de León, 1967), perforado en 1967 (2068 m) al cual se le unieron un conjunto de pozos perforados a raíz del sismo ocurrido en México en 1985, con el apoyo de Petróleos Mexicanos (PEMEX), en 1988, (Roma, Mixhuca, Tulyehualco-1 y Copilco) (Pérez-Cruz, 1988) (González-Torres et al., 2015) que alcanzó profundidades superiores a los 2000 metros. El objetivo fue caracterizar las secuencias estratigráficas de la cuenca y mejorar la comprensión de la propagación de las ondas sísmicas. Posteriormente, a partir del 2013 el Sistema de aguas de la Ciudad de México junto con la Comisión Nacional del Agua, realizaron nuevas perforaciones (Pozo San Lorenzo, Agrícola Oriental 2B y 2C, Santa Catarina 3a y Mirador 2) (Lezama-Campos et al., 2016), con el fin de continuar la exploración profunda y evaluar un posible acuífero profundo y su potencial de aprovechamiento.

El pozo Mirador 2, se perforó con el objetivo de caracterizar unidades con posibilidad de aprovechamiento de agua y su explotación. Este trabajo presenta los resultados de la interpretación de los datos obtenidos del pozo Mirador 2, así como la metodología empleada para la identificación geohidrológica a partir de los registros geofísicos.

1.1. Antecedentes

1.1.1. Localización del pozo Mirador 2

El pozo Mirador 2, se ubica en el oriente de la Ciudad de México, en la alcaldía Iztapalapa, cercano a las estructuras volcánicas conocidas como el Cerro de la Estrella y la sierra de Santa Catarina (Figura 1), las cuales, pertenecen a la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) dentro de la Cuenca de México.

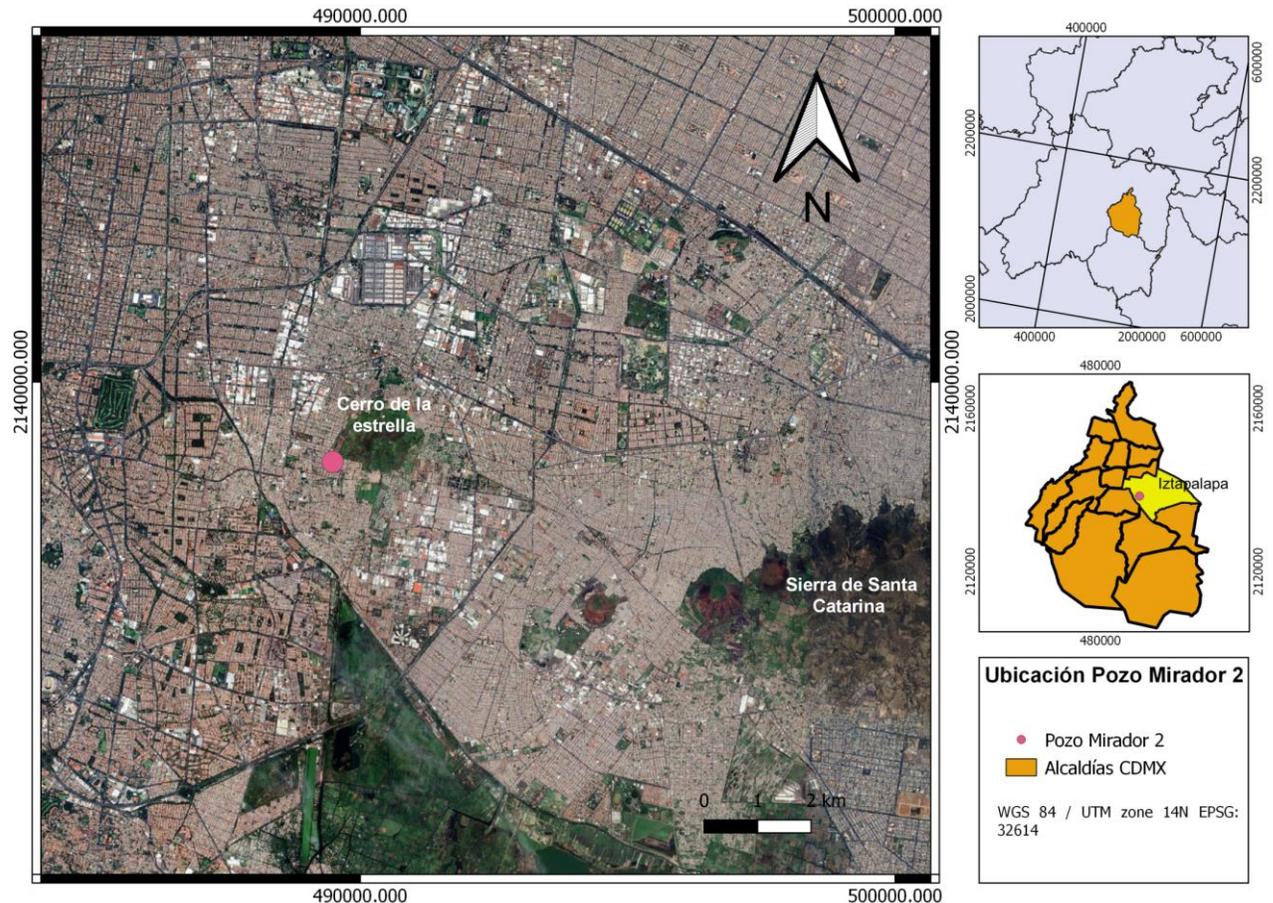


Figura 1. Mapa de ubicación pozo Mirador 2.

1.1.2. Geología del área de estudio

La Cuenca de México, se caracteriza por ser una altiplanicie con grandes valles (Valle de México, Valle de Apan, Valle de Tizayuca y Valle de Cuautitlán) y llanuras que en un pasado fueron cuencas lacustres profundas (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). La cuenca se encuentra rodeada por sierras y montañas de origen volcánico. Las rocas más antiguas, fueron registradas por perforaciones profundas, y corresponden a formaciones de calizas marinas del Cretácico Inferior, las cuales están cubiertas por secuencias de calizas, areniscas y lutitas del Cretácico Superior conocida como la Formación Mezcala. (Enciso de la Vega, 1992).

Las rocas volcánicas de la cuenca son predominantemente andesíticas y dacíticas, y forman secuencias con espesores de 600 a 700 m aproximadamente, perteneciente al

Oligoceno tardío-Mioceno temprano (De Cserna, 1987), las cuales cubren discordantemente los depósitos clásticos continentales. Durante el Plioceno y Cuaternario, se formaron los depósitos volcánicos y volcanoclásticos, lo que dio lugar a la morfología actual de "abanicos" debido a la actividad volcánica y a la erosión. Esto puede observarse en la Sierra de las Cruces, ubicada al oeste; en la Sierra Chichinautzin, ubicada al sur; y la Sierra Nevada, ubicada al noreste de la cuenca, con espesores de hasta 650 m en ciertas áreas de la cuenca. (De Cserna, 1987; Macias et al., 2012; Arce et al., 2015).

Los depósitos sedimentarios de la cuenca provienen principalmente de materiales fluviales y lacustres provenientes de las sierras volcánicas, así como grandes cantidades de cenizas de la actividad volcánica más reciente. (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

En el sureste de la cuenca, se encuentran extrusiones ígneas que se han colocado en los planos de mayor debilidad, formando una estructura geológica denominada graben y cuyos límites están marcados por dos fallas normales (Figura 2). La falla norte marca la ubicación de los volcanes Cerro de la Estrella, Peñón del Marqués y Chimalhuacán, mientras que la falla sur delimita la Sierra de Santa Catarina. (Montero, 2024).

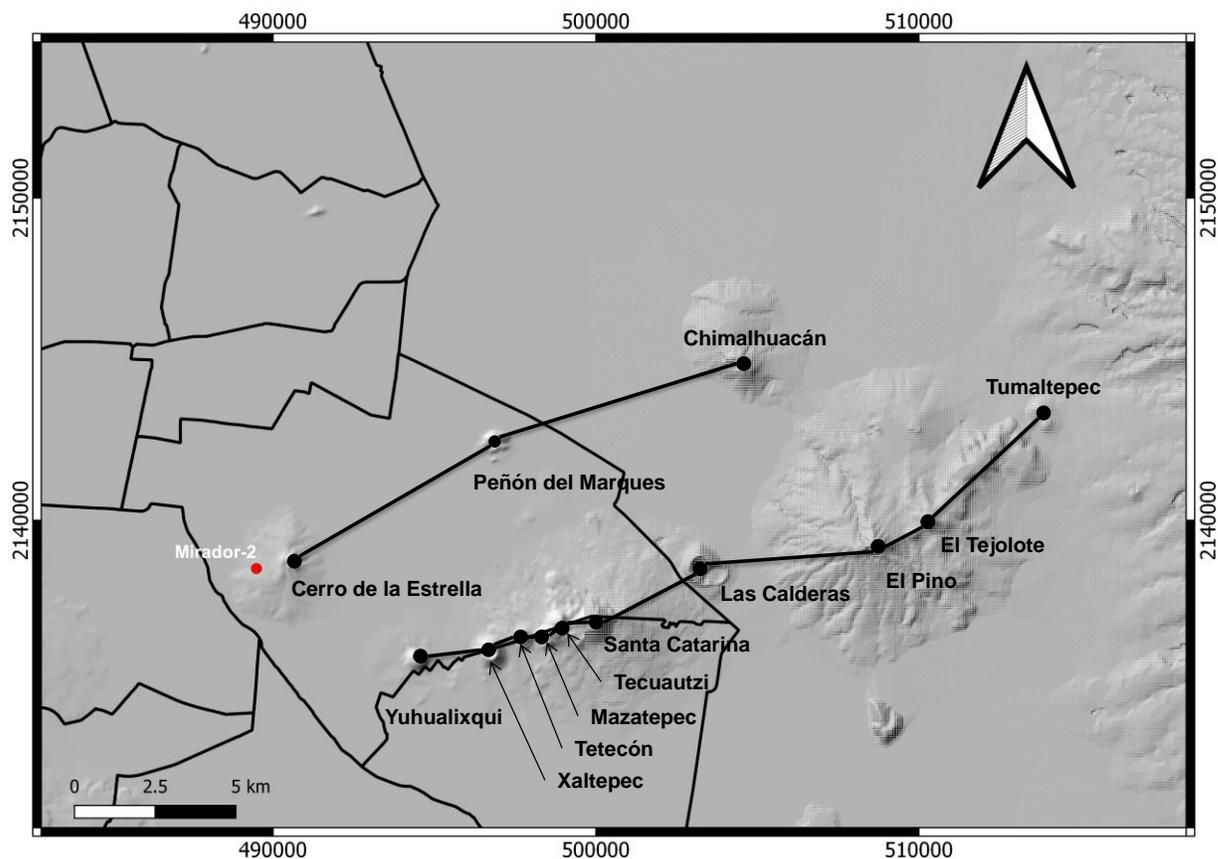


Figura 2. Límites de las fallas normales, en la que se muestra la falla norte que delimita los volcanes del Cerro de la Estrella, Peñón del Marqués y Chimalhuacán, y en la falla sur la Sierra de Santa Catarina. Tomado y modificado de Montero (2024).

1.1.3. Sierra de Santa Catarina

La sierra de Santa Catarina se localiza al oriente de la ciudad de México, en los límites de las alcaldías Tláhuac e Iztapalapa (Figura 3). La sierra es un conjunto de siete estructuras volcánicas la cual comprende una extensión de 12 km, que inicia con el volcán Yuhualixqui y termina con el doble cráter de explosión de la Caldera. Estas estructuras volcánicas poseen un alineamiento NE-SW con una pequeña desviación hacia el Norte. Esta alineación se atribuyó a un sistema de fallas ENE, donde la sierra de Santa Catarina, es producto de una falla principal, la cual se inclina al sur, y una falla secundaria, la cual es casi paralela a la falla principal y se inclina al norte. (Lugo-Hubp et al., 1994).

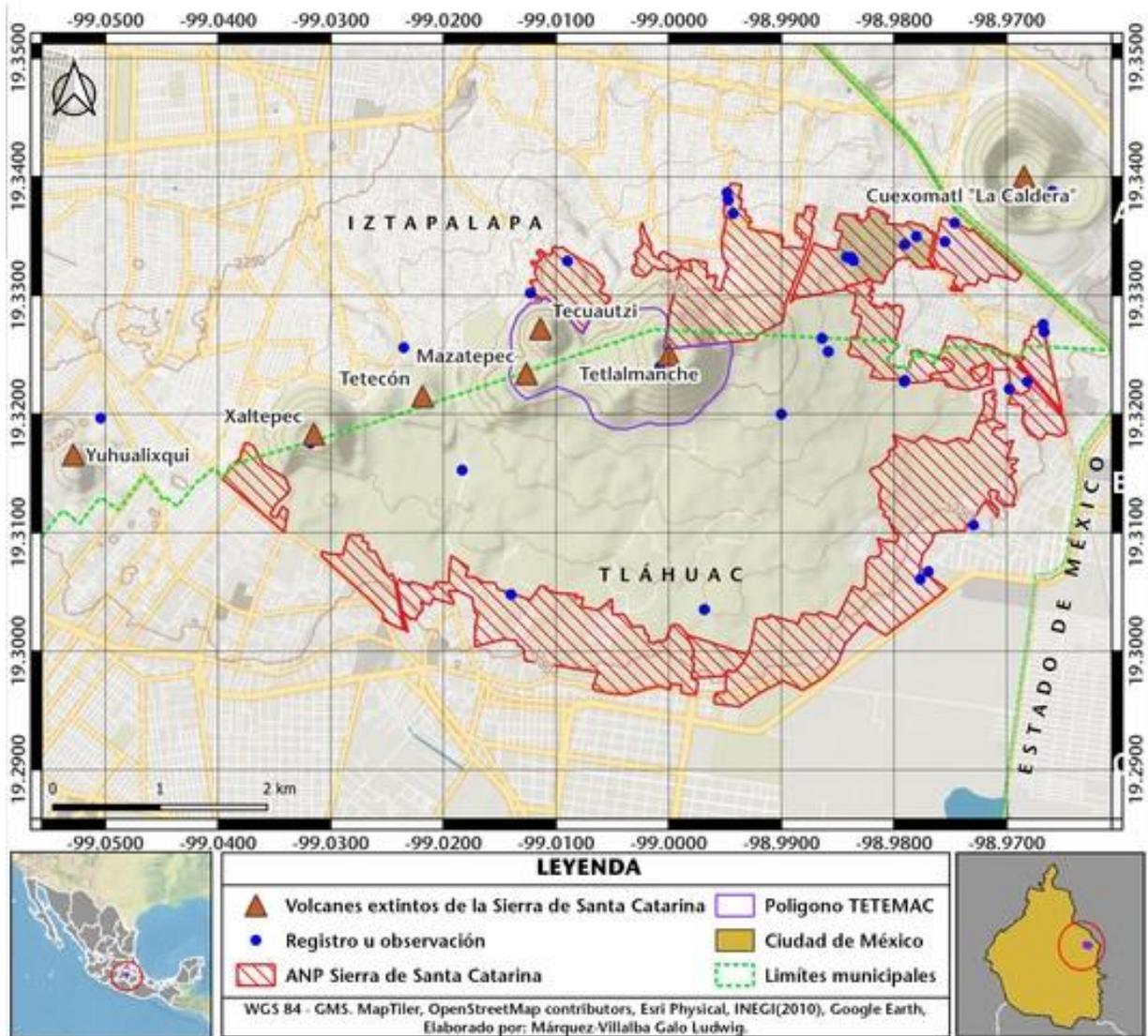


Figura 3. Ubicación de la Sierra de Santa Catarina. (Villalba, G. L. M., 2023).

La Sierra de Santa Catarina se constituye de rocas volcánicas, principalmente de derrames volcánicos y material piroclástico. Los análisis geoquímicos de las rocas de esta zona, las determinaron como andesitas (Gonzales-Moran, 1992). Al poniente de la alineación, el volcán Yuhualixqui es un cono de escoria, el cual ha sido excavado para la extracción de material, (Figura 4), a partir de su explotación, se ha logrado identificar un material de color rojizo, que es característico de la escoria, la cual compone principalmente a los volcanes de la sierra. Se han reconocido fragmentos angulosos de un color negro de entre 3 y 12 cm y los derrames de lava se encuentran cubiertos casi en su totalidad por material piroclástico con hasta más de 15 m de grosor. (Lugo-Hubp et al., 1994).



Figura 4. Fotografía del volcán Yuhualixqui. Tomado de <https://atlasmateriaprime.net/Volcan-Yuhualixqui>.

Pozos cercanos a la sierra de Santa Catarina han mostrado una interdigitación de sedimentos lacustres con depósitos volcánicos del grupo Chichinautzin (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1991). Debido a sus características morfológicas y la composición petrológica, la sierra de Santa Catarina se considera contemporánea a la sierra de Chichinautzin, con lo cual, en la historia geológica de la cuenca de México, se considera a la sierra de Santa Catarina como una etapa de actividad volcánica relativamente joven. (Lugo-Hubp et al., 1994).

1.1.4. Cerro de la Estrella

El Cerro de la Estrella, aunque se encuentra en la misma alineación que la Sierra Santa Catarina, se distingue como una estructura independiente, debido a que exhibe diferencias morfológicas y un sistema de drenaje claramente definido en comparación con la sierra de Santa Catarina. Debido a sus características morfológicas, el Cerro de la Estrella es definido como un volcán en escudo, que se caracteriza por tener pendientes suaves y terminaciones de los flujos de lava de forma radial, con un cono de escorias en su cima. (Arce et al., 2015).

Se estima que el Cerro de la Estrella tiene una antigüedad entre 0.7 a 0.5 Ma (Arce et al., 2013), el cual se formó a lo largo de una fractura con orientación Este-Noreste y Oeste-Sudoeste. Tiene dos cráteres poco definidos y sus flujos de lava basáltica están cubiertos e intercalados con materiales tobáceos y escoriáceos. (Montero, 2024).

1.1.5. La exploración profunda del Valle de México

Derivado del sismo sucedido en México en 1985, y con apoyo de Petróleos Mexicanos (PEMEX), en 1988 se perforaron una serie de pozos profundos (mayores a 2000 m de profundidad), con el objetivo de caracterizar las secuencias estratigráficas de la cuenca y obtener un mejor entendimiento de la propagación de las ondas sísmicas. Adicional a estas perforaciones, a partir del 2013 el Sistema de aguas de la Ciudad de México junto

con la Comisión Nacional del Agua, realizaron nuevas perforaciones con el objetivo de continuar con la exploración profunda y caracterizar un posible acuífero profundo y sus posibilidades de aprovechamiento. A continuación, se da una descripción de estos pozos, y en la Figura 5, se muestra un mapa de su ubicación dentro del valle de México.

- El pozo Texcoco-I (TX-I), se perforó en vaso del antiguo lago de Texcoco en 1967, el cual alcanzó una profundidad de 2068 m. Este pozo se perforó previo a la exploración profunda realizada en 1988.
- El pozo Roma, con una profundidad de 3200 m, Mixhuca con una profundidad de 2452 m, Tulyehualco-1 con 3000 m, y Copilco con 2258 m, son parte de la campaña de exploración profunda realizada en 1988.
- Pozo San Lorenzo, se localiza en el oriente de la ciudad de México en la alcaldía Iztapalapa, cercano a la central de abastos de la ciudad de México, el cual se perforó en el año 2013 alcanzando una profundidad de 2008 m.
- Pozos Agrícola Oriental 2B y 2C, Estos pozos se localizan al oriente de la ciudad de México, en la delegación Iztacalco. Se perforaron en el año 2016, el pozo AO2B alcanzó una profundidad total de 2000 m, mientras que el pozo AO2C alcanzó la profundidad de 1570 m.
- El pozo Santa Catarina 3a, se localiza en el sur de la ciudad de México, correspondiente a la alcaldía Xochimilco, el cual se perforó en diciembre de 2016 y concluyendo en julio de 2017.
- El pozo Mirador 2, se ubica en el oriente de la Ciudad de México, en la alcaldía Iztapalapa, el cual se perforó en el año 2018 alcanzando una profundidad de 2386 m.

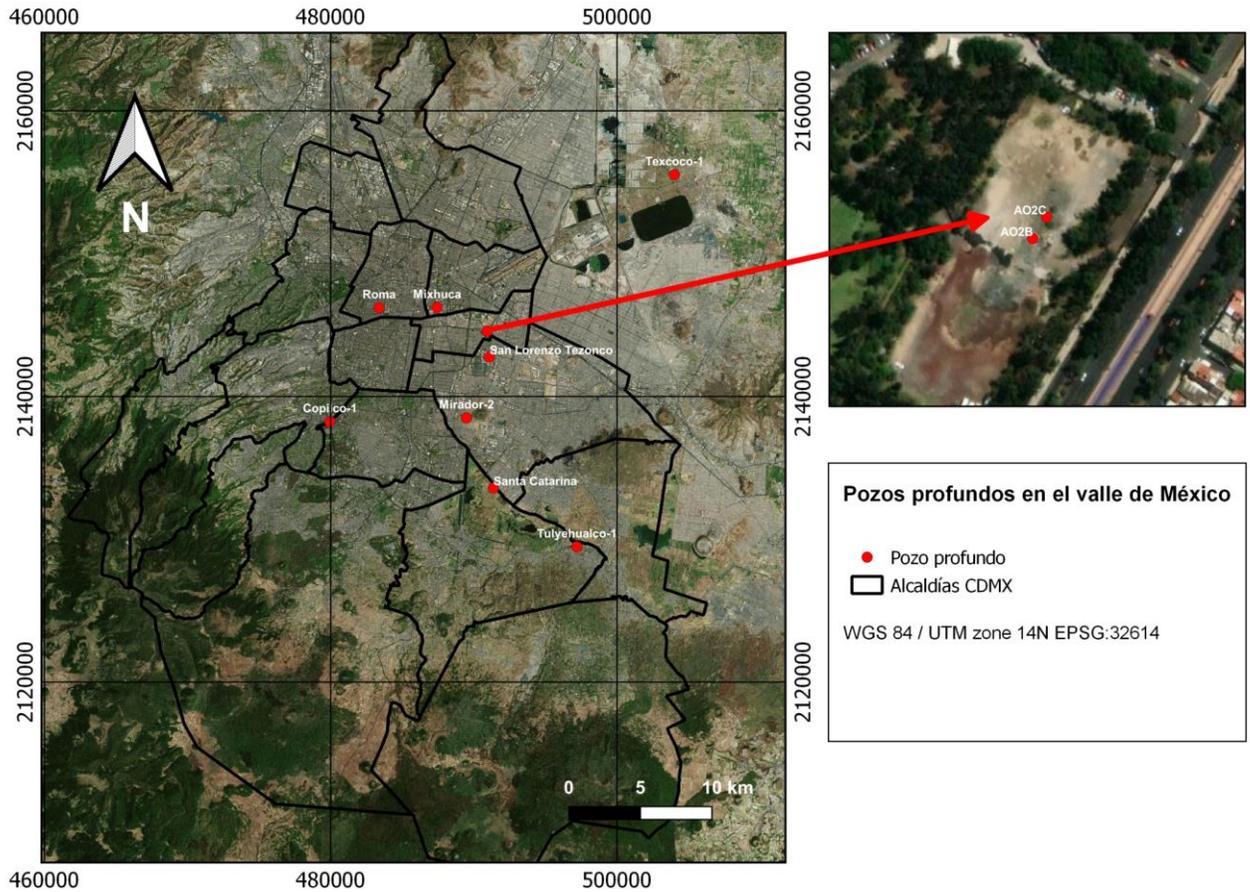


Figura 5. Mapa ubicación pozos profundos en el valle de México.

El presente trabajo se muestra los resultados de los trabajos de interpretación de los datos derivados del pozo Mirador 2 y la metodología utilizada para la identificación geohidrológica a partir de la información de los registros geofísicos.

1.1.6. Características del pozo Mirador 2

En la Tabla 1, se muestran los datos generales sobre el proyecto de perforación del pozo Mirador 2.

Tabla 1. Descripción pozo Mirador 2.

Descripción general del pozo	
Proyecto de inversión	Mirador 2
Formación objetivo	Tepozteco del Mioceno
Estructura	Basaltos y vulcanitas fracturadas
Tipo de pozo	Direccional tipo "J" KOP 550 m, Ang. Max. 20°, Azimut: 90° P.T. 2,380 m Desplazamiento: 454 m
Profundidad programada	2,380 md (2,277 mv)
Coordenadas Zona productora	X=489,600; Y=2,138,451
Coordenadas a la profundidad total	X=489,897; Y=2,138,313
Ubicación del pozo	Macropera Mirador 2
Elevación del terreno	2,288 msnm
Fluido productor	Agua

En la Figura 6, se muestra el estado mecánico programado para el pozo Mirador 2, donde se muestran las características de la perforación y la tubería.

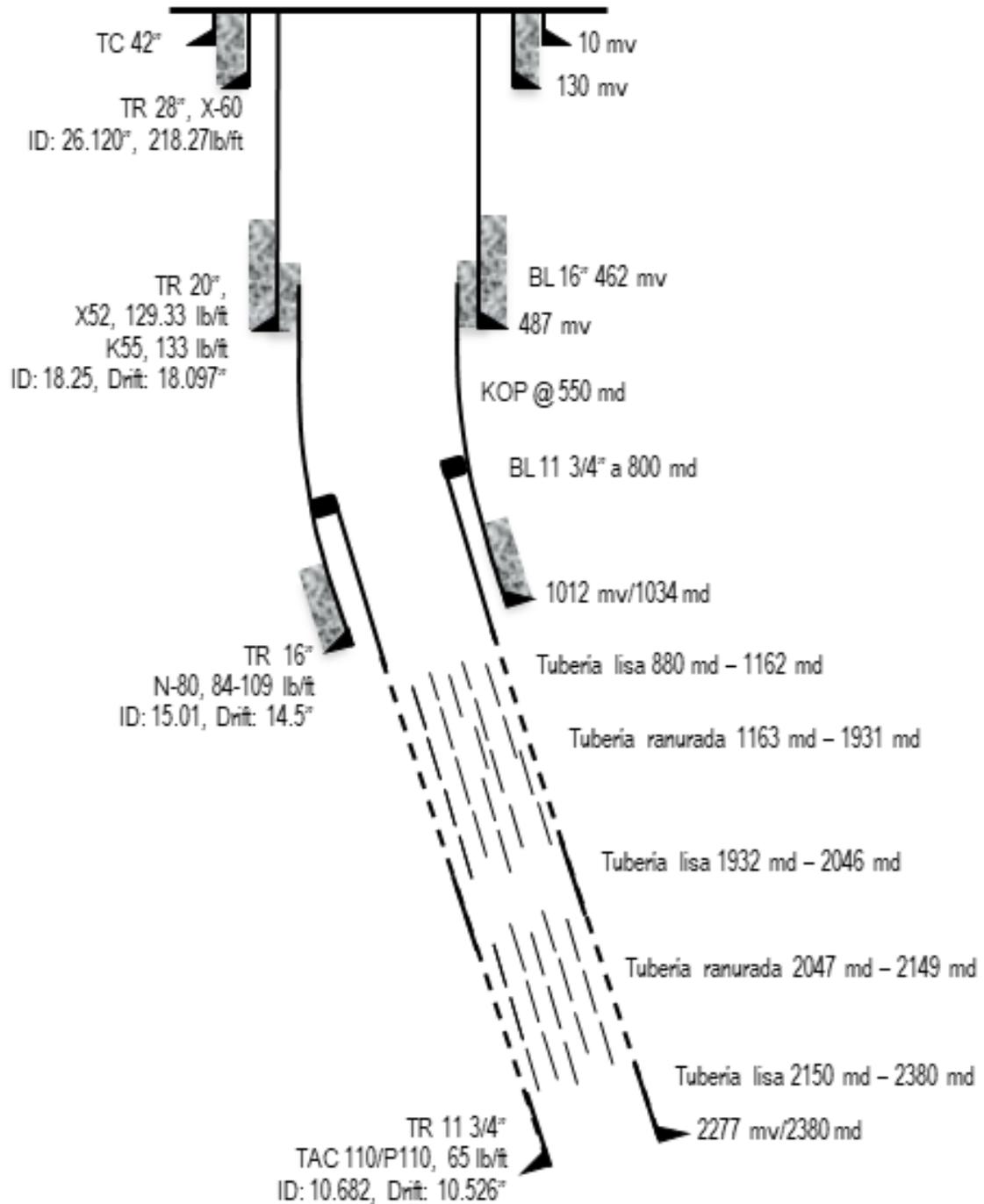


Figura 6. Estado mecánico programado para el pozo Mirador 2, cortesía de PEMEX.

1.1.7. Resumen de los registros disponibles.

Los registros del pozo Mirador 2 se tomaron en dos etapas, la primera etapa fue de 463.14 a 1044.70 md de profundidad, mientras la segunda se tomó desde 1002.33 a 2390.24 md de profundidad.

En la primera etapa se tomaron los registros: AIT, BGL, DSI, HNGL, HRT, LDL.

En la segunda etapa se tomaron los registros: AIT, BGL, DSI, HNGL, LDL.

2. Registros geofísicos

2.1. Registro Potencial Espontaneo SP

El registro de Potencial Espontaneo (SP), se basa en el potencial natural generado por las diferencias de salinidad entre los fluidos presentes en la formación y el fluido de perforación. La medición del potencial, se obtiene a partir de un electrodo móvil acoplado en la sonda de medición, y por otro electrodo fijo montado en la superficie en presencia de algún medio húmedo, comúnmente la presa del lodo de perforación. (Ricco-Macedo, 2012).

El registro SP, es más utilizado en formaciones estratificadas de arenas y lutitas, la relación entre los estratos de arenas y lutitas genera deflexiones (cambios relativos) en la curva del SP, a partir de una línea teórica con base a las lutitas llamada "línea base de lutitas", que se toma de referencia. Cuando existen la presencia de formaciones permeables (como, por ejemplo, formaciones de arenas), la curva del SP presentara variaciones respecto a esta línea base como se puede observar en la Figura 7. El registro SP permite identificar la presencia de zonas permeables en las formaciones del pozo, además de darnos información sobre la correlación de las capas y la delimitación de estas. (Ricco-Macedo, 2012).

El registro SP tiene la desventaja de no poder medirse en pozos en donde no se pueda obtener una buena continuidad eléctrica entre el electrodo del SP en superficie y la formación, como lo es el caso de los pozos con tuberías de revestimiento, tuberías de producción y el caso donde los fluidos de perforación no son conductores.

Generalmente, la respuesta del SP debería ser, en condiciones normales, inversa a la respuesta de la resistividad, esto siempre y cuando la resistividad del fluido de formación sea inferior a la resistividad del fluido presente en la formación. (Manrique B & Kairuz H, 1998).

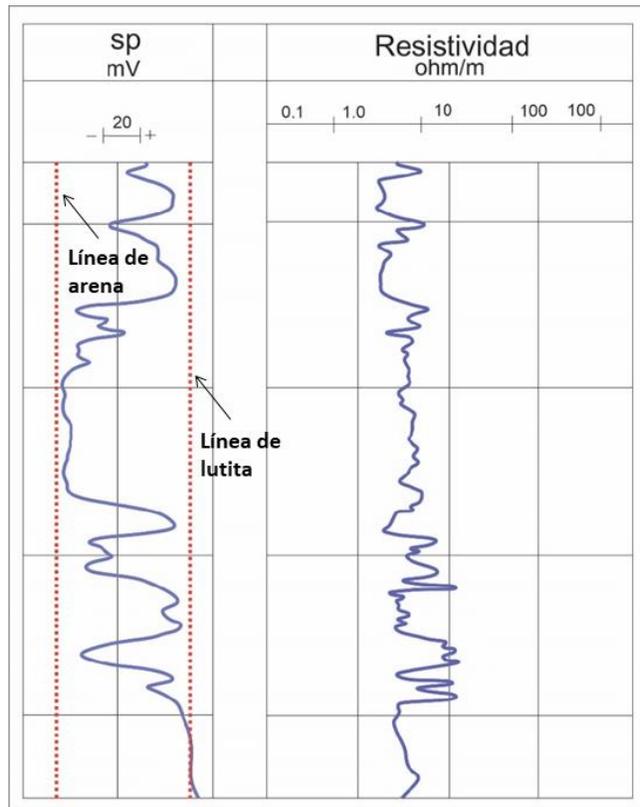


Figura 7. Ejemplo de registro de SP. Tomado de Schlumberger (1990), y modificado de Montes (2020).

2.2. Registros de Rayos Gamma

El registro de Rayos Gamma (GR), se basa en la medición de la radiactividad natural de las formaciones. Este registro se utiliza frecuentemente para complementar el registro de potencial espontáneo (SP) y como sustituto de la curva SP en pozos perforados con lodo salado, aire, base aceite o en pozos entubados. Las herramientas de GR se calibran siguiendo el estándar de la API, y los registros se expresan en unidades API (Schlumberger, 1990). En la Figura 8, se presenta un ejemplo del registro de Rayos Gamma y como este se comporta con diferentes litologías.

El registro GR se utiliza principalmente en formaciones sedimentarias, en donde es posible determinar el contenido de arcilla, debido a que los elementos radioactivos presentes en los minerales de las rocas que tienden a concentrarse en arcillas y lutitas. Las formaciones limpias (sin arcillas) poseen un nivel muy bajo de radiactividad, sin embargo, en formaciones donde se presenten eventos o contaminantes de naturaleza volcánica como cenizas, sales radioactivas disueltas en los fluidos presentes en la formación o residuos de granito, el valor de radiactividad en estas rocas puede aumentar considerablemente. (Schlumberger, 1990).

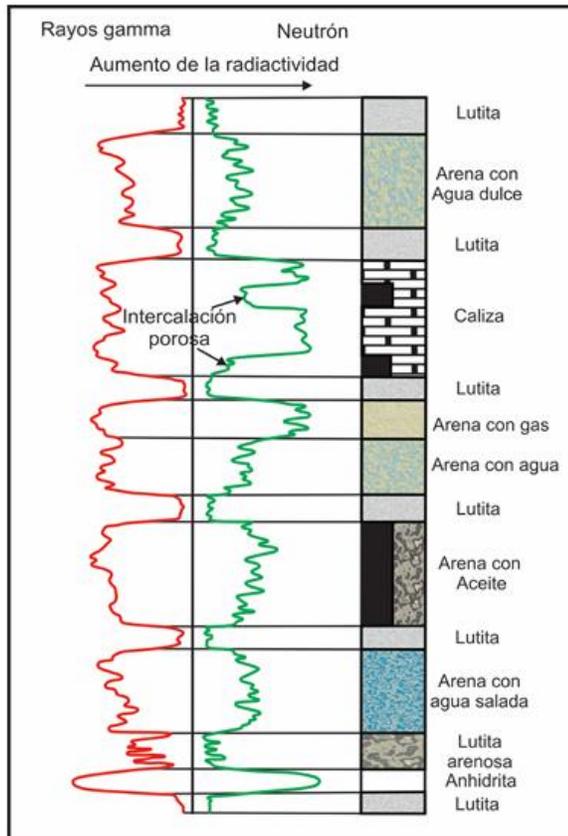


Figura 8. Ejemplo de registro de GR junto con un registro Neutrón, en donde se compara el cambio de la curva según la litología y la presencia de fluido. Tomado de Gómez (1975) en Ricco Macedo (2012).

2.3. Espectroscopia de Rayos Gamma:

El registro de Rayos Gamma brinda información sobre la radioactividad natural presente en las formaciones, sin embargo, este registro sólo proporciona datos de la radiación total, lo cual no permite diferenciar los elementos radiactivos que producen dicha medida. La mayor parte de la radiación gamma presente en las rocas de la tierra pertenece a elementos radiactivos de la serie de uranio, torio y potasio. (Schlumberger, 1990).

Para distinguir la componente de radiación de cada uno de estos elementos se desarrolló el Registro de Espectroscopia de Rayos Gamma, el cual, mide el número de Rayos Gamma y el nivel de energía de la radiación que se produce de manera natural, con lo cual es posible determinar las concentraciones de estos elementos radiactivos presentes en las rocas de la formación en el pozo. Las concentraciones K/Th ayudan a identificar el tipo de arcilla presentes en la formación, mientras que la concentración de uranio indica la presencia de materia orgánica dentro de las arcillas. (Garduza, 2019).

El registro de espectroscopia de Rayos Gamma se presenta como un registro de las concentraciones de uranio y torio en partes por millón [ppm], mientras que el del potasio

se expresa en porcentaje (%). En la siguiente figura, podemos observar un ejemplo del registro de espectroscopia de Rayos Gamma.

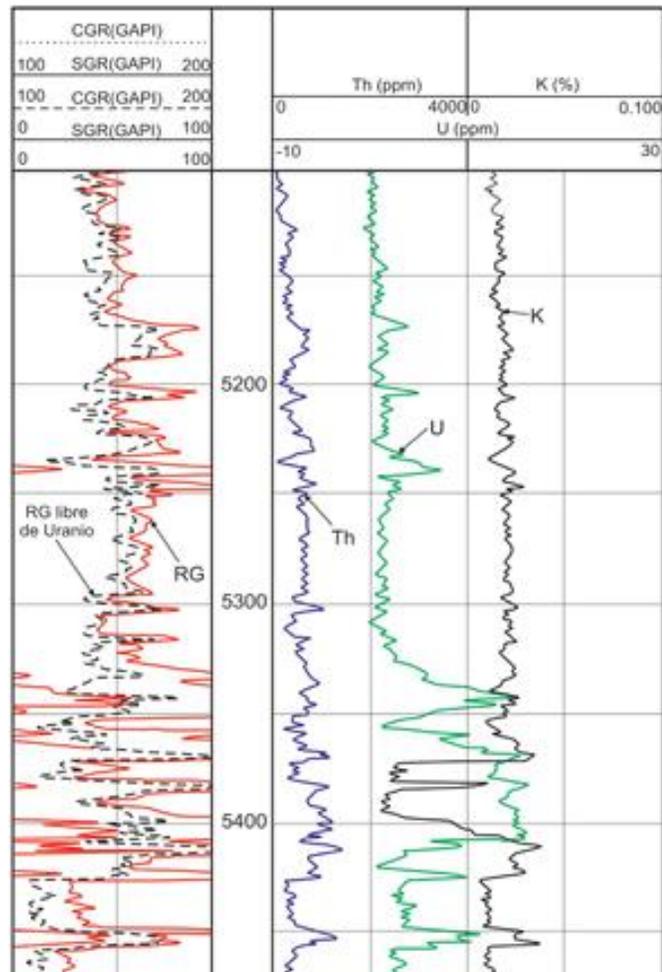


Figura 9. Ejemplo de presentación de un registro de espectroscopia de rayos gamma y el registro de rayos gamma sin uranio. Tomado de Schulmberger (2008) en Ricco Macedo (2012).

2.4. Registro de Inducción

Los registros de Inducción se desarrollaron para abordar el desafío de medir propiedades eléctricas en lodos de perforación no conductores, como aquellos de base aceite o que se perforan neumáticamente. Los registros eléctricos convencionales tienen limitaciones, ya que varias herramientas requieren el contacto directo entre la sonda y las formaciones geológicas del pozo. Este contacto además necesita ser conductor para permitir la transferencia de corriente entre la sonda y la formación, y así, poder medir las resistividades de dichas formaciones. Las herramientas de inducción se desarrollaron para superar estas limitaciones al permitir mediciones de resistividad de las formaciones sin necesidad de lodo conductor, ofreciendo ventajas significativas sobre otros tipos de registros eléctricos. (Ricco-Macedo, 2012).

Las herramientas de inducción utilizan arreglos de bobinas transmisoras y receptoras que se basan en el principio de la inducción electromagnética. Para entender esto, en la Figura 10, se muestra un esquema de la configuración de bobinas de las herramientas de inducción.

Para explicar el principio de la inducción electromagnética se toma un arreglo con una bobina transmisora y otra receptora. A través de la bobina transmisora se envía una corriente alterna de alta frecuencia e intensidad constante, esta corriente crea un campo magnético primario (H_t) que induce corrientes eléctricas en la formación geológica, la componente vertical de este campo magnético genera un campo eléctrico (e_a y e_{bt}), donde las corrientes fluyen en patrones circulares alrededor del eje de la bobina de transmisión, estas corrientes en la formación generan un campo magnético secundario (H_a), que a su vez produce un voltaje detectado por la bobina receptora, la intensidad de este campo magnético secundario está relacionada con la conductividad de la formación y por lo tanto con su resistividad. (Ricco-Macedo, 2012).

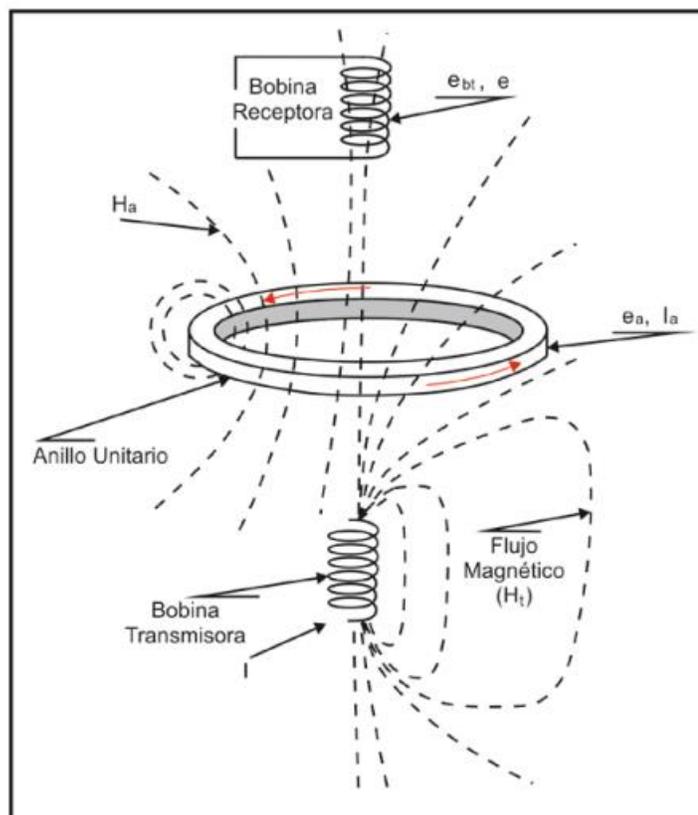


Figura 10. Esquema que muestra el principio en el que se basa la configuración de bobinas de las herramientas de inducción. Tomado de Ricco Macedo (2012).

Las herramientas de inducción permiten obtener buenas respuestas para capas delgadas, además, permiten procesar grandes cantidades de información de los alrededores del pozo, gracias a esto se puede minimizar en gran medida los errores provocados por las condiciones ambientales en el pozo, y con lo cual, obtener la conductividad de la formación penetrando zonas irregulares y zonas invadidas hasta llegar a la zona virgen y con ello una mejor precisión en la información.

Existe una gran variedad de herramientas de arreglos de inducción, siendo una de las más destacadas la herramienta de inducción de arreglos de imágenes (AIT). Esta herramienta se compone por un arreglo de 8 receptores y un transmisor, la cual puede realizar 28 mediciones de inducción distintas con intervalos de 3 pulgadas. La herramienta AIT es versátil en diferentes entornos, es autocalibrable y tiene la capacidad de trabajar con cualquier tipo de lodo de perforación. El registro AIT genera cinco curvas y profundidades de investigación a 10, 20, 30, 60 y 90 pulgadas desde el centro del pozo, proporcionando una resolución vertical de 12 pulgadas (1 pie) para detectar capas delgadas con alta precisión, y de 2 y 4 pies para una correlación sencilla con registros existentes. (Ricco-Macedo, 2012). En la siguiente figura, podemos ver un ejemplo de un registro de inducción tomado de una herramienta AIT.

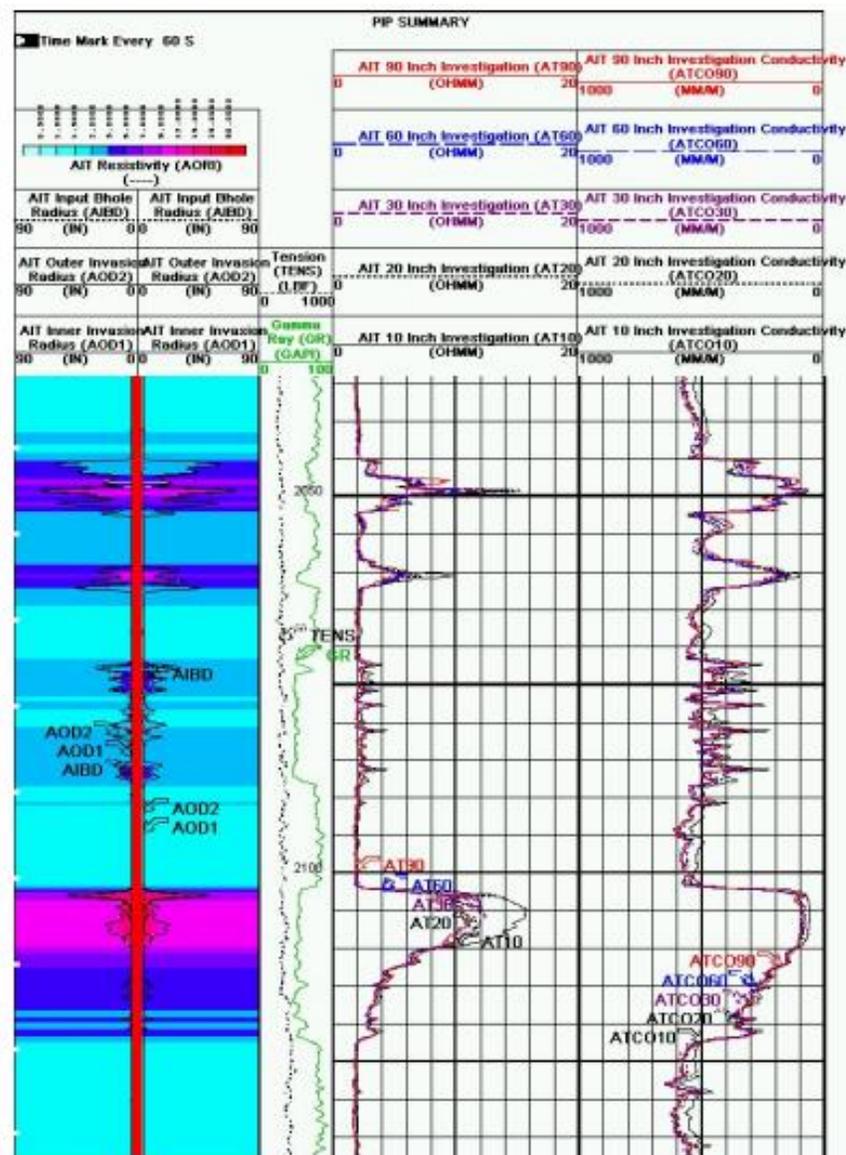


Figura 11. Ejemplo de la presentación del registro de inducción AIT. Tomado y modificado de Alatorre Gutiérrez (2009).

2.5. Registro Sónico

El registro sónico es uno de los métodos mediante el cual se obtiene el valor de la porosidad de las formaciones, a partir de las propiedades físicas y petrofísicas de las rocas. El principio en el cual se basa el registro sónico es la medición del tiempo que tarda una onda sonora en atravesar la formación y ser captada por el receptor, esto es conocido como tiempo de tránsito Δ_t , el cual es el inverso de la velocidad de la onda sonora. Este tiempo de tránsito está influenciado por la litología y la porosidad de la formación, cuando se conoce la litología es posible establecer una relación entre el tiempo de tránsito con la porosidad. (Schlumberger, 1990).

Las herramientas más básicas de los registros sínicos se componen de un transmisor, el cual emite un pulso sónico que choca con las paredes del pozo, en donde se propagarán trenes de ondas acústicas, como las ondas de compresión y cizallamiento, ondas de superficie a lo largo de la pared del pozo y ondas dentro de la columna de fluido, estos pulsos acústicos serán detectados y medidos por un receptor. Existen diferentes herramientas para la toma de registros sínicos como por ejemplo la herramienta de registro sónico compensado (BHC), registro sónico de espaciamiento largo (LSS) y las herramientas Array-Sonic. (Schlumberger, 1990).

La herramienta Array-Sonic, permite obtener el registro completo de la forma de onda, en la Figura 12, se muestra un ejemplo de los arribos de ondas de la herramienta Array-Sonic. Una de las principales limitantes de las herramientas de registros sínicos convencionales, es que estas no pueden detectar a las ondas transversales si no se encuentran en formaciones rápidas, debido a que estas herramientas utilizan fuentes de transmisión mono polares, las cuales emiten un pulso omnidireccional en donde no se genera un frente de onda correspondiente a la onda transversal, por lo que no es posible medir la velocidad de la onda de cizallamiento en formaciones lentas. (Ricco-Macedo, 2012).

Es por esto que surgieron nuevas herramientas como la herramienta sónica dipolar generadora de imágenes (DSI), la cual utiliza la combinación de fuentes mono polares y dipolares, con lo cual es posible obtener la medición de la velocidad de la onda de cizallamiento y de compresión en formaciones lentas, en la Figura 13, se muestra un ejemplo de un registro sónico DSI.

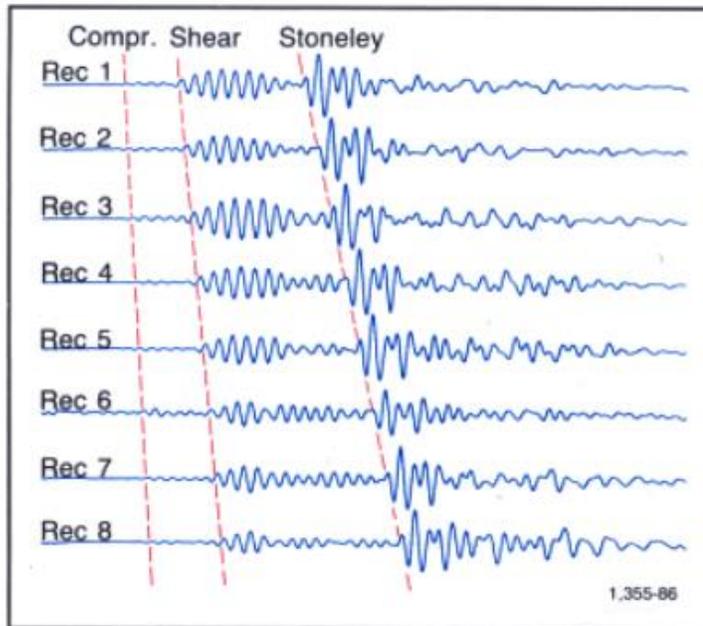


Figura 12. Ejemplo de los arribos de ondas de la herramienta Array-Sonic de 8 receptores. Tomado de Schlumberger (1990).

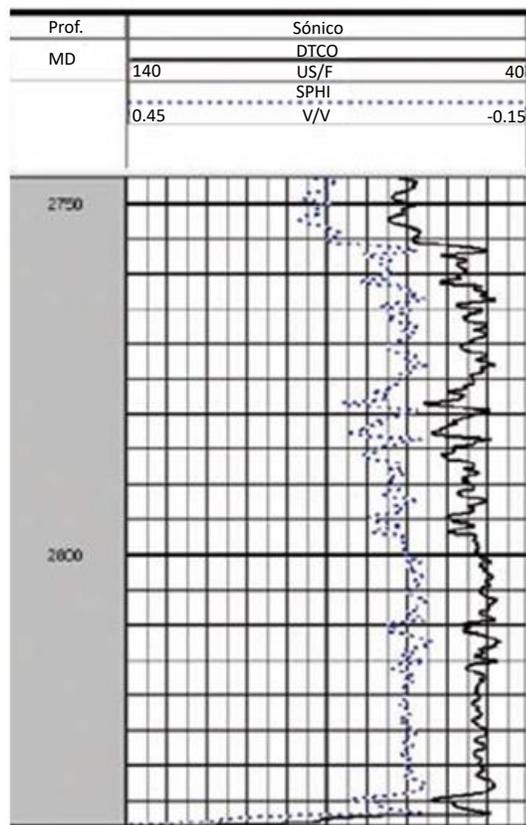


Figura 13. Ejemplo Registro sónico mono polar BHC (DTCO). Tomado y modificado de Garduza (2019).

2.6. Registros de litodensidad

Los registros de densidad son una herramienta comúnmente empleada para determinar la porosidad de una formación geológica. Estos registros se basan en la emisión de rayos gamma desde una fuente radiactiva, que al chocar con los electrones de la formación transfieren parte de su energía en cada colisión, este fenómeno se conoce como el efecto Compton. Los rayos gamma dispersos resultantes alcanzan un detector ubicado a una distancia constante de la fuente, en donde se cuentan los rayos gamma que llegan para poder relacionarse con la densidad de la formación. (Schlumberger, 1990).

El registro de lito-densidad es una versión mejorada de las herramientas de registros de densidad. Donde además de medir la densidad total, esta herramienta mide el factor fotoeléctrico de la formación. Está equipada con una fuente y dos detectores separados a una distancia fija, el detector cercano se utiliza únicamente para corregir la medición de densidad del detector lejano, compensando los efectos de enjarre y rugosidad del agujero. (Schlumberger, 1990).

El número de Rayos Gamma en la región de dispersión Compton, correspondiente a la región de mayor energía, está inversamente relacionado con la densidad de electrones de la formación. Mientras que el número de rayos gamma en la región del efecto fotoeléctrico, que pertenece a la región de menor energía, está inversamente relacionado tanto con la densidad de electrones como con la absorción fotoeléctrica. (Schlumberger, 1990).

El efecto fotoeléctrico ocurre cuando un rayo gamma de baja energía choca con un átomo en la formación, este rayo interactúa principalmente con los electrones orbitales, transfiriendo su energía al electrón con el cual colisionó, lo que provoca que sea expulsado de su órbita alrededor del núcleo. El grado de absorción fotoeléctrica de las formaciones depende del número atómico de los elementos que las componen y de la energía incidente de los rayos gamma. Por lo tanto, la intensidad del factor fotoeléctrico está relacionada con la densidad electrónica de la formación. (Ricco Macedo, 2012). En la siguiente figura se presenta un ejemplo de un registro de lito-densidad.

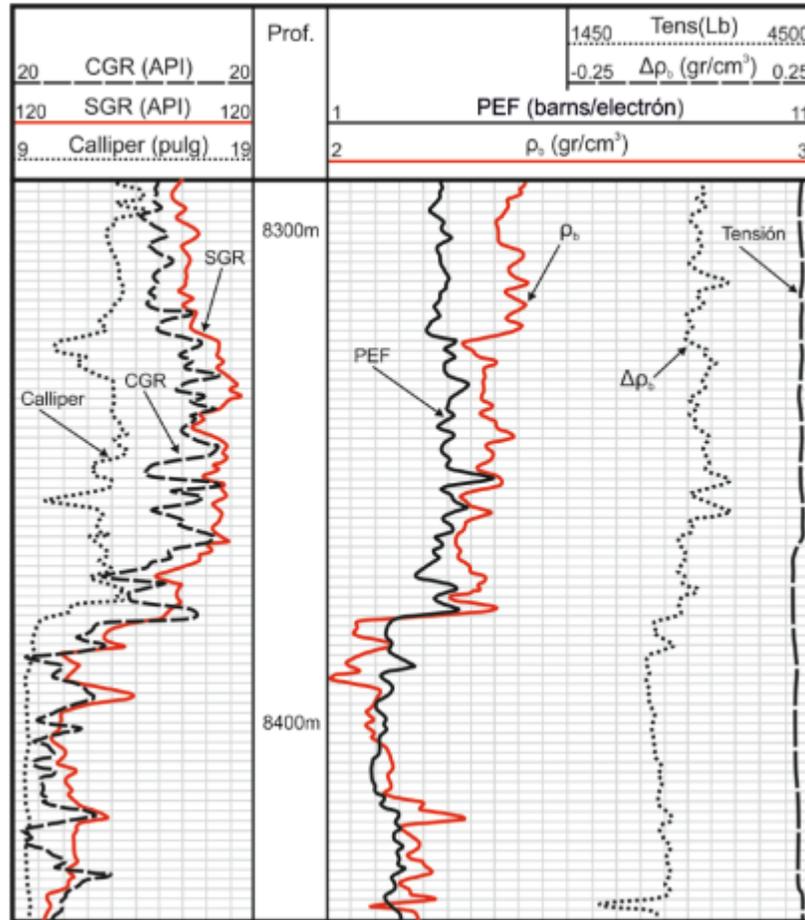


Figura 14. Ejemplo de un registro de porosidad que muestra las curvas de densidad, el factor de corrección de densidad, la curva de efecto fotoeléctrico, curvas de espectroscopia de rayos gamma junto con una curva de rayos gamma y Caliper. Bassiouni (1994) en Ricco Macedo.

2.7. Registros de Neutrones

El registro de neutrones se utiliza para identificar formaciones porosas y determinar la porosidad efectiva de las formaciones que muestran ciertos grados de permeabilidad. La respuesta del registro está dada principalmente por la cantidad de hidrogeno en la formación. Para formaciones limpias, donde los poros estén saturados de agua o gas, la respuesta del registro reflejara la cantidad de poros que estén saturados de fluido. La combinación del registro de neutrones con otros registros de porosidad y densidad, proporciona mejores datos de porosidad y una mejor identificación litológica. (Schlumberger, 1990).

El registro de neutrones se basa en la emisión continua de neutrones de alta energía hacia las formaciones, utilizando una fuente radiactiva que se encuentra dentro de la sonda. Estos neutrones chocan con los núcleos de los materiales de la formación, perdiendo energía en cada colisión. La cantidad de energía perdida en estos choques depende de la masa relativa del núcleo con el que colisionan. Dado que los neutrones son partículas eléctricamente neutras con una masa similar a la del átomo de hidrógeno, tienden a perder más energía al colisionar con átomos de hidrógeno, ya que la pérdida de

energía es mayor cuando el neutrón impacta un núcleo con una masa similar a la suya. Las colisiones que son producidas con núcleos con una masa mucho mayor a la del neutrón no hará que este pierda mucha aceleración, por lo que la pérdida de energía de los neutrones dependerá de la cantidad de hidrógeno presente en la formación. (Schlumberger, 1990).

Los neutrones tras sufrir múltiples colisiones, reducen su energía a cerca de 0.025 eV y luego se dispersan aleatoriamente sin perder más energía, hasta que son absorbidos por núcleos de átomos como cloro, hidrógeno o silicio. Cuando esto ocurre, los núcleos excitados emiten rayos gamma de alta energía. Dependiendo del tipo de herramienta que se utilice para la toma del registro, un detector ubicado en la sonda capta estos rayos gamma de captura o los neutrones mismos. Cuando hay una alta concentración de hidrógeno en la formación, la mayoría de los neutrones emitidos se desaceleran y son capturados en distancias muy cortas de la fuente. En contraste, si la concentración de hidrógeno es baja, los neutrones se alejan de la fuente antes de ser capturados. Por lo tanto, la tasa de conteo en el detector aumentará para bajas concentraciones de hidrógeno y disminuirá para altas concentraciones, lo que se relaciona directamente con la porosidad de la formación. (Schlumberger, 1990).

Las herramientas de neutrones termales se enfocan en medir neutrones con una energía cercana a 0.025 eV. Estos neutrones están influenciados por dos factores principales. El primero es la cantidad de hidrógeno presente en la formación, a mayor cantidad de hidrógeno, mayor será el conteo de neutrones termales cerca de la fuente y menor en el detector, por lo que la cantidad de neutrones obtenidos, dependerá de igual forma del espaciamiento que tengan los detectores con respecto a la fuente. El segundo factor es la sección transversal de captura de los elementos en las rocas de la formación: si estas rocas son ricas en elementos que absorben neutrones, se registrarán lecturas bajas de neutrones termales en el pozo. (Ricco Macedo, 2012). En la siguiente figura, se muestra un ejemplo de la presentación del registro de neutrones termales.

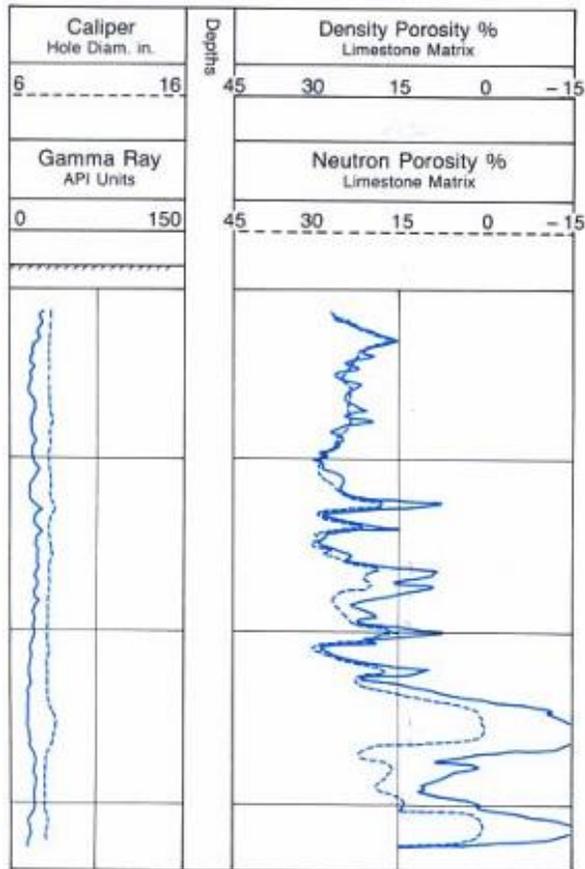


Figura 15. Ejemplo de un registro de porosidad Neutrón. Schlumberger (1990).

2.8. Registro Caliper

La planeación para la adquisición de registros geofísicos en pozo, dependerá del tipo de perforación, ya sea una perforación vertical, horizontal o direccional, en la cual además se requerirán parámetros como la forma, diámetro del pozo y las variaciones radiales que se generan en el agujero, junto con las propiedades de las formaciones. Para esto, es que se tiene el registro de Caliper, el cual tienen la finalidad de poder medir con alta precisión los cambios radiales que presenta el agujero a medida que se va perforando el pozo, con lo cual, el registro permite identificar derrumbes, acortamientos, cavernas y zonas permeables en las formaciones del pozo. (Ricco Macedo, 2012).

El registro Caliper se realiza a partir de un número determinado de brazos articulados, en donde el número de estos brazos dependerá de la herramienta con la que se esté trabajando. La medición más básica del registro Caliper se realiza a partir de dos brazos articulados, los cuales están colocados simétricamente a un costado de las sondas de toma de registros. Estos brazos articulados van unidos mediante un sistema mecánico o hidráulico a las paredes del pozo, donde se leen las variaciones resistivas mediante un potenciómetro a medida que la herramienta sube a la superficie. Estas lecturas en las variaciones del diámetro y la forma del agujero hacen que la herramienta abra o cierre sus brazos, lo que refleja en la señal como cambios de resistencia medida por el potenciómetro, donde posteriormente mediante una calibración en superficie, es posible

escalar las variaciones en el diámetro del agujero. (Ricco Macedo, 2012). En la siguiente figura, se muestra un ejemplo de la presentación del registro Caliper.

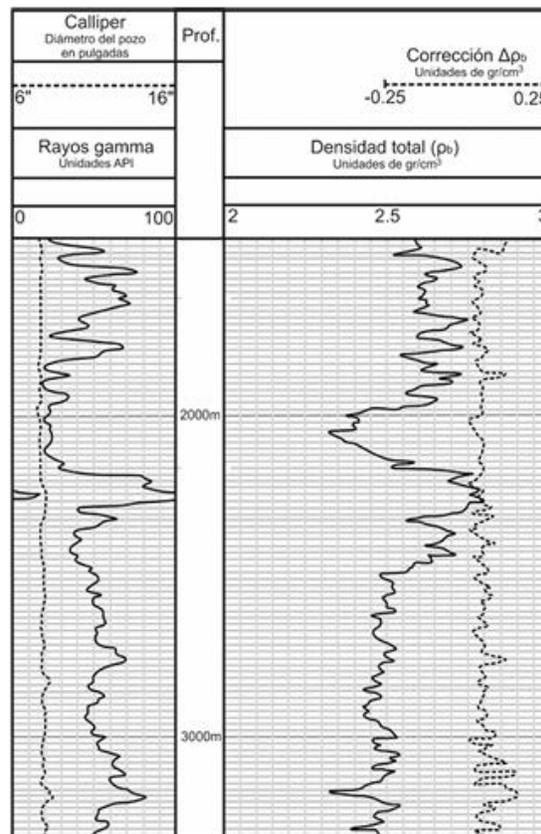


Figura 16. Ejemplo Registro Caliper. Tomado y modificado de Bassiouni (1994) en Ricco Macedo (2012).

2.9. Registros en formaciones volcánicas

La mayor parte de la información que se tiene sobre los registros geofísicos, se ha generado en la industria petrolera, y, por lo tanto, esta información se basa en registros para rocas sedimentarias. Por lo que el análisis y la interpretación de registros geofísicos para formaciones de rocas ígneas, requiere adaptaciones y nuevos criterios para estos ambientes de formaciones volcánicas. (Lezama-Campos et al., 2016).

De acuerdo con Ran, 2014, los registros geofísicos en formaciones volcánicas responden a las siguientes características:

- 1). Registro de Rayos Gamma: el registro de Rayos Gamma permite medir la radiactividad natural total de las formaciones. En formaciones de rocas volcánicas, el registro de Rayos Gamma nos proporciona información sobre el aumento de la radiactividad con base a la composición de la roca, la cual está relacionada al contenido de sílice, en donde la radiactividad aumenta desde las rocas ígneas básicas hasta las rocas ígneas ácidas.
- 2). Registro de Espectroscopia de Rayos Gamma: este registro permite medir por separado los contenidos relativos de uranio, torio y potasio. En donde el contenido de

uranio está relacionado con la absorbencia orgánica de las rocas; el contenido de torio, el cual nos indica la presencia de minerales de arcilla; y el contenido de potasio el cual está controlado principalmente por el contenido de feldespato potásico, lo cual nos da información sobre la composición de la roca. En formaciones de rocas ígneas, el registro de espectroscopia nos dice que en general, los contenidos de uranio y torio en los yacimientos volcánicos disminuyen desde las rocas básicas hasta las rocas ácidas.

3). Registros de densidad: Proporciona información sobre la densidad aparente de la formación, con el cual podemos observar cambios en la litología a lo largo del pozo. En donde en general, las rocas volcánicas básicas tienen una densidad más alta que las rocas volcánicas ácidas.

4). Registro sísmico: mide la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la formación, que se basa en los principios de la propagación de ondas acústicas a lo largo de la pared del pozo, este registro nos proporciona información sobre el grado de la compactación de las formaciones del pozo.

5). Registro de porosidad: está relacionado con cambios en la litología, propiedades físicas, fracturas y propiedades de los fluidos presentes en las formaciones del pozo.

6). Registro de resistividad: está relacionado con muchos factores, como el contenido de minerales conductores, los tipos y contenidos de arcilla, la presencia de poros y fracturas, los diferentes tipos de fluidos de formación, y muchos otros. Las rocas volcánicas tienen un bajo contenido de minerales de arcilla y una porosidad relativamente baja, por lo que los valores y las formas de las curvas del registro de resistividad pueden indicar relativamente bien el tipo de roca.

3. Metodología

3.1. Interpretación cualitativa de los registros geofísicos del pozo Mirador 2

La interpretación se realizó de acuerdo a las etapas en las que fueron adquiridos los registros geofísicos. Para este caso, la adquisición de los registros del pozo Mirador 2 se realizó en dos etapas, la primera etapa corresponde al intervalo perforado de 463.14 a 1044.70 metros desarrollados (md), mientras que la segunda etapa corresponde al intervalo de 1002.33 a 2390.24 metros desarrollados (md).

En cada una de las etapas se realizó el análisis como se describe a continuación. El primer paso, es discriminar la sección del registro útil, del que no lo es, de acuerdo a los valores válidos o bien adquiridos. Los criterios para descartar la parte del registro con adquisición válida fueron valores atípicos a lo largo de todo el registro y el inicio o fin de las mediciones de cada curva. En las Figuras 17 y 18, se muestran los valores extremos (inicio y fin), de la primera y segunda etapa del registro.

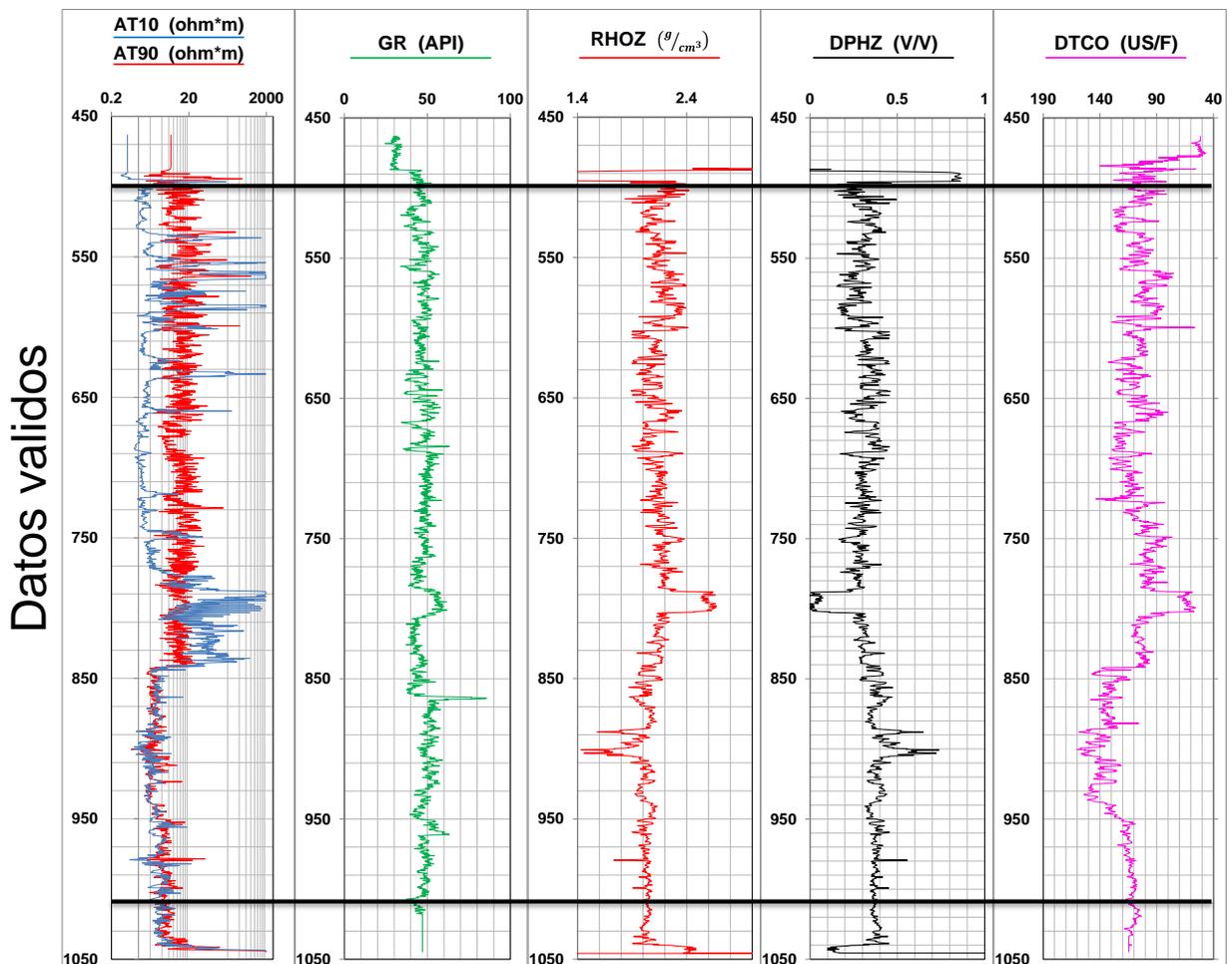


Figura 17. Delimitación de los registros para la primera etapa, donde los datos validos pertenecen de la profundidad de 500 a 1010 md.

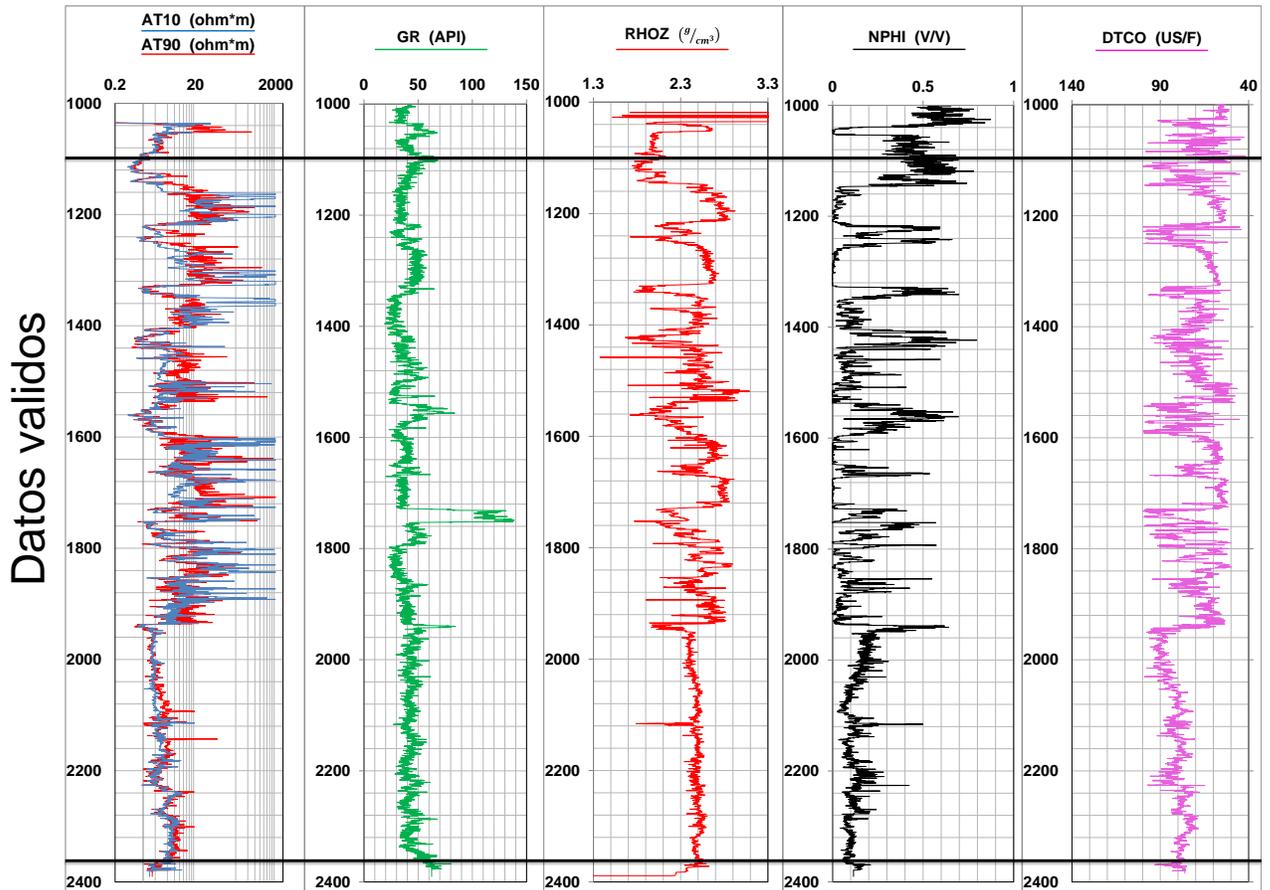


Figura 18. Delimitación de los registros para la segunda etapa, donde los datos validos pertenecen de la profundidad de 1100 a 2370 md.

Posteriormente, de cada etapa, se seleccionó un conjunto de curvas para realizar el análisis de las propiedades petrofísicas y litológicas del pozo.

Las curvas seleccionadas para la primera etapa fueron: las curvas de resistividad somera (AT10), resistividad profunda (AT90), Rayos Gamma (GR), registro de densidad (RHOZ), registro sónico (DTCO), registro Caliper (HCAL) y registro de porosidad (DPHZ).

Para la segunda etapa, se utilizó, el mismo juego de registros, junto con el registro de porosidad neutrón (NPHI) que si se adquirió en esta etapa. En la Figura 19, se muestran las curvas seleccionadas para la interpretación cualitativa, correspondiente a la primera etapa.

Las curvas de resistividad, permiten observar los cambios en la litología a lo largo del pozo, así como los espesores de las capas, el registro sónico da un aproximado sobre el grado de la compactación de las formaciones del pozo, mientras que el registro de densidad y porosidad brinda información sobre los cambios en las formaciones.

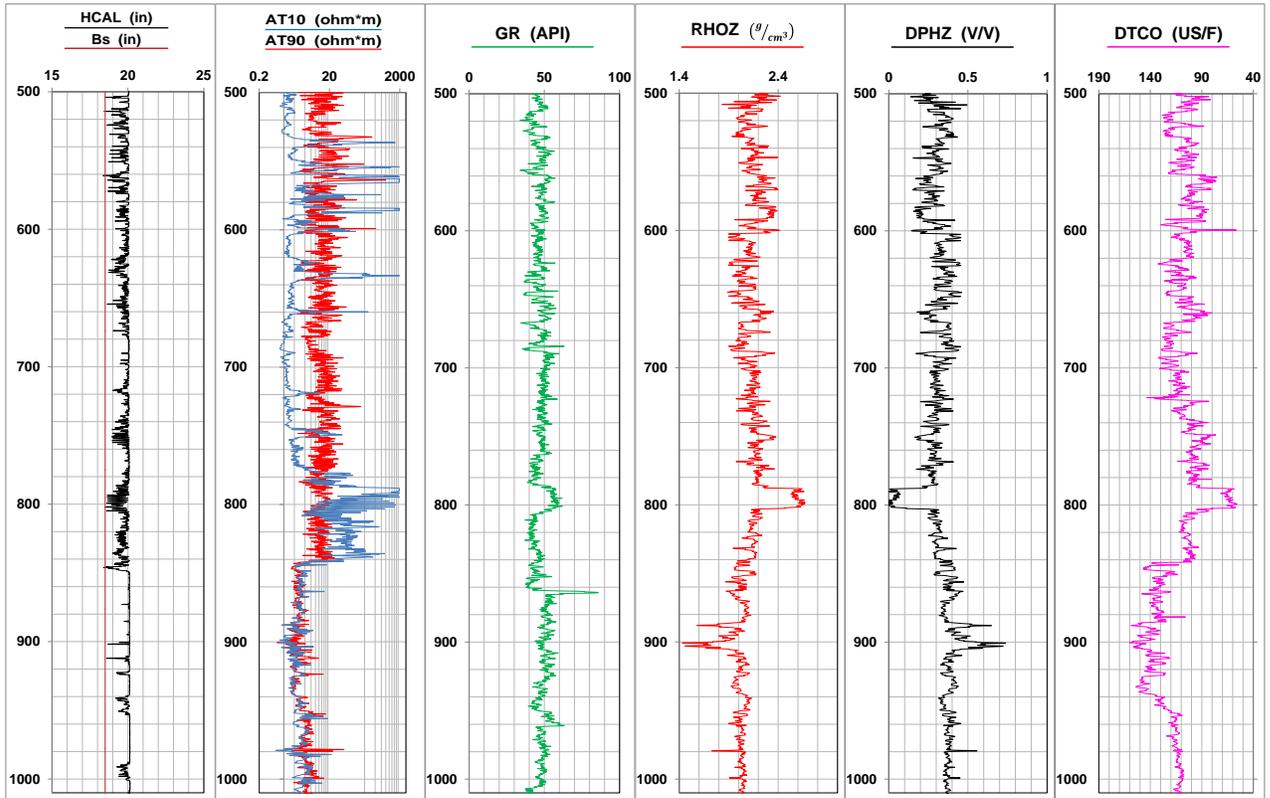


Figura 19. Ejemplo de selección de curvas para la interpretación cualitativa.

En cada etapa, se delimitaron zonas, con respuestas en los registros de manera similar o que correspondieran a formaciones con características parecidas. En la Figura 20, se ejemplifica la delimitación de una zona, de acuerdo a los valores de resistividad que son relativamente cercanos a 10 ohm*m, valores de Rayos Gamma que se mantienen constantes dentro de un intervalo de 45 a 55 API, densidades menores a 2 g/cm³ y valores altos de registro sísmico en un intervalo de 130 a 160 US/F.

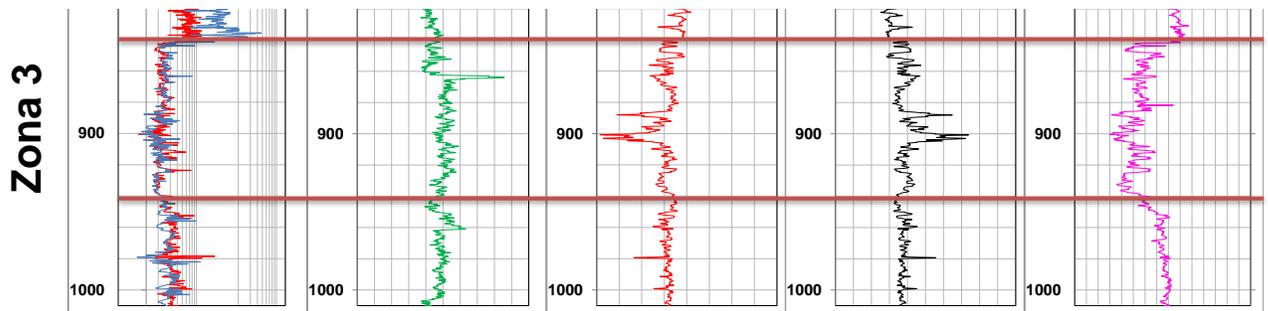


Figura 20. Ejemplo de la división de las zonas preliminares del registro para la primera etapa, a partir de los registros de resistividad, rayos gamma, densidad y sísmico.

Con las diferentes etapas ya delimitadas, se procedió a caracterizar cada zona mediante los rangos de valores de cada una de las curvas, para esto se obtienen los valores promedio o más representativos de cada zona, estos rangos se obtuvieron mediante el uso de gráficas de caja o Boxplot, el cual es una herramienta grafica que muestra la distribución de un conjunto de datos, se obtiene el rango de valores de cada una de las

curvas, para posteriormente hacer una primera descripción de la zona. En la Figura 21, se muestra un ejemplo del Boxplot para la primera zona correspondiente a la primera etapa.

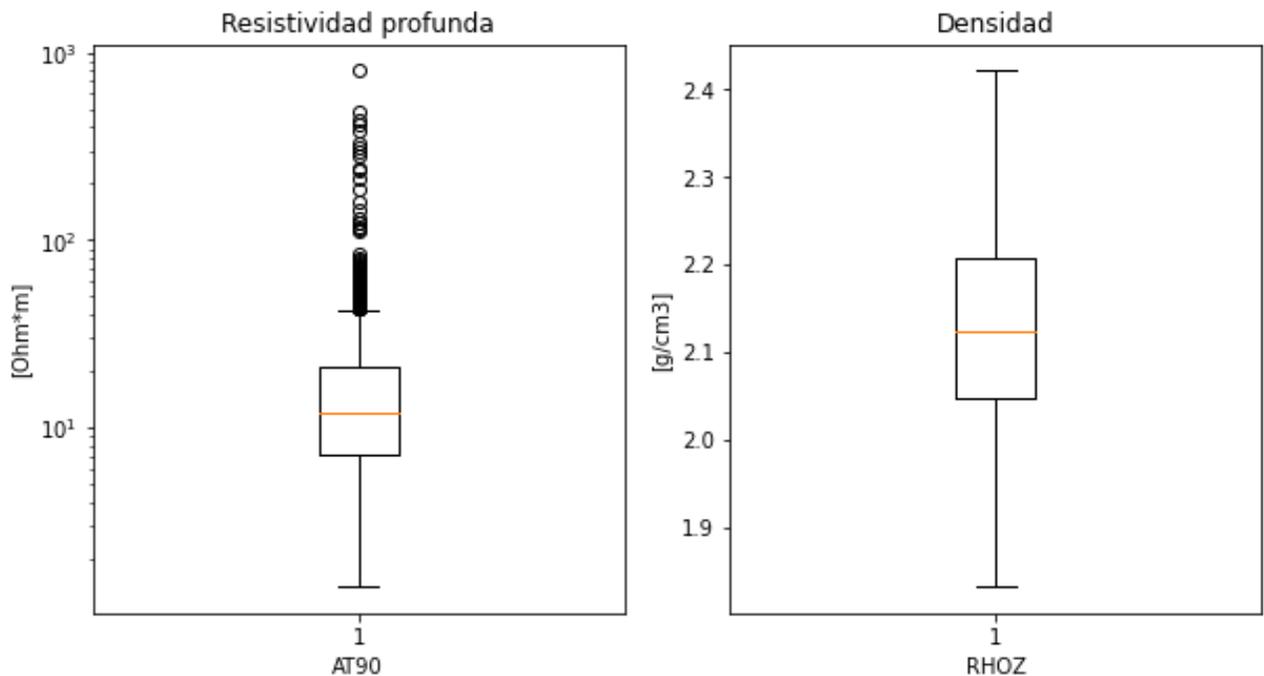


Figura 21. Boxplot del registro de resistividad (AT90) y densidad (RHOZ), correspondiente al intervalo de profundidad de 500 a 685 md.

Con la información de cada una de las zonas de las diferentes etapas, se procede a realizar un análisis más detallado que pueda complementar la información de las características de cada zona, para ello se utilizó el método de grupos (Cluster).

3.2. Teoría del análisis de grupos (Clúster)

El análisis de grupos (Cluster Analysis), es una técnica estadística multivariante, la cual, a partir de un conjunto de datos, busca agruparlos y reorganizarlos en grupos relativamente homogéneos y con la mayor diferencia posible entre ellos.

El análisis de grupos se puede sintetizar en dos etapas. En la primera, se emplea la técnica estadística K-Means para dividir los datos en grupos manipulables. El Método de K-Means, es un algoritmo de agrupamiento de datos que se basa en la idea de que un conjunto de datos puede juntarse en grupos donde los puntos dentro de cada grupo o "cluster" son más similares entre sí, que con los puntos en otros grupos vecinos. En esta primera etapa, se selecciona un número de datos (semilla) que abarque todos los rangos de datos presentes en los registros. A partir de estos datos seleccionados, se busca agruparlos en un número más manejable de facies geológicas. (Senergy, 2008).

El algoritmo de K-Means asigna cada punto del conjunto de datos de entrada a un cluster, donde se busca minimizar la varianza "intra-clúster", es decir la distancia promedio entre los puntos dentro de cada clúster. Esto se logra calculando la suma de la diferencia de cuadrados para un punto de datos y para cada media del clúster, y asignando el punto al clúster con la diferencia mínima. Después de asignar todos los puntos de datos a los

clústeres, se recalculan los nuevos valores medios en cada uno. Con estos nuevos valores, comienza un ciclo de iteraciones para reasignar nuevamente los datos a los clústeres, este proceso se repite hasta que los valores medios de los clústeres dejen de cambiar con las iteraciones. (Senergy, 2008).

En la segunda etapa, se utiliza una técnica de cluster jerárquico, para agrupar los datos. Esta agrupación jerárquica calcula las distancias entre todos los grupos, para posteriormente fusionar los dos grupos más cercanos. Esta nueva distancia de clúster a todos los demás grupos se vuelve a calcular y los dos grupos más cercanos se fusionan nuevamente. Este proceso se realiza cíclicamente hasta que solo se tenga un clúster. Como se puede observar en la Figura 22, se muestran estos resultados como un dendograma, que muestra cómo se fusionaron los grupos y el orden en que se fusionaron, coloreando cada agrupación en un color diferente. Los resultados originales de la agrupación K-mean se muestran en la base de la gráfica. (Senergy, 2008).

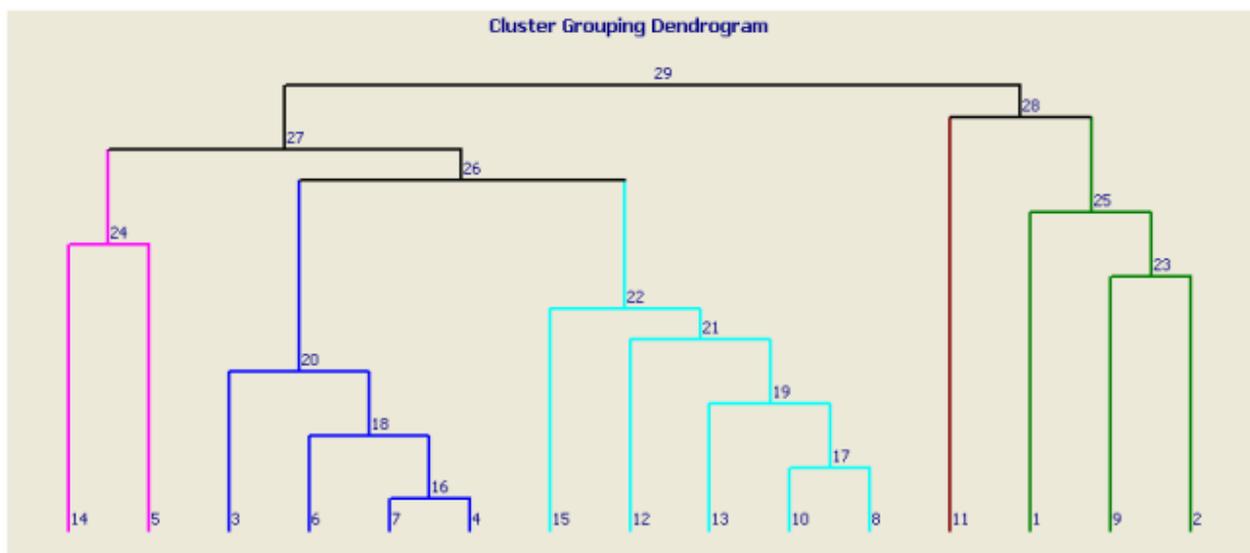


Figura 22. Ejemplo de Dendograma con 5 grupos que proporciona la interfaz de IP. Tomado de Senergy, 2008.

3.3. Metodología análisis

Se realizaron pruebas con diferentes registros para obtener diferentes agrupaciones, empleando dos enfoques principales. El primero fue un enfoque mecánico, utilizando registros enfocados en propiedades físicas, como el registro de resistividad, el registro de densidad y el registro sísmico. El segundo fue un enfoque basado en la composición mineralógica, como el registro de Rayos Gamma y la espectroscopía (contenido de torio, uranio y potasio).

El primer paso para realizar el análisis de grupos, fue elegir un conjunto de curvas, las cuales proporcionen datos sobre las propiedades petrofísicas de las formaciones, y así, poder agrupar los datos en un número definido de facies con base a esas características.

El criterio de selección de las curvas que se utilizaron, se enfocó principalmente al objetivo de poder dar una interpretación confiable de la geología y de las formaciones que

son atravesadas por el pozo. Es por esto que se seleccionan curvas que son relevantes desde el punto de vista geológico y petrofísico, y que además puedan complementarse entre sí.

Una vez que se seleccionaron las curvas para el análisis, se procedió a probar diferentes configuraciones de las semillas (número de cluster), con el fin de mejorar la agrupación de los datos, puesto que diferentes semillas llevan a diferentes agrupaciones finales. Se realizó una inspección de cada uno de los resultados obtenidos y se comparó con la información obtenida de los núcleos, muestras de canal y reportes de perforación.

A continuación, se muestra un ejemplo del resultado de un análisis de clúster, para la primera etapa (Figura 23), el cual corresponde a una agrupación con las curvas de resistividad profunda (AT90), Rayos Gamma (GR), registro de densidad (RHOZ) y registro sísmico (DTCO).

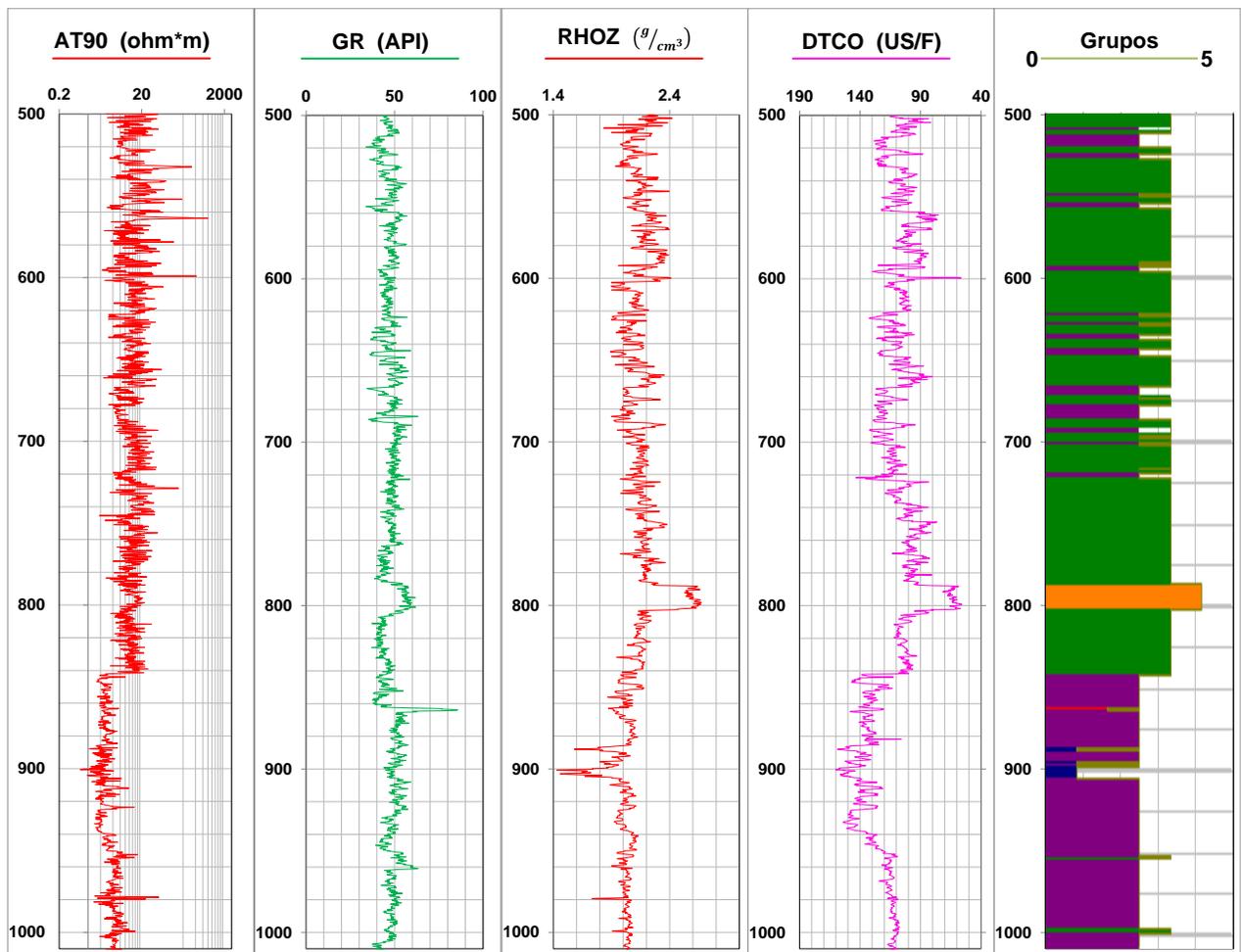


Figura 23. Análisis de grupos correspondiente a la primera etapa, con una semilla de 18, y a partir de los registros de resistividad profunda (AT90), Rayos Gamma (GR), densidad (RHOZ) y sísmico (DTCO).

La figura anterior muestra la configuración de 5 grupos o facies, en donde se observa la intercalación de estas facies, pertenecientes a materiales con propiedades petrofísicas

diferentes. Para poder observar de manera más clara los resultados, se realizó un diagrama de dispersión que mostró como fue dicha agrupación de los datos.

Los diagramas de dispersión, son graficas que representan la relación que existe entre dos variables diferentes, estas graficas permiten visualizar los patrones, tendencias o agrupaciones naturales en los datos. En el análisis de grupos, los diagramas de dispersión permiten observar cómo los datos se agrupan, respecto a los valores de cada uno de los registros, lo que facilita la identificación visual de los diferentes clústeres, además de que permiten evaluar la efectividad del análisis de grupos. En la siguiente figura, se muestra un diagrama de la relación que existe entre el registro sónico (DTCO) y la densidad (RHOZ), donde además se incluye el análisis de clúster anterior con el fin de poder observar la agrupación de los datos en las diferentes facies y así poder observar la efectividad del análisis.

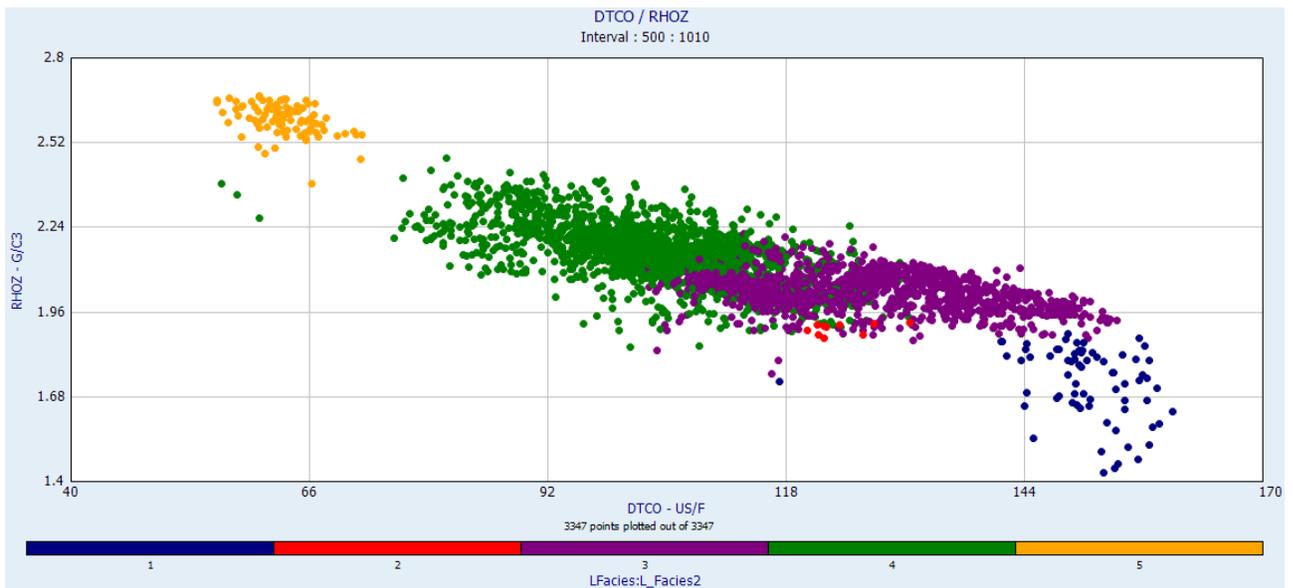


Figura 24. Relación entre el registro sónico (DTCO) y la densidad (RHOZ), perteneciente al primer ejemplo del análisis de grupos con una semilla de 18, correspondiente a los datos de la primera etapa.

Se puede ver que el grupo 1 y 5, se encuentran bien delimitados, el grupo 2 consta de una serie de pocos puntos, localizado por debajo del grupo 3, el grupo 3 y 4 en el sector central del gráfico, presentan datos con valores similares.

En la Figura 25, se muestra otro diagrama de la relación que existe entre el registro sónico (DTCO) y la densidad (RHOZ), donde además se incluye el análisis de clúster con una semilla 21, con el fin de observar los análisis de grupos con semillas diferentes.

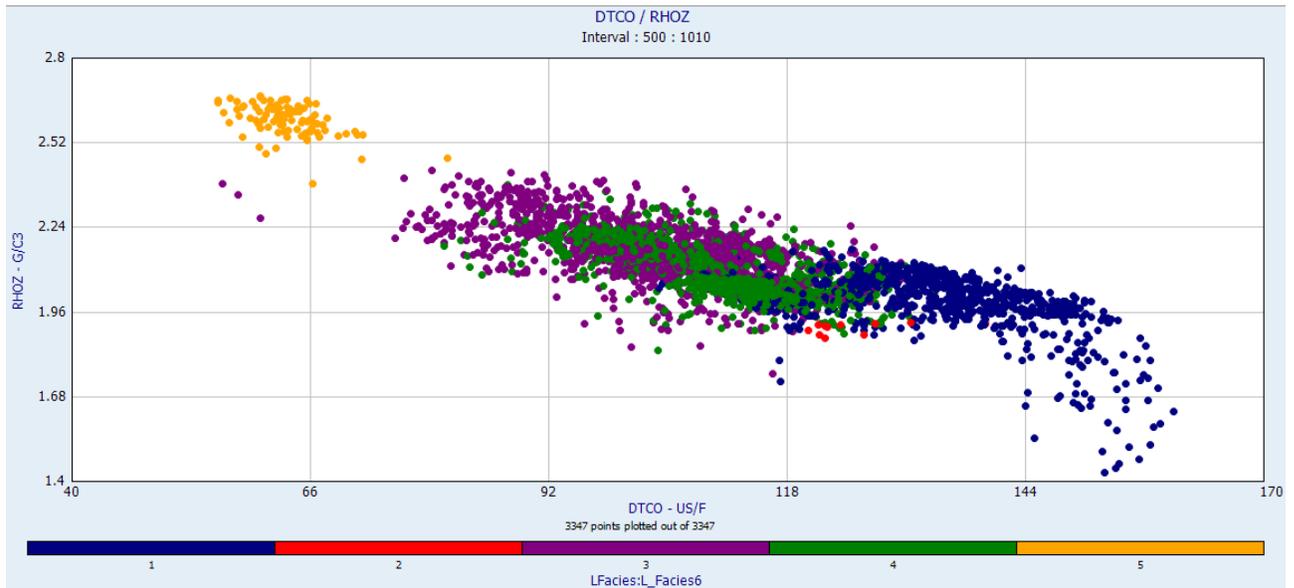


Figura 25. Relación entre el registro sísmico (DTCO) y la densidad (RHOZ), perteneciente al segundo ejemplo del análisis de grupos con una semilla de 21, correspondiente a los datos de la primera etapa.

Se observa que no existe una buena distinción entre los grupos 3 y 4, donde los datos de estos 2 grupos se encuentran dispersos entre sí. Este tipo de comparación se realizó con diversas semillas y las combinaciones disponibles con cada uno de los registros utilizados.

Con el conjunto de curvas establecido para el análisis de grupos, se procedió a realizar más configuraciones de facies con diversas semillas, con el objetivo de obtener los mejores resultados (agrupamientos óptimos). Esto permitió categorizar dichos grupos en tablas, con sus respectivos rangos de valores, para cada una de las propiedades petrofísicas, lo cual constituye uno de los principales aportes de este trabajo.

3.4. Metodología interpretación geológica

Con los resultados de la interpretación cualitativa, el análisis de grupos de registros físicos y espectroscopia, se construyó una columna de unidades petrofísicas para el pozo Mirador 2, siguiendo los siguientes pasos. Primero, mediante la interpretación cualitativa, se delimitaron zonas con características semejantes en los registros, lo que proporcionó una base de las posibles capas o unidades.

Segundo, el primer enfoque del análisis de grupos relacionado a las propiedades físicas, delimitó facies litológicas con características petrofísicas similares. Mientras que el segundo enfoque relacionado a la composición mineralógica a partir de la espectroscopia, delimitó facies litológicas con características mineralógicas similares. Ambos enfoques se correlacionaron para formar diferentes unidades, de acuerdo a composiciones mineralógicas semejantes, que se relacionen con características petrofísicas acorde al análisis de grupos.

Tercero, la información obtenida del análisis de grupos se complementó con la identificación de facies volcánicas, lo que proporcionó información clave sobre el tipo de

litología presente y su petrogénesis. También se calculó el contenido de sílice a partir del registro de Rayos Gamma, lo que permitió clasificar las diferentes rocas ígneas según su composición.

Finalmente, con toda esta información, se construyó una columna de unidades. En la figura siguiente se muestra un ejemplo de la construcción de dicha columna para la primera etapa del análisis.

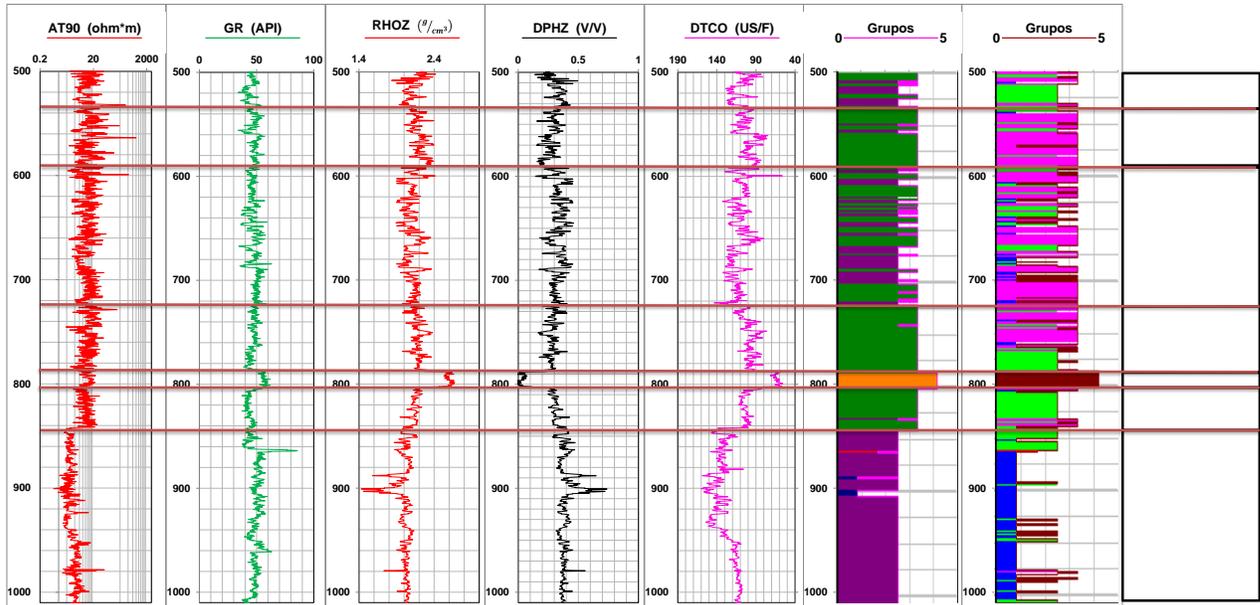


Figura 26. Ejemplo de la construcción de la columna de unidades correspondiente a la primera etapa.

Una vez delimitadas estas unidades, se procedió a observar la distribución de los datos en cada una de ellas mediante graficas de caja o “Boxplot”, donde se obtienen los rangos de los valores más representativos de los registros, mediante los (Cuartiles 25 y 75), para cada una de estas capas (unidades) como se muestra en la Figura 27, lo que permitió posteriormente, compararlo con valores de tablas de las características físicas y de composición de diferentes rocas ígneas. Para finalmente dar una posible interpretación de la litología de estas unidades.

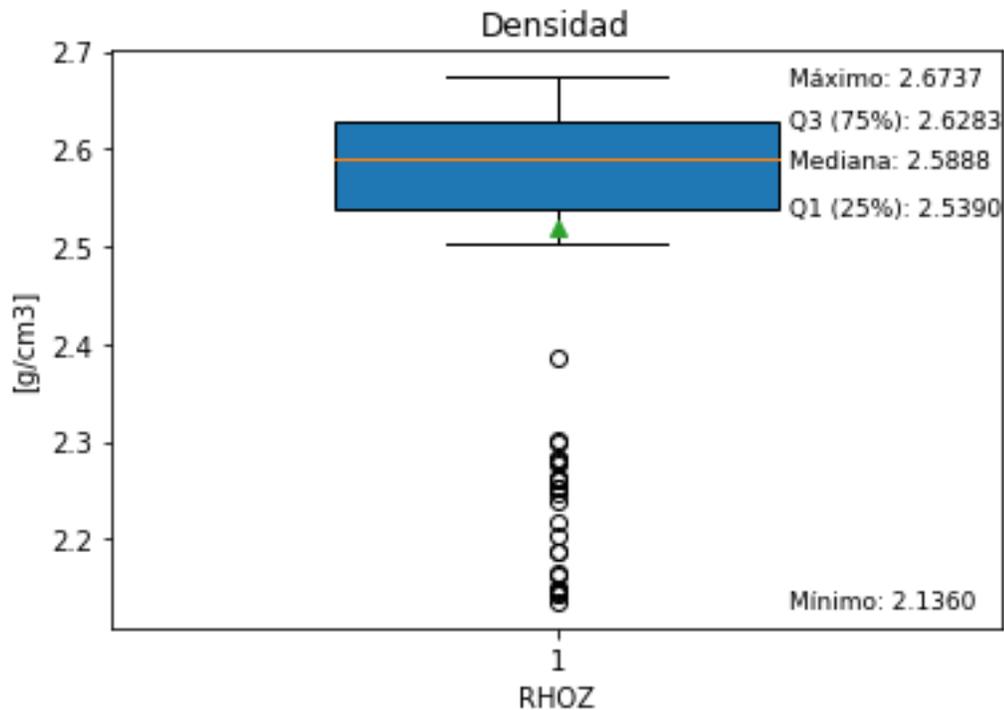


Figura 27. Ejemplo caracterización del rango de valores, mediante la gráfica Boxplot para el registro de densidad (RHOZ).

3.5. Análisis de muestras.

Para calibrar y determinar que agrupaciones de facies eran las más adecuadas, se utilizó toda la información del pozo disponible. Entre esta información se contó con las muestras de recorte y algunos núcleos cuya descripción es la siguiente:

3.5.1. Núcleos Mirador 2

Durante el proceso de perforación del pozo Mirador 2, se obtuvieron un total de 7 secciones de núcleos. A continuación, se muestra una breve descripción de cada uno, y un pequeño listado de estos, junto con su respectiva etiqueta y la profundidad a la cual fueron extraídos (Figura 28).

Núcleos pozo Mirador 2:

- Núcleo N-Mirador-2, empaquetado y etiquetado en la caja No. T1-1, correspondiente al intervalo en profundidad de 1060.62 md.
- Núcleo N-Mirador-2, empaquetado y etiquetado en la caja No. T1-2, correspondiente al intervalo en profundidad de 1062 md.
- Núcleo N-MIRADOR-2, empaquetado y etiquetado en la caja No. T-6, correspondiente al intervalo en profundidad de 1971.90 a 1973 md.
- Núcleo N-MIRADOR-2, empaquetado y etiquetado en la caja No. T-4, correspondiente al intervalo en profundidad de 1974 a 1975 md.
- Núcleo N-MIRADOR-2, empaquetado y etiquetado en la caja No. T-3, correspondiente al intervalo en profundidad de 1975a 1976 md.

- Núcleo N-MIRADOR-2, empaquetado y etiquetado en la caja No. T-2, correspondiente al intervalo en profundidad de 1976 a 1977 md.
- Núcleo N-MIRADOR-2, empaquetado y etiquetado en la caja No. T-1, correspondiente al intervalo en profundidad de 1977 a 1978 md.



Figura 28. Ejemplificación del etiquetado de los núcleos del pozo Mirador2.

3.5.2. Análisis de los Núcleos del pozo Mirador 2

En la siguiente figura, se muestra el núcleo N-Mirador-2 T1-1 perteneciente al intervalo de 1060.62 md, el cual se encuentra fragmentado y con signos de alteración, lo que dificulta una descripción detallada.



Figura 29. Núcleo N-Mirador-2 T1-1 perteneciente a 1060.62 md.

El núcleo parece presentar un contacto entre dos materiales diferentes, donde el fragmento más grande es de un color rojizo, presenta clastos grandes de unos cuantos centímetros de color rosado como se muestra en la (Figura 30), mientras que el resto de los fragmentos del núcleo presentan un color rojizo más fuerte y un color gris como se muestra en la (Figura 31).



a) Vista longitudinal del núcleo.



b) Sección transversal.

Figura 30. Fragmento del Núcleo N-Mirador-2 T1-1 perteneciente a 1060.62 md.



Figura 31. Fragmentos del Núcleo N-Mirador-2 T1-1 perteneciente a 1060.62 md.

En la Figura 32, se muestra el núcleo N-Mirador-2 T1-2 perteneciente al intervalo de 1062 md, la roca presenta un color rojizo, dentro de la roca se observan algunos clastos de color rosado como se muestra en la Figura 33.



Figura 32. Núcleo N-Mirador-2 T1-2 perteneciente a 1062 md.



Figura 33. Fragmento perteneciente al núcleo N-Mirador-2 T1-2 en el cual se observa la presencia de un clasto redondeado.

En la Figura 34, se muestra el núcleo N-Mirador-2-T-6 perteneciente al intervalo de 1971.90-1973 md, el núcleo se encuentra roto y parcialmente alterado, la roca es de color gris, la cual presenta clastos de unos cuantos centímetros. En uno de los fragmentos como se muestra en la Figura 36, se presenta un cumulo de minerales color verde fuerte junto con estrías de falla.



Figura 34. Núcleo N-Mirador-2 T-6 perteneciente al intervalo de 1971.90 a 1973 md.

En la siguiente figura, podemos observar el tamaño de los clastos que presentan los fragmentos del núcleo, los cuales van de unos cuantos centímetros y clastos más grandes.



Figura 35. Fragmento perteneciente al núcleo N-Mirador-2 T-6 en el cual se observa la presencia de clastos angulosos grandes.

En la siguiente figura, podemos observar que la muestra presenta un rasgo conocido como estrías de falla, en donde se observa una mineralización de color blanco lechoso dentro de estas estrías. Además, dentro de la misma muestra se observa una mineralización de color verdosa, la cual es posible que se creara debido a un proceso hidrotermal que se filtró en las fallas de la formación.



Figura 36. Fragmento perteneciente al núcleo N-Mirador-2 T-6 en el cual se observa la presenta una coloración verdosa y estrías de falla.

En la siguiente figura, se muestra el núcleo N-Mirador-2 T-4 perteneciente al intervalo de 1974-1975 md, el núcleo se encuentra fragmentado. La roca presenta color gris verdoso la cual contiene clastos pequeños de unos cuantos centímetros como se observa en la Figura 38.



Figura 37. Núcleo N-Mirador-2 T-4 perteneciente al intervalo de 1974 a 1975 md.



Figura 38. Fragmento perteneciente al núcleo N-Mirador-2 T-4 en el cual se observa la presencia de clastos pequeños redondeados.

En la siguiente figura, se muestra el núcleo N-Mirador-2 T-3, perteneciente al intervalo de 1975-1976 md, el núcleo se encuentra fragmentado, por lo que fue difícil observar su disposición original. La roca presenta color gris verdoso la cual contiene clastos pequeños de unos cuantos centímetros como se observa en la Figura 40.



Figura 39. Núcleo N-Mirador-2 T-3 perteneciente al intervalo de 1975 a 1976 md.



Figura 40. Fragmento perteneciente al núcleo N-Mirador-2 T-3 en el cual se observa la presencia de clastos pequeños sub-redondeados.

En la siguiente figura, se muestra el núcleo N-Mirador-2 T-2, perteneciente al intervalo de 1976-1977 md, el núcleo se encuentra fragmentado, pero fue posible reconstruir gran parte de su disposición original (Figura 42). La roca presenta color gris verdoso la cual contiene clastos redondeados de tamaños medianos y grandes como se observa en la Figura 43.



Figura 41. Núcleo N-Mirador-2 T-2 perteneciente al intervalo de 1976 a 1977 md.



Figura 42. Núcleo N-Mirador-2 T-2 reconstruido perteneciente al intervalo de 1976 a 1977 md.



Figura 43. Fragmento perteneciente al núcleo N-Mirador-2 T-2 en el cual se observa la presencia de clastos sub-redondeados.

En la siguiente figura, se muestra el núcleo N-Mirador-2 T-1, perteneciente al intervalo de 1977-1978 md, el núcleo se encuentra poco fragmentado, y fue posible reconstruir gran parte de su disposición original (Figura 45). La roca presenta color gris verdoso la cual contiene clastos redondeados de tamaños pequeños y medianos como se observa en la Figura 45 y 46.



Figura 44. Núcleo N-Mirador-2 T-1 perteneciente al intervalo de 1977 a 1978 md.



Figura 45. Núcleo N-Mirador-2 T-1 reconstruido perteneciente al intervalo de 1977 a 1978 md.



Figura 46. Núcleo N-Mirador-2 T-1 perteneciente al intervalo de 1977 a 1978 md.

3.6. Revisión de bitácoras

Para discernir entre anomalías en el registro provocadas por las formaciones naturales o por características del pozo, se analizaron las bitácoras de perforación disponibles, cuyo resumen se presenta a continuación.

El pozo Mirador 2 se perforó de abril a noviembre de 2018. Durante el primer mes, se realizó la instalación y prueba de funcionamiento de los equipos de perforación. El 5 de mayo se dio inicio a la perforación, en donde se llegó a los primeros 26 metros de profundidad. El 19 de julio se llegó a la profundidad 1001 md y se procedió a recuperar el núcleo. El 21 de julio se perforó hasta la profundidad de 1046 md y se procedió a realizar la primera corrida de los registros: eléctricos (AIT), geometría de pozo (BGL), inclinometría

(GPIT), Rayos Gama (GR) de 1046 a 478 md. Posteriormente se procede a tomar la segunda corrida correspondiente a los registros de litodensidad (LDL), sónico (DSI), Rayos Gamma (GR), espectroscopia de Rayos Gamma (HGNS) y temperatura de profundidad de 1046 a 487 md.

El 3 de agosto se dio continuación a la perforación para la segunda etapa, llegando a una profundidad de 1051 md y con ayuda de geólogos de CONAGUA se analizaron muestras para determinar el punto de extracción de corte de núcleo. El 4 de agosto se efectuó el corte de núcleo, de la profundidad de 1053 a 1062 md, donde el 5 de agosto se recuperó el corte de núcleo correspondiente a (N-Mirador-2 N1.1) con una longitud de 1.68 m de 9 metros cortados. El 7 de agosto por solicitud de CONAGUA se efectúa otro corte de núcleo el cual corresponde al núcleo (N-Mirador-2 N1.2), para posteriormente continuar con la perforación a 2079 md. El 28 de agosto se tomó una primera corrida de los registros: AIT, BHC, LDL, SP y GR de 1754 a 1034 md, posteriormente se tomó una segunda corrida de los registros: LDL, GR de 1754 a 1034 md. El 29 de agosto se comenzó con la ampliación del agujero de 1306 a 1760 md. El 5 de septiembre se realizó el cambio de barrena y se continuó con la perforación. El 10 de septiembre se efectuó un nuevo corte de núcleo de 1969 a 1978 md, en donde recupero el núcleo con una longitud total de 6.40 m, repartido a 5 tramos de 1 m y de 1.40 m, los cuales corresponden a los núcleos (N-Mirador-2-T-6, N-Mirador-2-T-4, N-Mirador-2-T-3, N-Mirador-2-T-2, N-Mirador-2-T-1).

Posteriormente, se continuó con la perforación. El 14 de septiembre se realizó una corrida de registros: DSI, BGL, GPIT, HNGS-GR en la cual tras varios intentos no se logró realizar la toma de registros debido a que la herramienta noto resistencia en varias ocasiones a la profundidad de 1120 md, por lo que se recuperó hasta superficie. El 15 de septiembre se cambió de barrena y se bajó a la profundidad donde noto resistencia hasta que logro vencerla, para posteriormente volver a cambiar de barrena y seguir conformando el agujero. El 28 de septiembre se efectuó el cambio de barrena para ampliar el agujero de la profundidad de 1303 a 2080 md. El 20 de octubre a la profundidad de 1806 md, no se observó recuperación de peso en un indicador, por lo que se optó por levantar la sarta, donde no se tuvo éxito, tras varios intentos no fue posible liberar la sarta. El 25 de octubre mediante la herramienta U.R.E. se efectuó la detección de punto libre, y se dio pie a los preparativos para dejar libre el área de rotación de sarta, posteriormente se levantó la sarta a superficie para revisión. En donde no fue posible recuperar la sarta completa quedando una parte de ella en el interior del pozo. Donde la longitud del pez fue de 79.65 m.

El 30 de octubre se efectúa side track de la profundidad 1586 a 1587 md, en los días posteriores se continúa con el side track a la profundidad de 1602 md, donde se continuó con la perforación hasta llegar a la profundidad de 2386 md, donde se tomaron los registros correspondientes a la segunda etapa.

4. Resultados

4.1. Calibración de las herramientas de registro

La calibración de las herramientas con las que se toman los registros geofísicos es un proceso importante, debido a que la calibración de las herramientas es un control de calidad de las mediciones de los registros, por lo que una buena calibración asegura datos confiables. Existen muchas compañías que fabrican las herramientas para la toma de registros, cada una con modelos y sensibilidades diferentes. Por lo que los datos registrados por estas herramientas deben ser consistentes y repetibles de una corrida de registros a otra, y de un tipo de herramienta a otra. Esto se logra relacionando las mediciones con patrones de referencia estándar por un proceso conocido como calibración. (Reyes Hernández, 2012).

El procedimiento de calibración consiste en ajustar la sensibilidad de la herramienta a un estándar conocido. Existen muchas maneras y métodos de calibración de registros, cada uno de ellos, se ajusta a datos que reflejen con precisión las propiedades de la formación geológica esperada en la que se perfora el pozo. Para el pozo Mirador 2 se realizaron dos calibraciones diferentes, una calibración de matriz de arenas y otra de matriz de dolomita.

La calibración de matriz de arenas se refiere a que se ajustan los registros geofísicos para reflejar las propiedades típicas de una matriz de arena, como su porosidad, permeabilidad, densidad, resistividad y otras propiedades asociadas con las arenas. Por otro lado, la calibración de Matriz de Dolomita se aplica cuando la formación geológica está compuesta principalmente de dolomita.

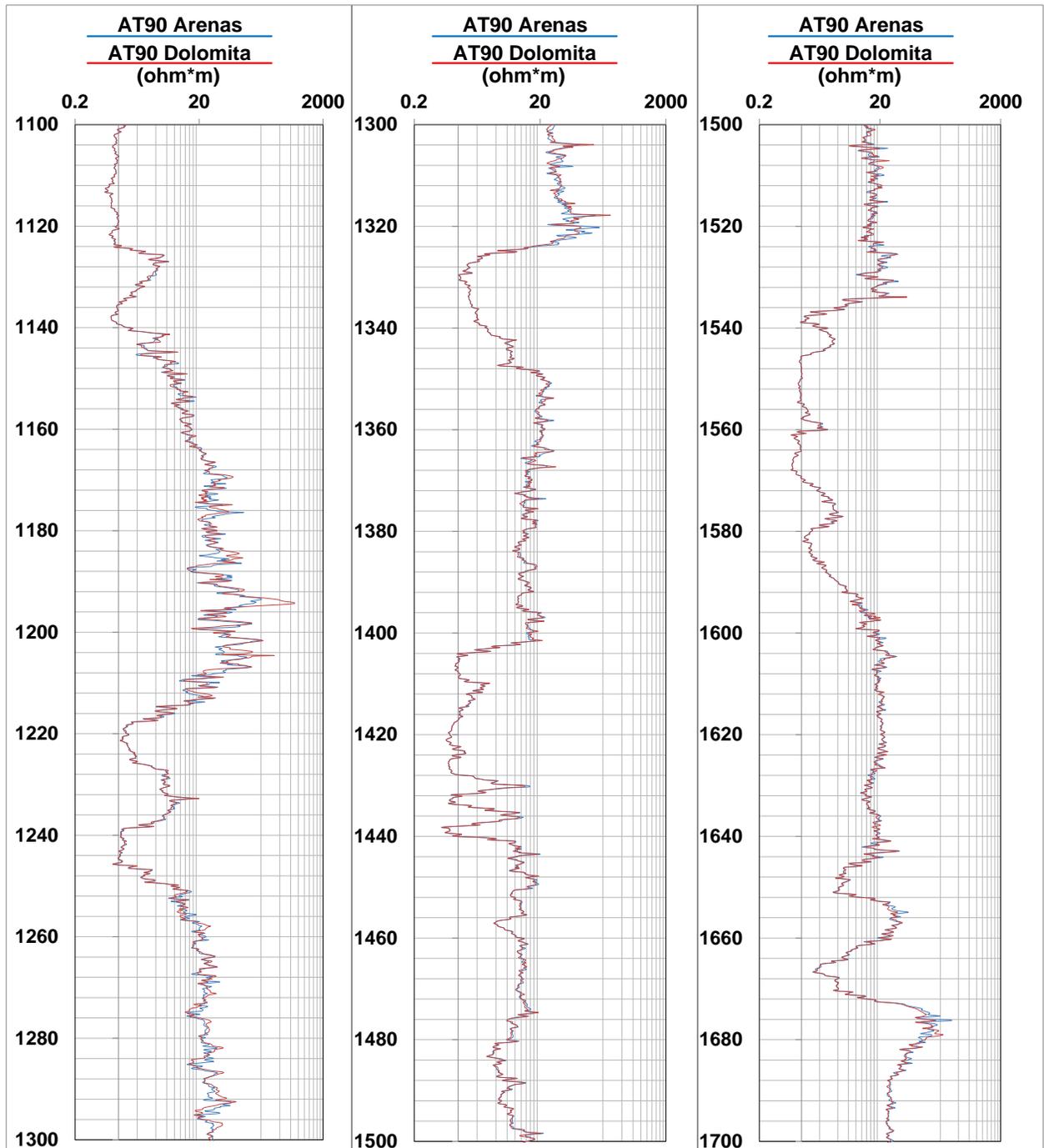


Figura 47. Comparación de las calibraciones de Arena y Dolomita para el registro de resistividad profunda (AT90), donde el registro se dividió en 3 secciones para una mejor observación.

4.1.1. Registro de resistividad

En la Figura 47, se muestran los resultados de la adquisición del registro de resistividad profunda (AT90), calibrada con las diferentes matrices. Esto con el objetivo de observar el comportamiento y las diferencias de la respuesta del registro de resistividad ante estas dos calibraciones, y así elegir las más conveniente para la interpretación.

El registro se divide en tres partes de acuerdo a la profundidad, para así lograr observar mejor el comportamiento de las curvas. La primera parte del registro va de una profundidad de 1100 a 1300 md. De manera general se logra observar que ambos registros siguen la misma tendencia. En algunas zonas se observan valores del registro calibrado en Dolomita, en donde este aumenta considerablemente con respecto al registro calibrado en Arenas. Un ejemplo claro de esto se observa en el intervalo de 1192 a 1195 md, en este intervalo el registro calibrado en arenas presenta una resistividad aproximada de 183 ohm*m, mientras que el registro calibrado en dolomita presenta una resistividad de 693 ohm*m.

En el intervalo que va de 1184 a 1185 m, se puede apreciar como si la medición del registro de arenas, diera una medición con valores totalmente contrarios a los medidos en el registro de dolomita. Sin embargo, esta diferencia en los registros se debe más bien a que el registro de dolomita, exalta los valores de resistividad, haciendo así el efecto de que el registro de arenas registre valores contrarios a los de dolomita. Este efecto se repite en algunas zonas a lo largo de esta primera sección, como en el intervalo que va de 1202 a 1205 md y 1288 a 1291 md.

Para la segunda parte del registro que va de 1300 a 1500 md (Figura 47), de manera general se tienen las mismas observaciones que se hicieron en la primera parte del registro. En esta segunda sección, resalta el intervalo que va de 1316 a 1322 md, donde el registro de arenas da mediciones mayores a las del registro de dolomita. La tercera parte del registro va de 1500 a 1700 md (Figura 47), de manera general se tienen las mismas observaciones que se hicieron en la primera parte del registro.

4.1.2. Registro de Rayos Gamma

En el registro de rayos gamma tomado con la herramienta calibrada tanto en arenas como en dolomita, no se logró observar alguna diferencia en el registro (Figura 48), por lo que independientemente de la calibración de la herramienta el registro es el mismo.

4.1.3. Registro Sónico

En el registro sónico presento datos ruidosos en gran parte de las primeras lecturas de la herramienta, sin embargo, la herramienta calibrada tanto en arenas como en dolomita, no se logró observar alguna diferencia en el registro (Figura 48), por lo que independientemente de la calibración de la herramienta el registro es el mismo.

Es importante resaltar que el análisis de grupos es el método que nos ayudara a dar una primera interpretación de la geología de las formaciones que son atravesadas por el pozo, es por esto que para poder elegir cual calibración es la mejor opción para realizar el análisis de grupos, se debe tener en cuenta factores que pueden afectar el análisis de clústeres, como datos que puedan contener ruido o errores que pueden llevarnos a tener un sesgo en los grupos y llevarnos a resultados poco confiables.

Es importante considerar si la diferencia en los valores de resistividad entre las dos calibraciones afecta la interpretación geológica de los datos. De este modo los valores más grandes del registro con calibración de dolomita pueden afectar significativamente la

agrupación de los datos. Por lo tanto, la matriz que proporciona valores más coherentes es la matriz de arenas.

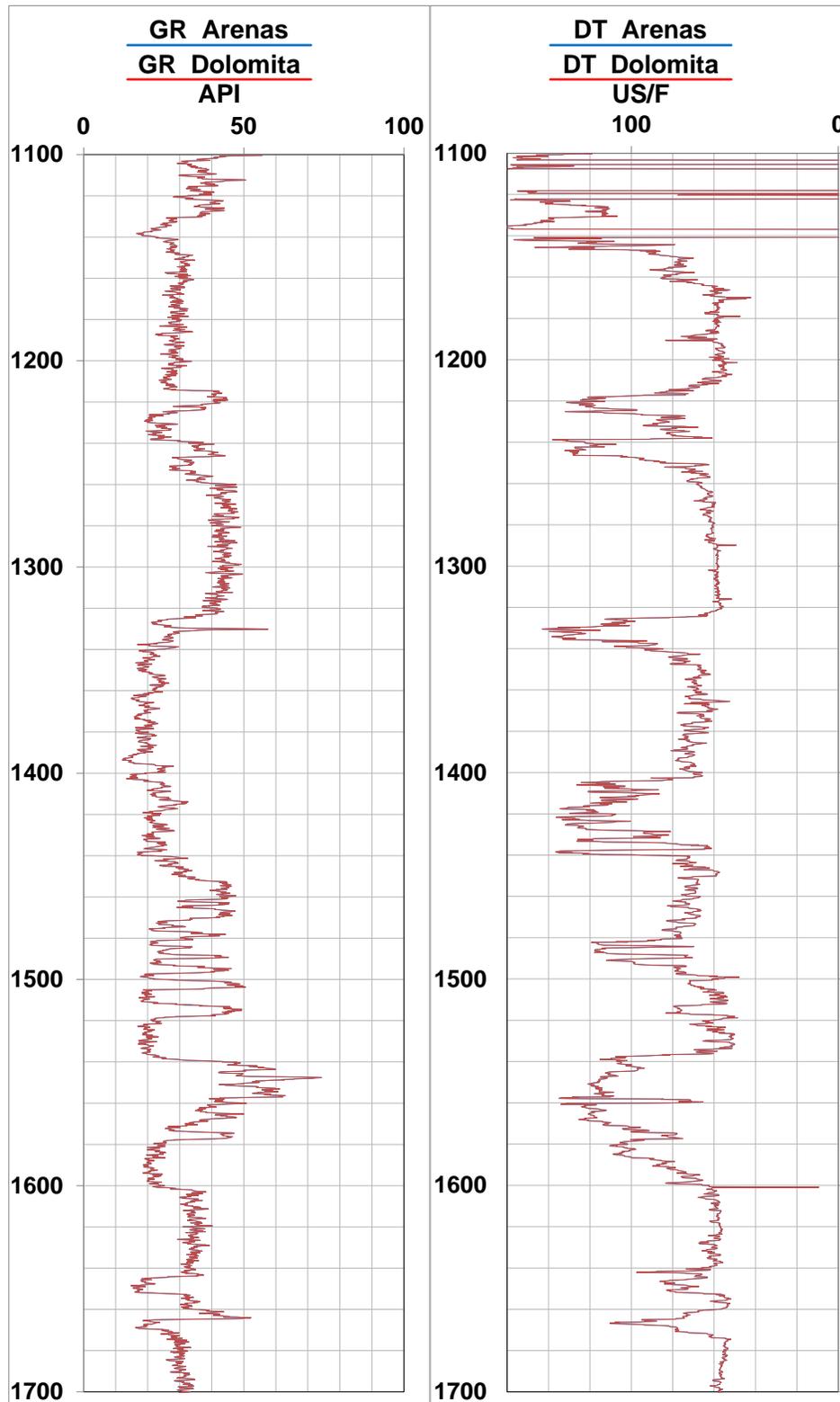


Figura 48. Comparación de las calibraciones de Arena y Dolomita para los registros de Rayos Gamma (GR) y registró sónico (DT).

4.2. Interpretación cualitativa del registro

La interpretación cualitativa se dividió de acuerdo a las diferentes etapas en las que se tomaron los registros del pozo Mirador 2.

4.2.1. Primera Etapa

En la Figura 49, se observa la división de los registros de la primera etapa en 4 zonas, cuyas características de los registros son similares y permiten describir y realizar una interpretación cualitativa.

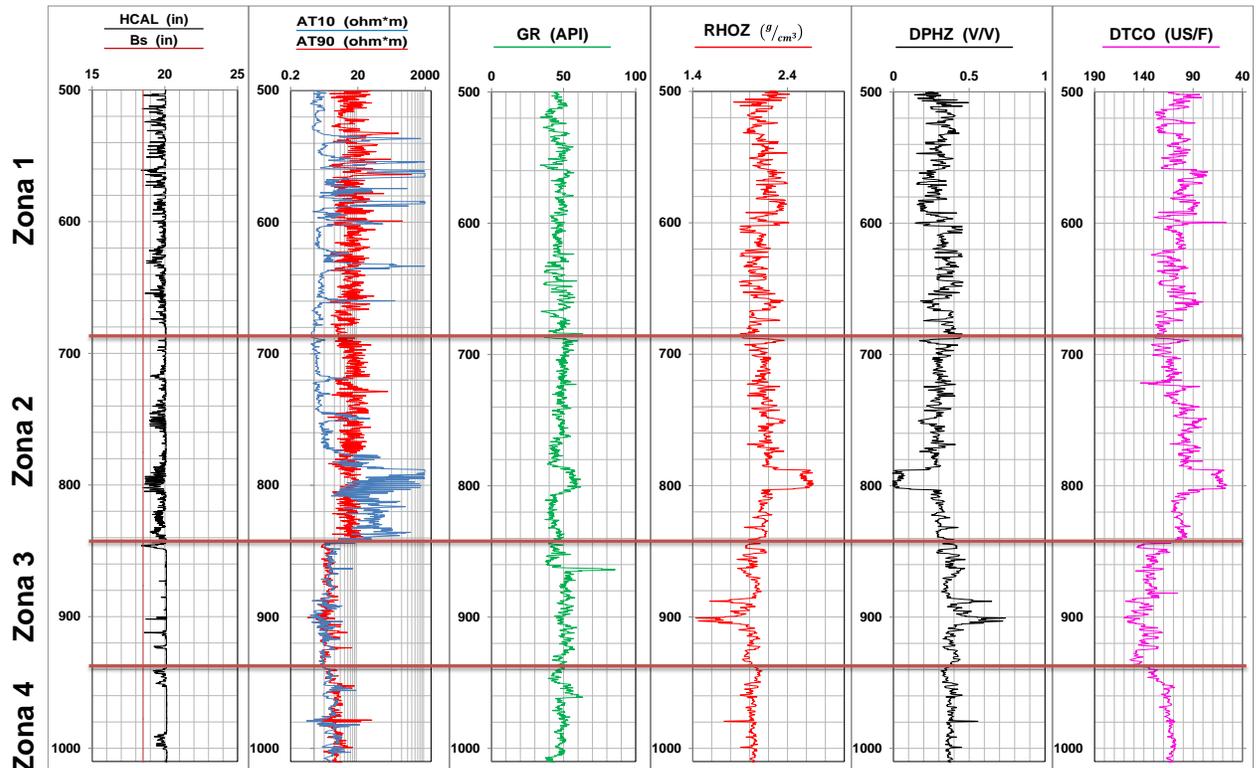


Figura 49. División cualitativa de las zonas preliminares del registro para la primera etapa, correspondiente al intervalo de 500 a 1010 md, mediante las curvas de resistividad profunda (AT90), resistividad somera (AT10), Rayos Gamma (GR), densidad (RHOZ), sónico (DTCO) y Caliper (HCAL).

La zona 1, se caracteriza por cambios repentinos o “saltos” en los valores de resistividad somera (línea azul) y profunda (línea roja), los valores de la curva de resistividad somera en promedio son bajos, de aproximadamente 1.31 a 4.23 ohm*m, con saltos en algunos intervalos de hasta 1950 ohm*m. Estos saltos en los valores de resistividad pueden deberse a fracturamiento de la formación, o cambios en las condiciones de competencia de la roca. Los valores de la resistividad profunda se encuentran agrupados entre 7.06 a 20.85 ohm*m, con saltos de hasta 798.27 ohm*m, donde se observa una separación con respecto a la curva de resistividad somera. La curva de Rayos Gamma se agrupa en valores que van de 44.08 a 49.89 API. La curva de densidad presenta cambios en sus

valores de 2.04 a 2.20 g/cm³, el registro de porosidad presenta valores de 0.268 a 0.364 V/V. En la curva del Registro Sónico, se observan variaciones en los valores de la onda compresional (DTCO) que van de 99.64 a 116.71 US/F, con un salto a la profundidad de 600 metros con un valor de 56.40 US/F. Con la información, se puede interpretar que esta zona corresponde a una zona heterogénea, con distintos grados de competencia de las formaciones y probablemente alto grado de fracturas.

La zona 2 presenta valores de resistividad profunda que van de 8.54 a 16.86 ohm*m, con un salto de 155.24 ohm*m a la profundidad de 728.62 md, los valores de resistividad somera de esta zona son bajos, de 1.34 a 47.73 ohm*m, donde a partir de la profundidad de 770.38 m se presenta un cruce de las curvas, donde se presentan valores de resistividad somera de hasta 1950 ohm*m, este aumento en la resistividad somera puede complementarse junto con el registro de Caliper, el cual presenta un intervalo para esa misma profundidad, donde los valores del diámetro del pozo disminuyen aproximándose al valor del diámetro de la barrena, en comparación con la zonas anteriores, lo que puede significar que esta zona se encuentra más consolidada y menos porosa, por lo que existe una menor invasión del lodo, dando como resultado una resistividad somera alta. A la profundidad de 780 md, se tiene un aumento en los valores del registro de Rayos Gamma que llegan hasta 63.23 API, en donde los valores a lo largo de esta zona se mantenían entre los 44.52 a 50.74 API. En la misma profundidad se observa un aumento en los valores de densidad de hasta 2.67 g/cm³ y una disminución de los valores de porosidad de 0 V/V, donde para esta zona los valores de densidad se mantenían entre 2.12 a 2.21 g/cm³, y el registro de porosidad se mantenía entre los valores de 0.262 a 0.317 V/V. El registro sónico presenta valores que van de 95 a 109.98 US/F, por lo que es posible que esta zona presente una mayor compactación y densidad, en el registro de sónico se observa una disminución en los valores de DTCO de hasta 55.90 US/F a la misma profundidad.

La zona 3 presenta valores bajos de resistividad somera y profunda, en donde ambas curvas se encuentran juntas, por debajo de los 5 ohm*m, esto se complementa con el registro Caliper, el cual, para esta zona, se mantiene un diámetro del pozo casi constante, y junto con ambas curvas de resistividad muy juntas indica una menor invasión del lodo para esta zona. Los valores de resistividad profunda tienen un rango de 2.04 a 2.93 ohm*m. El registro de Rayos Gamma no presenta cambios representativos y se mantiene en un rango de 47.05 a 52.79 API, exceptuando un salto en el registro de un valor de 85.77 API en la profundidad 863 md. En esta zona se observa una pequeña disminución en los valores de densidad en comparación con la zona anterior con un rango de 1.95 a 2.05 g/cm³, mientras que el registro de porosidad presenta valores de 0.359 a 0.422 V/V, donde se logran apreciar unos saltos de valores bajos de densidad en la profundidad de 887 md con un valor de densidad de 1.59 g/cm³, de igual forma el registro de porosidad a esta profundidad presenta un salto de hasta 0.641 V/V, se presenta otro salto en la profundidad de 900 m aproximadamente de 1.43 g/cm³, donde para esta misma profundidad el registro de porosidad presentan un salto de hasta 0.738 V/V. El registro sónico muestra un cambio de valores altos de DTCO con respecto a la zona anterior que van de 131.15 a 144.04 US/F, por lo que el grado de compactación de esta zona es menor.

La zona 4, al igual que la zona anterior el Caliper presenta un diámetro de pozo casi constante, con valores bajos de resistividad somera y profunda, donde estas curvas se encuentra juntas, lo que indica muy poca invasión del lodo, en esta zona se presenta un aumento en los valores de resistividad profunda de 3.24 a 5.14 ohm*m, con un salto de 51.98 ohm*m a la profundidad de 978 md. El registro de Rayos Gamma no presenta grandes cambios con respecto a la zona anterior con valores que van de 46.08 a 50.49, mientras que el registro de densidad se estabiliza entre valores de 2.01 a 2.06 g/cm³, y el registro de porosidad se mantiene entre los valores de 0.357 a 0.384, se presenta un salto a la profundidad de 979 m con un valor de 1.73 g/cm³, donde a la misma profundidad el registro de porosidad registra un salto de hasta 0.557 V/V. Se observa una disminución en los valores del Registro Sónico que va de 111.92 a 119.25 US/F, por lo que esta zona se interpreta como una zona de mayor grado de compactación.

4.2.2. Segunda Etapa

En la siguiente figura, se observa que, para la segunda etapa, es posible distinguir 2 zonas principales.

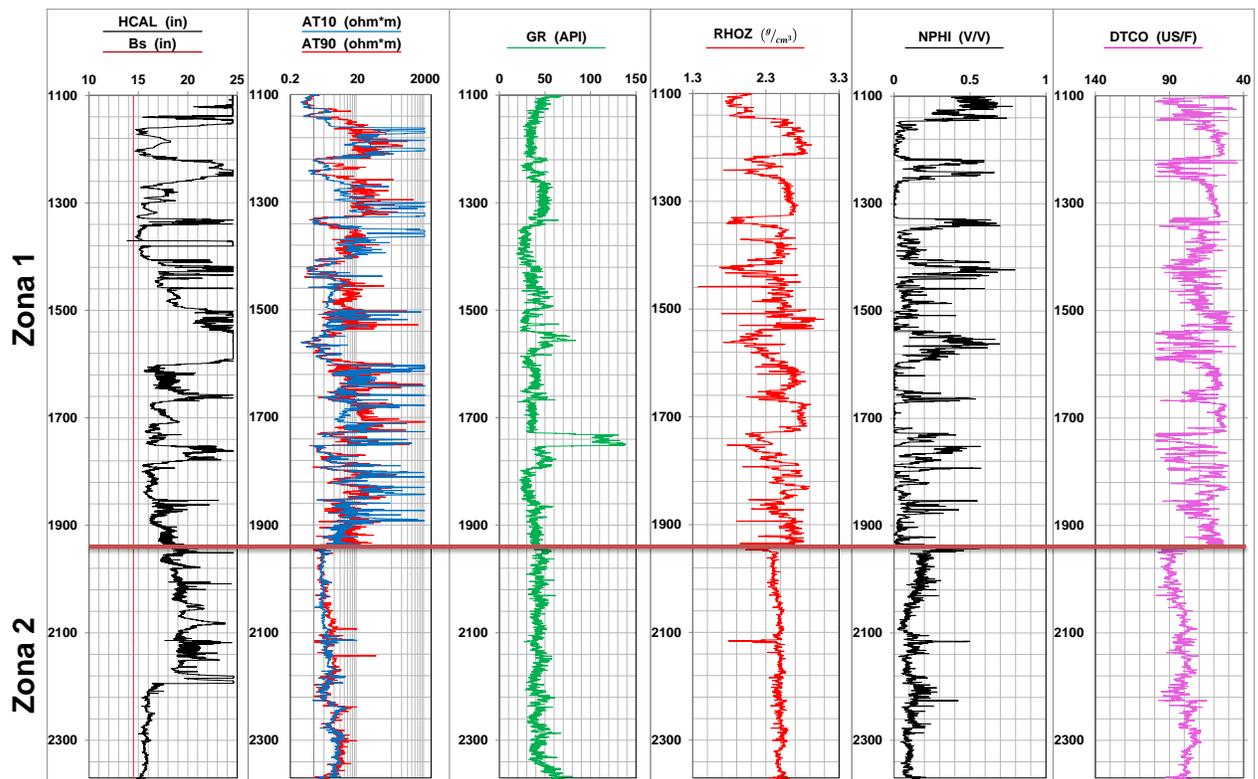


Figura 50. División de las zonas preliminares del registro para la segunda etapa, correspondiente al intervalo de los datos validos del registro de 1100 a 2370 md, mediante las curvas de resistividad profunda (AT90), resistividad somera (AT10), Rayos Gamma (GR), densidad (RHOZ), porosidad neutrón (NPHI), sónico (DTCO) y Caliper (HCAL).

La primera zona presenta cambios o intercalaciones de valores altos y bajos de las curvas usadas en el registro. El registro del Caliper, muestra que existe una gran variación en el diámetro del pozo a lo largo de esta zona, donde de manera muy general, se observa que el diámetro del pozo es más estrecho en aquellas zonas donde existen altos valores de

resistividad y densidad, y bajos valores de porosidad y registró sónico, lo que puede sugerir formaciones más consolidadas, donde, además, las curvas de resistividad somera y profunda se encuentran juntas, lo que sugiere poca invasión del lodo. En la Figura 51, se muestra la división de cada una de las intercalaciones correspondientes a la primera zona del registro, y a continuación, se presenta una descripción de cada una de estas intercalaciones con sus respectivos valores y como se relacionan.

La primera intercalación relaciona valores de alta resistividad que van de 14.05 a 53.27 ohm*m, con algunos saltos de valores altos de hasta 585.92 ohm*m, un rango de Rayos Gamma de 32.34 a 37.14 API, valores de alta densidad de 2.58 a 2.77 g/cm³, junto con porosidades bajas de 0.01 a 0.05 V/V, con algunos saltos de valores altos de hasta 0.15 V/V y un valor de DTCO bajo de 55.37 a 64.06 US/F.

La segunda intercalación relaciona valores de bajas resistividades de 1.22 a 6.88 ohm*m, con algunos saltos de valores altos de hasta 33.78 ohm*m, un rango de Rayos Gamma de 32.86 a 45.37 API, donde de igual manera que presento el registro eléctrico, se observa un salto de valores bajos de Rayos Gamma de hasta 23.81 API, valores bajos de densidad de 2.10 a 2.35 g/cm³, con un salto de valores bajos de 1.72 g/cm³, porosidad alta de 0.15 a 0.46 V/V, con algunos saltos de porosidades bajas de hasta 0.05 V/V, y valores altos del registro sónico de 68.95 a 87.16 US/F, con algunos saltos de valores bajos de hasta 44.22 US/F y de valores altos de hasta 99.70 US/F.

La tercera intercalación relaciona valores de alta resistividad de 17.48 a 44.94 ohm*m, con algunos saltos de valores altos de hasta 894.64 ohm*m, un rango de Rayos Gamma de 44.06 a 50.17 API, valores de alta densidad de 2.56 a 2.65 g/cm³, junto con porosidades bajas de 0 a 0.01 V/V, y un valor de DTCO bajo de hasta 58.59 a 63.94 US/F.

La cuarta intercalación relaciona valores de bajas resistividades de 1.14 a 2.21 ohm*m, un rango de Rayos Gamma de 37.27 a 45.36 API, con un salto de 64.84 API, valores bajos de densidad de 1.89 a 2.14 g/cm³, porosidad alta de 0.34 a 0.51 V/V, con algunos saltos de porosidades altas de hasta 0.69 V/V, y valores altos del registro sónico de 64.69 a 85.68 US/F, con saltos de valores bajos de hasta 50.46 US/F.

La quinta intercalación relaciona valores de alta resistividad de hasta 8.52 a 16.88 ohm*m, con un salto de 86.10 ohm*m, un rango de Rayos Gamma de 25.40 a 30.47 API, valores de alta densidad de 2.44 a 2.53 g/cm³, con un salto de valores bajos de 1.95 g/cm³, junto con porosidades bajas de 0.04 a 0.12 V/V, con un salto de valores altos de 0.21 V/V, y un valor de DTCO bajo de hasta 65.47 a 72.56 US/F, con un salto de valores bajos de 51.41 US/F.

La sexta intercalación relaciona valores de bajas resistividades de 0.87 a 2.98 ohm*m, con algunos saltos de valores altos de hasta 8.17 ohm*m, un rango de Rayos Gamma de 30.64 a 38.99 API, valores bajos de densidad de 1.96 a 2.37 g/cm³, con un salto de valores bajos de 1.67 g/cm³, porosidad alta de 0.22 a 0.51 V/V y valores altos del registro sónico de 71.44 a 85.71 US/F, con un salto de valores bajos de hasta 51.43 US/F.

La séptima intercalación relaciona valores de alta resistividad de 5.50 a 13.74 ohm*m, con algunos saltos de valores altos de hasta 1231.13 ohm*m, un rango de Rayos Gamma de 30.64 a 44.05 API, con un salto de valores altos de 65.40 API, valores de alta densidad de 2.44 a 2.61 g/cm³, con algunos saltos de valores bajos de hasta 1.37 g/cm³, junto con porosidades bajas de 0.03 a 0.10 V/V, con algunos saltos de valores altos de porosidad de hasta 0.59 V/V, valores bajos de DTCO de 59.88 a 72.77 US/F, con algunos saltos de valores altos de hasta 89.98 US/F.

La octava intercalación relaciona valores de bajas resistividades de 1.25 a 2.61 ohm*m, un rango de Rayos Gamma de 34.76 a 53.38 API, valores bajos de densidad de 2.10 a 2.31 g/cm³, con un salto de valores altos de 2.56 g/cm³, porosidad alta de 0.17 a 0.39 V/V, con saltos de valores bajos de 0.06 y valores altos de hasta 0.69 V/V, valores altos del registro sónico de 67.14 a 85.67 US/F, con algunos saltos de valores bajos de hasta 45.18 US/F.

La novena intercalación relaciona valores de alta resistividad de 6.68 a 30.04 ohm*m, con algunos saltos de valores altos de hasta 1689.81 ohm*m, un rango de Rayos Gamma de 34.18 a 41.15 API, valores de alta densidad de 2.52 a 2.68 g/cm³, con algunos saltos de valores bajos de hasta 2.15 g/cm³, junto con porosidades bajas de 0 a 0.02 V/V, con algunos saltos de porosidades altas de 0.32 V/V, y un valor bajo de DTCO de hasta 57.95 a 64.80 US/F.

La décima intercalación relaciona valores de bajas resistividades de 4.40 a 10.72 ohm*m, con algunos saltos de valores altos de 45.98 ohm*m, un rango de Rayos Gamma de 33.02 a 42.75 API, con un salto de 61.17 API, valores bajos de densidad de 2.32 a 2.46 g/cm³, con un salto de valores bajos de 2.04 g/cm³, porosidad alta de 0.06 a 0.16 V/V, con algunos saltos de porosidad alta de hasta 0.53 V/V, valores altos del registro sónico de 68.83 a 77.23 US/F, con saltos de valores bajos de 57 US/F y saltos de valores altos de hasta 95.92 US/F.

La onceava intercalación relaciona valores de alta resistividad de hasta 19.50 a 65.26 ohm*m, con algunos saltos de valores altos de hasta 1922.50 ohm*m, un rango de Rayos Gamma de 33.31 a 37.94 API, valores de alta densidad de 2.69 a 2.80 g/cm³, con un salto de valores bajos de 2.48 g/cm³, junto con porosidades bajas de 0 a 0.008 V/V, con un salto de hasta 0.12 V/V, un valor bajo de DTCO de 54.47 a 58.58 US/F, con un salto de valores altos de 77.73 US/F.

La doceava intercalación relaciona un aumento creciente de los valores de resistividad que va desde 2.92 a 23.71 ohm*m, con un aumento de igual forma en los valores de densidad que van de 2.26 a 2.59 g/cm³, con algunos saltos de valores bajos de densidad de hasta 1.76 g/cm³, de la misma manera el registro de porosidad presenta un descenso de sus valores que van de 0.04 a 0.20 V/V, con algunos saltos de porosidades altas de hasta 0.57 V/V, el registro de sónico presenta un descenso en sus valores que van desde 61.26 a 82.92 US/F, con algunos saltos de valores altos de 99.34 US/F. El registro de Rayos Gamma por otro lado presenta un salto en sus valores con respecto a la intercalación anterior, en donde los valores en la intercalación anterior se mantenían constantes entre los valores de 33.31 a 37.94 API, a pasar a valores de hasta 138.74 API,

este salto de los valores de Rayos Gamma puede interpretarse como una anomalía en el registro. En los reportes de perforación proporcionados por PEMEX, se indica que durante la segunda etapa de perforación del pozo aproximadamente a la profundidad de 1806 m, la sarta direccional quedo atrapa y no fue posible su recuperación completamente.

Por último la treceava intercalación de la misma forma que la intercalación anterior presenta un crecimiento en sus valores de resistividad que va desde 5.28 a 12.63 ohm*m, un rango de Rayos Gamma de 36.25 a 42.17 API, un aumento en los valores de densidad que van de 2.43 a 2.67 g/cm³, con algunos saltos de valores bajos de densidad de hasta 1.90 g/cm³, de la misma manera el registro de porosidad presenta un descenso de sus valores que van de 0.09 a 0.02 V/V, con algunos saltos de porosidades altas de hasta 0.42 V/V, el registro de sónico presenta un descenso en sus valores que van desde 70.92 a 60.83 US/F, con un salto de valores altos de 82.86 US/F.

Con esta información se interpreta toda esta zona como una zona heterogénea, con dos tipos de roca diferentes que se intercalan entre sí.

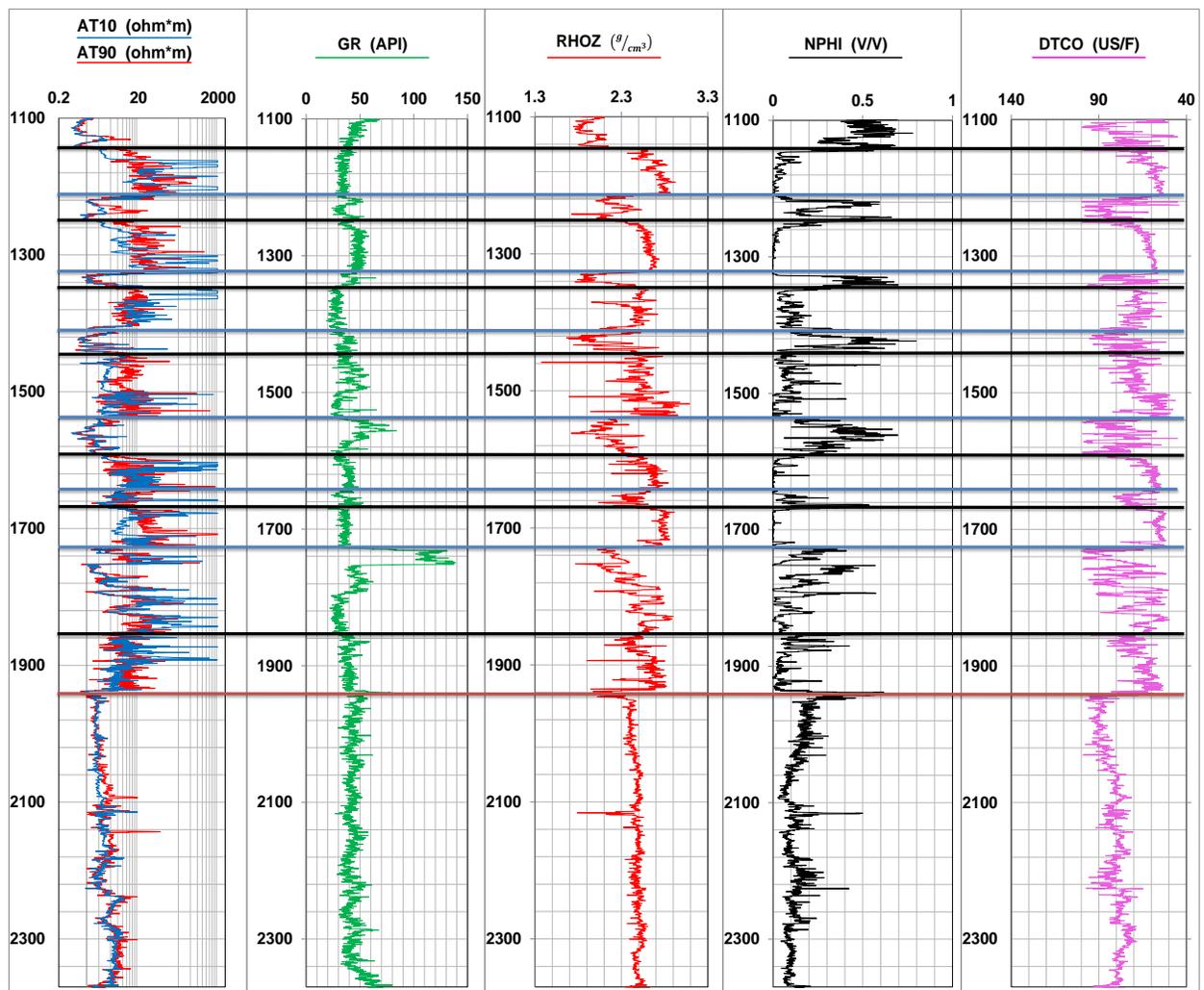


Figura 51. División de las intercalaciones identificadas, para la primera zona del registro, correspondiente a la segunda etapa, mediante las curvas de resistividad profunda (AT90),

resistividad somera (AT10), Rayos Gamma (GR), densidad (RHOZ), porosidad neutrón (NPHI) y sísmico (DTCO).

En la segunda zona, se observan valores bajos de resistividad profunda de 1.02 a 18.58 ohm*m, con un salto de 70.75 ohm*m a la profundidad de 2,143 md, los valores de resistividad somera son bajos de 1.85 a 3.90 ohm*m, estas curvas de resistividad se encuentran juntas lo que indica que no hay mucha invasión del lodo. Lo anterior puede complementarse con el registro Caliper, donde a lo largo de esta segunda zona, presenta un aumento constante en el diámetro del pozo, y a partir de la profundidad de 2187 md, de manera abrupta el diámetro del pozo se estrecha y continua casi constante hasta el final del registro, donde se observa para este último tramo, las curvas de resistividad se juntan mucho más. La densidad se mantiene constante en los valores de 2.39 a 2.59 g/cm³, en donde se observa un salto de valores bajos de densidad a la profundidad de 2115 md de hasta 1.79 g/cm³. La porosidad en gran parte del intervalo es baja entre 0.04 y 0.14, sin embargo, se aprecian saltos de hasta 0.49 V/V, en la profundidad de 2115 m, que concuerda también con saltos en el registro de densidad. En el registro sísmico se presentan saltos que van de 98.32 a 64.72 US/F, mientras el registro de Rayos Gamma que pareciera no presentar grandes cambios, con valores que van de 26.99 a 67.55 API en la parte final del registro. Con toda esta información se interpreta a esta zona como una sola unidad más homogénea.

4.3. Interpretación cuantitativa del registro

En general, la interpretación cuantitativa se utiliza para calcular parámetros y propiedades de la formación, donde interviene la cantidad de crudo o gas que se puede extraer de un yacimiento. Para el pozo Mirador 2, se conoce que el objetivo principal era caracterizar la geología, la cual, se sabe que pertenece a formaciones ígneas, por lo que a continuación, se presenta una metodología para su interpretación. Y por lo anterior, no se presenta cálculos convencionales de un yacimiento petrolero, como lo son: El contenido de arcilla, la resistividad de agua, la salinidad, contenido de hidrocarburos, entre otros. En el caso de las arcillas puesto que, en las formaciones ígneas, las rocas son el resultado de la solidificación del magma, por lo que generalmente no tienen contenido de arcillas, sino que, esta se produce por procesos de alteración. El cálculo de porosidad para formaciones ígneas, se concentra en las fracturas y vesículas resultantes del enfriamiento del magma, por lo que las formaciones ígneas son más heterogéneas que las sedimentarias, lo que dificulta la aplicación de métodos convencionales de porosidad y saturación de agua en registros geofísicos. El cálculo de la salinidad en formaciones ígneas, ofrece información limitada, ya que estas rocas, formadas por el enfriamiento del magma, no suelen contener grandes cantidades de agua salada. Para el pozo Mirador 2, no se realiza el cálculo de saturación de aceite (So), saturación de gas (Sg), ya que se establece que las formaciones están completamente saturadas de agua (Sw=1).

4.3.1. Análisis de grupos basado en las características físicas de la roca

La descripción de resultados de los diferentes análisis de grupos, se muestran de acuerdo a las diferentes etapas en las que se tomaron los registros.

El registro de Rayos Gamma proporciona información sobre la radiactividad natural de las rocas, lo que permite clasificarlas de acuerdo a su composición y poder distinguir diferentes tipos de rocas ígneas, además que nos da una idea del contenido de arcillas en las formaciones. Por otro lado, el registro de resistividad nos puede proporcionar mucha información sobre otros factores como el contenido de minerales conductores, los tipos y contenidos de arcilla, así como la presencia de poros y fracturas. En casos en donde existe una diferencia pequeña entre los valores de rayos gamma de dos rocas diferentes, por ejemplo, entre la andesita y la toba andesítica, sería imposible poder distinguir esta diferencia en el registro, pero con la ayuda del registro de resistividad puede observarse que la diferencia en los valores de resistividad entre estas rocas es bastante grande. Así que, un diagrama de dispersión resistividad-rayos gamma puede distinguir eficazmente entre varias rocas ígneas de acuerdo al tipo de depósito. (Huang et al., 2004).

4.3.1.1. Primera Etapa

En Figura 52, se muestra el resultado del análisis de grupos correspondiente a la primera etapa, la última columna muestra los grupos generados del análisis, la cual muestra una clasificación preliminar de facies, conforme a la profundidad del pozo.

Las curvas que se utilizaron para realizar el análisis de grupos fueron: la curva de Rayos Gamma (GR), la curva de resistividad profunda (AT90), la curva de la onda compresional (DTCO) y la curva de densidad (RHOZ).

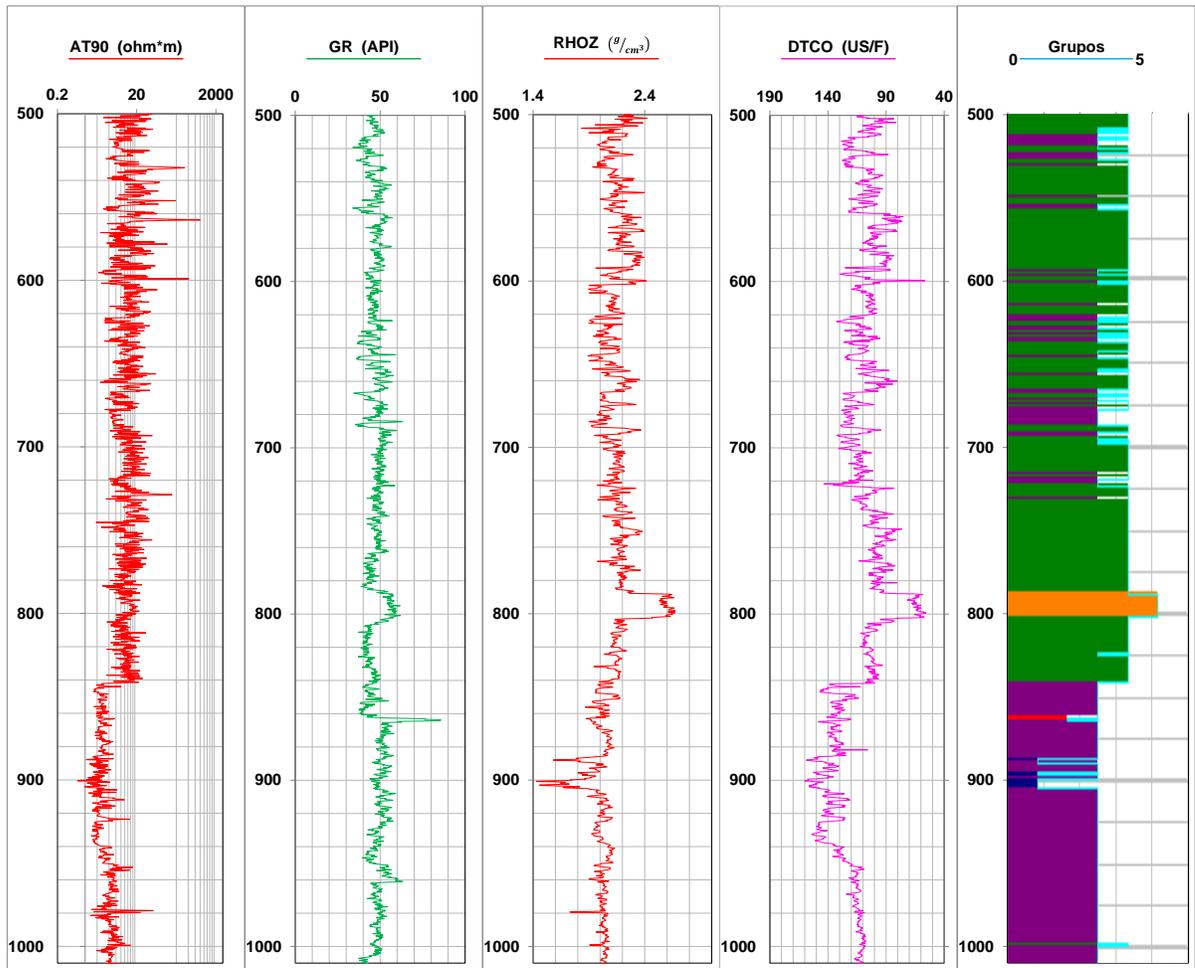


Figura 52. Análisis de grupos correspondiente a la primera etapa.

En la siguiente figura, se muestra la relación que existe entre el registro de Rayos Gamma (GR) y la resistividad (AT90).

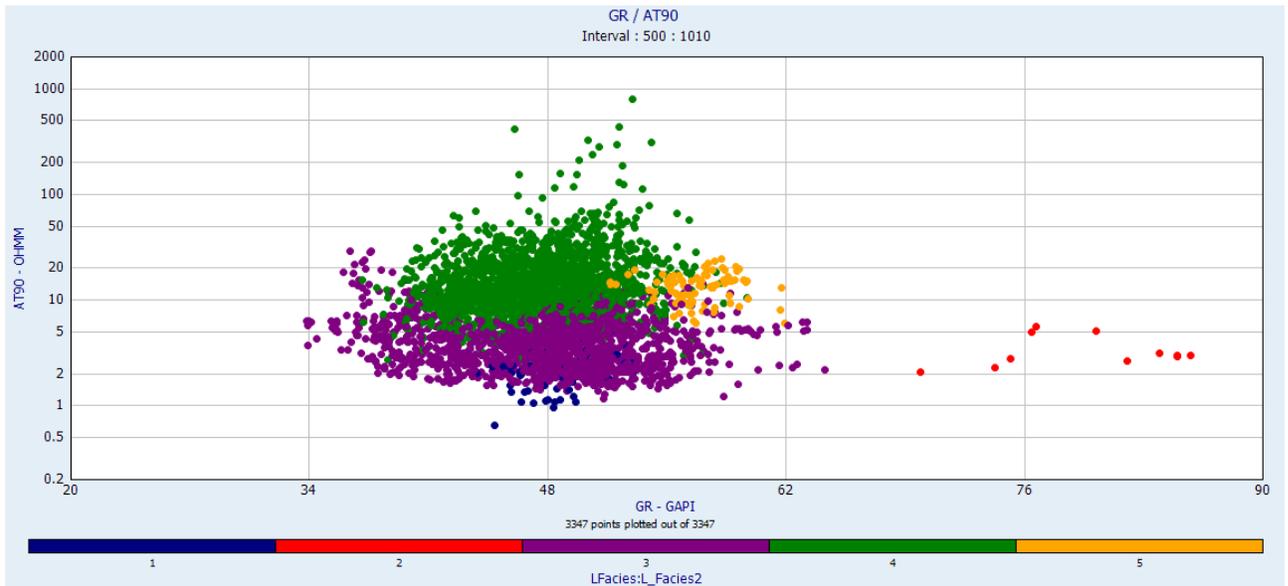


Figura 53. Relación entre Rayos Gamma (GR) y la resistividad (AT90), correspondiente a la primera etapa.

En la figura anterior, se observa la agrupación de los datos correspondientes a la primera etapa. Se aprecia una buena agrupación de los datos, mientras que el grupo 2 se encuentra separado de la nube de datos, siendo este el que tiene valores más altos de Rayos Gamma.

El grupo 1, consta de pocos puntos que se observan en la parte baja de la gráfica de dispersión, tiene los valores más bajos de resistividad que van desde 0.66 a 5.35 ohm*m aproximadamente, y sus valores de Rayos Gamma van de 44 a 53 API aproximadamente. El grupo 2, posee un rango corto de resistividad, que va desde 2.12 a 5.61 ohm*m, presenta los valores más altos de Rayos Gamma con un rango de 70 a 86 API. El grupo 3, es el grupo más grande y tiene un amplio rango de valores, siendo de 1.17 a 29.2 ohm*m para su resistividad, y de 34 a 64 API para sus valores de Rayos Gamma. Los datos del grupo 4, comparten características del grupo 3, es por esto que no se logra apreciar una separación clara, presenta los valores más altos de resistividad que van de 2.41 a 798.9 ohm*m aproximadamente, y sus valores de Rayos Gamma tienen un rango de 37 a 60 API aproximadamente. Los datos del grupo 5, se encuentran a la derecha del grupo 3 y 4, posee valores de Rayos Gamma que van desde 52 a 62 API aproximadamente, mientras que sus valores de resistividad van de 5.98 a 24.51 ohm*m aproximadamente.

La relación entre el registro sísmico y de densidad, permite diferenciar las unidades de acuerdo a su grado de compactación y su densidad. En la Figura 54, se muestra dicha relación de los datos de los registros (DTCO) Y (RHOZ).

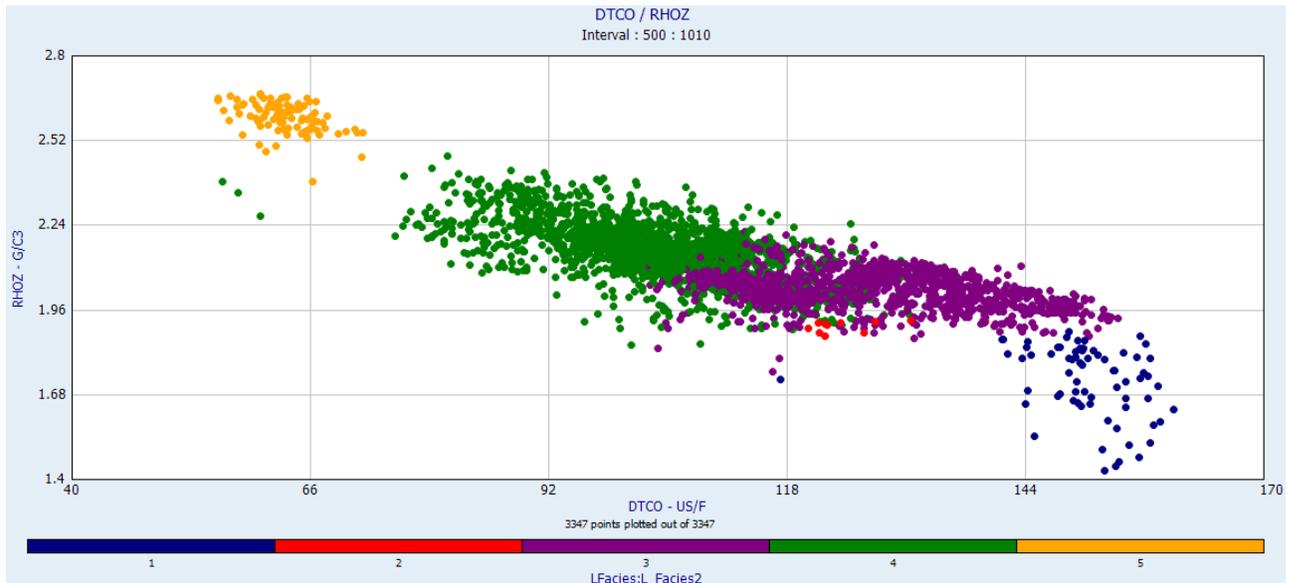


Figura 54. Relación entre el registro sísmico (DTCO) y la densidad (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.

En la figura anterior, se observa una buena separación de los grupos, mostrando la relación lineal entre la densidad y el comportamiento de la onda compresional, que conforme aumenta el registro sísmico disminuye la densidad. Esto se relaciona de manera que mientras más lento viaja la onda a través de la formación su densidad es más baja, y por ende es menos compacta, y mientras más rápido viaje la onda, la densidad es mayor por lo que la formación será más compacta.

El grupo 1, presenta los valores más bajos de densidad, con un rango que va desde 1.43 a 1.88 g/cm³, y los valores más altos del registro sísmico de 117 a 160 US/F. Los datos del grupo 2 se encuentran debajo del grupo 3, este es un grupo consta de pocos datos con valores del registro sísmico que van de 120 a 140 US/F aproximadamente, con un rango muy estrecho de densidad que va de 1.87 a 1.92 g/cm³ aproximadamente, y que se caracteriza por los valores altos del registro de Rayos Gamma. El grupo 3, presenta valores del registro sísmico que van desde 100 a 154 US/F, y sus valores de densidad que va de 1.75 a 2.22 g/cm³. Algunos de los datos del grupo 4 se encuentran cerca del grupo 3, sin embargo, es posible trazar una línea divisoria entre estos 2 grupos como se muestra en la Figura 55. Donde el rango de valores del registro sísmico va de 56 a 131 US/F aproximadamente, y sus valores de densidad van desde 1.84 a 2.47 g/cm³. El grupo 5, presenta los valores más altos de densidad que van desde 2.38 a 2.67 g/cm³, mientras el rango de valores del registro sísmico es de 56 a 72 US/F.

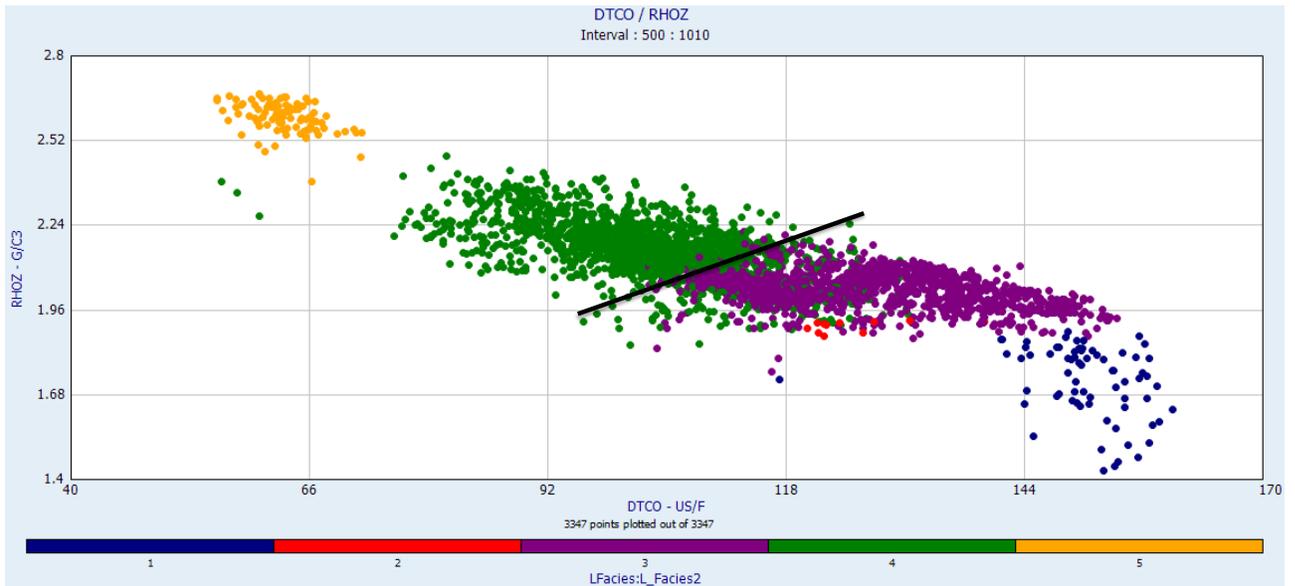


Figura 55. Separación del grupo 3 y 4 del diagrama de (DTCO) y (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.

En la Figura 56, se muestra la relación que existe entre el registro de densidad (RHOZ) con el registro de resistividad (AT90).

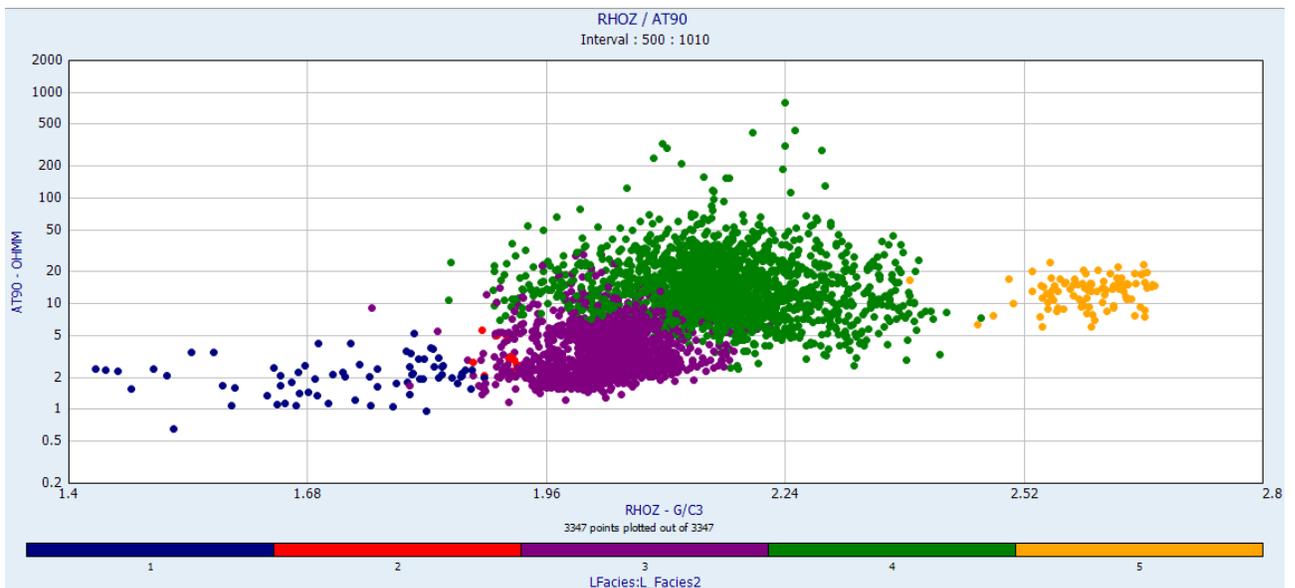


Figura 56. Relación entre el registro de densidad (RHOZ) y la resistividad (AT90), correspondiente a la primera etapa.

En la figura anterior, podemos apreciar una buena separación de los grupos, donde el grupo 2 consta de un pequeño conjunto de datos, caracterizados por valores altos de Rayos Gamma. El grupo 1, presenta los valores más bajos de densidad que van de 1.43 a 1.88 g/cm³, y los valores más bajos de resistividad que van de 0.66 a 5.35 ohm*m. El grupo 2, es un grupo pequeño, presenta un rango de densidad muy estrecho que va de 1.87 a 1.92 g/cm³ aproximadamente, sus valores de resistividad van de 2.12 a 5.61 ohm*m aproximadamente. El grupo 3, presenta valores de densidad que van desde 1.75 a

2.22 g/cm³ aproximadamente, y valores de resistividad con un rango que va de 1.17 a 29.2 ohm*m. El grupo 4, presenta algunos datos que se encuentran dentro del grupo 3, en donde es difícil trazar una línea de separación entre estos grupos, sus valores de densidad tienen un rango que va de 1.84 a 2.47 g/cm³ aproximadamente, mientras sus valores de resistividad tienen un rango muy amplio que va desde 2.41 a 798.9 ohm*m. El grupo 5, presenta los valores más altos de densidad que van desde 2.38 a 2.67 g/cm³, y sus valores de resistividad van desde 5.98 a 24.51 ohm*m.

La densidad es un factor muy importante para poder clasificar diferentes litologías, el registro de densidad compensada puede obtener con precisión los valores reales de densidad de las formaciones, mientras que el de Rayos Gamma proporciona información para distinguir entre diversas rocas ígneas. Por lo tanto, el diagrama de dispersión rayos gamma y densidad nos permite distinguir eficazmente entre diferentes litologías. En la Figura 57, se muestra dicha relación.

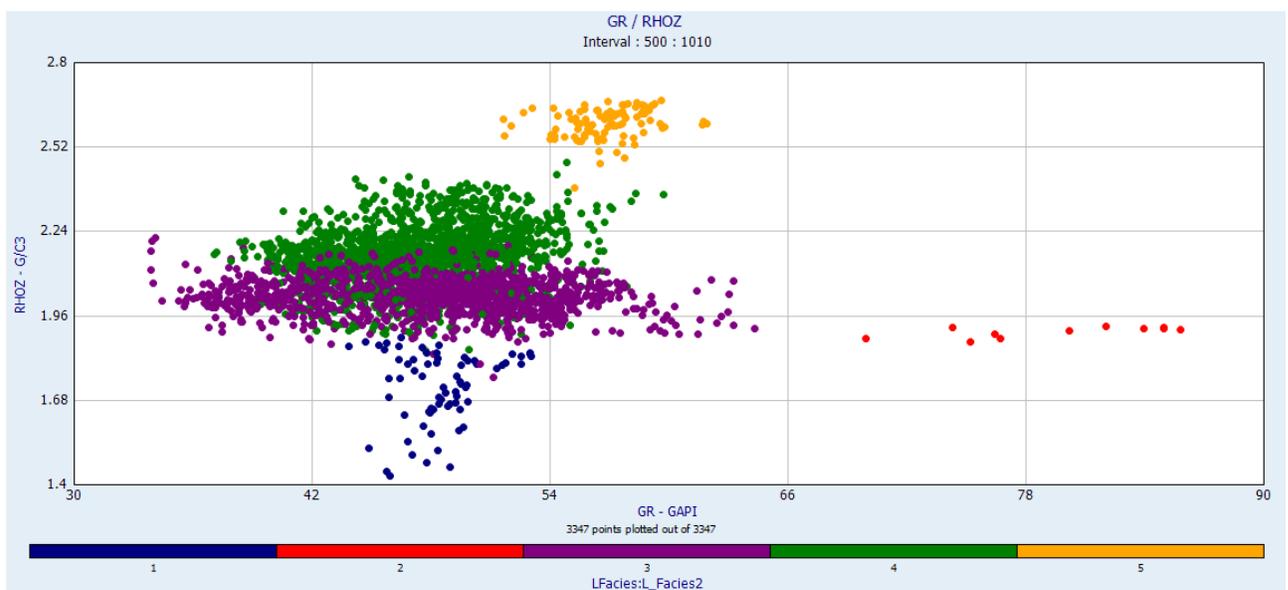


Figura 57. Relación entre el registro Rayos Gamma (GR) y la densidad (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.

En la figura anterior, se observa una buena separación de los grupos. El grupo 1, presenta los valores más bajos de densidad que van de 1.43 a 1.88 g/cm³, con un rango estrecho de valores de Rayos Gamma que va de 44 a 53 API. El grupo 2, es un grupo muy pequeño que se encuentra alejado de la nube de datos, el cual presenta los valores más altos de Rayos gamma con un rango de 70 a 86 API, mientras su rango de densidad es muy estrecho con valores de 1.87 a 1.92 g/cm³. El grupo 3 y el grupo 4, presentan algunos datos dispersos entre ambos grupos. De modo que el grupo 3 presenta un rango de densidad que va de 1.75 a 2.22 g/cm³ aproximadamente, mientras su rango de Rayos Gamma es de 34 a 64 API. El grupo 4, presenta un rango de densidad que va de 1.84 a 2.47 g/cm³ aproximadamente, y sus valores de Rayos Gamma van de 37 a 60 API. El grupo 5, presenta los valores más altos de densidad con un rango de 2.38 a 2.67 g/cm³, con un rango de valores de Rayos gamma que va de 52 a 62 API.

En la Tabla 2, se muestra la síntesis del rango de valores de los diferentes parámetros petrofísicos obtenidos de los diagramas para cada uno de los grupos, correspondientes a la primera etapa.

Tabla 2. Rangos de valores del análisis de grupos a partir de los diagramas de dispersión, correspondiente a la primera etapa del registro 500 a 1010 md.

Grupo	GR (API)	AT90 (ohm*m)	DTCO (US/F)	RHOZ (g/cm3)
1	44-53	0.66-5.35	117-160	1.43-1.88
2	70-86	2.12-5.61	120-140	1.87-1.92
3	34-64	1.17-29.2	100-154	1.75-2.22
4	37-60	2.41-798.9	56-131	1.84-2.47
5	52-62	5.98-24.51	56-72	2.38-2.67

4.3.1.2. Segunda Etapa

En la siguiente figura se muestra el análisis de grupos para la segunda etapa, la última columna muestra los resultados generados del análisis de grupos, la cual nos da una clasificación preliminar de agrupaciones geológicas conforme a la profundidad del pozo.

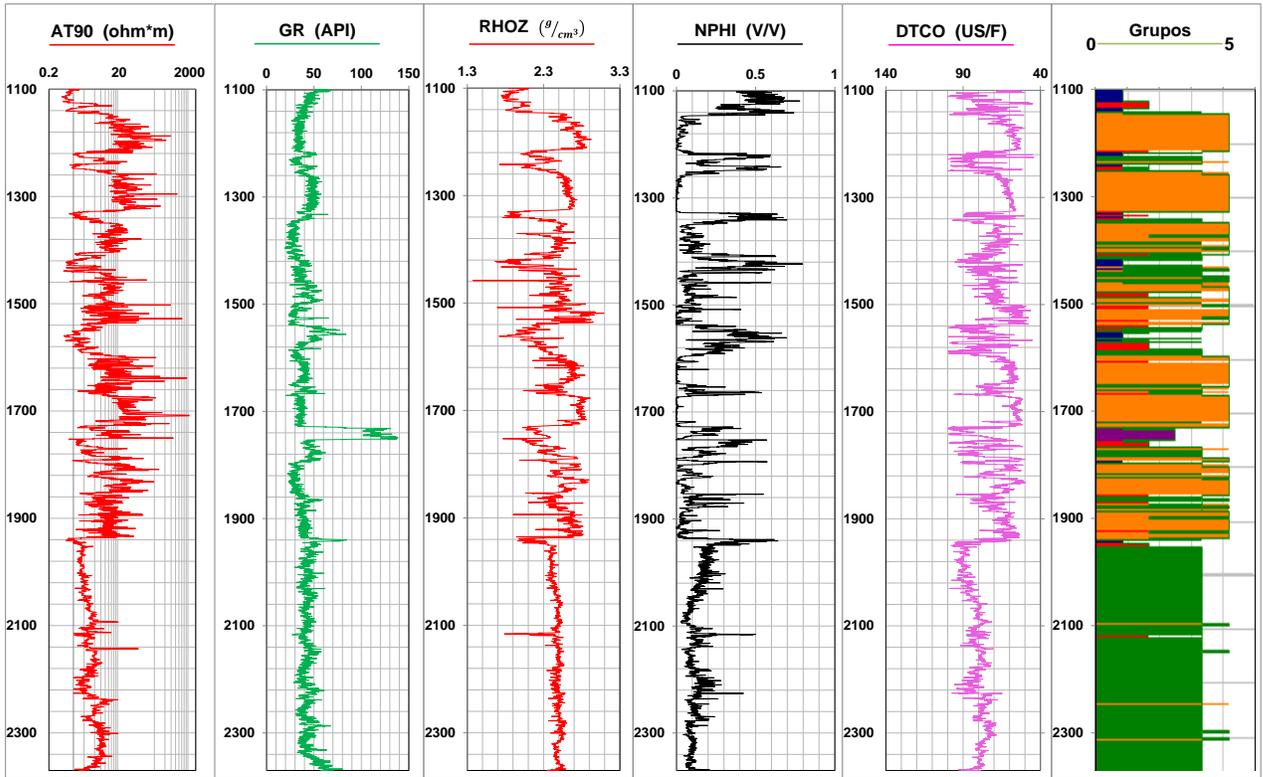


Figura 58. Análisis de grupos correspondiente a la segunda etapa.

En la siguiente figura, se muestra el diagrama de dispersión, el cual muestra la relación que existe entre el registro de rayos gamma (GR) y la resistividad (AT90).

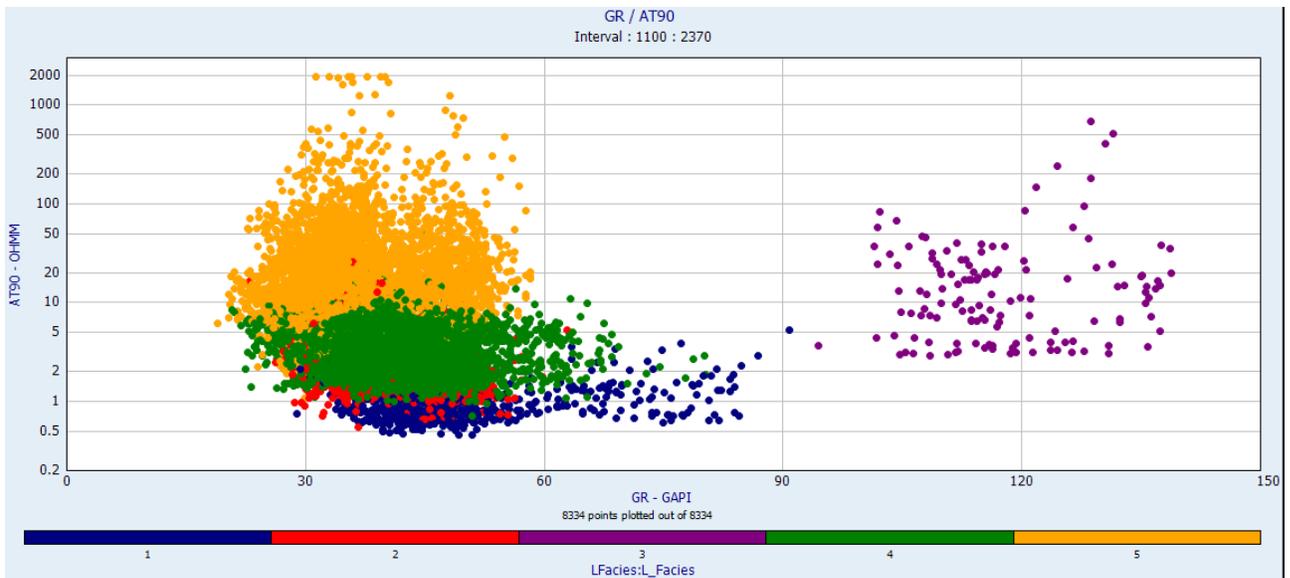


Figura 59. Relación entre Rayos Gamma (GR) y la resistividad (AT90), correspondiente a la segunda etapa.

La figura anterior, se observa claramente la separación de los grupos 1, 3, 4 y 5, donde el grupo 2 comparte características similares de resistividad y rayos gamma con el grupo 4 y 5. El grupo 1, presenta los valores más bajos de resistividad 0.46 a 5.42 ohm*m

aproximadamente, mientras que sus valores de Rayos Gamma poseen un amplio rango que va desde 29 a 91 API. El grupo 2, tiene un rango de valores de Rayos Gamma que va de 23 a 63 API, con valores de resistividad que van de 0.56 a 25.69 ohm*m aproximadamente. El grupo 3, se destaca por presentar los valores más altos de Rayos Gamma, con un rango de 94 a 139 API, mientras que el rango de valores de resistividad es muy amplio, que va de 2.90 a 699.9 ohm*m. El grupo 4, presenta valores de Rayos Gamma que van de 21 a 80 API, y valores de resistividad que van de 0.71 a 49.02 ohm*m. El grupo 5, presenta los valores más altos de resistividad, con un rango amplio que va de 1.08 hasta 2000 ohm*m, mientras sus valores de Rayos Gamma tienen un rango que va de 19 a 58 API.

La relación entre el registro sísmico y de densidad, permite diferenciar las unidades litológicas de acuerdo a su grado de compactación y su densidad, en la siguiente figura, se muestra dicha relación de los datos de (DTCO) Y (RHOZ).

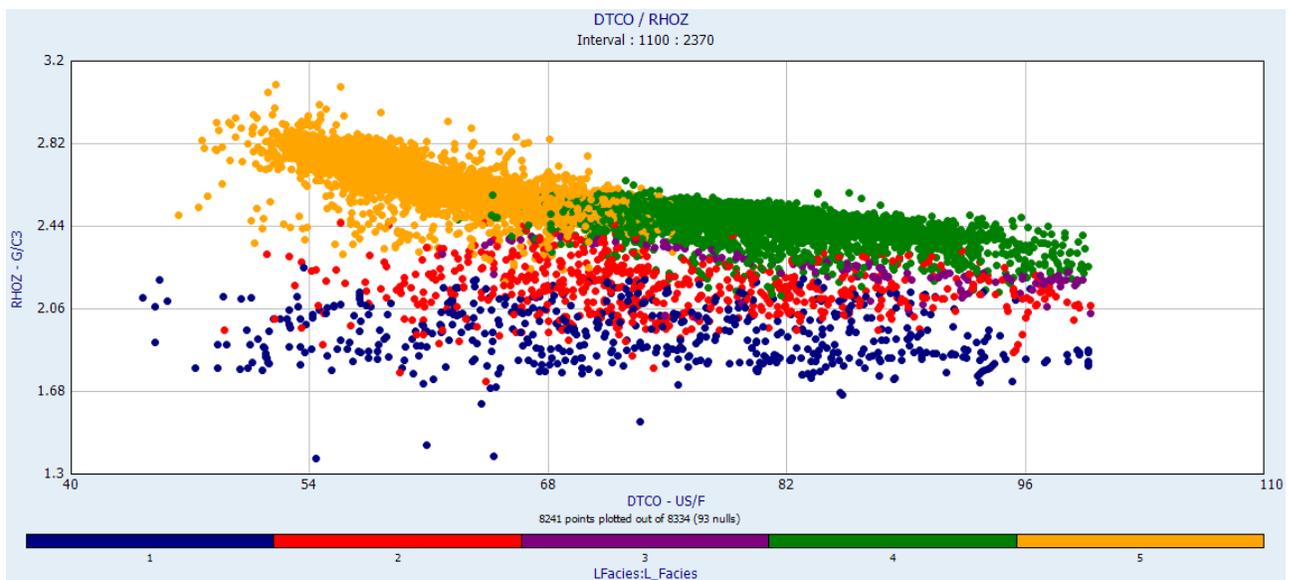


Figura 60. Relación entre el registro sísmico (DTCO) y la densidad (RHOZ), correspondiente a la segunda etapa.

En la figura anterior, se observa una buena separación de los datos del grupo 4 con el 5, donde esta separación se observa en sus valores de onda compresional DTCO. El grupo 1, posee un rango amplio de valores de DTCO, que va desde 44 a 100 US/F, mientras que sus valores de densidad tienen un rango de 1.37 a 2.25 g/cm³ aproximadamente. El grupo 2, presenta valores de DTCO con un rango de 49 a 100 US/F, su densidad presenta valores que van de 1.73 a 2.45 g/cm³ aproximadamente. El grupo 3, es un conjunto pequeño de datos que se encuentra por debajo de los grupos 4 y 5, donde su rango de densidad va de 2.04 a 2.39 g/cm³ aproximadamente, mientras que su rango de valores de DTCO va de 62 a 100 US/F. El grupo 4, presenta valores de densidad con un rango de 2.12 a 2.65 g/cm³ aproximadamente, mientras que sus valores de DTCO tienen un rango de 63 a 100 US/F. El grupo 5, presenta los valores más altos de densidad, con un rango de 2.18 a 3.09 g/cm³, mientras que su rango de valores de DTCO va de 46 a 82 US/F.

En la Figura 61, se muestra la relación que existe entre el registro de densidad (RHOZ) con el registro de resistividad (AT90).

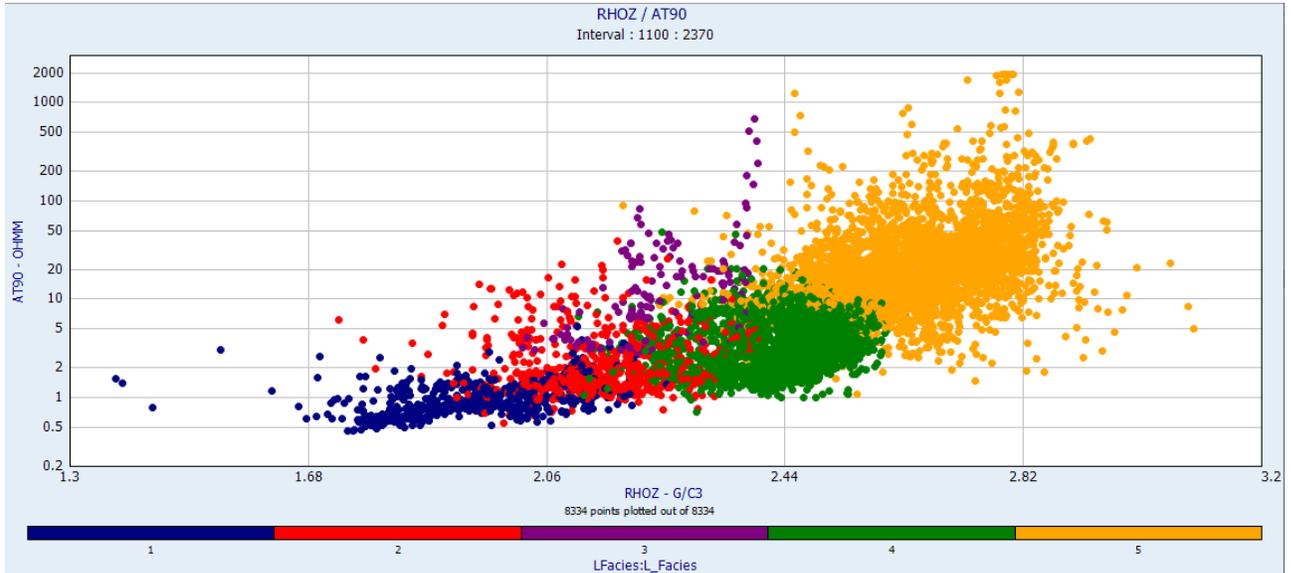


Figura 61. Relación entre el registro de densidad (RHOZ) y la resistividad (AT90), correspondiente a la segunda etapa.

El diagrama anterior, muestra una buena separación de los grupos. El grupo 1, presenta los valores más bajos de resistividad 0.46 a 5.42 ohm*m, mientras que sus valores de densidad poseen un rango que va de 1.37 a 2.25 g/cm³ aproximadamente. El grupo 2, tiene un rango de valores de resistividad que va desde 0.56 a 39.1 ohm*m, con un rango de densidad que va de 1.73 a 2.45 g/cm³ aproximadamente. El grupo 3, presenta valores de resistividad con un rango muy amplio, que va desde 2.90 a 699.9 ohm*m, donde los valores de densidad tienen un rango que va de 2.02 a 2.39 g/cm³ aproximadamente. El grupo 4, presenta valores de resistividad que van de 0.71 a 49.41 ohm*m, mientras su densidad tiene un rango de 2.12 a 2.65 g/cm³ aproximadamente. El grupo 5, presenta los valores más altos de resistividad, con un rango amplio que va de 1.08 hasta 2000 ohm*m, así como los valores más altos de densidad, con un rango de 2.18 a 3.09 g/cm³.

En la Figura 62, se muestra la relación que existe entre el registro de porosidad neutrón (NPHI) con el registro sísmico (DTCO).

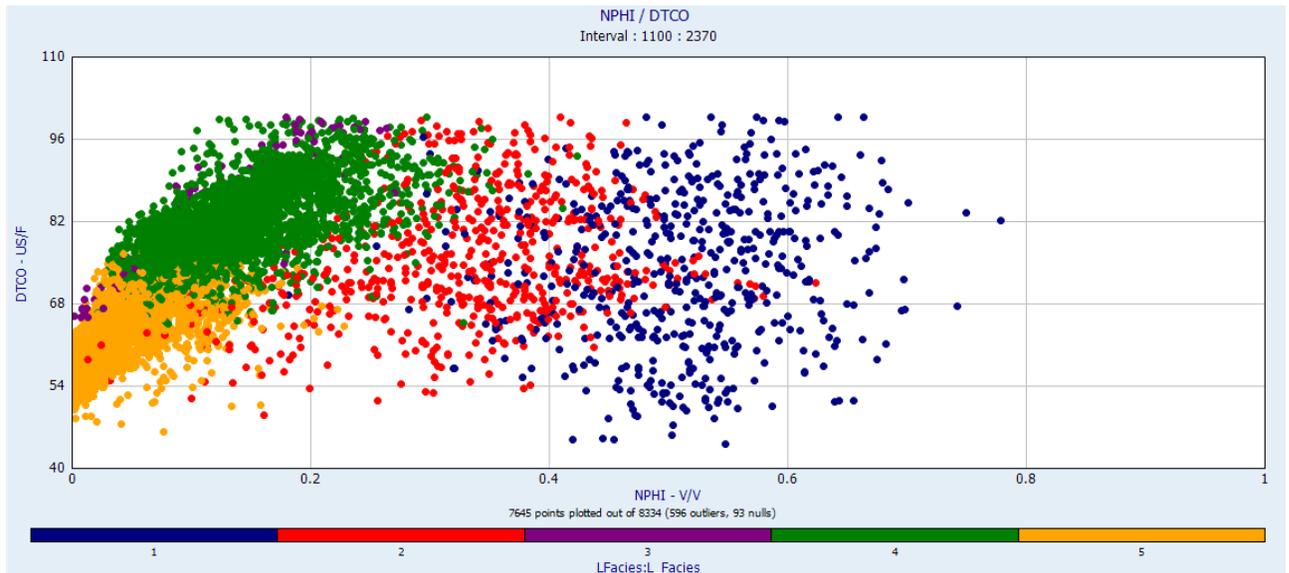


Figura 62. Relación entre el registro de porosidad neutrón (NPHI) y el registro sísmico (DTCO), correspondiente a la segunda etapa.

En la figura anterior, se observa una buena separación de los grupos, 1, 2, 4 y 5, donde el grupo 3 es un conjunto pequeño de datos. El grupo 1, posee un rango amplio de valores de DTCO, que va desde 44 a 100 US/F, mientras que sus valores de porosidad tienen un rango de 0.181 a 0.779 V/V aproximadamente. El grupo 2, presenta valores de DTCO con un rango de 49 a 100 US/F, y su porosidad presenta valores de 0.013 a 0.623 V/V aproximadamente. El grupo 3, es un conjunto pequeño de datos, donde su rango de valores de DTCO va de 66 a 100 US/F, mientras que su porosidad tiene un rango de valores de 0 a 0.27 V/V. El grupo 4, presenta valores de DTCO con un rango de 63 a 100 US/F, con un rango de porosidad que va de 0.021 a 0.423 V/V. El grupo 5, presenta un rango de valores de DTCO que va de 46 a 82 US/F, mientras que su rango de porosidad va desde 0 a 0.228 V/V.

En la Tabla 3, se muestra el rango de valores de los diferentes parámetros petrofísicos obtenidos de los diagramas para cada uno de los grupos, correspondientes a la segunda etapa.

Tabla 3. Rangos de valores del análisis de grupos a partir de los diagramas de dispersión, correspondiente a la segunda etapa del registro 1100 a 2370 md.

Grupo	GR (API)	AT90 (ohm*m)	DTCO (US/F)	RHOZ (g/cm ³)	NPHI (V/V)
1	29-91	0.46-5.42	44-100	1.37-2.25	0.181-0.779
2	23-63	0.56-39.1	49-100	1.73-2.45	0.013-0.623
3	94-139	2.90-699.9	66-100	2.02-2.39	0-0.27
4	21-80	0.71-49.41	63-100	2.12-2.65	0.021-0.423
5	19-58	1.08-2000	46-82	2.18-3.09	0-0.228

4.3.2. Análisis de grupos basado en la composición de la roca

Los registros geofísicos convencionales no miden directamente la composición mineralógica de la roca, lo que hacen, es proporcionar información sobre la litología de una manera indirecta, a través de parámetros como la radiactividad de la roca, los contenidos relativos de uranio, torio y potasio, la densidad y porosidad aparente. Mediante el análisis de estos parámetros físicos, es posible identificar rocas, en el caso particular de este trabajo, rocas volcánicas con diferentes composiciones, mediante las diferentes respuestas que presenten los registros convencionales (Ran et al., 2014).

Las respuestas de los registros geofísicos se pueden dividir de acuerdo a la composición de la roca: ácidas, básicas o intermedias, como se muestra en la Tabla 4.

Las rocas volcánicas básicas, se caracterizan por tener una radiactividad de Rayos Gamma relativamente baja, debido al bajo contenido de torio y de potasio, pero con una densidad relativamente alta y una alta porosidad de neutrones. Las rocas volcánicas ácidas poseen valores altos de Rayos Gamma, alto contenido de torio y de potasio, baja densidad y baja porosidad de neutrones. Las rocas volcánicas de composición intermedia poseen valores medios de las medidas antes mencionadas. (Ran et al., 2014).

Tabla 4. Características de respuesta de registros convencionales de rocas volcánicas con diferentes composiciones. Tomado de (Ran, Q et al., 2014).

Tipo de roca	GR	Contenido de Th	Contenido de K	Densidad de la roca	Porosidad de neutrones
Roca volcánica básica	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto
Roca volcánica intermedia	Entre básico y ácido				
Roca volcánica ácida	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo

De acuerdo al estudio de identificación de litología volcánica realizado por (Ran et al., 2014), para el campo de gas XX y el bloque de pozo XX1, se obtuvieron las Tablas 5 y 6, las cuales presentan los rangos de valores de la respuesta de los registros convencionales, para la identificación de la litología de roca volcánica de acuerdo a su composición y a su petrogénesis.

Tabla 5. Rango de valores de las curvas de registros convencionales para rocas volcánicas con diferentes composiciones (Campo de gas XX). Tomado de (Ran, Q et al., 2014).

Características de la respuesta de los registros convencionales	Roca volcánica básica	Roca volcánica intermedia	Roca volcánica ácida
Radiactividad GR/API	< 65	60-120	> 110
Th/PPM	< 5.2	5-12	> 10
K/%	< 2.3	1.1-5.5	> 3.7
Densidad/(g/cm ³)	> 2.6	2.55-2.7	< 2.66
Porosidad neutrón/%	> 6	3-12	< 10

Tabla 6. Rango de valores de las curvas de registros convencionales para rocas volcánicas de diferentes petrogénesis (Bloque de pozo XX1). Tomado de (Ran, Q et al., 2014).

Litología	GR/API	PE/(b/e)	U/PPM	TH/PPM	K/%	CNL/ %	DEN/ (g/cm ³)	RLLD/ (ohm*m)
Riolita	131-170	2.9-3.5	0.9-3.9	11.8-21.2	3.7-5.1	0.07-4.6	2.42-2.65	800-4600
Lava Brechada	122-150	3.3-4.3	0.3-3.6	16.5-29	2.9-5.6	3.3-18	2.3-2.5	25-210
Brecha soldada	175-212	3.9-4.9	7-13.3	20-28	2.7-5.2	2.56-4	2.49-2.6	200-650
Toba soldada	138-158	3.1-3.6	0.4-2.9	13-20	3-4.8	2.2-3.7	2.4-2.52	320-700
Toba cristalina	100-140	2.9-3.1	1.7-5	13.6-16.5	3.6-4.7	8-10.8	2.38-2.44	20-24
Brecha volcánica	150-220	3.1-4.1	2-11.4	14-20	2-4.8	4-8	2.42-2.59	26-176

La espectroscopia de Rayos Gamma permite clasificar las rocas volcánicas según la respuesta que da el registro, usualmente en el caso de formaciones sedimentarias, el registro de espectroscopia ayuda a identificar formaciones sucias, con elementos radiactivos de Th y K, los cuales se concentran en las arcillas. En el caso de formaciones volcánicas, la respuesta del registro de espectroscopia puede reflejar valores anómalos por los elementos presentes en las cenizas o residuos de derrames. (Morales-Casique et al., 2018).

En la siguiente sección, se muestran el análisis de grupos correspondiente al registro de espectroscopia de Rayos Gamma, para las diferentes etapas en las que se tomaron los registros del pozo Mirador 2. Siguiendo la metodología usada para el análisis de grupos de los otros registros, y en base al estudio de (Ran et al., 2014), se usaron los registros de espectroscopia, resistividad profunda, densidad y porosidad de neutrón, para el caso de la segunda etapa donde si se tiene dicho registro de porosidad.

4.3.2.1. Primera Etapa

En la Figura 63, se muestra el análisis de grupos correspondiente a la primera etapa, en donde para este análisis se utilizaron las curvas de Rayos Gamma (GR), resistividad (AT90), densidad (RHOZ), y los contenidos de torio (HTHO), potasio (HFK) y uranio (HURA).

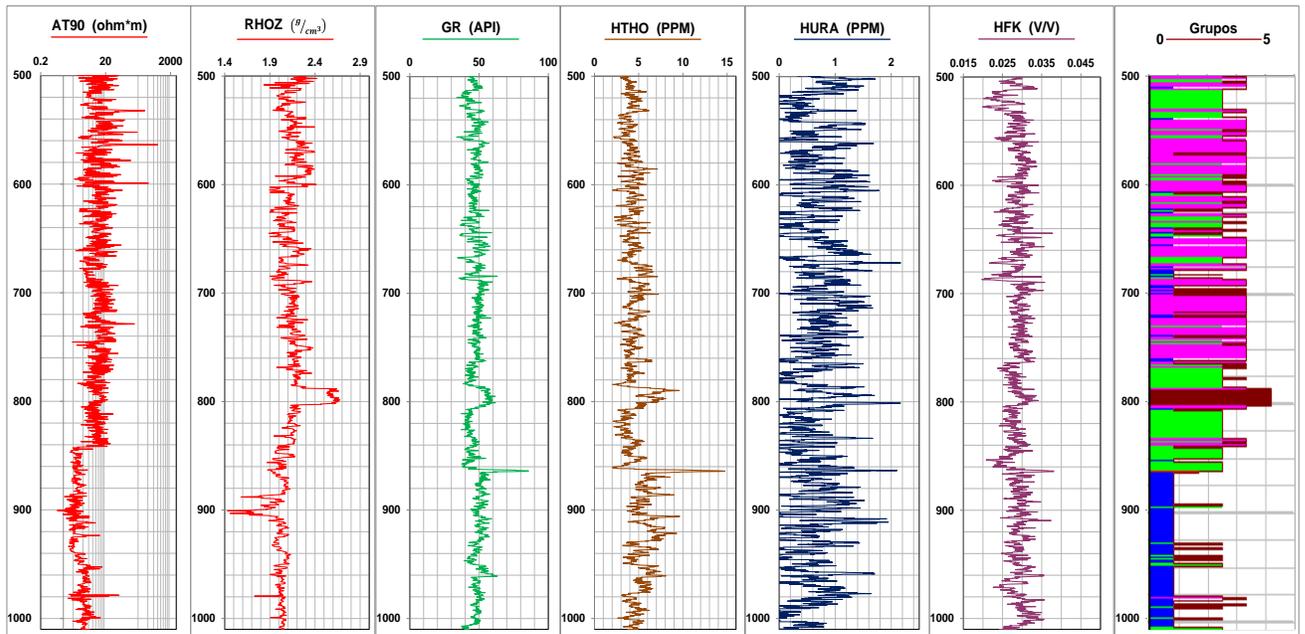


Figura 63. Análisis de grupos a partir del registro de espectroscopia de Rayos Gamma (contenido de torio (HTHO), contenido de uranio (HURA) y contenido de potasio (HFK)), junto con las curvas de resistividad (AT90), Rayos Gamma (GR) y el registro de densidad (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.

En la siguiente figura, se muestra el diagrama con la relación entre el contenido de torio (HTHO) y potasio (HFK), a partir del análisis de grupos del registro de espectroscopia de Rayos Gamma.

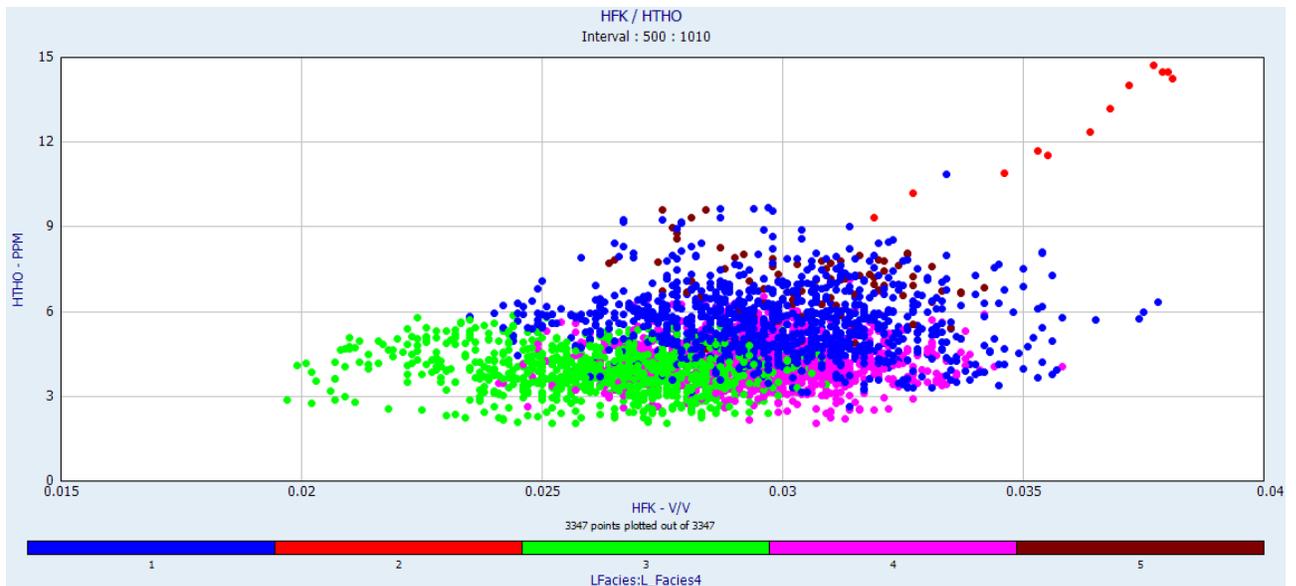


Figura 64. Relación entre el contenido de potasio (HFK) y el contenido de torio (HTHO), correspondiente a la primera etapa.

La separación entre los grupos no es clara, sin embargo, es posible distinguir los rangos de valores de cada grupo. El grupo 1, presenta valores de contenido de potasio con un rango de 0.0235 a 0.0378 V/V, su contenido de torio tiene un rango que va de 2.65 a

10.86 PPM aproximadamente. El grupo 2, presenta los valores más altos de contenido de torio, con valores que van desde 9.37 a 14.76 PPM, mientras su contenido de potasio tiene un rango de 0.0319 a 0.0381 V/V. El grupo 3, presenta valores de contenido de potasio con un rango que va de 0.0197 a 0.0314 V/V aproximadamente, el contenido de torio presenta un rango de valores que va de 2.05 a 5.86 PPM aproximadamente. El grupo 4 presenta un contenido de potasio, con un rango de valores que va de 0.0241 a 0.0358 V/V aproximadamente, su contenido de torio tiene un rango que va de 2.04 a 7.12 PPM aproximadamente. El grupo 5 presenta un contenido de potasio con un rango de 0.0264 a 0.0342 V/V, mientras que su contenido de torio tiene un rango que va de 4.68 a 9.60 PPM aproximadamente.

En la Figura 65, se muestra la relación que hay entre el registro de Rayos Gamma (GR) y el registro de densidad (RHOZ).

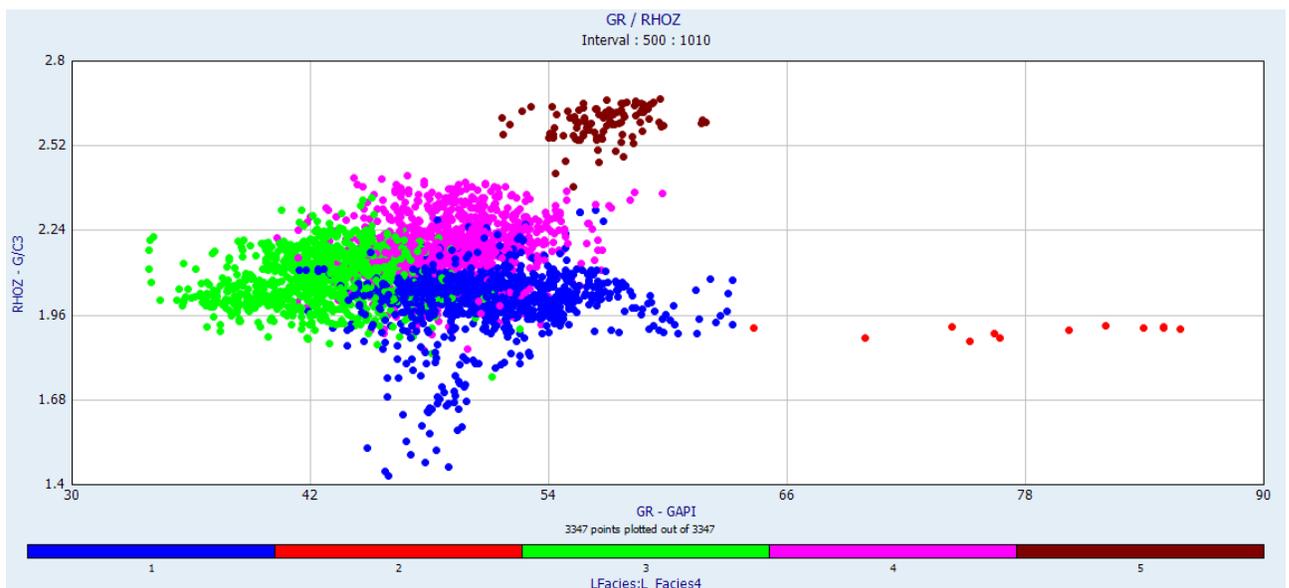


Figura 65. Relación entre el registro de Rayos Gamma (GR) y el registro de densidad (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.

A partir del análisis de grupos de la espectroscopia de Rayos Gamma, se observa una buena separación entre los grupos. En el grupo 1 se muestra una serie de puntos en la parte inferior de la gráfica, que representa los valores más bajos de densidad, para este grupo su rango de densidad abarca valores que van desde 1.42 a 2.30 g/cm³, mientras que sus valores de Rayos Gamma tienen un rango que va de 41 a 63 API aproximadamente. El grupo 2, consta de pocos puntos, los cuales presentan los valores más altos de Rayos Gamma con un rango de 64 a 86 API, mientras que su rango de densidad es muy estrecho con valores que van de 1.87 a 1.92 g/cm³. El grupo 3, presenta valores de Rayos Gamma con un rango de 34 a 53 API aproximadamente, con valores de densidad que van de 1.75 a 2.35 g/cm³. El grupo 4, presenta valores de Rayos Gamma que van de 40 a 60 API aproximadamente, con un rango de densidad que va de 1.85 a 2.42 g/cm³ aproximadamente. El grupo 5, presenta los valores más altos de densidad, con un rango que va de 2.39 a 2.67 g/cm³, mientras sus valores de Rayos Gamma tienen un rango de 52 a 62 API.

En la Figura 66, se muestra la relación que hay entre el contenido de uranio (HURA) y el registro de densidad (RHOZ).

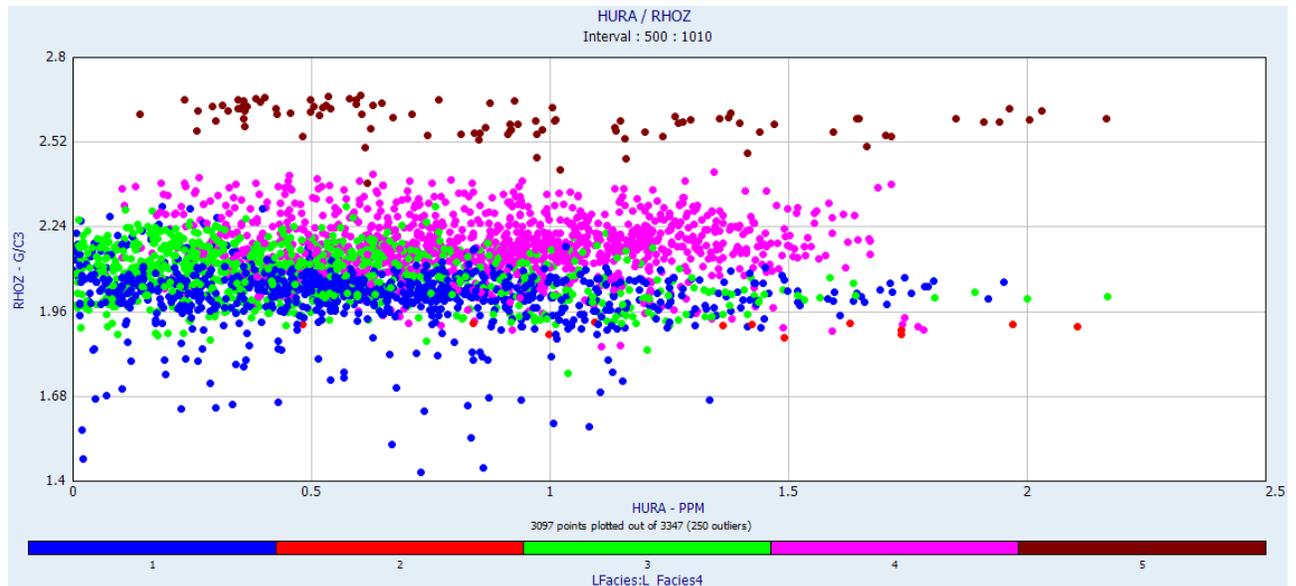


Figura 66. Relación entre el contenido de uranio (HURA) y la densidad (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.

Se observa que no hay una separación tan clara entre los grupos 1, 3 y 4. El grupo 1, presenta valores de contenido de uranio con un rango que va desde 0 hasta 1.95 PPM, con un rango de densidad que va de 1.42 a 2.30 g/cm³ aproximadamente. El grupo 2, consta de pocos puntos, los cuales presentan valores de contenido de uranio que van desde 0.48 a 2.10 PPM, mientras su rango de densidad es muy estrecho con valores de 1.87 a 1.92 g/cm³ aproximadamente. El grupo 3, presenta valores de contenido de uranio con un rango de 0 a 2.16 PPM aproximadamente, con un rango de densidad que va de 1.75 a 2.35 g/cm³ aproximadamente. El grupo 4, presenta valores de contenido de uranio que van de 0.10 a 1.78 PPM aproximadamente, con un rango de densidad que va de 1.84 a 2.42 g/cm³ aproximadamente. El grupo 5, presenta los valores más altos de densidad, con un rango que va desde 2.38 a 2.67 g/cm³ aproximadamente, mientras su contenido de uranio tiene un rango que va de 0.14 a 2.16 PPM.

En la Figura 67, se muestra la relación que hay entre el registro de Rayos Gamma (GR) y el registro de resistividad (AT90).

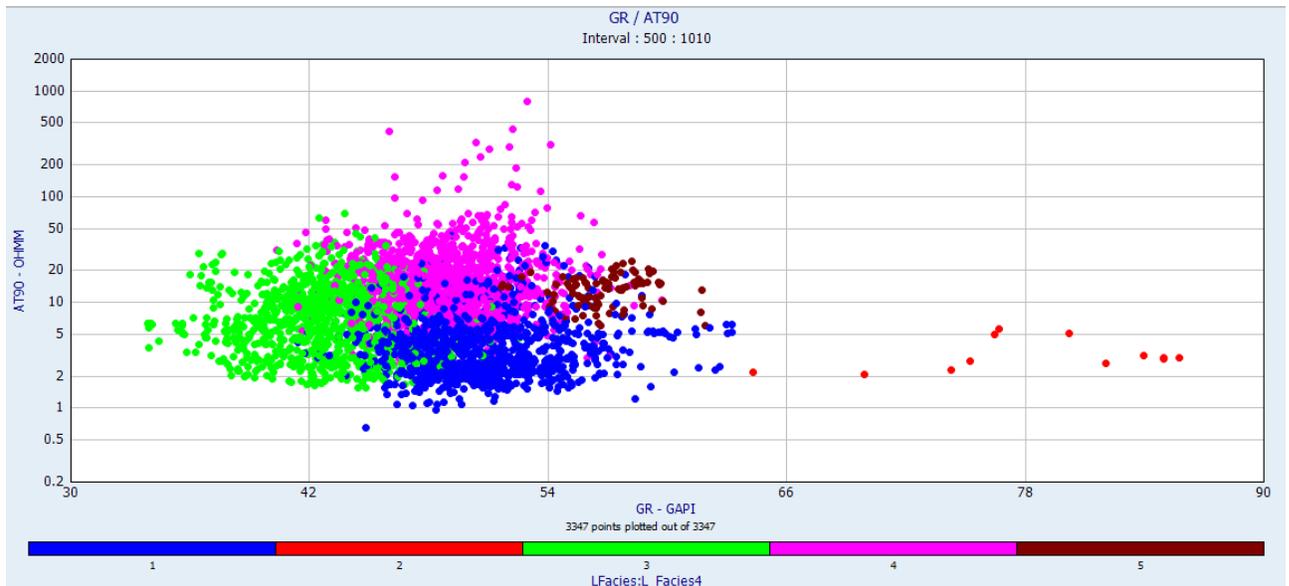


Figura 67. Relación entre el registro de Rayos Gamma (GR) y el registro de resistividad (AT90), correspondiente a la primera etapa.

En la relación anterior, se observa una buena separación entre los grupos, el grupo 1, presenta valores de Rayos Gamma con un rango que va de 41 a 63 API aproximadamente, con un rango de resistividad que va de 0.66 a 43.13 ohm*m aproximadamente. El grupo 2, consta de pocos puntos, los cuales presentan los valores más altos de Rayos Gamma con un rango de 64 a 86 API, mientras que el rango de resistividad va de 2.08 a 5.75 ohm*m. El grupo 3, presenta valores de Rayos Gamma que van de 34 a 53 API aproximadamente, con un rango de resistividad que va de 1.55 a 70.45 ohm*m. El grupo 4, presenta valores de Rayos Gamma que van de 40 a 60 API aproximadamente, con un rango de resistividad que va de 2.40 hasta 800.4 ohm*m aproximadamente. El grupo 5, presenta valores de Rayos Gamma con un rango de 52 a 62 API aproximadamente, con un rango de resistividad de 6.09 a 24.63 ohm*m aproximadamente.

En la Tabla 7 se muestran los rangos de valores de las curvas de los registros utilizados en el análisis de grupos de la espectroscopia de Rayos Gamma. Donde de acuerdo a la información proporcionada por la Tabla 5 y 6, se hace una clasificación preliminar de cada uno de los grupos.

Tabla 7. Rangos de valores del análisis de grupos de espectroscopia, a partir de los diagramas de dispersión, correspondiente a la primera etapa del registro 500 a 1010 md.

Grupo	GR (API)	U (PPM)	Th (PPM)	K (%)	Densidad (g/cm ³)	AT90 (ohm*m)	Composición	Petrogénesis
1	41-63	0-1.95	2.65-10.86	2.35-3.78	1.42-2.30	0.66-43.13	Básica-Intermedia	Lava-brechada
2	64-86	0.48-2.10	9.37-14.76	3.19-3.81	1.87-1.92	2.08-5.75	Intermedia-Ácida	Toba-cristalina
3	34-53	0-2.16	2.05-5.86	1.97-3.14	1.75-2.35	1.55-70.45	Básica	Toba-brechada
4	40-60	0.10-1.78	2.04-7.12	2.41-3.58	1.85-2.42	2.40-800.4	Básica-Intermedia	Toba-soldada
5	52-62	0.14-2.16	4.68-9.60	2.64-3.42	2.39-2.67	6.09-24.63	Intermedia	Brecha volcánica

4.3.2.2. Segunda Etapa

En la Figura 68, se muestra el análisis de grupos correspondiente a la segunda etapa. Para este análisis se utilizaron las curvas de Rayos Gamma (GR), resistividad (AT90), densidad (RHOZ), porosidad neutrón (NPHI), y los contenidos de torio (HTHO), potasio (HFK) y uranio (HURA).

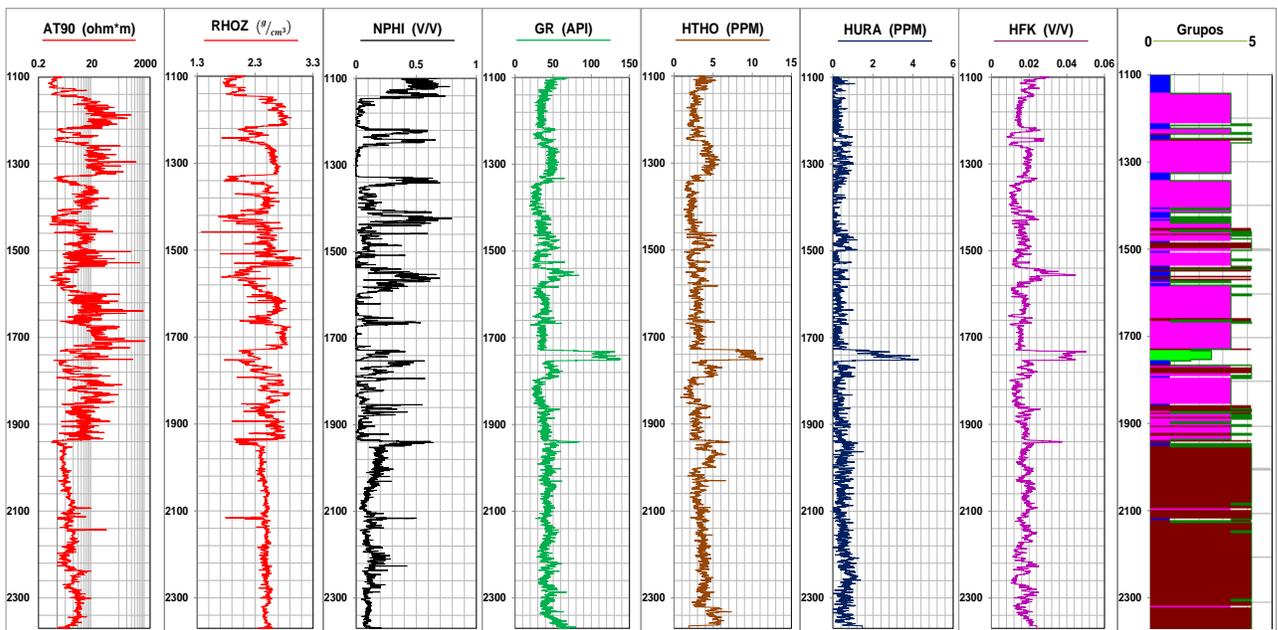


Figura 68. Análisis de grupos a partir del registro de espectroscopia de Rayos Gamma (contenido de torio (HTHO), contenido de uranio (HURA) y contenido de potasio (HFK)), junto con las curvas de resistividad (AT90), Rayos Gamma (GR), registro de densidad (RHOZ) y porosidad neutrón (NPHI), correspondiente a la segunda etapa.

En la siguiente figura, se muestra la relación que hay entre el contenido de potasio (HKF) y el contenido de torio (HTHO).

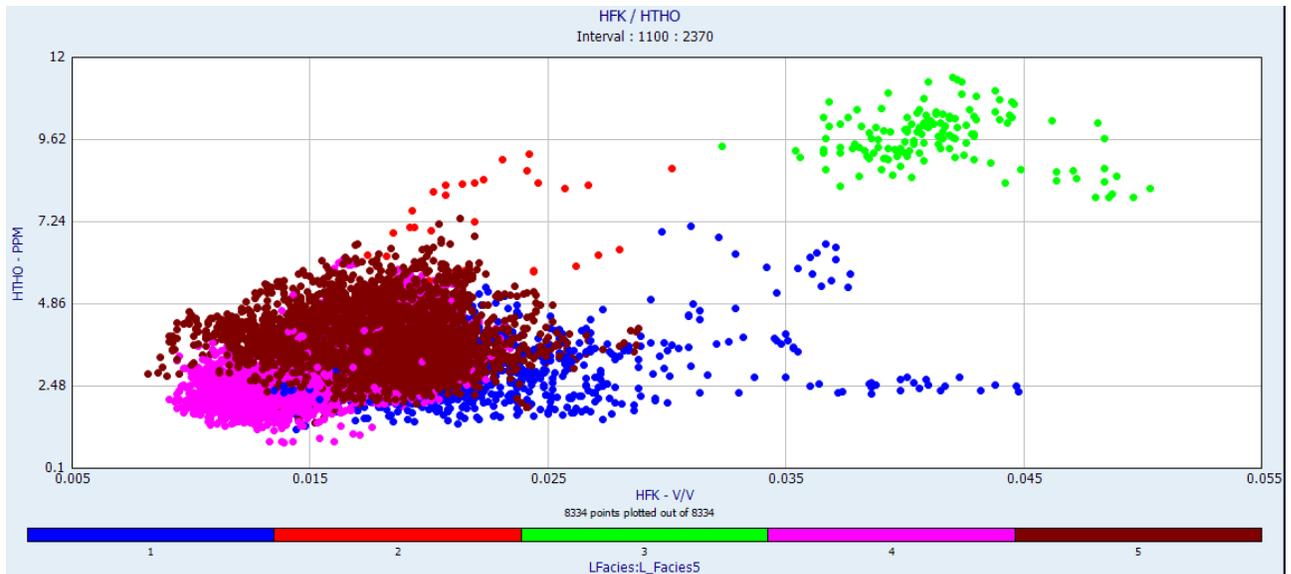


Figura 69. Relación entre el contenido de potasio (HKF) y el contenido de torio (HTHO), correspondiente a la segunda etapa.

En la figura anterior, se muestra el diagrama que relaciona el contenido de torio y potasio, a partir del análisis de grupos de la espectroscopia de Rayos Gamma. Se puede observar que no hay una separación clara entre el grupo 1, 4 y 5, donde la dispersión de los datos de estos grupos es grande. El grupo 1, presenta un rango amplio de valores de contenido de potasio que van desde 0.0134 a 0.0448 V/V aproximadamente, mientras su contenido de torio tiene un rango de 1.25 a 7.14 PPM aproximadamente. El grupo 2, presenta un rango de contenido de potasio con valores que van de 0.0164 a 0.0302 V/V aproximadamente, y su contenido de torio tiene un rango de 5.55 a 9.26 PPM aproximadamente. El grupo 3, presenta los valores más altos de contenido de torio y de potasio, su contenido de potasio tiene un rango de 0.0323 a 0.0503 V/V, mientras que su contenido de torio va desde 7.94 a 11.45 PPM. El grupo 4, presenta un rango de contenido de potasio de 0.0091 a 0.0234 V/V aproximadamente, y su contenido de torio tiene un rango que va de 0.8397 a 6.16 PPM aproximadamente. El grupo 5, presenta valores de contenido de potasio que van desde 0.0082 a 0.0288 V/V, el de contenido de torio tiene un rango de 1.41 a 7.33 PPM aproximadamente.

En la Figura 70, se muestra la relación que hay entre el registro de Rayos Gamma (GR) y el registro de densidad (RHOZ).

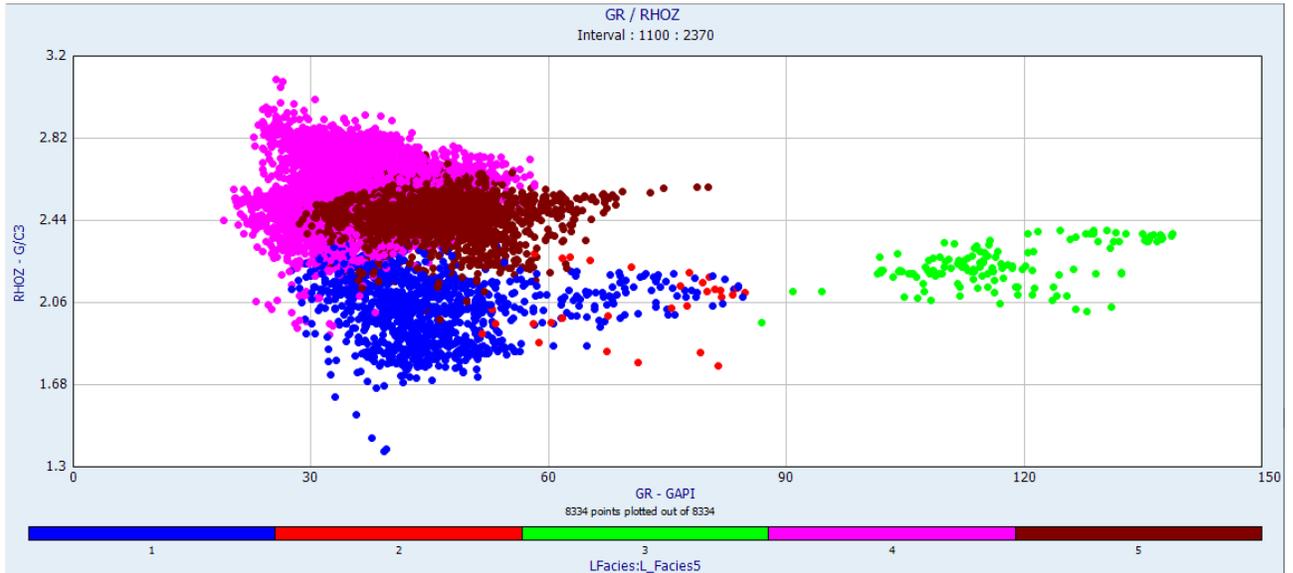


Figura 70. Relación entre el registro de Rayos Gamma (GR) y el registro de densidad (RHOZ), correspondiente a la segunda etapa.

En la figura anterior, se muestra la relación entre el registro de Rayos Gamma (GR) y la densidad (RHOZ), a partir del análisis de grupos de la espectroscopia de Rayos Gamma. Se observa que no hay una separación clara entre el grupo 4 y 5. El grupo 1, presenta valores de Rayos Gamma con un rango amplio que va de 28 a 84 API, y su densidad tiene un rango de 1.37 a 2.44 g/cm³ aproximadamente. El grupo 2, presenta valores de Rayos Gamma que van de 52 a 85 API aproximadamente, con un rango de densidad de 1.77 a 2.28 g/cm³. El grupo 3, presenta los valores más altos del registro de Rayos Gamma con un rango que va desde 87 a 139 API, mientras su densidad tiene un rango de 1.96 a 2.40 g/cm³. El grupo 4, presenta valores de Rayos Gamma con un rango de 19 a 59 API aproximadamente, y con un rango de densidad de 1.91 a 3.09 g/cm³. El grupo 5, presenta valores de Rayos Gamma que van de 28 a 80 API aproximadamente, mientras que su densidad tiene un rango de 1.98 a 2.74 g/cm³.

En la Figura 71, se muestra la relación que hay entre el contenido de uranio (HURA) y el registro de porosidad neutrón (NPHI).

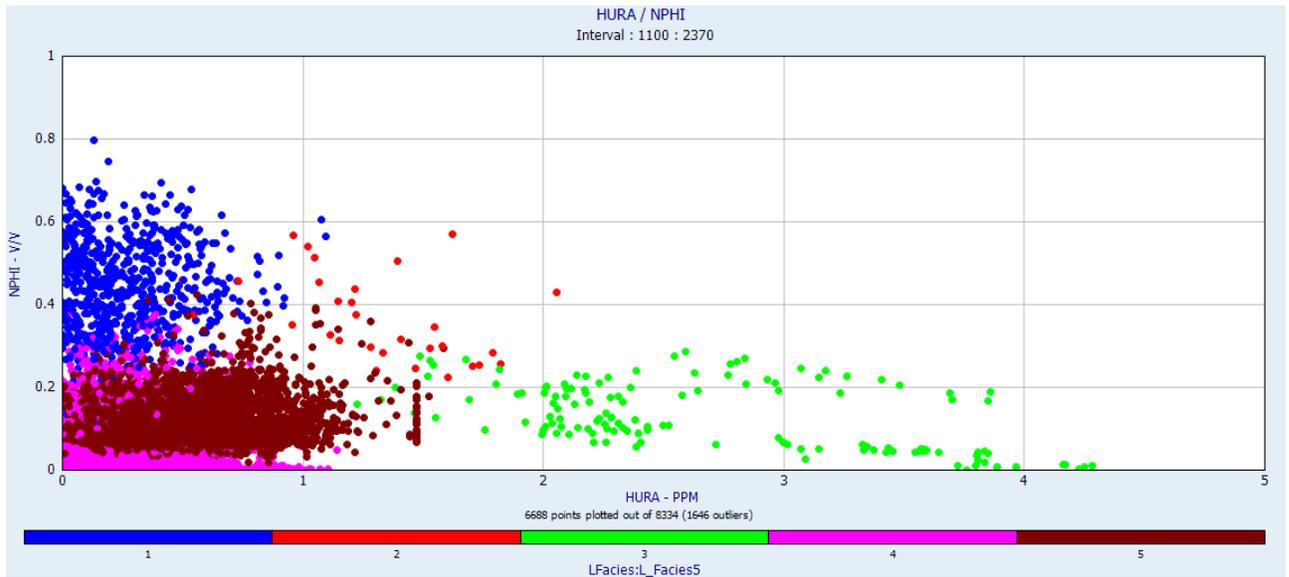


Figura 71. Relación entre el contenido de uranio (HURA) y la porosidad neutrón (NPHI), correspondiente a la segunda etapa.

Se observa que no hay una separación clara entre los grupos 4 y 5, aunque el grupo presenta las porosidades menores y los contenidos de Uranio menores a 1PPM. El grupo 1, presenta valores de contenido de uranio con un rango que va de 0 a 1.09 PPM, y una porosidad neutrón que va de 0.122 a 0.8 V/V aproximadamente. El grupo 2, presenta valores de contenido de uranio con un rango de 0.49 a 2.05 PPM aproximadamente, y una porosidad neutrón con un rango de 0.22 a 0.57 V/V. El grupo 3, presenta los valores más altos de contenido de uranio, con valores que van desde 1.22 a 4.28 PPM, mientras que su porosidad neutrón tiene un rango que va de 0 a 0.28 V/V. Para el grupo 4, es difícil observar su rango de valores con certeza, su rango de contenido de uranio va de 0 a 1.14 PPM aproximadamente, y su porosidad neutrón tiene un rango de 0 a 0.38 V/V. El grupo 5, presenta valores de contenido de uranio con un rango que va de 0 a 1.52 PPM y una porosidad neutrón con un rango de 0.01 a 0.42 V/V.

En la Figura 72, se muestra la relación que hay entre el registro de Rayos Gamma (GR) y el registro de resistividad (AT90).

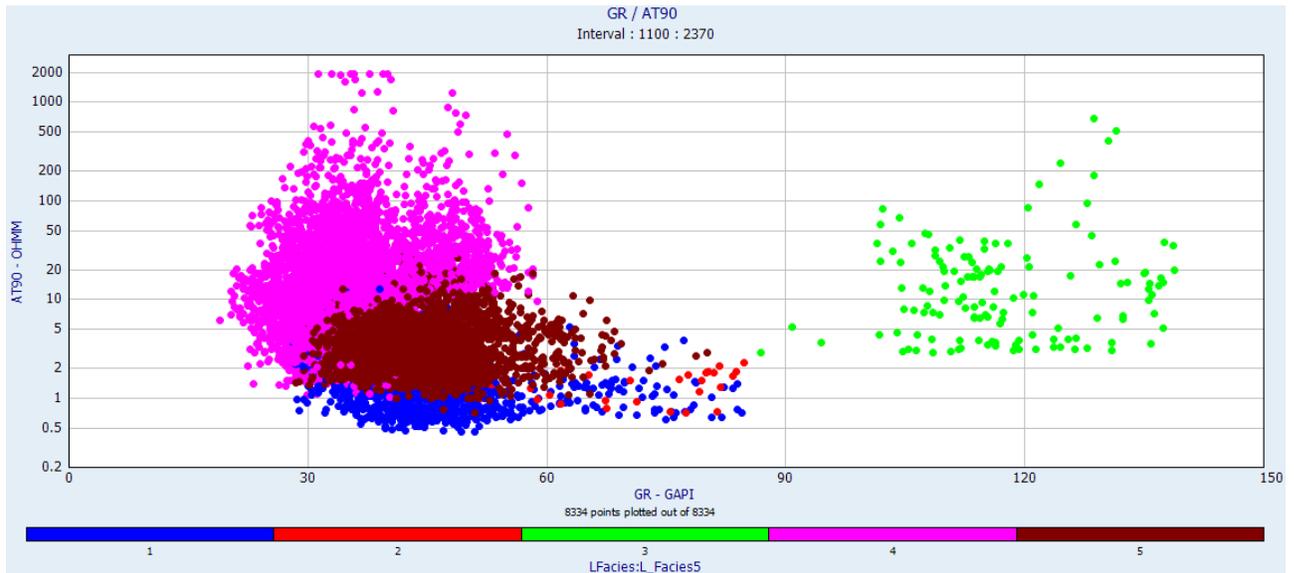


Figura 72. Relación entre el registro de Rayos Gamma (GR) y el registro de resistividad (AT90), correspondiente a la segunda etapa.

Se observa una buena separación entre el grupo 1, 2, 4 y 5. El grupo 1, presenta valores de Rayos Gamma que van desde 28 a 84 API, y valores de resistividad con un rango de 0.45 a 40.02 ohm*m aproximadamente. El grupo 2, presenta valores de Rayos Gamma con un rango de 52 a 85 API aproximadamente, con un rango de resistividad que va de 0.73 a 2.30 ohm*m. El grupo 3, presenta los valores más altos de Rayos Gamma con un rango que va desde 87 a 139 API, mientras sus valores de resistividad van de 2.90 a 699.9 ohm*m. El grupo 4, presenta valores de Rayos Gamma con un rango que va de 19 a 59 API, con un amplio rango de valores de resistividad de 1.02 a 1979 ohm*m aproximadamente. El grupo 5, presenta valores de Rayos Gamma con un rango de 28 a 80 API aproximadamente, mientras su rango de resistividad va de 0.71 a 27.46 ohm*m.

En la Tabla 8 se muestran los rangos de valores de las curvas de los registros utilizados en el análisis de grupos de la espectroscopia de Rayos Gamma. Donde de acuerdo a la información proporcionada por la Tabla 5 y 6, se hace una clasificación preliminar de cada uno de los grupos, exceptuando el grupo 3, debido a que los datos del registro de espectroscopia y Rayos Gamma en el intervalo de 1720 a 1753 md aproximadamente, presentan información errónea, ocasionada por la herramienta de perforación que quedo atascada durante la etapa de perforación, la cual se analizó en la sección de “Bitácoras de perforación” (PEMEX, 2018).

Tabla 8. Rangos de valores del análisis de grupos de espectroscopia, a partir de los diagramas de dispersión, correspondiente a la segunda etapa del registro 1100 a 2370 md.

Grupo	GR API	U (PPM)	Th (PPM)	K (%)	PhiN (V/V)	Densidad (g/cm3)	AT90 (ohm*m)	Composición	Petrogénesis
1	28-84	0-1.09	1.25-7.14	1.34-4.48	0.12-0.8	1.37-2.44	0.45-40.02	intermedia	Toba cristalina
2	52-85	0.49-2.05	5.55-9.26	1.64-3.02	0.22-0.57	1.77-2.28	0.73-2.30	intermedia	Lava-brechada
3	87-139	1.22-4.28	7.94-11.45	3.23-5.03	0-0.28	1.96-2.40	2.90-699.9	No valido	No valido
4	19-59	0-1.14	0.83-6.16	0.91-2.34	0-0.38	1.91-3.09	1.02-1979	Básica	Riolita
5	28-80	0-1.52	1.41-7.33	0.82-2.88	0.01-0.42	1.98-2.74	0.71-27.46	Básica-Intermedia	Toba soldada

4.4. Comparación interpretación cuantitativa y cualitativa

La interpretación cualitativa de los registros, se utiliza principalmente para dividir el registro en zonas con características físicas similares, que servirá para enfocar el análisis en aquellas zonas que sean de interés de acuerdo al objetivo del estudio.

Por otro lado, la interpretación cuantitativa mediante el análisis de grupos, permite dividir el registro en facies, a partir de un método estadístico de sus propiedades petrofísicas, donde a partir de diagramas de dispersión obtenemos el rango de valores de las diferentes facies, y con esto poder caracterizar y realizar una interpretación litológica de estas facies atravesadas por el pozo.

Como parte del análisis de los resultados, se compararon estas interpretaciones, donde se busca observar las similitudes y diferencias de cada una, y además la forma en cómo pueden complementarse una con la otra, en esta comparación solo se utilizó el análisis de grupos con enfoque en las propiedades físicas de las rocas.

4.4.1. Primera Etapa

En la interpretación cualitativa para la primera etapa del registro, se dividió en cuatro zonas, mientras que el análisis de grupos dividió al registro en cinco facies (grupos) diferentes. En la siguiente figura, se muestra la división de las zonas del registro de la interpretación cualitativa junto al resultado del análisis de grupos.

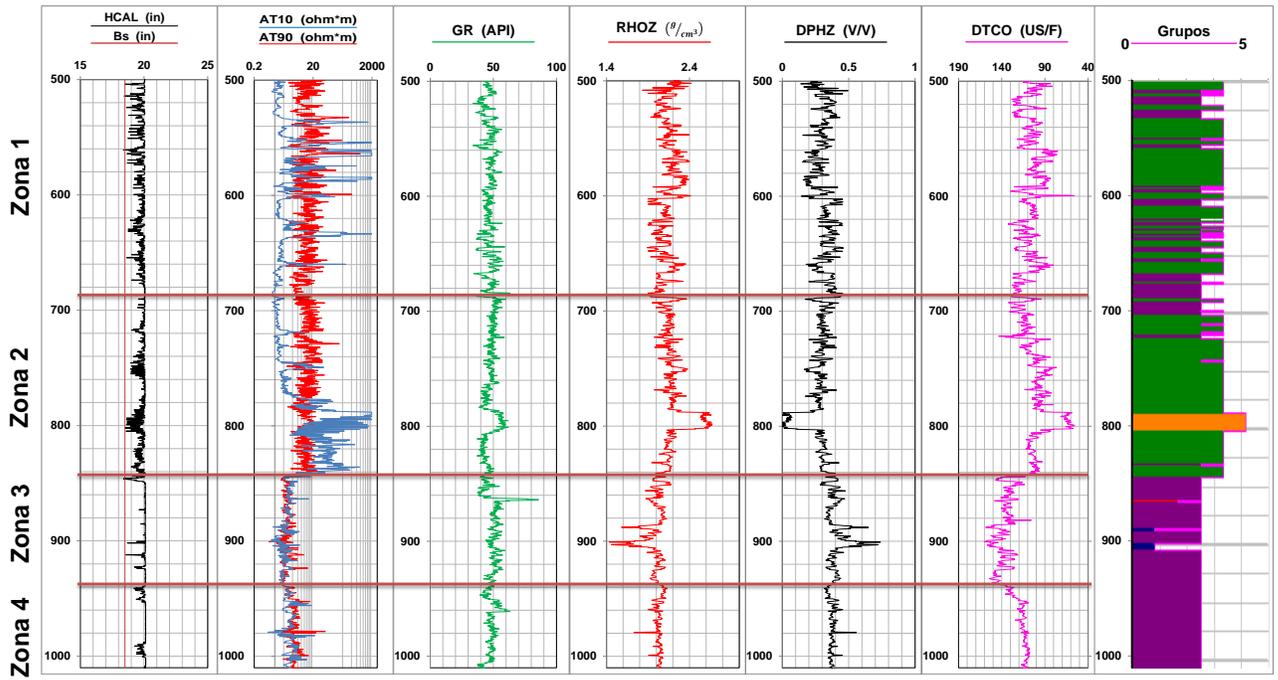


Figura 73. Comparación de la división del registro con el análisis de grupos correspondiente a la primera etapa.

En el análisis de grupos desde la profundidad de 500 a 705 md aproximadamente, se presentan intercalaciones de las facies de color morado (Grupo 3) y verde (Grupo 4) de diferentes espesores. Este intervalo del análisis de grupos se relaciona con la zona 1, la cual se dividió a partir del cambio en las curvas de Rayos Gamma, resistividad y registro sínico. Este tramo del registro y del análisis de grupos, se puede entender como una unidad con un grado de competencia variable, compuesta por la intercalación de materiales diferentes, que se refleja en las intercalaciones de las facies.

El análisis de grupos se dividió una facies de color naranja (Grupo 5), en la profundidad de 784 a 802 md, esta facies se caracteriza por los altos valores de densidad, bajos valores de registro sínico y porosidad. Donde esta facies se encuentra encapsulada dentro de una facies de color verde. En la interpretación cualitativa, estas facies están comprendidas dentro de la zona 2.

En el análisis de grupos se observa que en la profundidad de 840 md, el registro se divide por la facies de color morado, la cual forma una sola unidad hasta el final del registro, donde se presentan pequeñas facies de color rojo (Grupo 2) relacionada al salto en los valores de Rayos Gamma, y azul (Grupo 1) relacionado a los saltos en los valores de densidad y porosidad, pero que en general puede agruparse como una sola unidad. Este intervalo del análisis de grupos concuerda con la división de la zona 3 y 4, donde estas dos últimas zonas, se dividieron por el cambio en los valores de las curvas de resistividad y de registro sínico.

4.4.2. Segunda Etapa

La segunda etapa del registro se dividió en dos zonas. La primera zona se caracteriza por intercalaciones de valores bajos y altos de las curvas de resistividad, densidad, porosidad de neutrón y registro sónico. La segunda zona se dividió por las formas más continuas y constantes de las curvas, que implican una unidad más homogénea. El análisis de grupos dividió al registro en 5 facies (grupos) diferentes. En la siguiente figura, se muestra la división de las intercalaciones del registro de la interpretación cualitativa junto al resultado del análisis de grupos correspondiente a la segunda etapa.

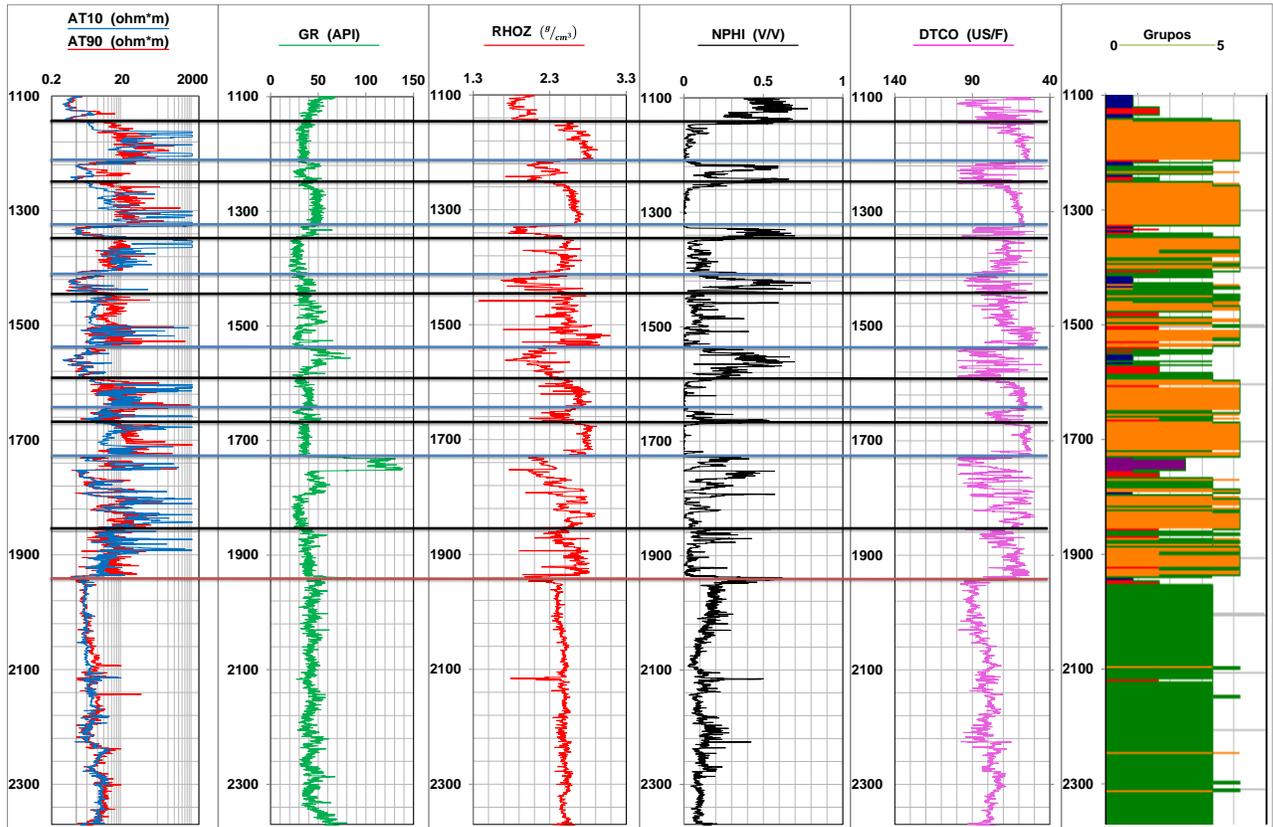


Figura 74. Comparación de la división del registro con el análisis de grupos correspondiente a la segunda etapa.

La primera zona de la interpretación cualitativa está caracterizada por la división del registro de acuerdo con las intercalaciones de los valores de las curvas. El análisis de grupos para esta segunda etapa agrupó los datos con valores altos de resistividad y densidad, y valores bajos de porosidad y registro sónico, en una facies de color naranja (Grupo 5). Mientras que los valores bajos de resistividad y densidad, junto con valores altos de porosidad y registro sónico, los agrupó en pequeñas facies de color azul (Grupo 1) y rojo (Grupo 2). Al igual que en la interpretación cualitativa, el análisis de grupos dividió el registro en intercalaciones de facies según los cambios de los valores de las curvas del registro.

El análisis de grupos identificó una facies de gran espesor de color verde (Grupo 4), en la profundidad de 1948 a 2370 md, la cual corresponde a la segunda zona de la

interpretación cualitativa. Por lo tanto, se puede deducir que ambos enfoques clasifican esta parte del registro como una sola unidad, más homogénea que las intercalaciones de la primera zona.

En este análisis, se observó que ambas metodologías proporcionan buena información para la caracterización del registro. Donde a partir de estos dos enfoques de interpretación, junto con los resultados del análisis de grupos de espectroscopia, que permite observar los cambios de composición mineralógica en el registro, es posible realizar una interpretación litológica sobre las formaciones atravesadas por el pozo y crear una columna de unidades de acuerdo a estos resultados.

4.5. Identificación litológica de acuerdo al contenido de sílice

El contenido de sílice es utilizado para clasificar a las rocas volcánicas de acuerdo a su composición ácida o básica, a partir del diagrama Total Alkali Silica (TAS), el cual fue propuesto por el Congreso Geológico Internacional de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) en 1989, para la clasificación de rocas volcánicas. La Figura 75, muestra el diagrama TAS el cual a partir del contenido de sílice que representa la acides de la roca, y los contenidos de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ que representa la alcalinidad, se pueden identificar 15 tipos fundamentales de rocas volcánicas en base al análisis geoquímico. (Ran et al., 2014).

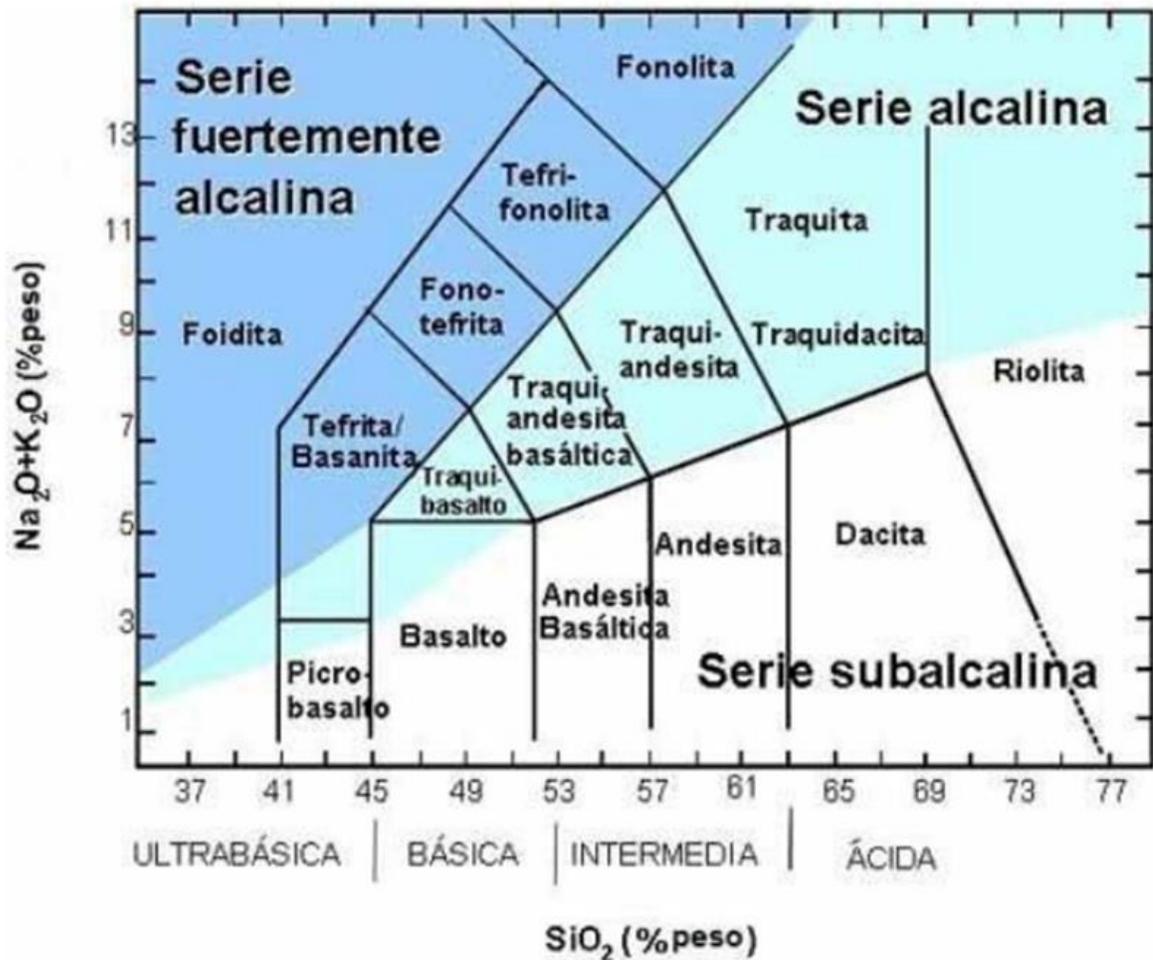


Figura 75. Diagrama TAS. (IUGS, Le Bas et al., 1986).

Como se muestra en la Tabla 9, las rocas volcánicas se pueden clasificar por su composición de acuerdo a su contenido de sílice. Las rocas de composición ultra-básica poseen un valor de contenido de sílice menor a 45 (%), las rocas básicas tienen un rango de 45-52 (%), las rocas de composición intermedia tienen un rango de 52-63 (%), mientras que las rocas ácidas tienen un valor mayor al 63 (%).

Tabla 9. Base de clasificación de rocas volcánicas con diferentes composiciones. Tomado de (Ran, Q et al., 2014).

Base de clasificación	Ultra-Básico	Básico	Intermedio	Ácido
SiO ₂ /%	< 45	45-52	52-63	> 63
Na ₂ O+K ₂ O/%	< 5	< 7.2	< 11.2	< 16

Un estudio realizado en Islandia, en donde a partir del análisis químico de 254 muestras de rocas ígneas, se demostró que existe una relación entre la intensidad del registro de

rayos gamma (GR), con la composición química de la roca, donde se puede expresar mediante el contenido de sílice (SiO_2). (Stefansson, V et al., 2000). A partir de este análisis se obtuvo la siguiente aproximación:

$$\text{API GU} = (2.63 \pm 0.10) * \text{SiO}_2 - (102 \pm 6) \quad (\text{ecq 1}).$$

La cual muestra una relación lineal entre la concentración de SiO_2 con los contenidos de torio, uranio y potasio. La ecuación anterior nos permite expresar el registro de Rayos Gamma (GR) con el contenido de sílice (SiO_2).

Para obtener el contenido de sílice despejamos la ecuación anterior de manera que obtengamos el contenido de sílice en función del registro de rayos gamma:

$$\text{SiO}_2(\%) = \frac{\text{GR (API)} + 102}{2.63} \quad (\text{ecq 2}).$$

4.5.1. Primera etapa

Con la ecuación anterior, se calculó el contenido de sílice, a partir del registro de Rayos Gamma como se muestra en la Figura 76. Mediante el análisis de grupos y con ayuda del diagrama TAS de la Figura 75 y la Tabla 9, es posible hacer una clasificación de la composición de las rocas para las dos etapas del pozo Mirador. En la Figura 77, se muestra el diagrama de dispersión del contenido de sílice contra el registro de densidad correspondiente a la primera etapa.

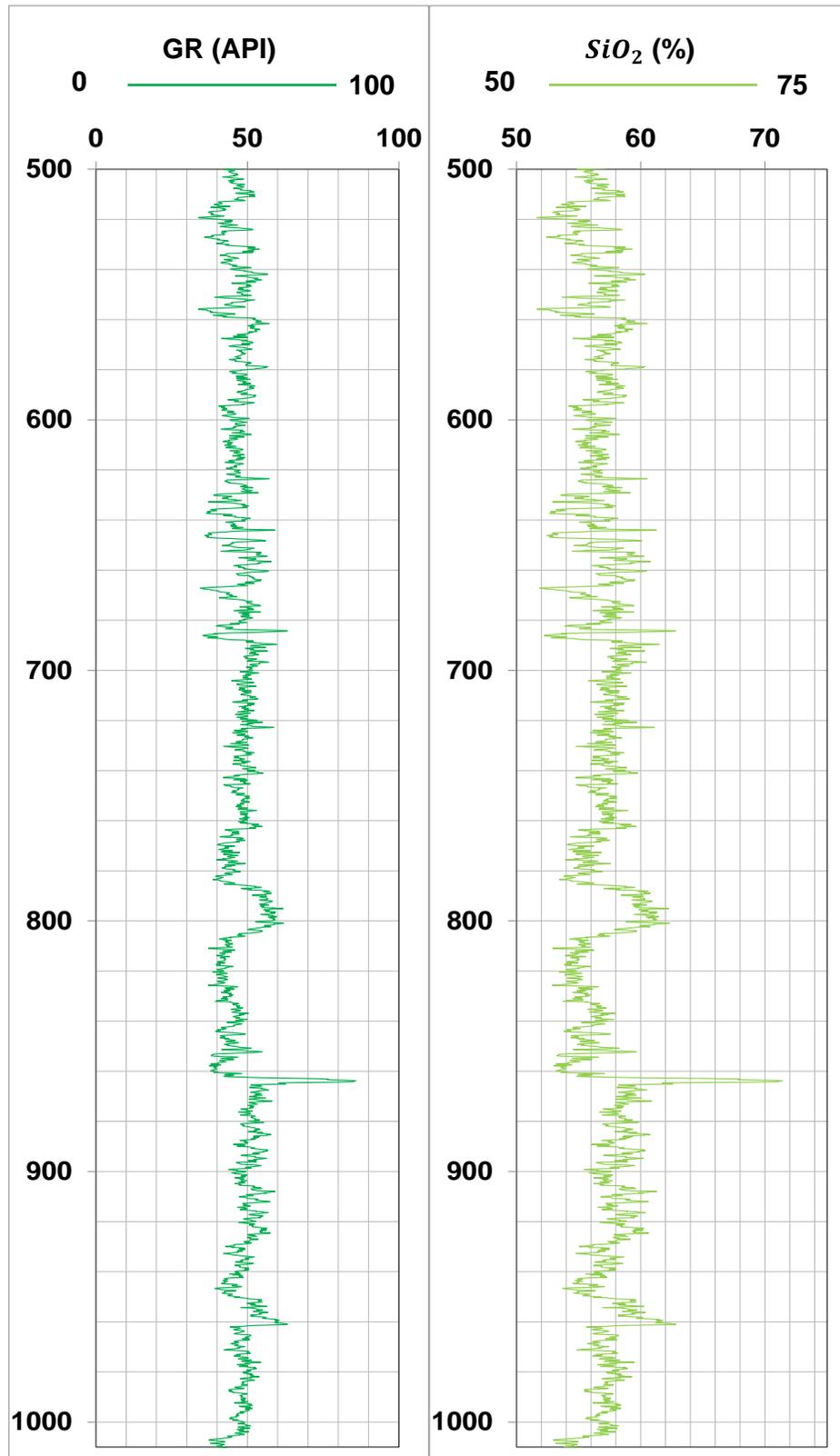


Figura 76. Contenido de sílice a partir del registro de Rayos Gamma, correspondiente a la primera etapa.

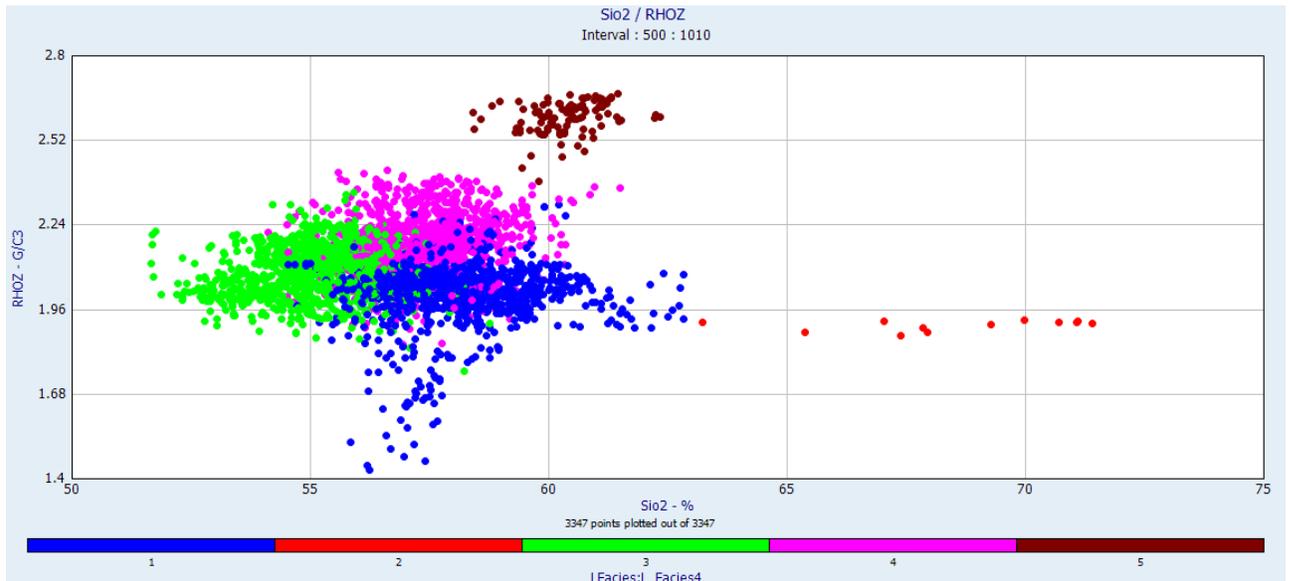


Figura 77. Relación entre el contenido de sílice (SiO₂) y la densidad (RHOZ), correspondiente a la primera etapa.

En la figura anterior se observa que el rango de valores del contenido de sílice (SiO₂) para los datos correspondientes a la primera etapa del registro, van desde 51.63 a 71.4 % aproximadamente. Por lo que las rocas volcánicas presentes en la formación deberían tener una composición intermedia a acida de acuerdo con los valores de la Tabla 9 y la Figura 78. El grupo 1, presenta los valores más bajos de densidad con un rango de 1.42 a 2.3 g/cm³ aproximadamente, mientras que su contenido de sílice tiene un rango de 54.53 a 62.82 %. El grupo 2, presenta un rango muy estrecho de valores de densidad con valores que van de 1.87 a 1.92 g/cm³, por otro lado, presenta el rango con valores más altos de contenido de sílice que va de 63.2 a 71.4 %. El grupo 3, presenta valores de densidad que van de 1.75 a 2.35 g/cm³ aproximadamente, su contenido de sílice presenta valores que van de 51.63 hasta 58.75 %. El grupo 4, presenta valores intermedios de densidad que van de 1.85 a 2.42 g/cm³ aproximadamente, su contenido de sílice tiene un rango que va de 54.11 a 61.49 %. El grupo 5, contiene los valores más altos de densidad que van de 2.39 a 2.67 g/cm³, y su contenido de sílice es de 58.38 a 62.36%.

En la Tabla 10, se muestran los rangos de contenido de sílice y densidad, observados por el diagrama anterior, donde de acuerdo a la información proporcionada por la Tabla 5 y la Tabla 9, se hace una clasificación de cada uno de los grupos.

Tabla 10. Clasificación de los grupos de acuerdo a su contenido de sílice, correspondiente a la primera etapa.

Grupo	SiO₂ (%)	Densidad (g/cm³)	Clasificación
1	55.53 – 62.82	1.42 – 2.3	Intermedia
2	63.2 - 71.4	1.87 - 1.92	Acida
3	51.63 – 58.75	1.75 - 2.35	Intermedia
4	54.11 - 61.49	1.85 - 2.42	Intermedia
5	58.38 - 62.36	2.39 - 2.67	Intermedia

4.5.2. Segunda Etapa.

Con la (ecuación 2) se calculó el contenido de sílice a partir del registro de Rayos Gamma como se muestra en la Figura 78. En la Figura 79, se muestra el diagrama de dispersión del contenido de sílice contra el registro de densidad correspondiente a la segunda etapa.

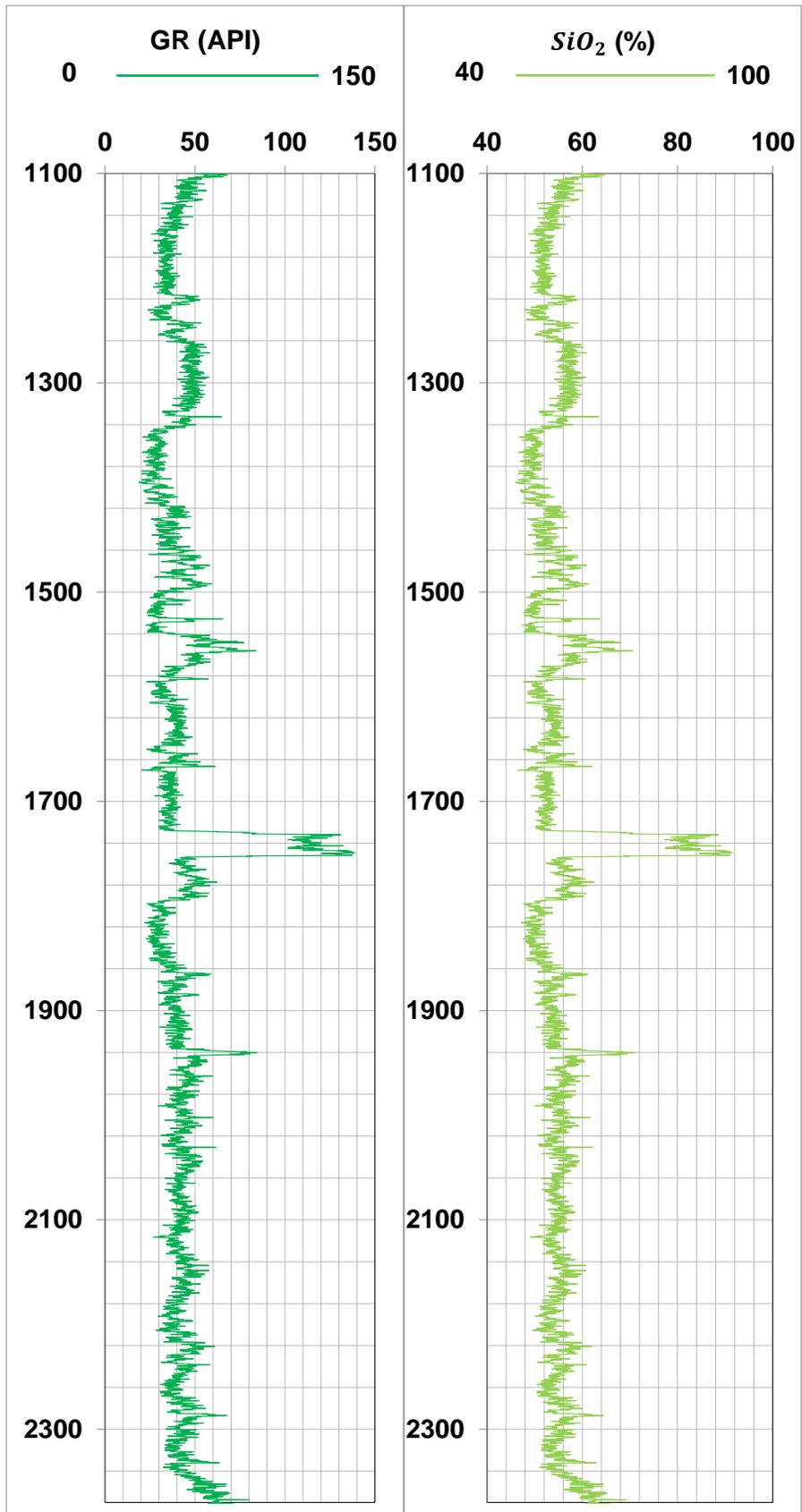


Figura 78. Contenido de sílice a partir del registro de Rayos Gamma, correspondiente a la segunda etapa.

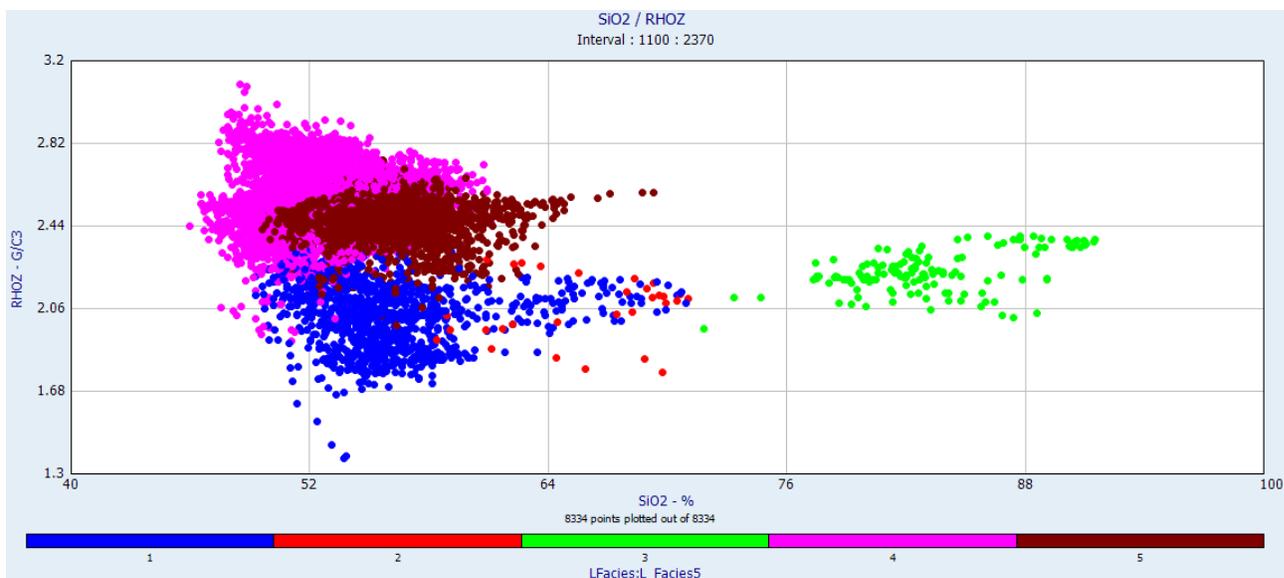


Figura 79. Relación entre el contenido de sílice (SiO₂) y la densidad (RHOZ), correspondiente a la segunda etapa.

En la figura anterior se observa que el rango de valores del contenido de sílice (SiO₂) para nuestros datos que corresponden a la segunda etapa del registro, van desde 45.9 a 91.5 % aproximadamente. Por lo que de acuerdo con los valores que proporcionan la Tabla 9 y la Figura 78, las rocas volcánicas deberían tener una composición de básicas a ácidas. El grupo 1, presenta los valores más bajos de densidad, que van de 1.37 hasta 2.40 g/cm³ aproximadamente, y su contenido de sílice tiene un rango amplio que va de 49.26 a 70.9 %. El grupo 2, presenta valores de densidad que van de 1.77 a 2.29 g/cm³ aproximadamente, su contenido de sílice tiene un rango de 58.38 a 71.02 %. El grupo 3, presenta los valores más altos de contenido de sílice, que van desde 71.82 hasta 91.5 %, su rango de densidad es de 1.97 a 2.40 g/cm³. El grupo 4, presenta los valores de densidad más altos con un rango amplio que va de 1.91 hasta 3.09 g/cm³ aproximadamente, con un contenido de sílice que va desde 45.9 a 61.11 %. El grupo 5, presenta valores de densidad con un rango que va de 2.06 a 2.74 g/cm³ aproximadamente, su contenido de sílice tiene un rango de 49.63 a 69.26 %.

En la Tabla 11, se muestran los rangos de contenido de sílice y densidad, observados por el diagrama anterior, donde de acuerdo a la información proporcionada por la Tabla 5 y la Tabla 9, se hace una clasificación de cada uno de los grupos. Con la excepción del grupo 3, debido a que los datos del registro de Espectroscopia y Rayos Gamma en el intervalo de 1720 a 1753 md aproximadamente, presentan valores erróneos, ocasionados por la herramienta de perforación que quedó atascada durante la etapa de perforación, la cual se analizó en la sección de “Revisión de bitácoras de perforación”.

Tabla 11. Clasificación de los grupos de acuerdo a su contenido de sílice, correspondiente a la segunda etapa.

Grupo	SiO ₂ (%)	Densidad (g/cm ³)	Clasificación
1	49.26 – 70.9	1.37 - 2.40	Básica - Ácida
2	58.38 – 71.02	1.77 - 2.29	Básica - Ácida
3	71.82 - 91.5	1.97 - 2.40	No valido
4	45.9 – 61.11	1.91 - 3.09	Básica - Intermedia
5	49.63 – 69.26	2.06 – 2.74	Intermedio - Ácida

4.6. Identificación de facies volcánicas mediante registros geofísicos

4.6.1. Facies Volcánicas

Las facies volcánicas son características geológicas que muestran la génesis de los cuerpos rocosos formados por actividad volcánica. Los primeros en desarrollar una clasificación detallada fueron M. Usov, Yu. Kuznetsov y V. I. Pavlinov, y en 1973, Kropachev y Starostni propusieron un esquema que sentó las bases para poder categorizar las facies volcánicas. Desde entonces, varios autores han propuesto diferentes sistemas de clasificación. (Ran et al., 2014).

Una buena clasificación debe considerar aspectos como el patrón y ambiente de erupción, la acumulación de productos volcánicos, los mecanismos de explosión y de intrusión magmática, y la ubicación específica del edificio volcánico. El estudio de Ran, Q. et al. (2014), se identifican seis facies volcánicas principales y 19 subfacies, basadas en características geológicas específicas de las cuencas de Songliao y Junggar. Estas facies y subfacies se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 12. Clasificación de Litofacies. Tomado de (Ran, Q et al., 2014).

Facies	Subfacies
Facies Explosivas	Subfacies de salpicaduras, subfacies de flujo clásticos calientes, subfacies de oleada basal caliente, y subfacies de caída.
Facies Efusivas	Subfacies cima, subfacies superiores, subfacies medias, y subfacies inferiores.
Facies Extrusivas	Subfacies de la zona interior, subfacies de la mesozona, y subfacies de la zona exterior.
Facies Conductos Volcánicos	Subfacies de cuello volcánico y subfacies de brechas criptoexplosivas.
Facies Subvolcanicas	Subfacies de la zona interior, subfacies de la mesozona, y subfacies de la zona exterior.
Facies Volcánicas Sedimentarias	Subfacies portadoras de xenoclastos, subfacies retransportadas, y subfacies de toba carbonífera.

Las litofacies volcánicas son unidades de roca caracterizadas por su litología, textura, estructura, y proporcionan una idea sobre las condiciones ambientales en las que estas se formaron. Los modelos de litofacies son generalizaciones de conjuntos de litofacies, que muestran intercalaciones de varias facies volcánicas y sus configuraciones geológicas y geográficas, lo que resulta en patrones de ensamblaje únicos. Las configuraciones de litofacies están controladas principalmente por la ubicación de las fuentes de erupción y las variaciones de la energía que tuvieron estas erupciones volcánicas. Por lo que estas configuraciones de litofacies, se distribuirán de acuerdo a su ubicación con respecto al cráter, y sobre todo al tipo y la intensidad de la actividad volcánica que las formaron. (Ran et al., 2014).

A continuación, se muestra una breve descripción sobre las características de las diferentes facies volcánicas, de acuerdo al estudio de Ran, Q. et al. (2014).

Facies explosivas: En esta facie el magma se caracteriza por un alto contenido de volátiles, lo que ejerce una presión muy alta sobre las rocas circundantes y provoca una gran explosión, que resulta en la acumulación materiales volcanoclásticos de tamaños variados, dando lugar a litologías como aglomerados volcánicos, brechas volcánicas, tobas y brechas soldadas, con sus correspondientes texturas litológicas. La facie explosiva se encuentra principalmente en las partes inferiores de los ciclos de erupción acida, y en la parte superior de los ciclos de erupción básica.

Facies efusivas: Las facies efusivas se forman durante el período medio de un ciclo de erupción volcánica, cuando el material magmático es expulsado y fluye sobre la superficie bajo la influencia de su propia gravedad, donde este material magmático se enfría

gradualmente y se litifica. Esta facie es común en rocas volcánicas ácidas, neutras y básicas, se caracterizan por tener estructuras vesiculares y riolíticas, que se forman debido a la liberación de gases durante el enfriamiento del magma. Las litologías más comunes en esta facie incluyen basaltos, andesitas, dacitas y riolitas, que presentan texturas como esferulíticas, aplíticas y vítreas, y estructuras como vesículas, amígdaloidales y litofisas.

Facies extrusivas: Las facies extrusivas se forman en la etapa final del ciclo de actividad volcánica, comprenden bloques volcánicos que se forman cerca del cráter cuando el magma ácido y neutro de alta viscosidad es enfriado rápidamente por el agua o el aire, mientras es comprimido por fuerzas internas provoca que el magma fluya hacia la superficie. Las facies extrusivas suelen tener una forma de domo, con la perlita siendo la litología predominante. Sus texturas típicas son perlíticas y vítreas, y sus estructuras están dominadas por nódulos y almohadillas.

Facies de conductos volcánicos: Las facies de conductos volcánicos se localizan en la parte inferior y cerca de la parte central del edificio volcánico. Estas facies se forman cuando el magma asciende a través del conducto volcánico, donde se retiene y rellena las fracturas y cavidades. A lo largo del ciclo volcánico, las facies de conducto se acumulan, donde generalmente solo se conservan los productos de las actividades volcánicas más recientes. Las litologías más comunes que se presentan en esta facie son brechas criptoexplosivas, con texturas autoclásticas, porfiríticas y cataclásticas, así como estructuras de veta dendrítica. Estas características indican un historial de fragmentación y deformación intensa debido a la presión y movimiento del magma en el conducto volcánico.

Facies subvolcánicas: Las facies subvolcánicas se forman durante la misma etapa o en la etapa posterior del ciclo de erupción volcánica. Estas facies se originan a partir del enfriamiento lento y la cristalización de la lava que se infiltra en las rocas circundantes, suelen localizarse cerca del conducto volcánico y adoptan formas como alféizares, lacolitos, cepos, diques y vetas. Donde las litologías más comunes en las facies subvolcánicas incluyen rocas con estructuras porfídicas y xenolíticas, que indican un proceso de enfriamiento lento y la incorporación de fragmentos de rocas preexistentes.

Facies sedimentarias volcánicas: Estas facies se forman por la acumulación de depósitos clásticos entre las rocas volcánicas y suelen coexistir con ellas, aunque no siempre están presentes en todas las fases de actividad volcánica. Contienen numerosos fragmentos de rocas volcánicas y sus litologías más comunes incluyen rocas volcánicas sedimentarias y rocas sedimentarias volcánicas, con texturas clásticas terrígenas, lechos rítmicos y lechos planos. La principal diferencia con las facies explosivas radica en su formación y composición, mientras que las facies explosivas resultan de la expulsión violenta de magma rico en volátiles, produciendo aglomerados, brechas volcánicas y tobas, las facies sedimentarias volcánicas se forman a través de procesos de sedimentación y deposición posteriores a la actividad eruptiva.

4.6.2. Litofacies de acuerdo a las características de distribución vertical

Existen tres patrones o tendencias de distribución vertical en las rocas volcánicas (Ran et al., 2014), estos modelos se muestran en la siguiente figura.

- La primera se conoce como secuencia de debilitamiento hacia arriba, en esta secuencia, la energía de la erupción se debilita de forma gradual, donde de primera instancia se desarrollan facies explosivas, seguidas por facies efusivas. Donde las facies explosivas comprenden sucesiones de forma ascendente de subfacies de caída, subfacies de oleada basal caliente, subfacies de flujo de escombros calientes y subfacies de salpicadura. Donde este modelo de litofacies es común en rocas volcánicas de composición ácida.
- La segunda secuencia se conoce como fortalecimiento hacia arriba, en esta secuencia, la energía de la erupción aumenta de forma gradual, donde de primera instancia se desarrollan facies efusivas, seguidas por facies explosivas. De forma ascendente las facies efusivas se componen por una sucesión de subfacies: subfacie inferior, subfacie media, subfacie superior y subfacie top, mientras que las facies explosivas comprenden una subfacies de caída y una subfacies de oleada basal caliente. Este modelo de litofacies es común en rocas volcánicas básicas neutras.
- La tercera secuencia se conoce como secuencia alternante, donde la energía de la erupción es inestable alternando entre energía fuerte y débil, lo que da como resultado la alternación de facies explosivas y facies efusivas.

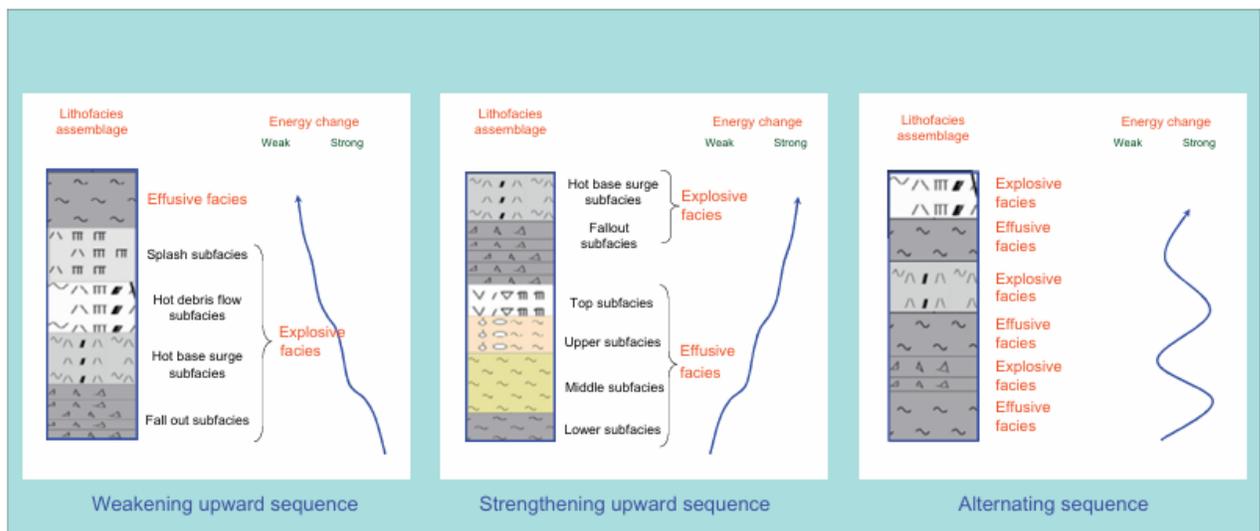


Figura 80. Patrón de apilamiento vertical de facies volcánicas. Tomado de Ran et al., (2014).

4.6.3. Litofacies de acuerdo a las características de distribución horizontal

La identificación de litofacies a partir de pozos individuales puede determinarse según la posición del pozo en el edificio volcánico, ya que esta ubicación influye en las configuraciones de litofacies presentes. Las facies volcánicas pueden dividirse lateralmente en tres cinturones de litofacies, según la distancia desde el cráter volcánico como se observa en la Figura 81. (Ran et al., 2014).

- Facie de cráter: Se caracteriza por una alternancia de facies explosivas, efusivas, extrusivas, de conducto volcánico y subvolcánicas. Presenta cambios rápidos en diversas litofacies y patrones de apilamiento o relaciones de superposición complejas.
- Facie de cráter proximal: Se caracteriza por la presencia de facies efusivas y explosivas, con un gran espesor, distribución relativamente estable, buena continuidad y una relación de superposición vertical primaria paralaminada.
- Facie de cráter distal: Se caracteriza por facies explosivas, efusivas o sedimentarias volcánicas, con una litología simple, pequeño espesor, distribución estable, buena continuidad y una distribución predominantemente laminada.

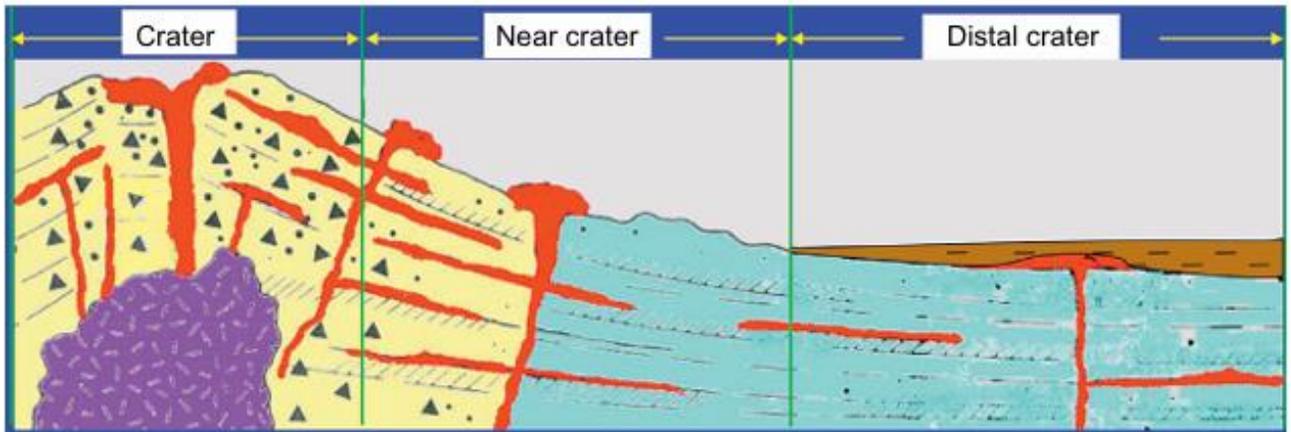


Figura 81. Patrón de la distribución lateral de las facies volcánicas. Tomado de Ran et al., (2014).

4.6.4. Identificación y clasificación de litofacies en intervalos no nucleados

La identificación y predicción de litofacies volcánicas permite conocer la arquitectura interna de los depósitos volcánicos. En pozos individuales, la identificación de litofacies, se basa en la configuración geológica de los edificios volcánicos perforados por el pozo, combinada con la identificación litológica mediante marcadores geológicos (núcleos) y registros geofísicos. En pozos donde se dispone de núcleos de roca, el proceso de identificación de litofacies es más directo, ya que los núcleos proporcionan información detallada sobre el tipo de litología volcánica, su textura y características estructurales. Esta información se utiliza para calibrar los registros y establecer una base sólida para la identificación de facies de perfil y la predicción de litofacies. Sin embargo, en pozos donde no se cuenta con núcleos de roca, la identificación de litofacies, se basa principalmente en el análisis de los registros geofísicos. De modo que la identificación de las litofacies volcánicas, se realizó a partir de las formas de las curvas que presenten los registros en función de los cambios verticales observados. La identificación litológica de las rocas volcánicas puede ser ambigua, y la relación entre la litología y las litofacies no es única, por lo que para realizar un buen análisis y predicción de litofacies, es preciso observar las amplitudes, formas, suavidad y cambios verticales de las curvas de los registros. (Ran et al., 2014).

4.6.4.1. Características de respuesta de los registros a diferentes facies y subfacies

A continuación, se describen las características y formas de los registros, de acuerdo al estudio de Ran, Q. et al. (2014), para cada una de las facies y subfacies de la Tabla 10.

Facies Explosivas: Las curvas de los registros para facies explosivas se caracterizan por un patrón compuesto de formas de caja aserradas o microaserradas, formas de campana o embudo, como se muestra en la Figura 82. Las respuestas de los registros geofísicos para las diferentes subfacies derivadas de las facies explosivas se caracterizan de la siguiente manera:

1. **Subfacies de Caída:** Alto tiempo de tránsito, baja densidad y baja resistividad, con una curva de registro aserrada.
2. **Subfacies de Oleada Basal Caliente:** Tiempo de tránsito medio-bajo, densidad y resistividad medio-altas, con una curva de registro microaserrada.
3. **Subfacies de Flujo Clástico Caliente:** Bajo tiempo de tránsito, alta densidad y alta resistividad, con una curva de registro suave y microaserrada.
4. **Subfacies de Salpicadura:** Alto tiempo de tránsito, baja densidad y baja resistividad, con una curva de registro aserrada.

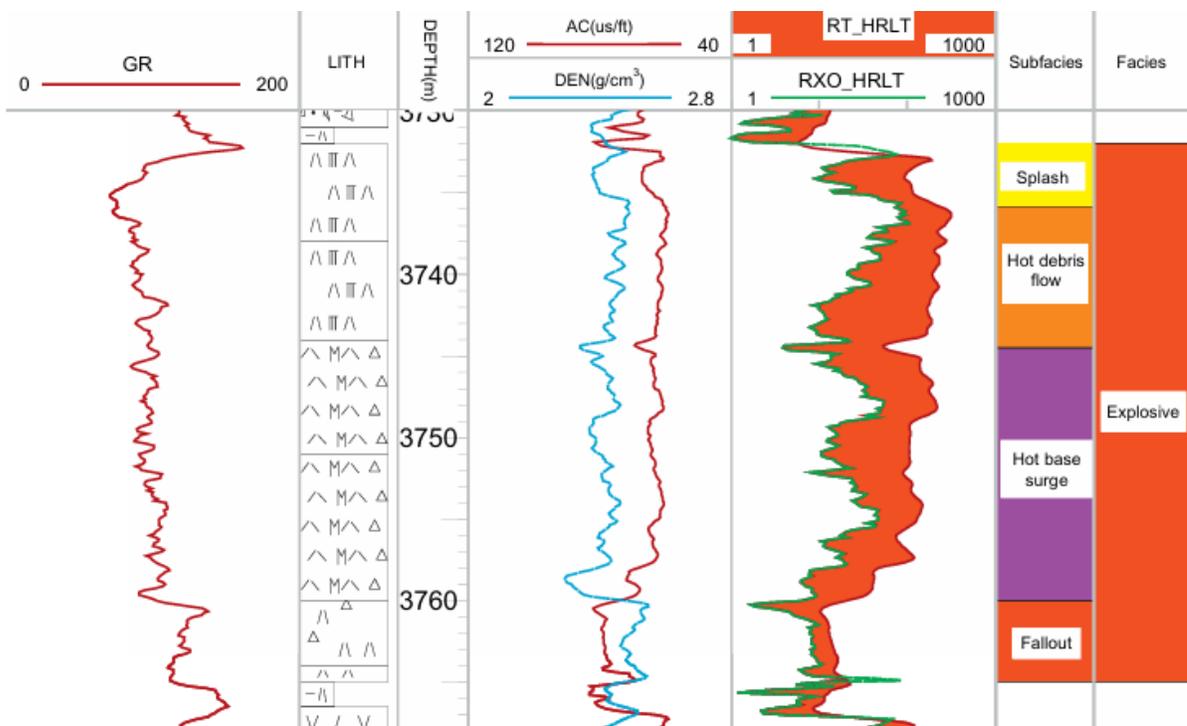


Figura 82. Respuesta de los registros para las facies explosivas, correspondiente al pozo (DD1413). Tomado de Ran et al., (2014).

Facies Efusivas: Las curvas de los registros de las facies efusivas generalmente tienen una forma suave, de microaserrada a forma de caja o campana, como se muestra en la Figura 83. Las respuestas de los registros geofísicos para las diferentes subfacies derivadas de las facies efusivas se caracterizan de la siguiente manera:

1. **Subfacies Inferior:** Alto tiempo de tránsito, baja densidad y baja resistividad, con una curva de registro microaserrada.
2. **Subfacies Media:** Bajo tiempo de tránsito, alta densidad y alta resistividad, con una curva de registro relativamente suave y microaserrada.
3. **Subfacies Superior:** Alta porosidad, alto tiempo de tránsito, baja densidad y baja resistividad, con una curva de registro microaserrada.
4. **Subfacies Cima:** Alto tiempo de tránsito, baja densidad y baja resistividad con varios poros y fracturas, con una curva de registro que varía de microaserrada a campana digitada.

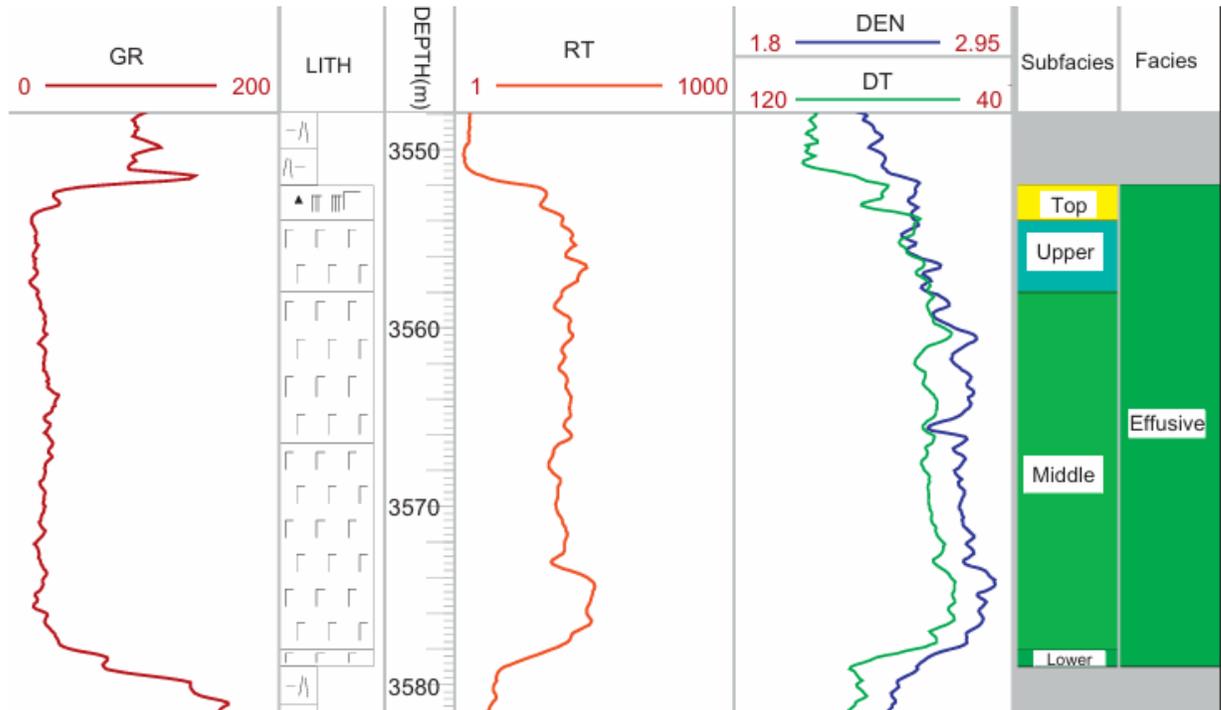


Figura 83. Respuesta de los registros para las facies efusivas, correspondiente al pozo (DD172). Tomado de Ran et al., (2014).

Facies Extrusivas: Las curvas de los registros de las facies extrusivas generalmente tienen una forma de caja aserrada, como se muestra en la Figura 84. Las respuestas de los registros geofísicos para las diferentes subfacies derivadas de las facies extrusivas se caracterizan de la siguiente manera:

1. **Subfacies de la Zona Exterior:** Contiene xenolitos y escombros volcánicos, con alto tiempo de tránsito, baja densidad y baja resistividad, y una curva de registro aserrada.
2. **Subfacies de la Mesozona:** Alto tiempo de tránsito, baja densidad y baja resistividad, con una curva de registro microaserrada.
3. **Subfacies de la Zona Interior:** Composición y textura consistentes, con litología densa, bajo tiempo de tránsito, alta-baja densidad y alta resistividad, con una curva de registro microaserrada.

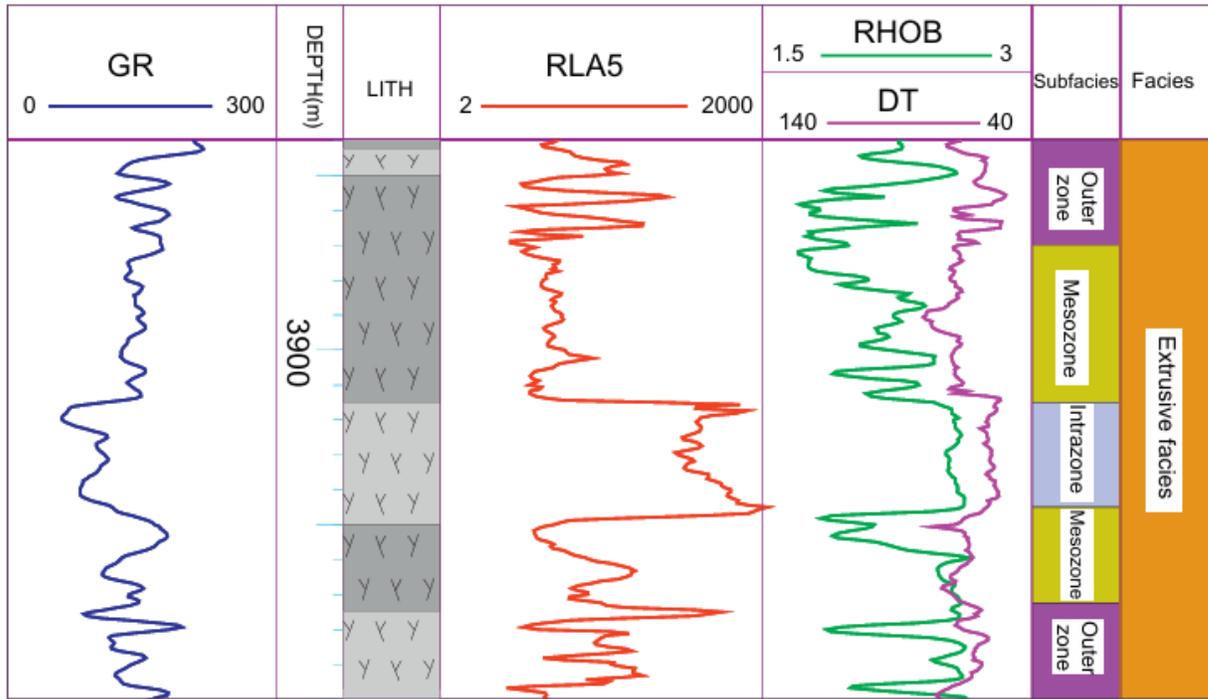


Figura 84. Respuesta de los registros para las facies extrusivas, correspondiente al pozo (XX2). Tomado de Ran et al., (2014).

Facies de Conductos Volcánicos: Las litologías, texturas y estructuras rocosas de las subfacies de los conductos volcánicos son diferentes, donde sus características de las respuestas de los registros se caracterizan de la siguiente manera, y como se muestra en la Figura 85:

1. **Subfacies de Brecha Criptoexplosiva:** Composición mixta, con densidad media-alta, resistividad media-alta y tiempo de tránsito medio-bajo, con una curva de registro aserrada.
2. **Subfacies de Cuello Volcánico:** Litología consistente, con alto tiempo de tránsito, baja densidad y baja resistividad, con una curva de registro suave en forma de caja.

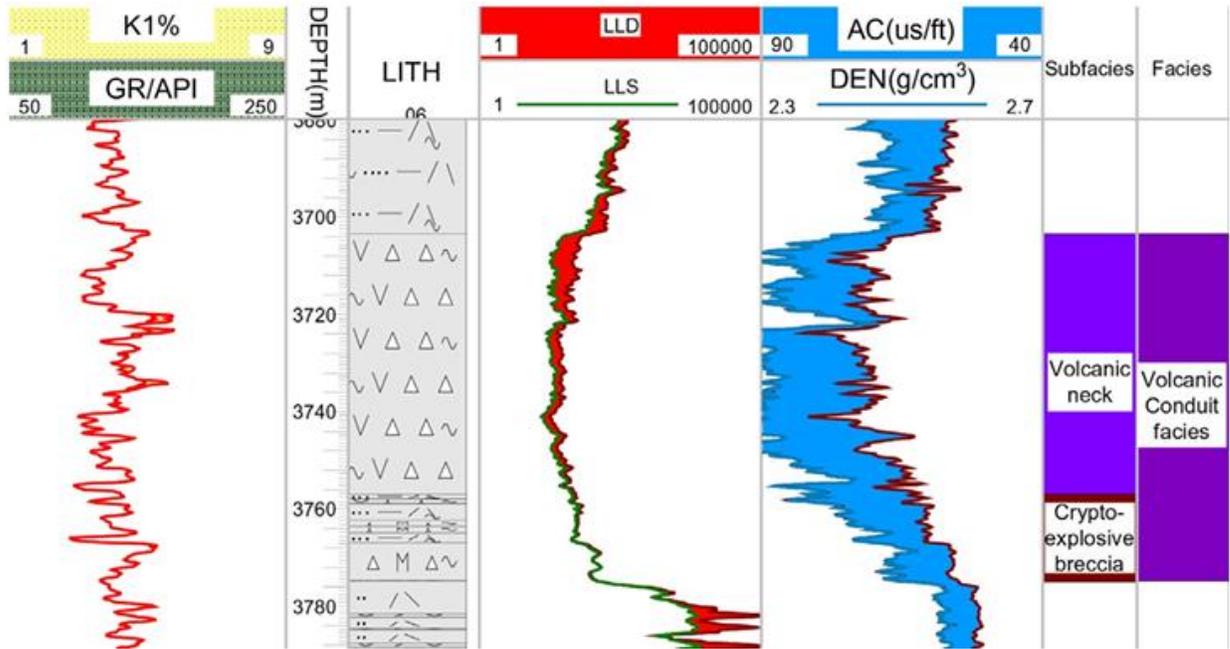


Figura 85. Respuesta de los registros para las facies de conducto volcánico, correspondiente al pozo (XX8). Tomado de Ran et al., (2014).

Facies Subvolcánicas: Las curvas de los registros de las facies subvolcánicas generalmente tienen forma de caja o campana microaserrada, como se muestra en la Figura 86. Las respuestas de los registros geofísicos para las diferentes subfacies derivadas de las facies subvolcánicas se caracterizan de la siguiente manera:

1. **Subfacies de la Zona Exterior:** Alto tiempo de tránsito, baja densidad y baja resistividad, con una curva de registro aserrada.
2. **Subfacies de la Mesozona:** Bajo tiempo de tránsito, alta densidad y alta resistividad, con una curva de registro microaserrada y suave.
3. **Subfacies de la Zona Interior:** Bajo tiempo de tránsito, alta densidad y alta resistividad, con una curva de registro suave.

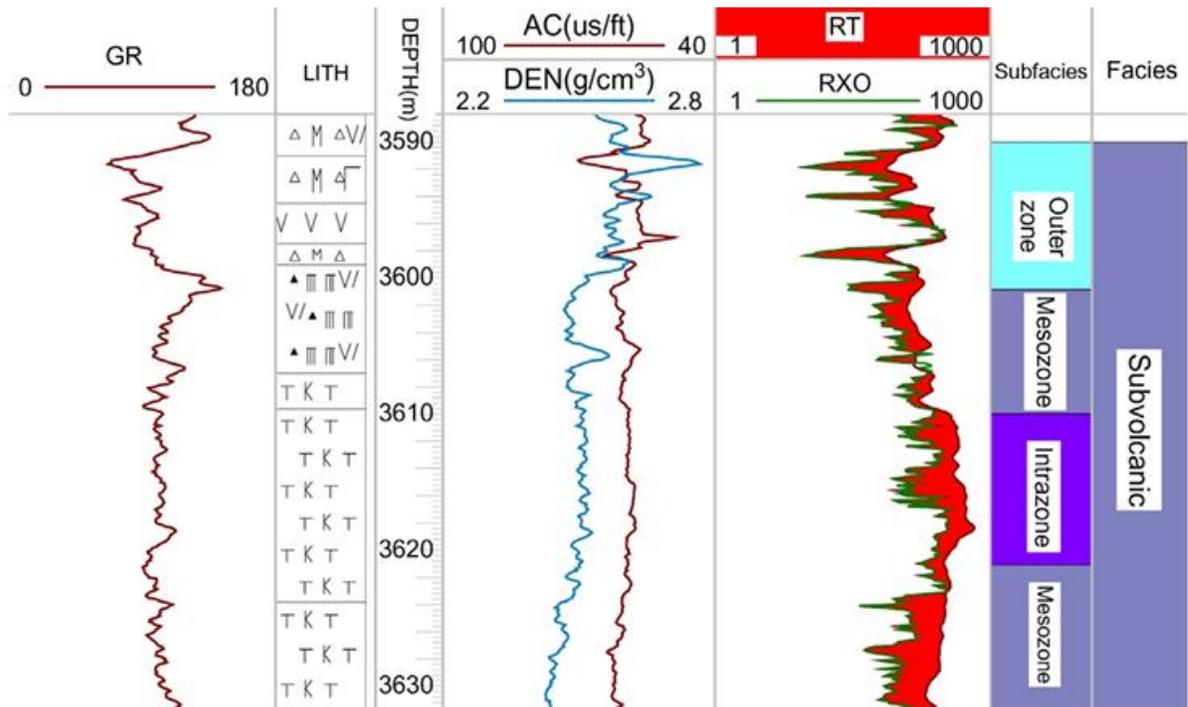


Figura 86. Respuesta de los registros para las facies subvolcánicas, correspondiente al pozo (DD1813). Tomado de Ran et al., (2014).

Facies Sedimentarias Volcánicas: Las facies sedimentarias volcánicas usualmente muestran un patrón compuesto de formas aserradas-digitadas o embudo campana en las curvas de registro, como se muestra en la Figura 87. Las respuestas de los registros geofísicos para las diferentes subfacies derivadas de las facies sedimentarias se caracterizan de la siguiente manera:

1. **Subfacies portadoras de Xenoclastos:** Alto tiempo de tránsito, baja densidad y baja resistividad, con una curva de registro microaserrada.
2. **Subfacies Retransportadas:** Alto tiempo de tránsito, baja densidad y baja resistividad, con una curva de registro aserrada.
3. **Subfacies de Toba carbonífera:** Alto tiempo de tránsito, baja densidad y alta resistividad, con una curva de registro aserrada-digitada.

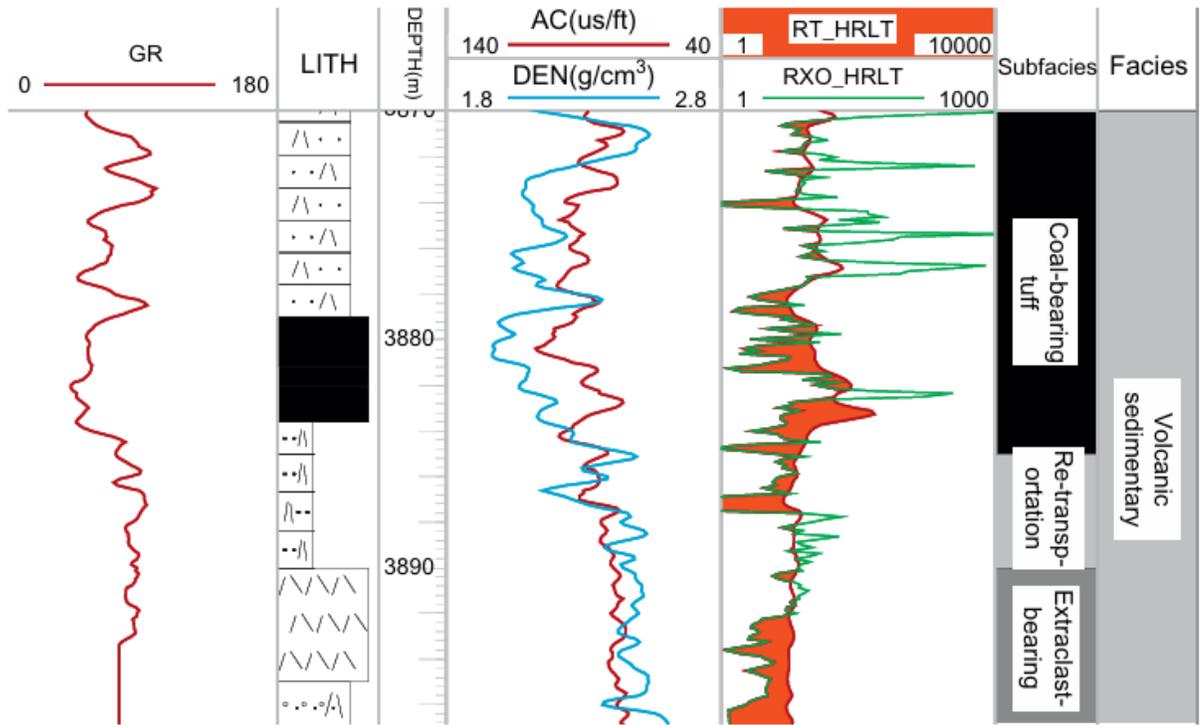


Figura 87. Respuesta de los registros para las facies sedimentarias volcánicas, correspondiente al pozo (DD1414). Tomado de Ran et al., (2014).

En la siguiente tabla se resume, la información de cada una de las descripciones de las respuestas de los registros.

Tabla 13. Características Facies y subfacies volcánicas.

Facies Volcánicas	Características del registro	Subfacies	Tiempo de Tránsito	Densidad	Resistividad	Forma de la Curva
Facies Explosivas	Patrón compuesto de formas de caja aserradas o microaserradas, formas de campana o embudo,	Subfacies de Caída	Alto	Baja	Baja	Aserrada
		Subfacies de Oleada Basal Caliente	Medio-Bajo	Medio-Alta	Medio-Alta	Microaserrada
		Subfacies de Flujo Clásico Caliente	Bajo	Alta	Alta	Suave y microaserrada
		Subfacies de Salpicadura	Alto	Baja	Baja	Aserrada
Facies Efusivas	Forma suave, de microaserrada a forma de caja o campana	Subfacies Inferior	Alto	Baja	Baja	Microaserrada
		Subfacies Media	Bajo	Alta	Alta	Relativamente suave y microaserrada
		Subfacies Superior	Alto	Baja	Baja	Microaserrada
		Subfacies Cima	Alto	Baja	Baja	Varía de microaserrada a campana digitada
Facies Extrusivas	Forma de caja aserrada	Subfacies de la Zona Exterior	Alto	Baja	Baja	Aserrada
		Subfacies de la Mesozona	Alto	Baja	Baja	Microaserrada
		Subfacies de la Zona Interior	Bajo	Alta-Baja	Alta	Microaserrada
Facies de Conductos Volcánicos		Subfacies de Brecha Criptoexplosiva	Medio-Bajo	Media-Alta	Media-Alta	Aserrada
		Subfacies de Cuello Volcánico	Alto	Baja	Baja	Suave en forma de caja
Facies Subvolcánicas	Forma de caja o campana microaserrada	Subfacies de la Zona Exterior	Alto	Baja	Baja	Aserrada
		Subfacies de la Mesozona	Bajo	Alta	Alta	Microaserrada y suave
		Subfacies de la Zona Interior	Bajo	Alta	Alta	Suave

Facies Sedimentarias Volcánicas	Patrón compuesto de formas aserradas- digitadas o embudo campana	Subfacies portadoras de Xenoclastos	Alto	Baja	Baja	Microaserrada
		Subfacies Re- transportadas	Alto	Baja	Baja	Aserrada
		Subfacies de Toba carbonífera	Alto	Baja	Alta	Aserrada- digitada

4.6.5. Identificación de facies volcánicas del pozo Mirador 2

Las rocas volcánicas presentan combinaciones complejas de secuencias de litofacies y cambios rápidos en los registros, lo que dificulta una división precisa de las litofacies utilizando únicamente los registros geofísicos. Por lo tanto, es necesario un análisis del entorno litofacial y de las interpretaciones litológicas de recortes de roca.

Un primer paso para el análisis y predicción de litofacies volcánicas, es mediante el análisis de los diferentes modelos de litofacies. Los modelos de litofacies horizontales ayudan a identificar las posibles facies volcánicas según la ubicación del pozo en relación con el edificio volcánico. La proximidad al cráter influye en las facies predominantes, variando desde facies complejas y de alta energía cerca del cráter, hasta facies más simples y de baja energía en zonas más distales. Mientras que los modelos de litofacies verticales permiten entender la organización estratigráfica y la secuencia de eventos volcánicos, facilitando la interpretación de la historia eruptiva y deposicional del volcán. (Ran et al., 2014).

Como se mencionó en la sección “Localización del pozo Mirador 2”. El pozo mirador 2, se encuentra ubicado en las cercanías a la estructura volcánica conocida como el Cerro de la Estrella como se muestra en la Figura 88. El cual es definido como un volcán en escudo, que se caracteriza por tener pendientes suaves y terminaciones de los flujos de lava de forma radial, con un cono de escorias en su cima. (Arce et al., 2015).

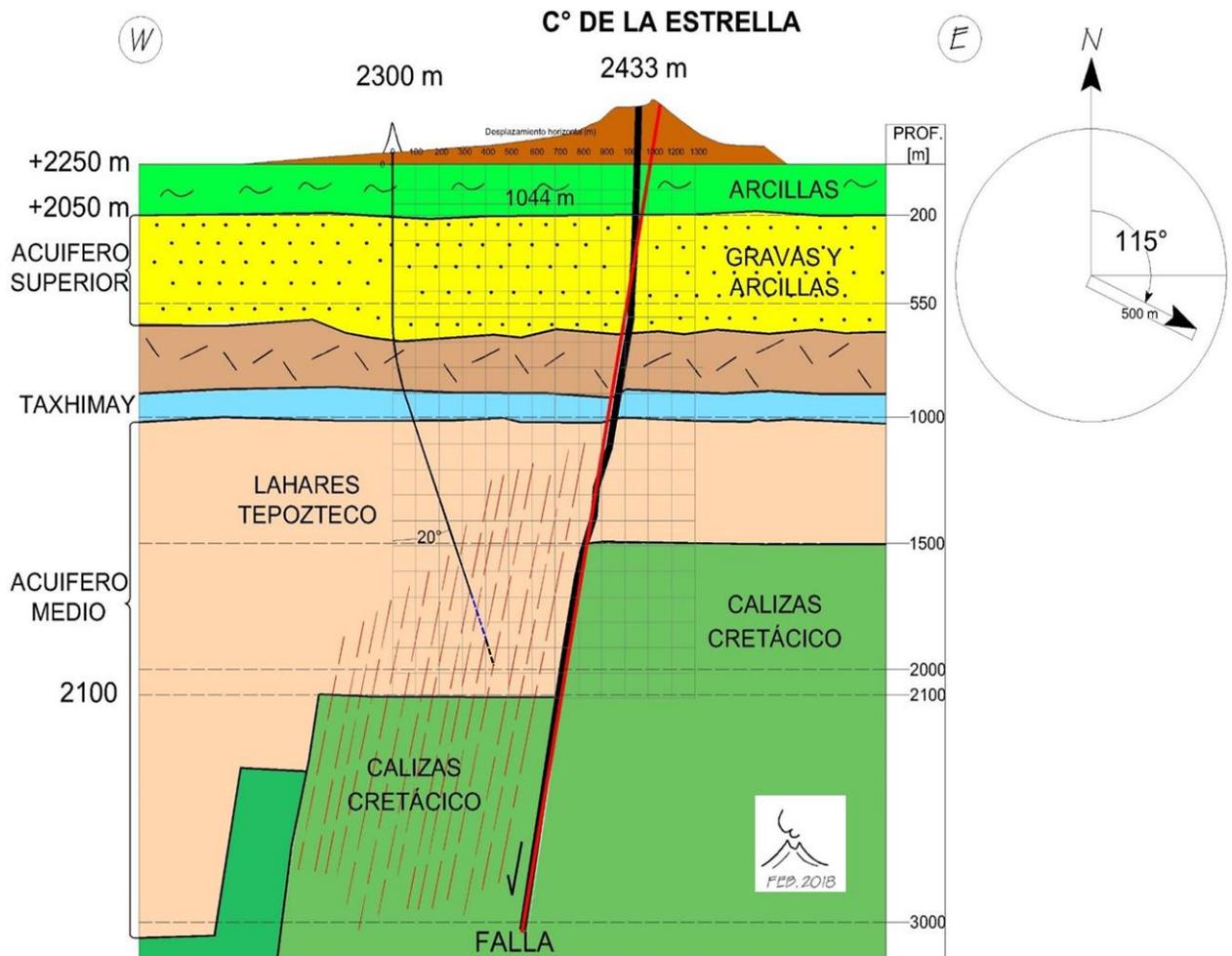


Figura 88. Ubicación del pozo Mirador 2 con respecto a la estructura volcánica del cerro de la Estrella. Cortesía de Pemex 2018.

De acuerdo a los modelos de litofacies horizontales, el pozo Mirador 2, se relaciona con las facies de carácter distal, donde las facies son predominantemente explosivas, efusivas y sedimentarias volcánicas. Es posible relacionar las formas y amplitudes de los diferentes cambios de los registros, con los modelos de litofacies de acuerdo a las características de distribución vertical. En la interpretación cualitativa de la segunda etapa del registro, se observó que las curvas presentaban cambios alternantes entre valores bajos y altos, y de acuerdo a los modelos de litofacies de distribución vertical, se puede interpretar que la segunda etapa del registro presenta una secuencia alternante, que describe que la energía de la erupción fue variable, alternando entre energía fuerte y débil, que da como resultado a la alternación de facies explosivas y facies efusivas como se mencionó en la Figura 80.

El pozo Mirador 2 cuenta con un total de siete núcleos. Los dos primeros núcleos corresponden a la primera etapa del registro, donde el intervalo de profundidad al que pertenecen no se consideró en la interpretación, ya que se encuentran en la parte final del registro. Por esto, se estimó que estos datos podrían contener ruido por el inicio de lectura de la herramienta. Sin embargo, estos núcleos nos permiten tener una idea de las

posibles facies volcánicas presentes en las capas aledañas. Estos núcleos fueron descritos en la sección “Descripción de núcleos”:

- El Núcleo (N-Mirador-2 T1-1), correspondiente al intervalo de 1060.62 md.
- El Núcleo (N-Mirador-2 T1-2), correspondiente al intervalo de 1062 md.

Los 5 núcleos restantes corresponden a la segunda etapa del registro, los cuales proporcionan información valiosa sobre las características litológicas para esta sección del registro. Estos núcleos de igual forma fueron descritos en la sección “Descripción de núcleos”:

- Núcleo (N-Mirador-2 T-6), correspondiente al intervalo de 1971.90 a 1973 md.
- Núcleo (N-Mirador-2 T-4), correspondiente al intervalo de 1974 a 1975 md.
- Núcleo (N-Mirador-2 T-3), correspondiente al intervalo de 1975a 1976 md.
- Núcleo (N-Mirador-2 T-2), correspondiente al intervalo de 1976 a 1977 md.
- Núcleo (N-Mirador-2 T-1), correspondiente al intervalo de 1977 a 1978 md.

Con esta información, se procedió a analizar los patrones en las curvas de ambas etapas, que concordaran con las características de las respuestas de los registros para las diferentes facies volcánicas, de acuerdo al trabajo de Ran, Q. et al. (2014) y los valores de la Tabla 13.

4.6.5.1. Primera Etapa

A continuación, se muestran unos ejemplos del análisis de la identificación de facies volcánicas para la primera etapa del registro, donde se compara con la respuesta del autor de la publicación fuente. En el intervalo de 785 a 806 md, se identificó una facies efusiva como se muestra en la Figura 89.

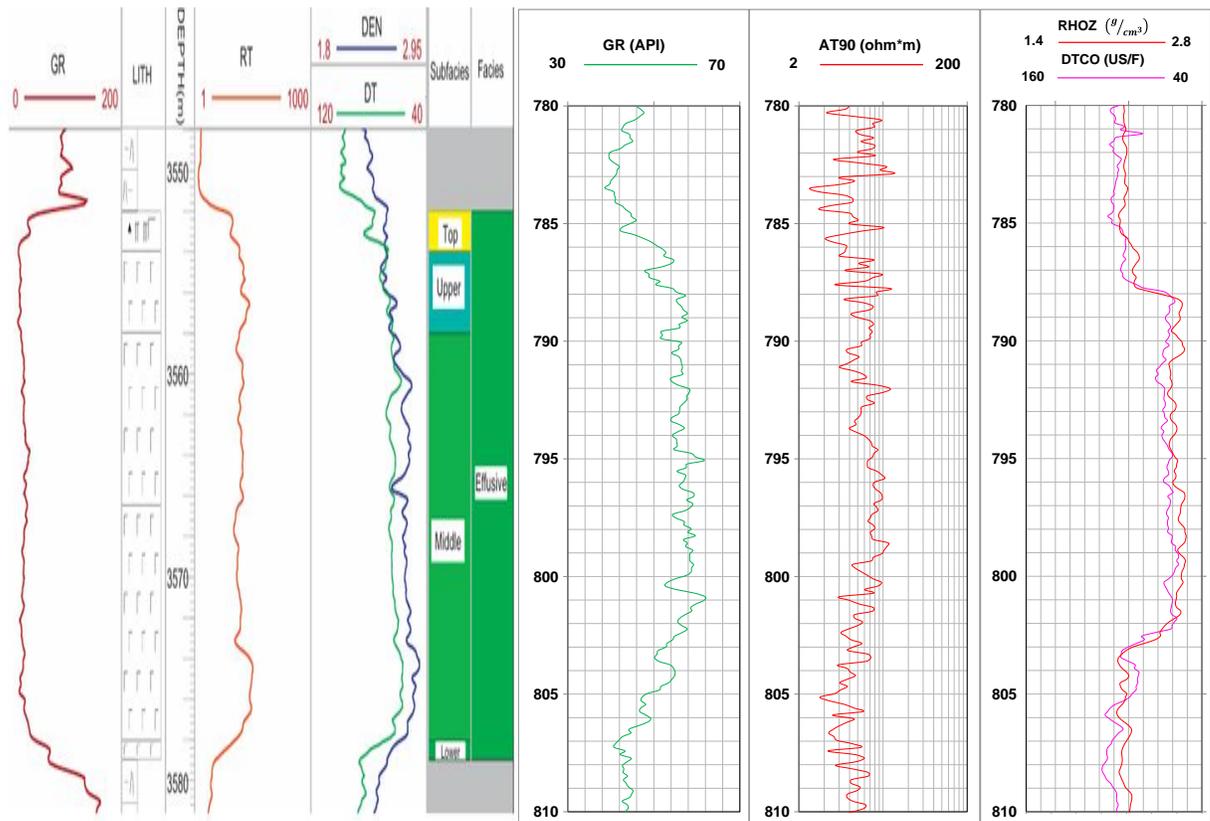


Figura 89. Ejemplo de identificación de facies efusivas en las curvas del registro, en el intervalo de 785 a 806 md correspondiente a la primera etapa.

En la figura anterior, se muestra la comparación de las respuestas de los registros para las facies efusivas. Se observa que las curvas del registro poseen una forma de caja microserrada, donde la curva de resistividad muestra valores altos, el registro sísmico muestra valores bajos de tiempo de tránsito y una densidad alta.

En el intervalo de 621 a 690 md, se identificó una facies explosiva como se muestra en la Figura 90.

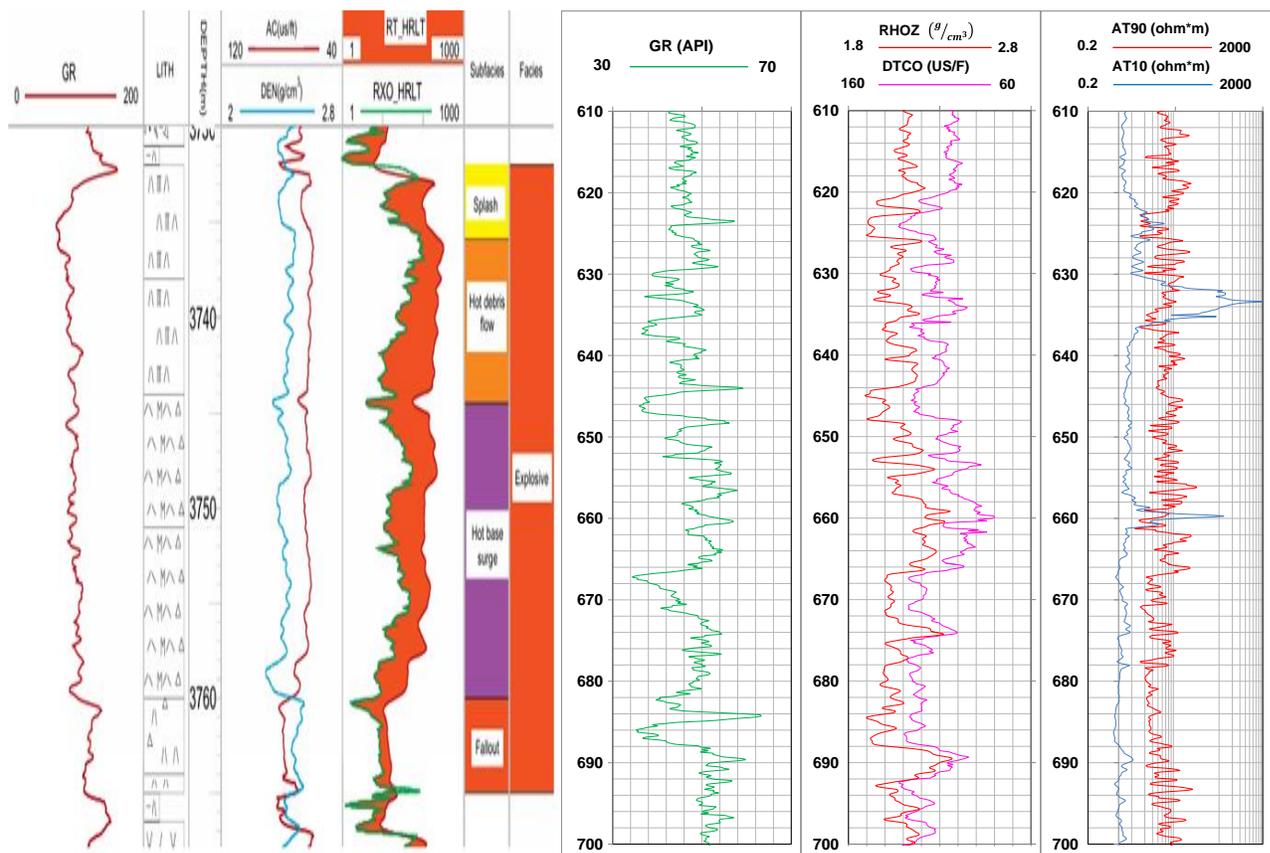


Figura 90. Ejemplo de identificación de facies explosivas en las curvas del registro, en el intervalo de 621 a 690 md correspondiente a la primera etapa.

En la figura anterior, se muestra la comparación de las respuestas de los registros para una facies explosiva. Se observa que las curvas del registro y del ejemplo siguen las mismas tendencias, donde las curvas de resistividad somera y profunda tienen cierta separación entre ellas, los saltos de la curva de resistividad somera (AT10) podrían relacionarse al fracturamiento de la formación, el registro de Rayos Gamma presenta cambios en sus valores, que indican una variación en los componentes mineralógicos de esta capa, lo que concordaría con una facie explosiva la cual contienen varios fragmentos líticos de diferentes litologías.

En el intervalo de 935 a 1010 md, se identificó una facies volcánica sedimentaria como se muestra en la Figura 91.

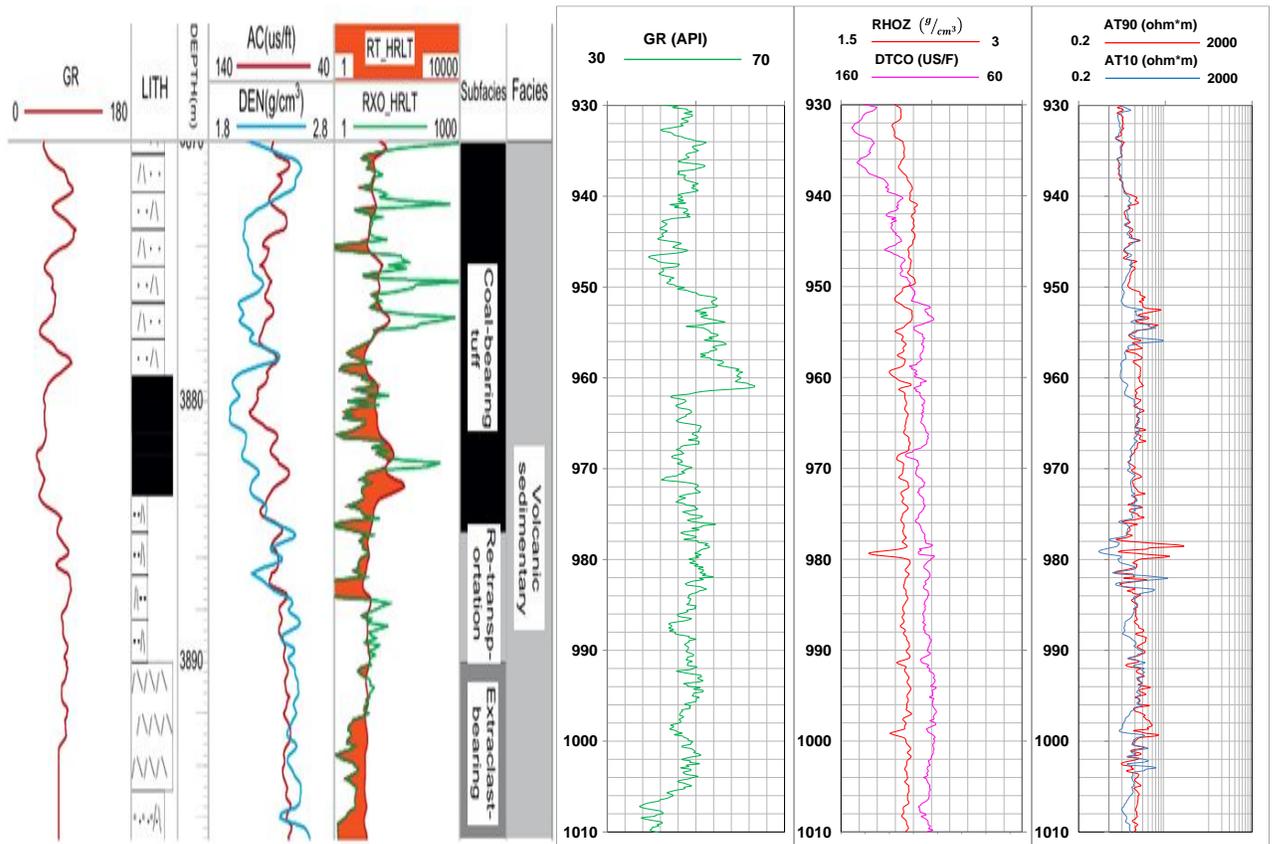
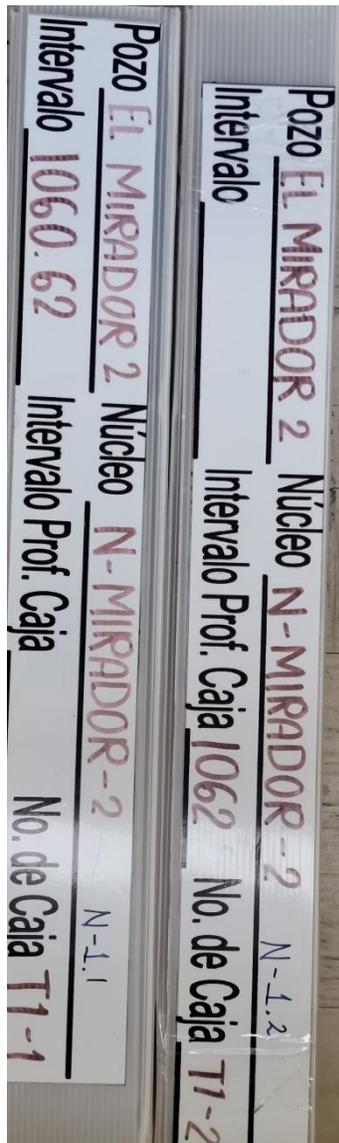


Figura 91. Ejemplo de identificación de facies volcánicas sedimentarias en las curvas del registro, en el intervalo de 935 a 1010 md correspondiente a la primera etapa.

En la figura anterior, se muestra la comparación de las respuestas de los registros para una facies volcánica sedimentaria. Se observa que las curvas de resistividad somera (A10) y profunda (AT90) en determinadas zonas se encuentran juntas y en otras se logran separar un poco, donde el registro de resistividad y densidad presenta valores bajos, el registro sísmico presenta altos valores de tiempo de tránsito.

Como se mencionó anteriormente, la primera etapa cuenta con dos núcleos. El primer núcleo pertenece al intervalo de 1060.62 md, el cual se encuentra fragmentado y con signos de alteración, y que pareciera presentar un contacto entre dos materiales diferentes. Un fragmento del núcleo tiene un color rojizo y presenta algunos clastos de color rosado, mientras que los demás fragmentos del núcleo presentan un color más oscuro (Figura 92). El segundo núcleo pertenece al intervalo de 1062 md, la roca presenta un color rojizo al igual que uno de los fragmentos del núcleo anterior, y es porosa al tacto, además de presenta algunos clastos de color rosado (Figura 92). Estos núcleos pueden clasificarse como flujos piroclásticos, que, de acuerdo con su intervalo de profundidad, concuerdan con las características de una facies sedimentaria volcánica, identificada en el intervalo de 935 a 1010md.



a) Núcleos empaquetados.

b) Vista superior de los núcleos.

Figura 92. Núcleos MIRADOR 2, pertenecientes a la primera etapa.

De acuerdo al análisis sobre la identificación de facies volcánicas, es posible realizar una columna de las diferentes facies correspondientes a la primera etapa del registro, la cual se muestra en la Figura 93.

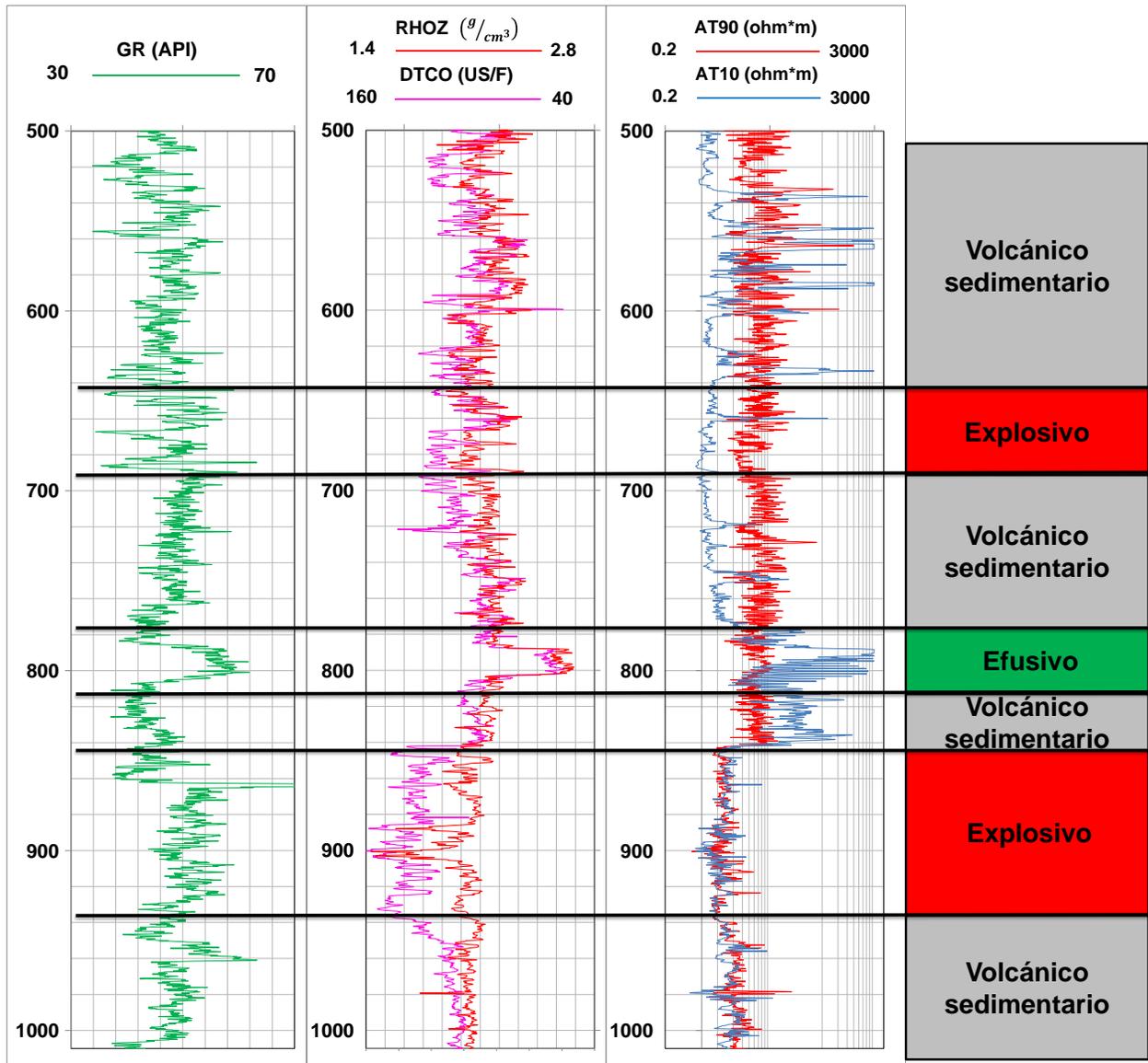


Figura 93. Litofacies volcánicas del pozo Mirador 2, correspondiente a la primera etapa.

4.6.5.2. Segunda Etapa

A continuación, se muestran unos ejemplos del análisis de la identificación de facies volcánicas para la segunda etapa del registro, donde se compara con la respuesta del autor de la publicación fuente.

En las curvas correspondientes a la segunda etapa, se identifican varios patrones o tendencias de facies efusivas. En el intervalo de 1250 a 1330 md, se identificó una facies efusiva como se muestra en la Figura 94.

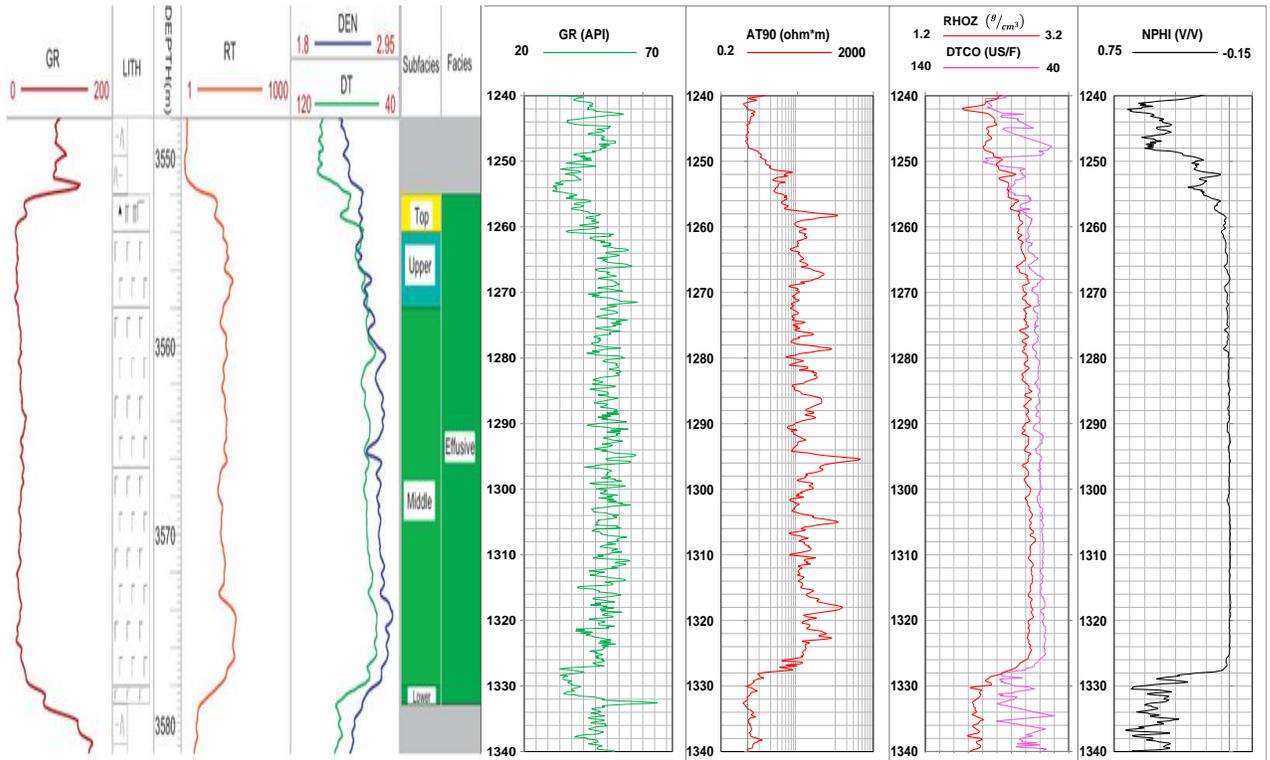


Figura 94. Ejemplo de identificación de facies efusivas en las curvas del registro, en el intervalo de 1250 a 1330 md, correspondiente a la segunda etapa.

En la figura anterior, se muestra la respuesta de los registros para las facies efusivas. Se observa que las respuestas de los registros poseen una forma de caja microserrada, donde la curva de resistividad muestra valores altos, el registro sónico muestra valores bajos de tiempo de tránsito y una densidad alta.

En la Figura 95, se identifican dos facies efusivas diferentes, que se encuentran delimitadas por las subfacies efusivas. Donde la primera facies efusiva corresponde al intervalo de 1585 a 1654 md, y la segunda corresponde al intervalo de 1654 a 1728 md.

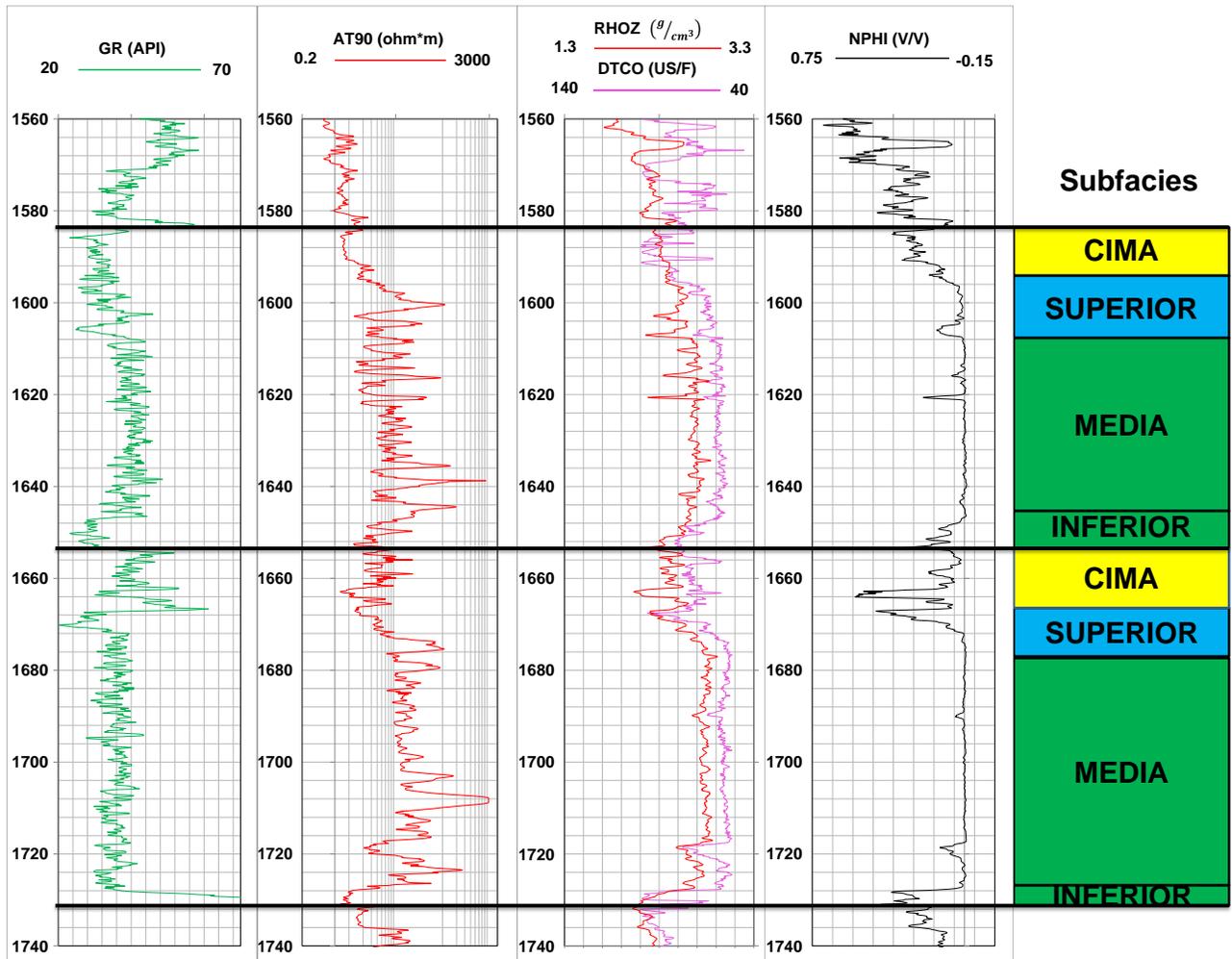


Figura 95. Ejemplo de identificación de 2 facies efusivas en las curvas del registro, delimitadas por las subfacies efusivas en el intervalo de 1585 a 1654 md y 1654 1728 md, correspondiente a la segunda etapa.

Se identificó una facies volcánica sedimentaria de re - transporte, en el intervalo correspondiente de 1220 a 1240 md (Figura 96). Esta subfacies se forma por depósitos volcanoclasticos re - trabajados por la corriente de agua.

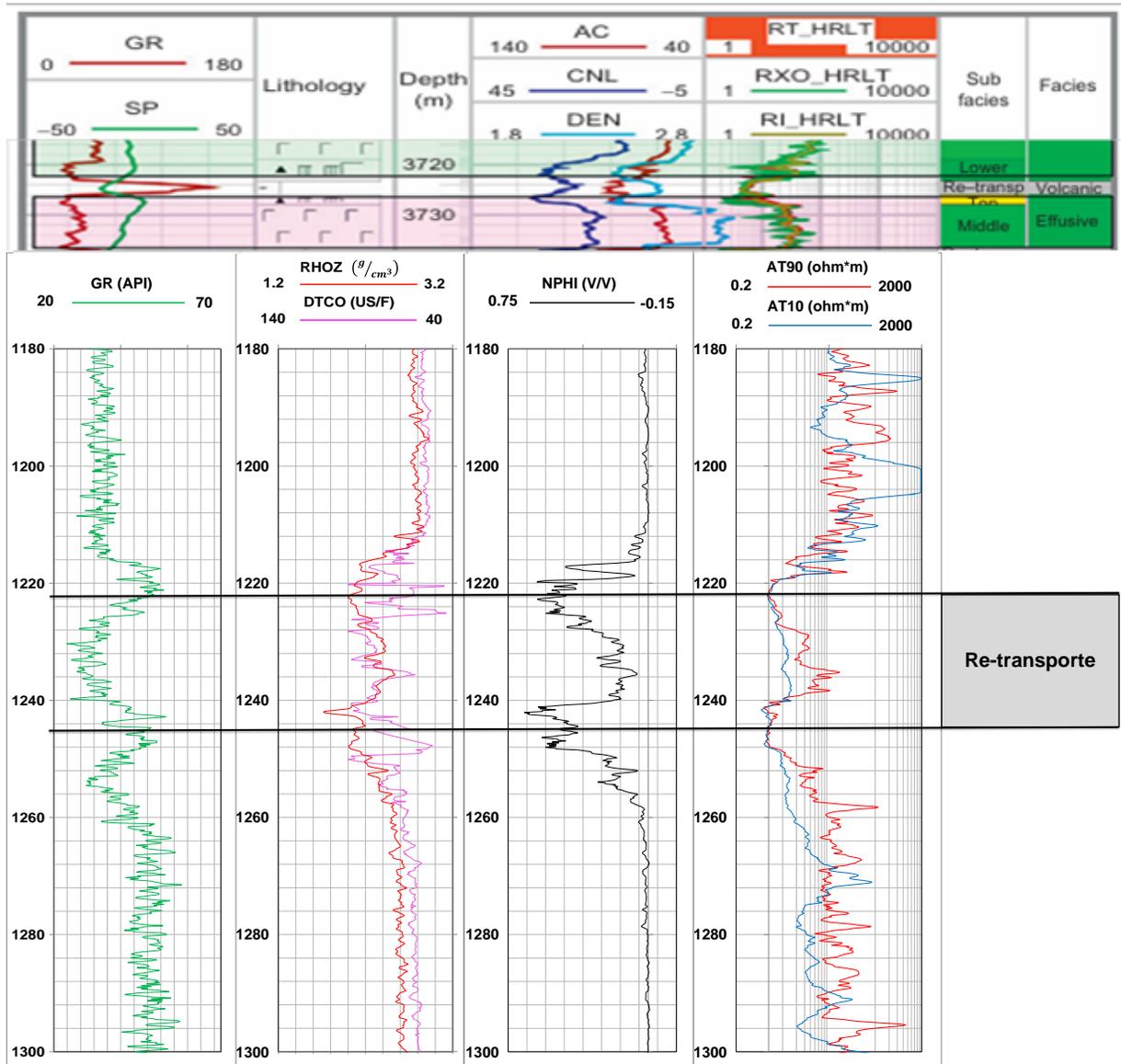


Figura 96. Ejemplo de identificación de facie volcánica sedimentaria re-transportada en las curvas del registro, en el intervalo de 1220 a 1240 md, correspondiente a la segunda etapa.

En la figura anterior, se muestra la respuesta de los registros para una facie sedimentaria volcánica de Re-transporte. En este intervalo, las curvas presentan un patrón de doble pico con un valle entre ellas, característico en este tipo de facies. Donde la curva de densidad y resistividad presenta un aumento, seguido de una disminución en sus valores. Este comportamiento se replica en las curvas de Rayos Gamma y porosidad de neutrón, donde se observa un cambio de valores altos a bajos, mientras el registro sísmico muestra una respuesta variable, que refleja la heterogeneidad de la unidad con sus variaciones en el grado de competencia de la formación, y la saturación de fluidos.

En el intervalo aproximado de 1537 a 1590 md, se identificó una facie volcánica explosiva como se muestra en la Figura 97.

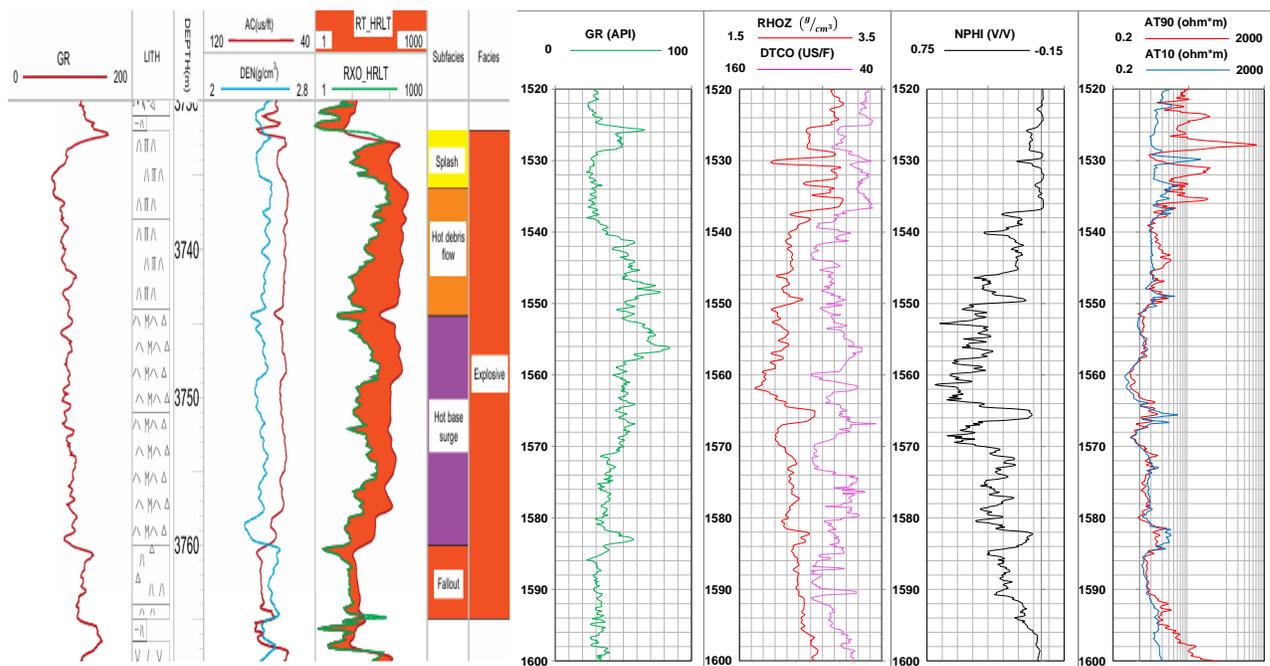


Figura 97. Ejemplo de identificación de facies explosivas en las curvas del registro, en el intervalo de 1537 a 1590 md, correspondiente a la segunda etapa.

En la figura anterior, se muestra la respuesta de los registros para las facies efusivas. Se observa que la curva de Rayos Gamma presenta variaciones significativas en sus valores, que indica una heterogeneidad en la composición mineralógica de la formación. Las curvas de resistividad somera (AT10) y profunda (AT90), presentan valores bajos de resistividad, las cuales no presentan una separación grande entre ellas. Las curvas de densidad presentan valores medio-bajos, junto con altos valores de porosidad de neutrón, mientras que el registro sísmico presenta valores medios, donde el grado de competencia de la formación es variable.

En el intervalo de 1948 a 2370 md, las respuestas de los registros son homogéneas, que se interpreta como una sola unidad litológica. En este intervalo se cuentan con cinco núcleos. Estos núcleos comparten características similares, se describen como una roca de color gris, que contienen pequeños clastos subangulosos de colores gris oscuro, gris claro y rojizo (Figura 98).

Por otro lado las respuestas de los registros en este intervalo (Figura 99), se pueden relacionar con una facies volcánica sedimentaria, donde las curvas de resistividad somera (AT10) y profunda (AT90) presenta valores bajos, donde no se observa una separación significativa entre ellas, la curva de densidad presenta valores medio-altos, junto con valores bajos de porosidad neutrón, y valores medio-altos del registro sísmico, el cual no presenta variaciones significativas en el grado de competencia de la formación. Por lo que, conforme a los datos obtenidos de los núcleos y los registros, se identificó a esta zona como un flujo de material piroclástico con matriz de ceniza color gris de gran espesor.

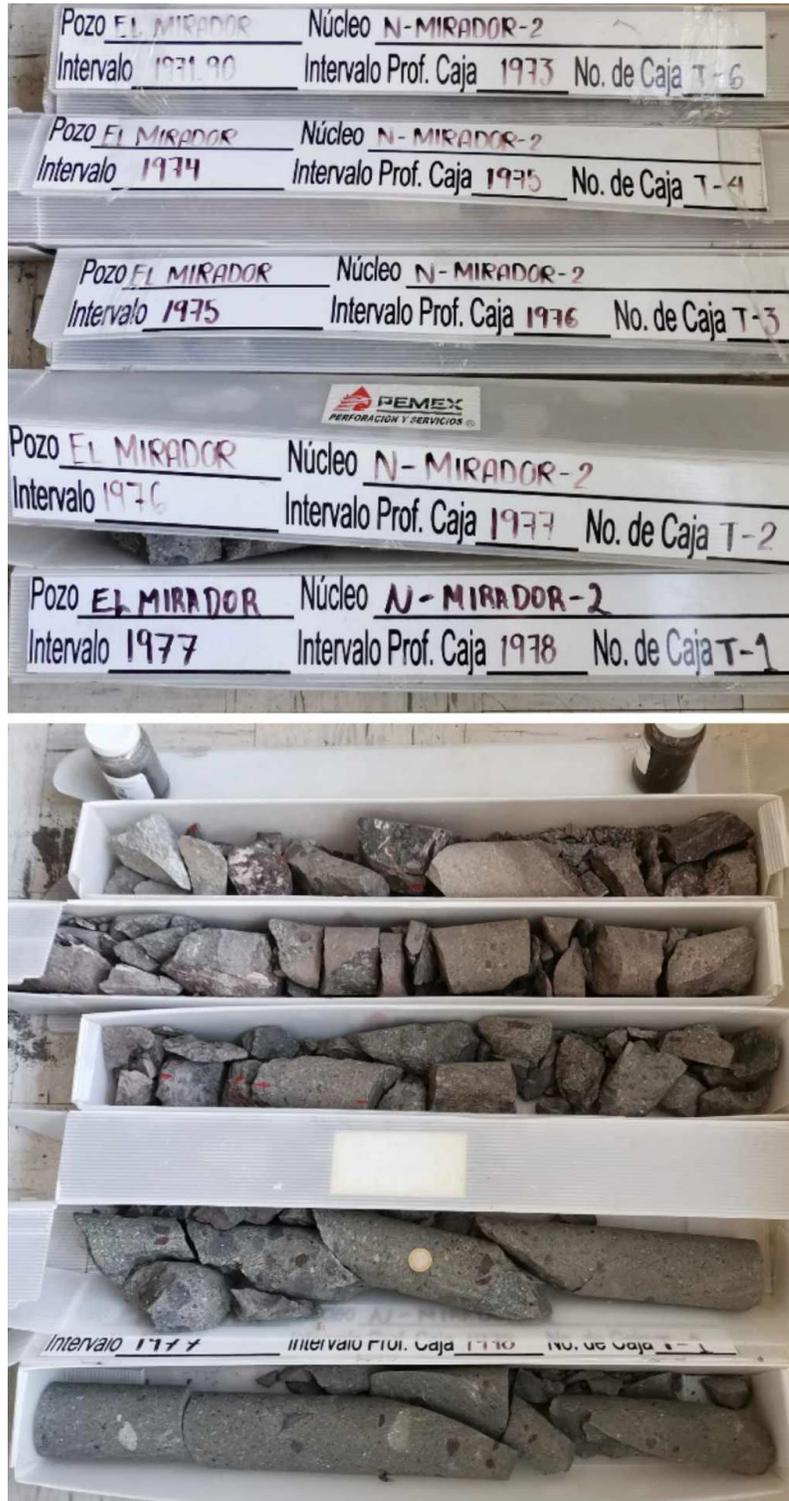


Figura 98. Núcleos MIRADOR 2, pertenecientes a la segunda etapa.

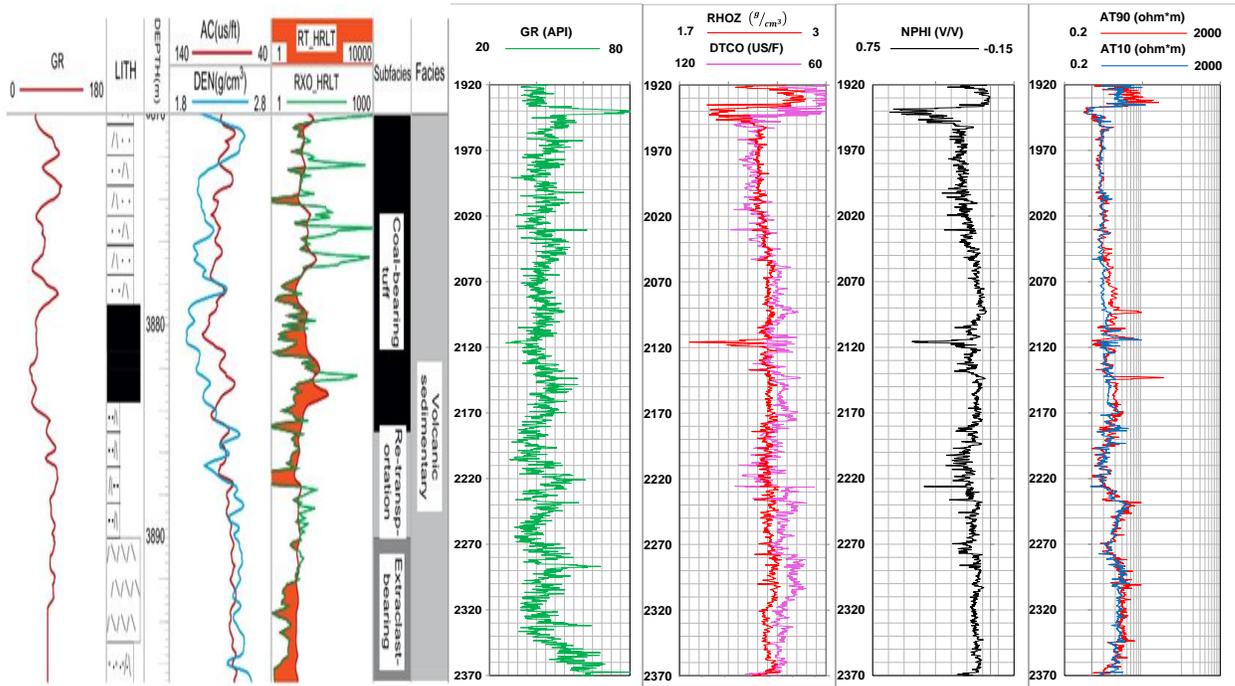


Figura 99. Ejemplo de identificación de facies volcánicas sedimentarias en las curvas del registro, en el intervalo de 1948 a 2370 md correspondiente a la segunda etapa.

De acuerdo a los análisis anteriores de identificación de facies volcánicas, es posible realizar una columna de las diferentes facies correspondientes a la segunda etapa del registro, la cual se muestra en la Figura 100.

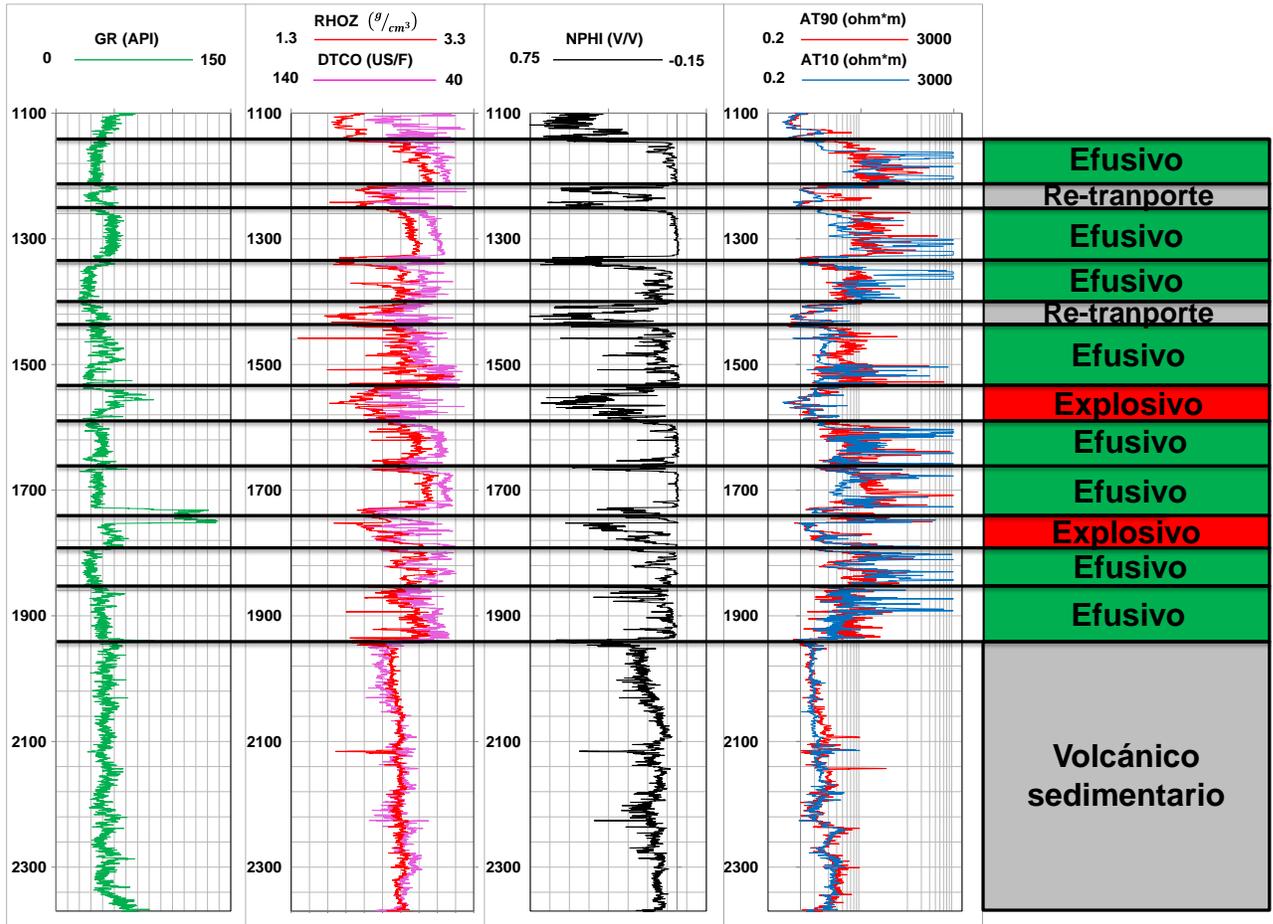


Figura 100. Litofacies volcánicas del pozo Mirador 2, correspondiente a la segunda etapa.

4.7. Columna propuesta

Como se mencionó en la sección de la metodología, la creación de las columnas de unidades de cada etapa del registro, se realizó a partir de los dos análisis de grupos, tanto de registros físicos y espectroscopia de Rayos Gamma, junto con la información proporcionada del análisis de facies volcánicas, donde cada una de estas unidades se caracterizó a partir de los valores de los registros, mediante el método de “Boxplot” y se compararon estos valores con diferentes tablas de propiedades petrofísicas para rocas ígneas, y finalmente realizar una interpretación litológica de cada una de las unidades.

En la Figura 101, se muestran los rangos de densidad para diferentes tipos de rocas ígneas. En las siguientes tablas (Tabla 14, 15, 16 y 17), se muestran rangos de valores obtenidos de estudios sobre las propiedades de diferentes rocas ígneas como lo son: los contenidos de Torio, Uranio y Potasio, y el contenido de sílice para distintas rocas efusivas.

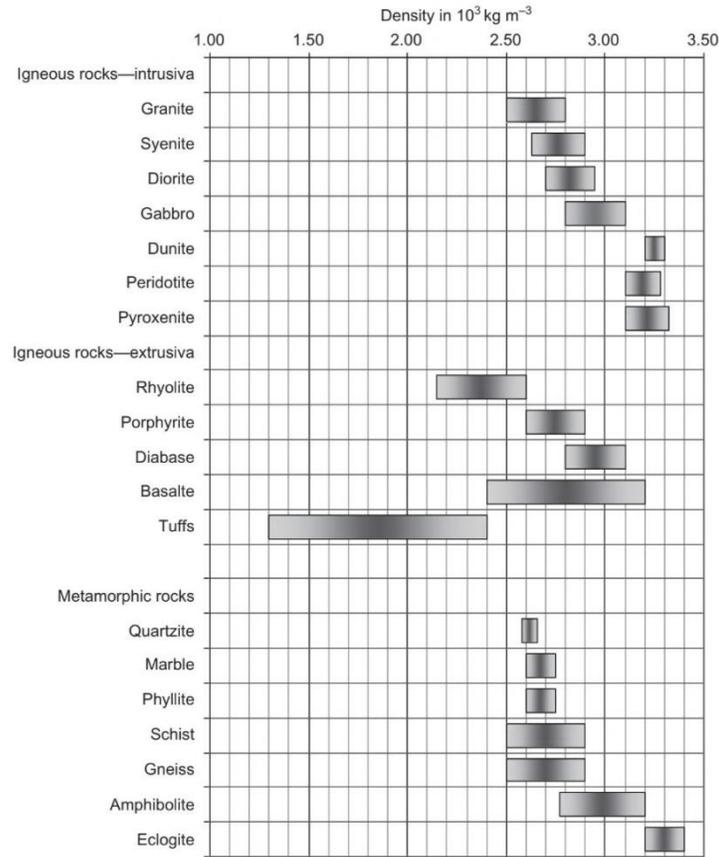


Figura 101. Rango de densidad de diferentes rocas ígneas. (Schön, 2015).

Tabla 14. Promedio de valores isotrópicos de estroncio para rocas seleccionadas de arcos volcánicos y continentales. Carmichael, 2017.

Localidad	Basalto (<52% SiO ₂)	Basalto Andesítico (52-55% SiO ₂)	Andesita (55-63% SiO ₂)	Dacita (63-68% SiO ₂)	Riolita (>68% SiO ₂)
Nueva Bretaña	0.7035	0.7036	0.7036	0.7036	0.7035
Tonga	—	0.7037	0.7042	0.7043	—
Marianas	0.7042	—	0.7042	0.7038	—
Islas Izu	0.7036	—	0.704	—	0.7034
Caribe					
St. Kitts	0.7036	0.704	0.7038	—	—
St. Vincent	0.7042	0.704	0.7039	—	—

Localidad	Basalto (<52% SiO ₂)	Basalto Andesítico (52-55% SiO ₂)	Andesita (55-63% SiO ₂)	Dacita (63-68% SiO ₂)	Riolita (>68% SiO ₂)
Carriacou	0.7052	—	0.7054	—	—
Norte de Japón	0.7043	—	0.7041	—	—
California					
Mt. Shasta	—	0.7039	0.703	0.7032	—
Mt. Lassen	0.7039	0.7032	0.704	—	—
Lago Medicine	0.7034	0.7037	—	—	0.704
América Central	0.7035	0.7042	0.7036	0.7036	0.7042
Nueva Zelanda					
Taupo	0.7042	—	0.7055	0.7051	—
Promedio	0.704	0.7038	0.704	0.7037	0.7038

Tabla 15. Contenido de Th, U y K de rocas ígneas. Schön, (2015).

Tipo de roca	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Th/U
Granito	4-7	15-40	3.4-4.0	3.5-5.6
Granodiorita	2.1	8.3	2.3	4
Diorita	1.8	6	1.8	3.3
Gabro, diabasa	0.6	1.8	0.7	3
Dunita, piroxenita	0.03	0.08	0.15	2.7
Basaltos	0.7	2.3	1	3.2

Tabla 16. Contenido de Th, U y K de rocas ígneas. Schön, (2015).

Tipo de roca	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	References
Intrusivas				
Granito	2.75–4.26	3.6–4.7	19–20	BA
Rocas graníticas (avg)	4.11	4.35	15.2	Sch
Rocas graníticas	2.3–4.0	2.1–7.0	8.3–40	Do
Granito con biotita	3.4	4	15	D
Sienita	2.7–4.9	2500	1300	BA
	2.63	2500	1338	Sch
Gabro	0.46–0.58	0.84–0.90	2.70–2.85	Sch
Granodiorita	2–2.5	2.6	9.3–11	BA, Sch
	2.3	2.1	8.3	Do
Diorita	1.1	2	8.5	BA, Sch
	1.8	1.8	6	Do
Dunita	<0.02	<0.01	<0.01	BA, Sch
Dunita, piroxenita	0.15	0.03	0.08	D
Peridotita	0.2	0.01	0.05	BA, Sch
Extrusivas				
Riolita	4.2	5		BA
	2–4	2.5–5	6–15	Sch
Traquita	5.7	2–7	9–25	Sch
Basalto	0.61	0.99	4.6	BA, Sch

Tipo de roca	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	References
alcalino				
Basalto de meseta	0.61	0.53	1.96	BA, Sch
Andesita	1.7	0.8	1.9	Sch
	1.7	1.2	4	D
Dacita	2.3	2.5	10	D
Liparita	3.7	4.7	19	Do

Tabla 17. Contenido de Th, U y K de algunas rocas ígneas. (Schön, 2015).

Tipo de roca	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)
Intrusivas ácidas			
Granito			
Rhode Islanda	1.32–3.4 (1.99)	21.5–26.6 (25.2)	3.92–4.8 (4.51)
Rhode Islanda	1.3–4.7 (4)	6.5–80 (52)	5.06–7.4 (5.48)
Precámbrica	3.2–4.6	14–27	2–6
Promedio	4.35	15.2	4.11
Sienita	2500	1338	2.63
Intrusivas básicas			
Gabro	0.84–0.9	2.7–3.85	0.46–0.58
Granodiorita	2.6	9.3–11	2–2.5
Diorita	2	8.5	1.1
Dunita	0.01	0.01	0.02

Tipo de roca	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)
Peridotita	0.01	0.05	0.2
Extrusivas ácidas			
Riolita	2.5–5	6–15	2–4
Traquita	2–7	9–25	5.7
Extrusivas básicas			
Basalto alcalino	0.99	4.6	0.61
Basalto de meseta (Oregón)	0.53	1.96	0.61
Olivino alcalino	1.4	3.9	1.4
Basalto	1.2–2.2 (1.73)	5.5–15 (6.81)	1.4–3.23 (1.68)

4.7.1. Primera etapa

En la Figura 102, se muestra la construcción de la columna a partir de los dos análisis de grupos. En la Figura 103, se muestra el resultado de la columna de unidades con su respectivo índice de profundidad de cada una de las capas.

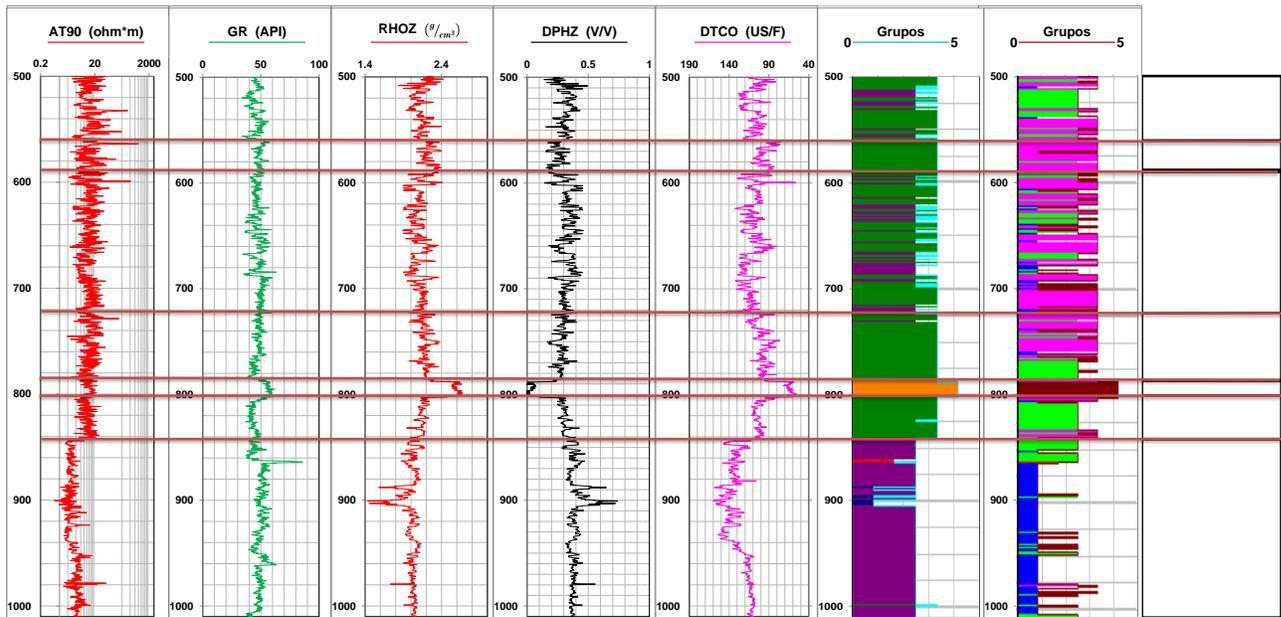


Figura 102. Construcción de la columna de unidades litológicas correspondiente a la primera etapa.

Se caracterizó cada una de las unidades en orden de la profundidad a la que se encuentran, y se realiza una interpretación litológica comparando los datos de los registros con valores de tablas.

- **Unidad 1 (500 - 558 md)**

La primera unidad presenta valores moderados a altos de resistividad que van de 6.71 a 22.29 ohm*m, que pueden ser características de rocas ígneas alteradas o rocas sedimentarias compactadas con posible contenido de fluidos. Los valores de densidad son bajos a moderados que van de 2.03 a 2.18 g/cm³, que pueden ser características de rocas ígneas alteradas o de rocas sedimentarias. Posee valores de porosidad altos de 0.279 a 0.373 V/V, lo que puede indicar una capa con posible almacenamiento de fluidos. Presenta valores bajos a moderados de Rayos Gamma que van de 41.65 a 47.02 API, que en complementación con el registro de espectroscopia, con valores de contenido de Uranio que van de 0.35 a 0.95 PPM, un contenido de Torio de 3.70 a 4.57 PPM, y contenido de Potasio de 2.4 a 2.8 %, lo que lo que indica un contenido bajo a moderado de minerales radiactivos. El registro sónico presenta valores altos con un rango de 101.33 a 120.88 US/F, lo que puede indicar una capa de menor competencia y mayor porosidad. El contenido de sílice indica valores moderados que van de 54.62 a 56.66 %, que es característico de rocas ígneas de composición intermedia. Con esta información se puede interpretar esta capa como una litología que ha sido influenciada significativamente por la actividad volcánica, y que podría ser una mezcla de materiales sedimentarios y volcánicos alterados.

- **Unidad 2 (558 - 590 md)**

La segunda unidad presenta valores moderados a altos de resistividad que van de 7.73 a 25.71 ohm*m, que pueden ser características de rocas ígneas alteradas o rocas

sedimentarias compactadas con posible contenido de fluidos. Los valores de densidad son de bajos a moderados con un rango de 2.13 a 2.28 g/cm³, que pueden pertenecer a rocas sedimentarias o rocas ígneas alteradas. Los valores de porosidad son moderados con un rango de 0.224 a 0.31 V/V, lo que puede indicar una capa con posible almacenamiento de fluidos. Los valores de Rayos Gamma van de bajos a moderados con un rango de 46.44 a 50.89 API, que en complementación con el registro de espectroscopia, con valores de contenido de Uranio que van de 0.30 a 0.93 PPM, un contenido de Torio de 3.49 a 4.47 PPM, y contenido de Potasio de 2.8 a 3 %, lo que indica un contenido bajo a moderado de minerales radiactivos. El registro sísmico presenta valores moderados que van de 91.20 a 106.29 US/F, lo que puede indicar rocas con poca competencia y mayor porosidad. El contenido de sílice presenta valores moderados de 56.44 a 58.13 %, que son característicos de rocas de composición intermedia. Con esta información se puede interpretar esta capa como una roca con sedimentos volcánicos alterados.

- **Unidad 3 (590 - 740 md)**

La tercera unidad presenta valores moderados de resistividad que van de 7.66 a 18.59 ohm*m, que pueden ser típicos de rocas ígneas alteradas o rocas sedimentarias con baja compactación y contenido de fluidos. Los valores de densidad son relativamente bajos con un rango de 2.03 a 2.17 g/cm³, característicos de rocas ígneas volcánicas alteradas o de rocas sedimentarias. Posee moderados valores de porosidad de 0.288 a 0.370 V/V, lo que podría indicar una roca con alta capacidad de almacenamiento de fluidos, que puede relacionarse a una sedimentaria o una roca ígnea alterada. Los valores de Rayos Gamma son bajos a moderados con un rango de 45.22 a 50.52 API, que, en complementación con el registro de espectroscopia, con valores de contenido de Uranio que van de 0.45 a 1.07 PPM, un contenido de Torio con valores de 3.48 a 5.05 PPM, y contenido de Potasio de 2.7 a 3 %, lo que indica un contenido bajo a moderado de minerales radiactivos. El registro sísmico presenta valores moderados que van de 103.78 a 118.85 US/F, lo que puede indicar rocas con baja competencia. Por otro lado, el contenido de sílice con valores de 55.97 a 57.99 %, indica rocas de composición intermedia. Con esta información se puede interpretar esta capa como sedimentos con material volcánico, que también podrían tener alta porosidad.

- **Unidad 4 (740 - 784 md)**

La cuarta unidad presenta valores moderados de baja resistividad de 8.73 a 18.12 ohm*m, que pueden ser típicos de rocas ígneas o sedimentarias con cierta compactación y contenido de fluidos. Los valores de densidad son relativamente bajos a moderados con un rango de 2.15 a 2.22 g/cm³, característicos de rocas ígneas volcánicas alteradas o de rocas sedimentarias. Posee valores bajos a moderados de rayos gamma con un rango de 43.84 a 48.93 API, lo que sugiere un contenido bajo de minerales radiactivos, que en complementación con el registro de espectroscopia con valores de contenido de Uranio que van de 0.21 a 0.79 PPM, contenido de Torio de 3.72 a 4.49 PPM, y contenido de Potasio de 2.7 a 3 %. El registro sísmico presenta valores moderados a altos que van de 92.12 a 100.72 US/F, que puede sugerir rocas con cierto grado de porosidad o alteración.

El contenido de sílice presenta valores intermedios con un rango de 55.45 a 57.38 %, los cuales indican rocas de composición intermedia. Con esta información la litología de esta capa se puede relacionar a materiales sedimentarios y volcánicos alterados, como una toba volcánica o una andesita alterada.

- **Unidad 5 (784 - 802 md)**

La quinta unidad presenta valores moderados de baja resistividad de 9.17 a 15.43 ohm*m, que pueden indicar rocas ígneas alteradas o rocas sedimentarias. Los valores de densidad son moderadamente altos con valores de 2.53 a 2.62 g/cm³, que pueden ser característicos de ciertas rocas ígneas o rocas sedimentarias más compactas. Posee una baja porosidad con valores de 0.012 - 0.067 V/V, lo que indica una roca con poca capacidad de almacenamiento de fluidos, más densa y que esta menos alterada. Los valores de Rayos Gamma son moderados con un rango de 54.11 a 57.65 API, que puede indicar una presencia significativa de minerales radiactivos, que en complementación con el registro de espectroscopia con valores de contenido de Uranio que van de 0.51 a 1.23 PPM, contenido de Torio de 5.02 a 7.34 PPM, y contenido de potasio de 2.8 a 3.1 %. El registro sísmico indica valores moderados que van de 61.85 a 68.98 US/F, lo que indica una capa con mayor competencia. El contenido de sílice indica valores moderadamente altos con un rango de 59.35 a 60.70 %, lo que puede indicar rocas ígneas de composición intermedia. Teniendo estos valores en cuenta, una interpretación sobre la litología de esta capa puede sugerir una roca ígnea de composición intermedia como la andesita, que posee baja porosidad, moderados valores de densidad y resistividad, o dacita que presenta un contenido de sílice un poco más alto que la andesita. De acuerdo al contenido de sílice esta unidad se caracterizó como una andesita.

- **Unidad 6 (802 - 839 md)**

La sexta unidad presenta valores moderados de baja resistividad de 8.09 a 13.52 ohm*m, que puede indicar rocas sedimentarias saturadas de agua o de rocas ígneas sedimentarias muy alteradas. Los valores de densidad son moderadamente bajos de valores de 2.12 a 2.17 g/cm³, que puede sugerir rocas sedimentarias o rocas ígneas con cierta porosidad. Posee valores bajos de Rayos Gamma de 41.79 a 45.87 API, que indica un bajo contenido de minerales radiactivos, y en complementación con el registro de espectroscopia con valores de contenido de Uranio de 0.23 a 0.72 PPM, contenido de Torio de 3.29 a 4.37 PPM, y contenido de potasio de 2.6 a 2.8 %, lo que puede indicar rocas volcánicas máficas o rocas sedimentarias con un bajo contenido de minerales radiactivos. El registro sísmico indica valores moderadamente altos que van de 99.78 a 106.86 US/F, lo que indica una capa con baja velocidad sísmica que puede deberse a una roca sedimentaria de alta porosidad o una roca ígnea muy alterada. Por otra parte, el contenido de sílice es moderado con un rango de 54.67 - 56.22 %, lo que sugiere rocas ígneas de composición intermedia o rocas sedimentarias con influencia volcánica. Con la información proporcionada es posible sugerir que la capa se encuentra formada por una combinación de materiales sedimentarios y volcánicos alterados.

- **Unidad 7 (839 - 1010 md)**

La séptima unidad presenta valores bajos de resistividad del orden de 2.23 a 4.39 ohm*m, que suelen ser caracterizados por rocas sedimentarias saturadas de agua o de rocas ígneas muy alteradas. Presenta densidades bajas de 1.97 - 2.06 g/cm³, que puede sugerir rocas sedimentarias o rocas ígneas de alta porosidad. Los valores de Rayos Gamma son bajos a moderados que van de 46.38 a 51.81 API, que junto con los valores del registro de espectroscopia como el contenido de Uranio con valores de 0.20 a 0.85 PPM, contenido de Torio con valores de 4.34 a 6.08 PPM y contenido de potasio con valores de 2.7 a 3 % indica una roca con contenido moderado de minerales radiactivos. El registro sísmico posee valores altos que van de 114.70 a 138.83 US/F, lo que indica una capa con baja velocidad sísmica que puede deberse a una roca sedimentaria de alta porosidad o una roca ígnea muy alterada. El contenido de sílice es moderado con un rango de 56.41 a 58.48 %, lo cual sugiere rocas de composición intermedia o rocas sedimentarias con influencia de material volcánico. Teniendo todos estos datos en cuenta, una primera interpretación litológica podría ser una formación compuesta por materiales volcánicos que han sido depositados y posteriormente fueron alterados, como lo podría ser una toba volcánica o una roca sedimentaria con influencia de material volcánico.

En la Tabla 18, se muestra el rango de los valores para cada una de las unidades litológicas.

Tabla 18. Rango de valores de cada unidad litológica, correspondiente a la primera etapa.

Unidad	Profundidad (md)	Resistividad (ohm*m)	Rayos Gamma (API)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad DPHZ (V/V)	DTCO (US/F)	Torio (PPM)	Uranio (PPM)	Potasio (V/V)	Sílice (%)
1	500 - 558	7.03 - 25.22	42.08 - 48.81	2.06 - 2.18	0.280 - 0.356	101.36 - 118.53	3.49 - 4.35	0.32 - 0.95	0.025 - 0.029	54.78 - 57.34
2	558 - 590	7.62 - 22.64	47.08 - 51.32	2.17 - 2.31	0.205 - 0.286	88.46 - 102.44	3.77 - 4.76	0.32 - 0.91	0.029 - 0.031	56.68 - 58.29
3	590 - 740	7.66 - 18.59	45.22 - 50.52	2.03 - 2.17	0.288 - 0.370	103.78 - 118.85	3.48 - 5.05	0.45 - 1.07	0.027 - 0.03	55.97 - 57.99
4	740 - 784	8.73 - 18.12	43.84 - 48.93	2.15 - 2.22	0.259 - 0.298	92.12 - 100.72	3.72 - 4.49	0.21 - 0.79	0.027 - 0.03	55.45 - 57.38
5	784 - 802	9.17 - 15.43	54.11 - 57.65	2.53 - 2.62	0.012 - 0.067	61.85 - 68.98	5.02 - 7.34	0.51 - 1.23	0.028 - 0.031	59.35 - 60.70
6	802 - 839	8.09 - 13.52	41.79 - 45.87	2.12 - 2.17	0.288 - 0.370	99.78 - 106.86	3.29 - 4.37	0.23 - 0.72	0.026 - 0.028	54.67 - 56.22
7	839 - 1010	2.23 - 4.39	46.38 - 51.81	1.97 - 2.06	0.357 - 0.406	114.70 - 138.83	4.34 - 6.08	0.20 - 0.85	0.027 - 0.030	56.41 - 58.48

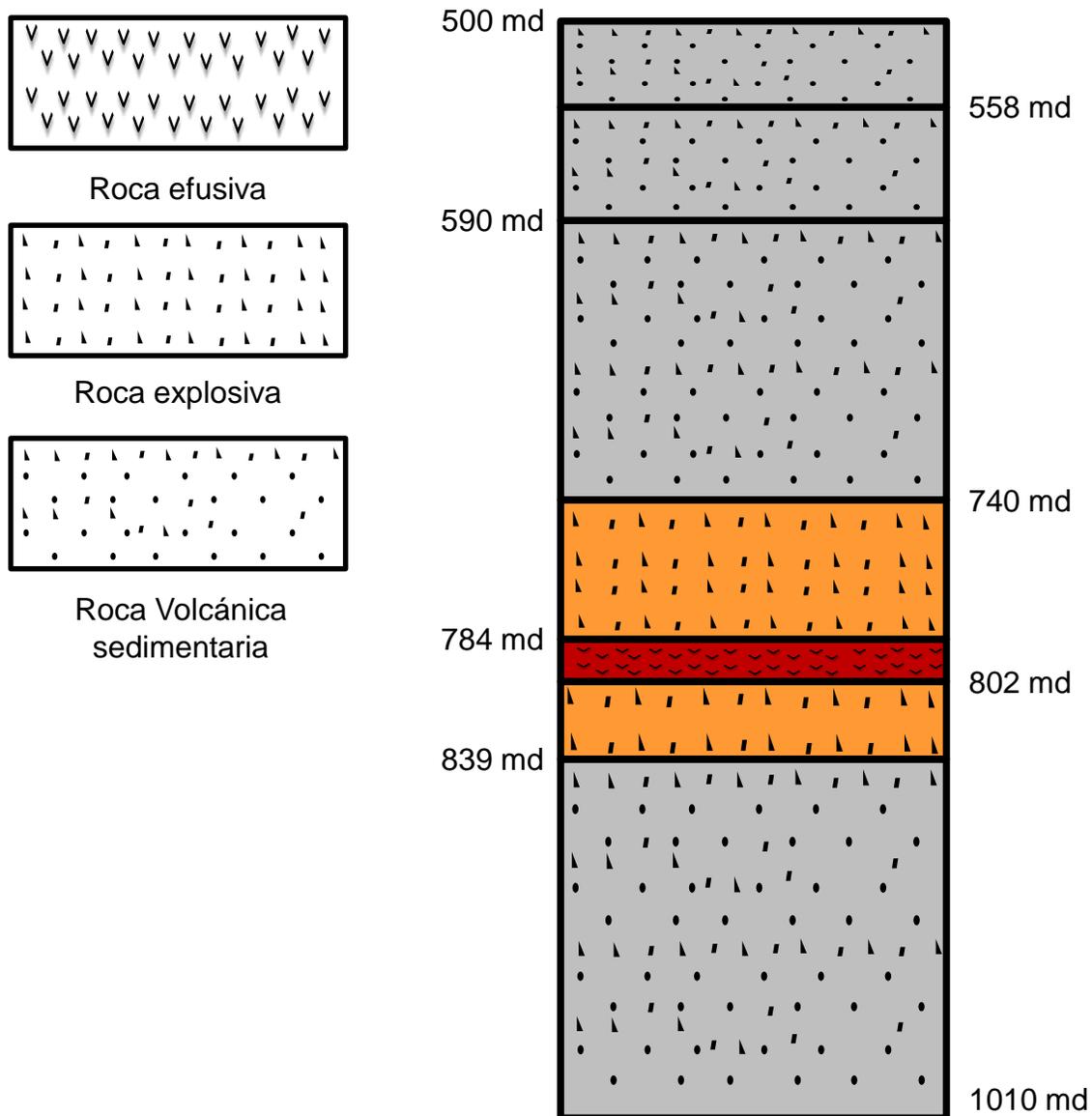


Figura 103. Columna unidades primera etapa.

4.7.2. Segunda etapa

En la Figura 104, se muestra la construcción de la columna correspondiente a la segunda etapa. En la Figura 105, se muestra el resultado de la columna de unidades con su respectivo índice de profundidad de cada una de las capas.

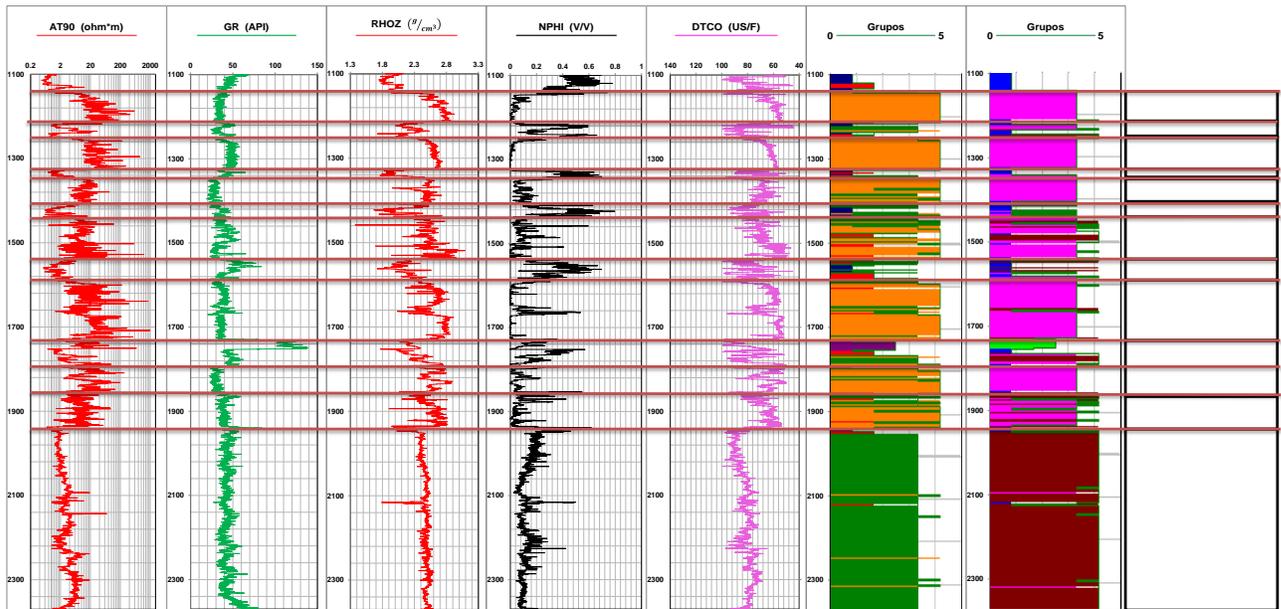


Figura 104. Construcción de la columna de unidades litológicas correspondiente a la segunda etapa.

Para la segunda etapa, se delimitaron las unidades a partir de los análisis de grupos, junto con la información proporcionada por la identificación de facies volcánicas. A continuación, se muestra la caracterización de las unidades, algunas de las cuales ya fueron descritas anteriormente en la interpretación cualitativa. Por lo que, se realizó una breve descripción de cada unidad, y posteriormente se realizó una interpretación litológica comparando los datos de los registros con valores de tablas.

- **Unidad 1 (1142 - 1213 md)**

La primera unidad presenta valores de alta resistividad y densidad, baja porosidad y valores bajos del tiempo de tránsito, junto con valores bajos valores de torio, uranio y potasio. Esta unidad se identificó como una facie efusiva, que de acuerdo a los valores de la Tabla 14, su contenido de sílice con un rango de 51 a 52.90 %, se puede clasificar esta unidad como una andesita basáltica.

- **Unidad 2 (1213 - 1250 md)**

La segunda unidad presenta valores de baja resistividad y densidad, alta porosidad y valores altos del tiempo de tránsito, junto con variabilidad en los contenidos de uranio y torio, y un mayor contenido de sílice. De acuerdo al análisis de facies volcánicas, esta unidad se interpreta como una facies de re-transporte formada por el depósito de material volcánico que posteriormente se compactó.

- **Unidad 3 (1250 - 1326 md)**

La tercera unidad consta de valores de alta resistividad y densidad, baja porosidad y valores bajos del tiempo de tránsito, junto con valores altos de contenido de torio y sílice.

Esta unidad se identificó como una facie efusiva, que de acuerdo a su contenido de sílice con un rango de 55.42 a 57.67 %, se clasificó como una andesita.

- **Unidad 4 (1326 - 1344 md)**

La cuarta unidad presenta valores de baja resistividad y densidad, alta porosidad y alto tiempo de tránsito, junto con contenidos moderados de uranio y torio, y un mayor contenido de sílice, puede indicar una toba o ceniza volcánica, formada por el depósito de material volcánico que posteriormente se compactó.

- **Unidad 5 (1344 - 1404 md)**

La quinta unidad presenta alta resistividad y densidad, baja porosidad y valores moderados de tiempo de tránsito, junto con un contenido relativamente bajo de elementos radiactivos. Esta unidad se identificó como una facie efusiva, que de acuerdo a sus valores del contenido de sílice con un rango de 48.63 a 51.17 %, se clasificó como un basalto.

- **Unidad 6 (1404 - 1435 md)**

La sexta unidad presenta baja resistividad y densidad, alta porosidad, altos valores de tiempo de tránsito y valores bajos de minerales radiactivos, que pueden indicar formaciones de depósitos de materiales volcánicos como la toba o ceniza volcánica.

- **Unidad 7 (1435 - 1533 md)**

La séptima unidad presenta resistividad y densidad moderadas, baja porosidad, junto con un alto contenido de sílice. Esta unidad se identificó como una facie efusiva, que de acuerdo a sus valores del contenido de sílice con un rango de 50.26 a 57.26 %, se clasificó como una andesita.

- **Unidad 8 (1533 - 1591 md)**

La octava unidad presenta baja resistividad y densidad, alta porosidad y alto tiempo de tránsito, junto con contenidos moderados de uranio y torio, que pueden indicar formaciones de depósitos de materiales volcánicos como la toba o brecha volcánica.

- **Unidad 9 (1591 - 1728 md)**

La novena unidad corresponde a dos eventos de efusivos, dada la similitud de sus características físicas y mineralógicas, estos dos eventos se agrupan en una sola unidad, la cual presenta valores de alta resistividad y densidad, baja porosidad, junto con alto contenido de sílice y elementos radiactivos. De acuerdo a sus valores del contenido de sílice con un rango de 52.03 a 54.98 %, se identificó como una andesita basáltica.

- **Unidad 10 (1728 – 1792 md)**

Esta unidad corresponde al intervalo de la anomalía en el registro de Rayos Gamma, la cual se debe a la interferencia de la herramienta de perforación que quedo atascada en el agujero del pozo, esta interferencia se menciona en la sección de “Revisión de bitácoras”, por lo que los datos para los registros de Rayos Gamma y espectroscopia no se toman en cuenta para su interpretación, puesto que podrían proporcionar información. La décima unidad presenta baja resistividad, densidad media, baja porosidad y valores moderados de tiempo de tránsito, por lo que esta unidad se puede interpretar como depósitos de material volcánico como la toba o brecha volcánica.

- **Unidad 11 (1792 - 1852 md)**

La onceava y doceava unidad corresponden a dos eventos de efusivos, que presentan características diferentes, por lo que se separan en unidades diferentes. Esta unidad presenta alta resistividad y densidad, baja porosidad y bajo tiempo de tránsito. De acuerdo a sus valores del contenido de sílice con un rango de 49.60 a 52.65 %, se clasificó esta unidad como un basalto.

- **Unidad 12 (1852 - 1948 md)**

La doceava unidad presenta alta resistividad y densidad, baja porosidad y bajo tiempo de tránsito. De acuerdo a sus valores del contenido de sílice con un rango de 53.15 a 56.43%, se clasificó esta unidad como una andesita basáltica.

- **Unidad 13 (1948-2370 md)**

La segunda sección se interpreta como una sola unidad litológica más homogénea, la cual presenta valores bajos de resistividad de 1.98 a 4.39 ohm*m, que puede indicar una litología con mayor contenido de agua o minerales conductores, valores moderados de rayos gamma que van de 39.33 a 46.82 API, valores de densidad de 2.44 a 2.50 g/cm³, su porosidad neutrón es baja con un rango de 0.085 a 0.156 V/V, los valores de tiempo de tránsito (DTCO) son medios con un rango de 77.49 a 85.61 US/F, y son consistentes con rocas arcillosas o compactas. Su contenido de Torio tiene un rango de 3.17 a 4.23 PPM, su contenido de uranio tiene un rango de 0.36 a 0.74 PPM, su contenido de Potasio tiene un rango de 0.015 a 0.019 V/V y su contenido de sílice tiene un rango de 53.75 a 56.79 %. Con esta información y junto con la descripción de los núcleos extraídos en los primeros metros de esta unidad, se caracteriza como un flujo piroclástico compacto.

En la Tabla 19, se muestra el rango de los valores para cada una de las unidades litológicas.

Tabla 19. Rango de valores de cada unidad litológica, correspondiente a la segunda etapa.

Unidad	Profundidad (md)	Resistividad (ohm*m)	Rayos Gamma (API)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad Neutrón (V/V)	DTCO (US/F)	Torio (PPM)	Uranio (PPM)	Potasio (V/V)	Sílice (%)
1	1142 - 1213	14.05 - 53.27	32.34 - 37.14	2.58 - 2.77	0.01 - 0.05	55.37 - 64.06	2.33 - 2.87	0 - 0.27	0.014 - 0.015	51 - 52.90
2	1213 - 1250	1.22 - 6.88	32.86 - 45.37	2.10 - 2.35	0.15 - 0.46	68.95 - 87.16	2.28 - 3.23	0 - 0.36	0.011 - 0.023	52.19 - 56.47
3	1250 - 1326	17.48 - 44.94	44.06 - 50.17	2.56 - 2.65	0 - 0.015	58.59 - 63.94	4.12 - 4.80	0.20 - 0.60	0.017 - 0.019	55.42 - 57.67
4	1326 - 1344	1.14 - 2.21	37.27 - 45.36	1.89 - 2.14	0.34 - 0.51	64.69 - 85.68	2.28 - 3.16	0.09 - 0.42	0.016 - 0.021	49.24 - 50.82
5	1344 - 1404	8.52 - 16.88	25.40 - 30.47	2.44 - 2.53	0.04 - 0.12	65.47 - 72.56	1.82 - 2.39	0 - 0.20	0.011 - 0.013	48.63 - 51.17
6	1404 - 1435	0.87 - 2.98	30.64 - 38.99	1.96 - 2.37	0.22 - 0.51	71.44 - 85.71	1.81 - 2.22	0 - 0.08	0.013 - 0.020	50.82 - 53.43
7	1435 - 1533	5.50 - 13.74	30.64 - 44.05	2.44 - 2.61	0.03 - 0.10	59.88 - 72.77	2.21 - 3.50	0.05 - 0.53	0.014 - 0.017	50.26 - 57.26
8	1533 - 1591	1.25 - 2.61	34.76 - 53.38	2.10 - 2.31	0.17 - 0.39	67.14 - 85.67	2.56 - 3.49	0 - 0.35	0.014 - 0.025	51.40 - 56.98
9	1591 - 1728	8.22 - 41.61	33.51 - 39.78	2.53 - 2.76	0 - 0.04	55.96 - 65.67	2.63 - 3.26	0.10 - 0.37	0.014 - 0.017	52.03 - 54.98
10	1728 - 1792	1.97 - 14.82	45.75 - 109.52	2.16 - 2.41	0.09 - 0.27	69.20 - 87.90	4.35 - 9.18	0.38 - 2.09	0.018 - 0.039	52.23 - 57.73
11	1792 - 1852	6.98 - 33.48	27.79 - 33.10	2.47 - 2.71	0.02 - 0.10	58.13 - 71.78	1.95 - 2.65	0.09 - 0.37	0.012 - 0.143	49.60 - 52.65
12	1852 - 1948	3.96 - 11.83	36.84 - 43.79	2.38 - 2.66	0.02 - 0.15	61.14 - 72.27	2.58 - 3.43	0.15 - 0.51	0.016 - 0.019	53.15 - 56.43
13	1948 - 2370	1.98 - 4.39	39.33 - 46.82	2.44 - 2.50	0.08 - 0.15	77.49 - 85.61	3.17 - 4.23	0.36 - 0.74	0.015 - 0.019	53.75 - 56.79

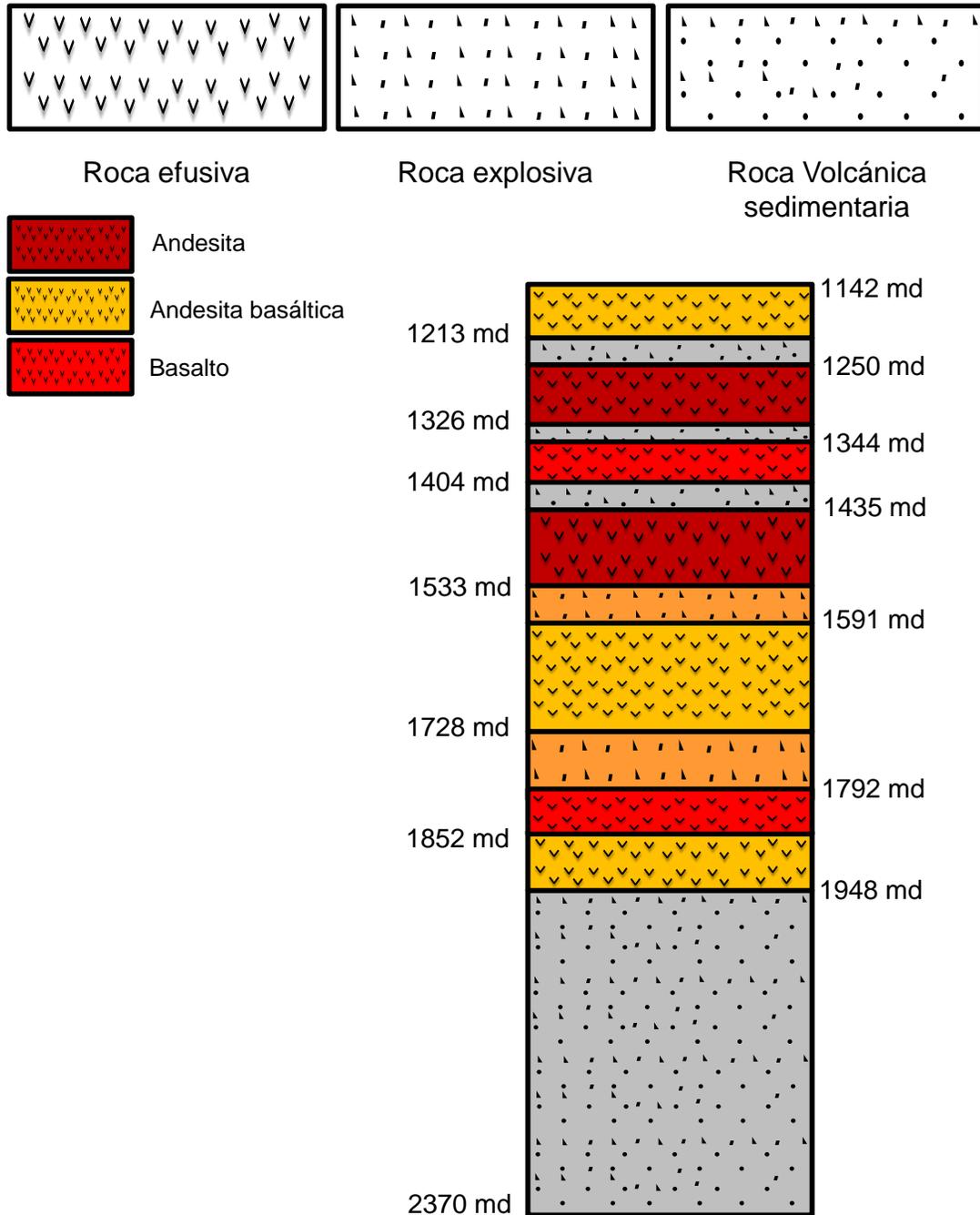


Figura 105. Columna unidades segunda etapa.

5. Discusión y conclusiones

Existen diferentes dificultades para interpretar registros geofísicos adquiridos en rocas ígneas, debido a que la mayor parte de las metodologías para su interpretación reportadas en la literatura se enfoca principalmente para formaciones con características sedimentarias. Métodos de identificación de zonas con contenidos de arcilla y arenas, saturación de agua, aceite o gas no son completamente de utilidad para la interpretación de formaciones volcánicas, ya que, o bien no aplican en estos casos, o se usan parámetros o constantes para sus cálculos que están calibradas para formaciones de rocas sedimentarias. Además, las formaciones volcánicas se caracterizan por cambios súbitos en sus espesores y su disposición, así como en su contenido mineralógico. Estas variaciones implican respuestas mixtas en los registros geofísicos, por lo que rocas volcánicas que poseen propiedades mecánicas parecidas, pueden tener una composición mineralógica distinta, y de manera contraria, formaciones con la misma composición mineralógica, pueden tener diferentes características mecánicas, por lo que es difícil realizar una interpretación detallada de un pozo únicamente mediante datos de registros.

Todas estas eventualidades, llevan a utilizar otros enfoques y nuevas metodologías para la interpretación. En este trabajo se realizó inicialmente una interpretación cualitativa, donde se buscó dividir los registros en zonas donde las características de las curvas presentaran cambios significativos (principalmente cambios en sus propiedades mecánicas, como la densidad, porosidad y resistividad eléctrica), esto sirvió para poder tener una primera idea sobre los cambios litológicos relacionadas con estos cambios, obteniendo los rangos de valores de sus propiedades, para clasificar las zonas de acuerdo a valores más altos y bajos o medios.

Para poder complementar la interpretación cualitativa, se realizaron dos análisis de grupos, el primero, con un enfoque mecánico, utilizando los registros enfocados en propiedades físicas. El segundo análisis se realizó con un enfoque basado en la composición mineralógica a partir de los registros de espectroscopia de Rayos Gamma. La metodología del análisis de grupos se basó en la agrupación de los datos de los diferentes registros, donde se reorganizaron en facies que dividieron el registro de acuerdo a diferentes respuestas, y donde se pudieron observar los rangos de valores de estas facies mediante diagramas de dispersión.

Esta metodología presento varias dificultades, una de estas fue que, para poder realizar un análisis de grupos, es necesario elegir un conjunto de curvas que puedan relacionarse unas con otras y que aportaran información sobre las características del pozo dependiendo de cada enfoque. Para conseguir esto, se probó con varias curvas, agregando y quitando curvas hasta observar un buen comportamiento en la agrupación de los datos y, sobre todo, que los resultados fueran coherentes de acuerdo a lo reportado por PEMEX, lo observado en los núcleos y muestras de canal. Otra de las dificultades que se tuvo en esta sección, es que la técnica estadística requiere de un número de semilla adecuado, el cual se encarga de agrupar todos los datos de los registros en un número más manejable de facies geológicas. Se observó que cada semilla proporcionaba un resultado diferente, por lo que la dificultad en esta metodología recae en

buscar una semilla que proporcione una buena agrupación de los datos y que además sean resultados concordantes con lo observado durante la perforación.

Una vez que se tuvo el análisis de grupos con la semilla que presento la mejor agrupación de los datos, se caracterizaron los resultados de estas facies mediante diagramas de dispersión que muestran la relación entre dos propiedades de los registros, esta caracterización de los resultados presentó dificultades, puesto que en algunos de los diagramas de dispersión, la separación de las facies no eran tan claras, y los rangos de cada agrupación se empalmaban unas con otras, por lo que fue difícil obtener el valor mínimo o máximo de estas facies para caracterizar su rango.

Además, durante la caracterización de los resultados de los análisis de grupos, se observó que los datos de la segunda etapa del registro presentaban una anomalía en el registro de Rayos Gamma, se detectó que los datos del registro presentaban un salto muy alto en sus valores de hasta 138.74 API, que no concordaba con la continuidad de los datos esperados en el registro, y que además ninguna otra curva de los registros presentaba alguna respuesta anómala en ese intervalo. Por lo que se consideró que la respuesta que presento el registro de Rayos Gamma no se debía a una respuesta normal de la formación. Después de una revisión al material disponible, mediante los reportes de perforación, se encontró que, durante la etapa de perforación de ese intervalo, se tuvo un inconveniente con la sarta de perforación en el intervalo aproximado donde se detectó la anomalía del registro de Rayos Gamma.

Por lo anterior el grupo 3 en el análisis de grupos respondió a esta anomalía, el cual agrupó los datos con un alto contenido de Rayos Gamma y espectroscopia, y de este modo se tuvo en cuenta que los datos de estos grupos no eran adecuados para la interpretación, por lo que, para esta sección, se tomaron más en cuenta los resultados de los otros registros.

Los resultados de estas interpretaciones cualitativas y cuantitativas (análisis de grupos) se compararon con el objetivo de observar las similitudes y diferencias de cada una, y encontrar la forma en cómo pueden complementarse entre sí. De manera general, se observó que las divisiones en donde se presentaban cambios significativos en las curvas de la interpretación cualitativa, coincidían con la delimitación de las facies de la interpretación cuantitativa.

El análisis de grupos dividió el registro en facies de acuerdo a los datos del registro, lo que generó intercalaciones o divisiones más detalladas, teniendo regiones donde las facies eran delgadas y otras regiones con facies con un gran espesor, a diferencia de la interpretación cualitativa, donde la división del registro es de manera más general. Por lo que el análisis de grupos fue una buena forma de complementar a la interpretación cualitativa, puesto que permite identificar divisiones del registro más detalladas y observar zonas que en un principio no fueron posibles de identificar en la interpretación cualitativa. En la segunda etapa del registro, se observó que tanto en la interpretación cualitativa como en la interpretación cuantitativa, se identificaron intercalaciones en los valores del registro, donde el análisis de grupos dividió en una facie las intercalaciones de valores altos de resistividad, valores altos de densidad y valores bajos de porosidad y registro

sónico, mientras que las intercalaciones de valores bajos de resistividad y densidad, valores altos de porosidad y registro sónico, se dividieron en otras facies. Por lo que ambas interpretaciones fueron similares para esta parte del registro, donde las divisiones de la interpretación cualitativa encajaban de buena manera con la división de las intercalaciones de las facies del análisis de grupos, sin embargo, no todas las intercalaciones encajaron, puesto que algunas facies se dividían en facies más delgadas, lo que indicaba que dentro de estas intercalaciones existían divisiones más pequeñas de materiales diferentes. Por lo que aún se necesitaba más información para poder interpretar estas formaciones.

Para la identificación de facies volcánicas, no se contó con núcleos suficientes que ayudaran a la interpretación de litofacies para partes clave del registro, ni con secciones sísmicas como en la publicación fuente. Por lo que para la predicción de facies volcánicas en el pozo Mirador 2, se basó únicamente en las formas de las curvas de los registros y sus valores. Esta metodología presentó dificultades puesto que al solo contar con la información de los registros fue difícil identificar las facies volcánicas a lo largo del registro, ya que tiene cierta ambigüedad caracterizar el rango de valores de las curvas en valores altos, medios, medios-bajos y bajos, por lo que dependerá del interprete y de los datos que presente cada registro, de igual forma fue difícil tratar de identificar las formas de las curvas y encontrar similitudes exactas con los datos que ejemplificaba el autor para ciertas facies volcánicas.

En la primera etapa del registro fue difícil identificar las facies volcánicas debido a que es difícil distinguir entre las facies volcánicas sedimentarias y las facies explosivas, ya que las formas que presentaban las curvas encontraban similitudes en forma para ambas facies, por lo que, para poder identificar las facies volcánicas en esta etapa del registro, se tomó en cuenta adicionalmente resultados de análisis anteriores como los análisis de grupos.

En la segunda etapa del registro fue más fácil identificar las facies volcánicas, dado que esta etapa se caracteriza por intercalaciones de facies efusivas, explosivas y sedimentarias donde las formas de las curvas para estas facies eran muy similares a las ejemplificaciones del autor y los rangos de sus valores eran más coherentes. Teniendo la información previa de las interpretaciones cualitativa y cuantitativa, así como el conocimiento del área de estudio y la teoría sobre los modelos de litofacies proporcionados por el autor, fue posible identificar las facies volcánicas en los registros y realizar una columna de facies volcánicas para las dos etapas de adquisición.

Con base en el análisis de los registros de pozo y con ayuda de metodologías para la identificación de formaciones geológicas en ambientes volcánicos, fue posible realizar una interpretación geológica que dio como resultado una columna de unidades caracterizada para el pozo Mirador 2.

Parte del objetivo de la interpretación geológica del registro geofísico del pozo Mirador 2 es identificar aquellas unidades factibles a la explotación de recursos hídricos. Para esto tomamos como base la columna de unidades que nos dice que formaciones geológicas son atravesadas por el pozo, y mediante las tablas de caracterización de los valores de las

propiedades de estas unidades, es posible realizar una inspección de las unidades que son factibles a la explotación.

Las formaciones con posibilidad de almacenamiento y explotación de agua, son aquellas que cumplen con ciertas características, como lo son la porosidad, formaciones con fracturas que permitan el flujo de agua, y que además estas formaciones permitan su flujo y que sean de un espesor considerable, con la finalidad de que sea factible obtener este recurso. Estas características se obtienen del registro de porosidad (DPHZ) para la primera columna de unidades, y la porosidad de neutrones (NPHI) para la segunda columna, la permeabilidad de las formaciones se puede obtener mediante el análisis de las curvas de resistividad somera (AT10) y profunda (AT90), en donde exista una separación clara en los valores de estas curvas, que indica que existe una invasión del lodo de perforación en la formación circundante del pozo. Una separación entre las curvas indica invasión del fluido de perforación causada por la conductividad de la formación. Lo que puede implicar una formación de interés.

La primera etapa del registro, está caracterizada por secuencias de rocas volcánicas sedimentarias, explosivas y solo una unidad de una roca efusiva que se identificó como andesita de acuerdo a su contenido de sílice. En estas unidades al ser mayormente volcánicas sedimentarias y explosivas, contienen porosidades medias-altas, por lo que mediante el análisis de la separación de las curvas de resistividad somera (AT10) y profunda (AT90) es posible determinar qué zonas se comportan como permeables. Las primeras 3 unidades (Figura 106), presentan características similares, donde la diferencia entre ellas es el cambio en sus valores del registro sísmico (grados de competencia), donde los rangos para estas unidades son altos, por lo que se interpreta que estas formaciones no están muy consolidadas, con densidades medias-bajas, con valores de porosidad medios, además, de presentar una separación significativa de las curvas de resistividad y saltos, en donde estos saltos, se interpretan como fracturas en la formación, por lo que pueden ser unidades factibles a su explotación.

Etapa 1

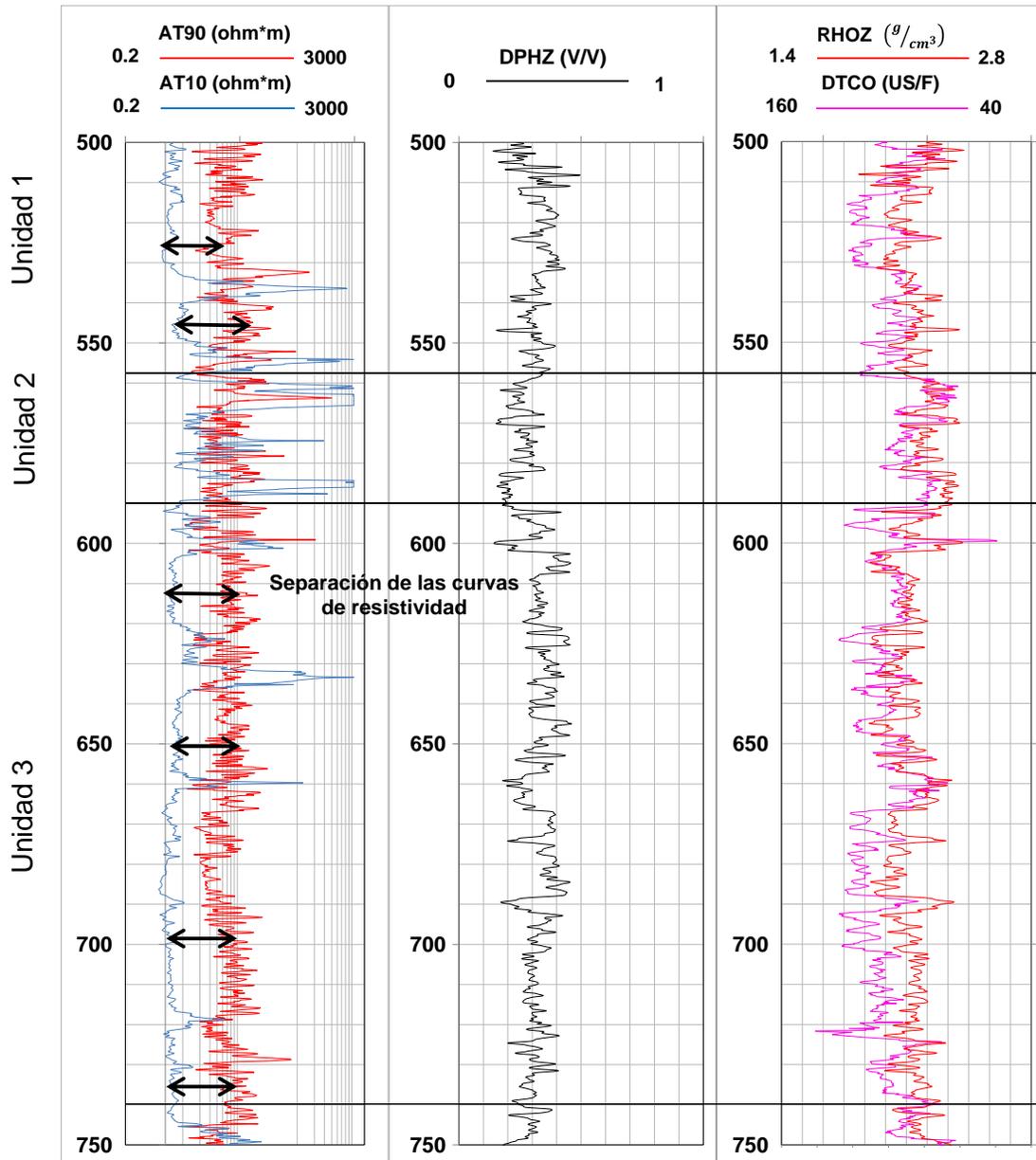


Figura 106. Presentación del registro para las primeras 3 unidades correspondientes a la primera etapa, donde se observa la separación de las curvas de resistividad somera (AT10) y profunda (AT90).

Las unidades 4 y 6 (Figura 107), presentan una separación alta en las curvas de resistividad, con porosidades medias y por sus valores altos del registro sísmico, estas unidades son poco competentes, por lo que pueden ser unidades factibles a la explotación. A su vez estas unidades encajonan a la unidad 5 (Figura 107), la cual se interpretó como una andesita, que posee una porosidad casi nula, valores del registro sísmico bajos que indican un mayor grado de competencia de la roca, densidades altas y grandes saltos en su resistividad somera (AT10) que se interpretan como fracturamiento

de la formación. Por lo que esta unidad se considera como una capa impermeable entre las unidades superiores y las inferiores a esta capa.

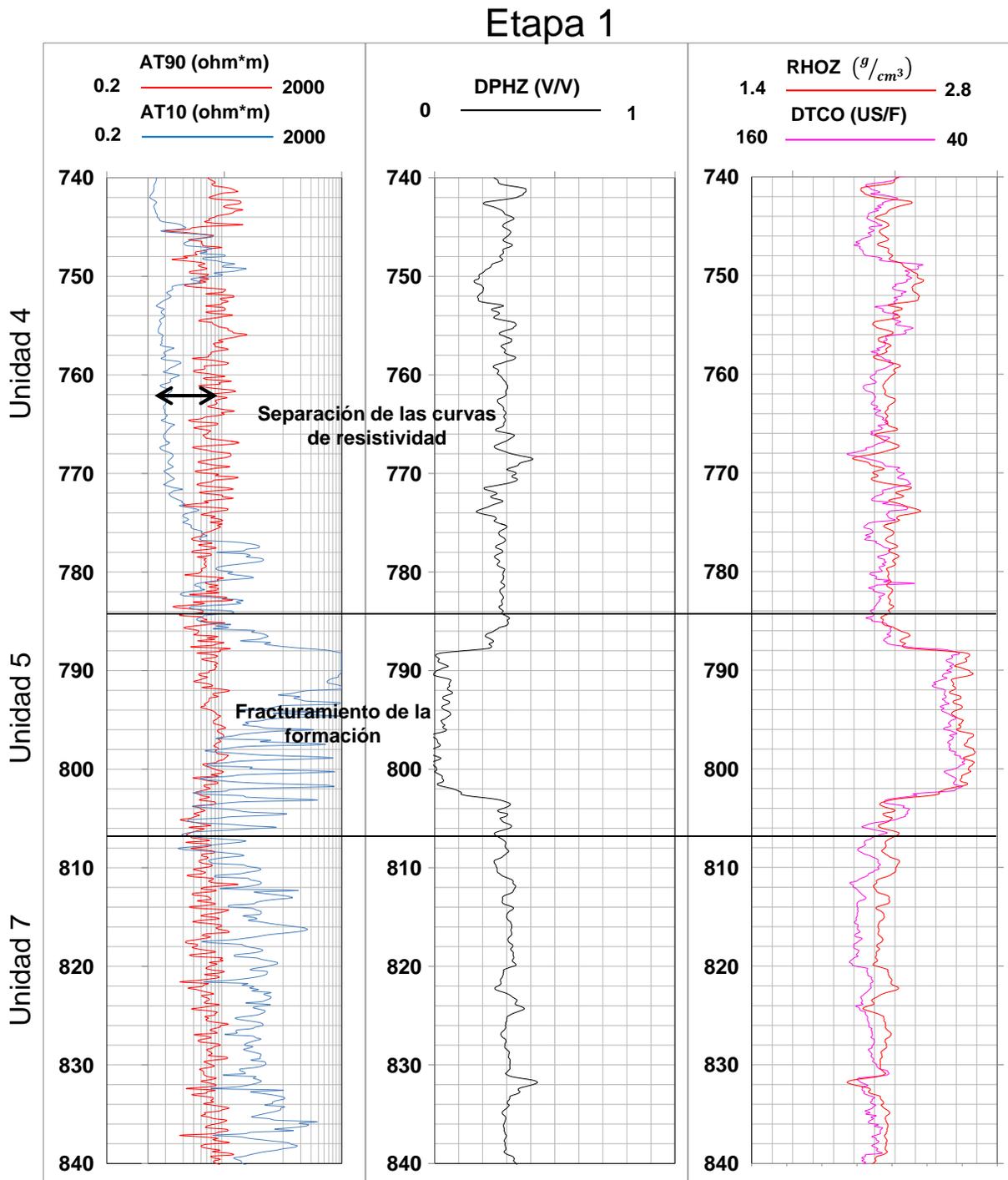


Figura 107. Presentación del registro para las unidades 4, 5 y 6 correspondientes a la primera etapa, donde se observa fracturamiento en la unidad 5, y la separación de las curvas de resistividad somera (AT10) y profunda (AT90).

La unidad 7 (Figura 108), presenta resistividades bajas menores a 5 ohm*m, porosidad alta, densidad baja, un menor grado de competencia debido a sus altos valores en el

registro sónico, donde en el intervalo de profundidad de 938 a 1010 md, el registro sónico presenta valores más bajos que en el intervalo superior, lo que indica que la unidad en este intervalo presenta una mayor competencia. Las separaciones de las curvas de resistividad son mínimas, por lo que se podría considerar que la invasión del lodo fue mínima y por lo tanto es poco permeable.

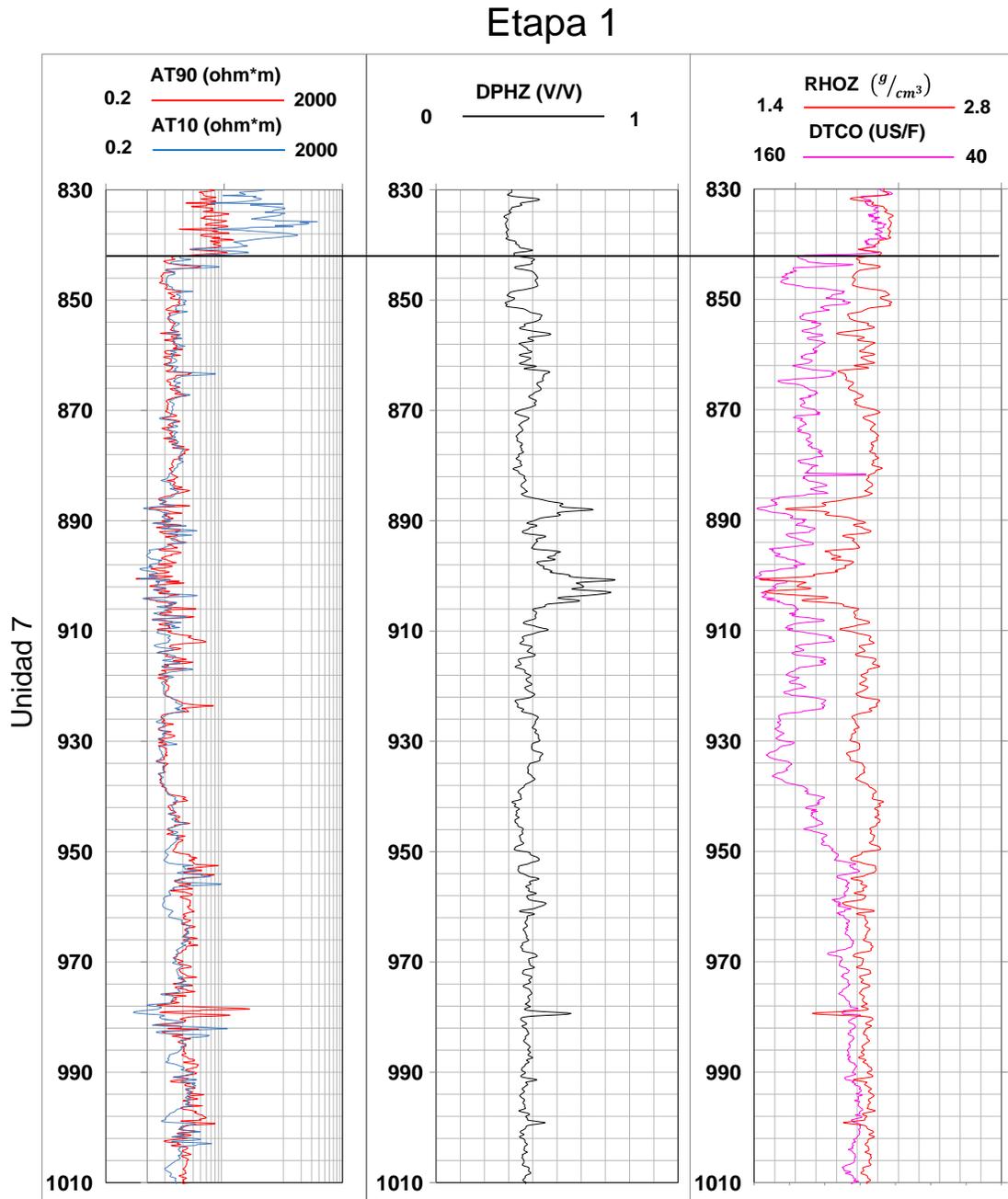


Figura 108. Presentación del registro para la unidad 7 correspondientes a la primera etapa.

La segunda etapa del registro, está caracterizada por secuencias de facies efusivas, explosivas y rocas sedimentarias de origen volcánico. De acuerdo al análisis anterior, las unidades más apropiadas para la explotación son las unidades sedimentarias y explosivas, ya que cumplen con características de las formaciones porosas y permeables.

Las formaciones efusivas por su parte, no son óptimas por si solas para el almacenamiento y flujo del agua, estos tipos de formaciones pueden actuar como un buen acuífero, si han sufrido de fracturación o presentan vesículas que aumenten su porosidad permitiendo el almacenamiento y flujo de agua. En este caso, las unidades (1, 3, 5, 7, 9, 11 y 12) (Figura 109), caracterizadas como rocas efusivas, presentan saltos en las curvas de resistividad, que pueden interpretarse como fracturamiento de la formación, sin embargo, el registro de porosidad de neutrones indica que estas rocas tienen valores prácticamente de cero, por lo que se descartaron estas unidades.

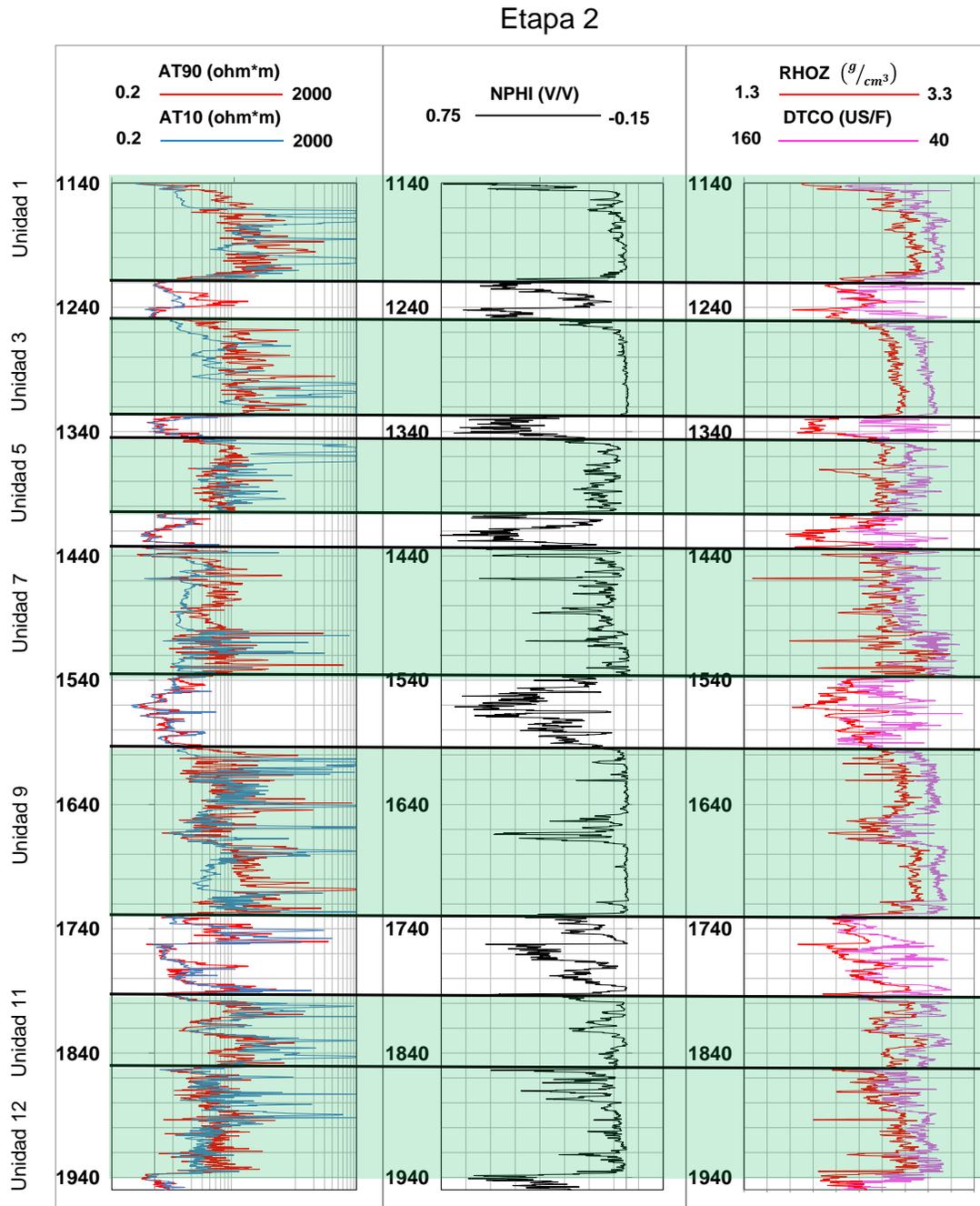


Figura 109. Presentación del registro para las unidades (1, 3, 5, 7, 9, 11 y 12) correspondientes a la segunda etapa.

La unidad 2 (Figura 110), se caracterizó como una unidad volcánica sedimentaria de Re-transporte, la cual se refiere a materiales volcánicos que han sido transportados por agentes sedimentarios como el agua o la gravedad antes de ser depositados en una nueva ubicación. Esta unidad presenta dos picos de alta porosidad de neutrón, con densidades medias-bajas, una competencia de la formación irregular, junto con valores bajos de resistividad somera (AT10) y profunda (AT90). En el centro del registro, se presenta una separación en las curvas de resistividad, que podría relacionarse con una mayor invasión del lodo de perforación, en esta parte central los valores de porosidad son bajos, con una densidad más alta. Se interpreta que los picos con alta porosidad y baja resistividad, se deben a formaciones alteradas que están saturadas de agua, mientras que en el intervalo central se produjo una mayor invasión del lodo, por lo que la formación es más permeable en este intervalo. Por lo que esta unidad podría ser factible para la explotación.

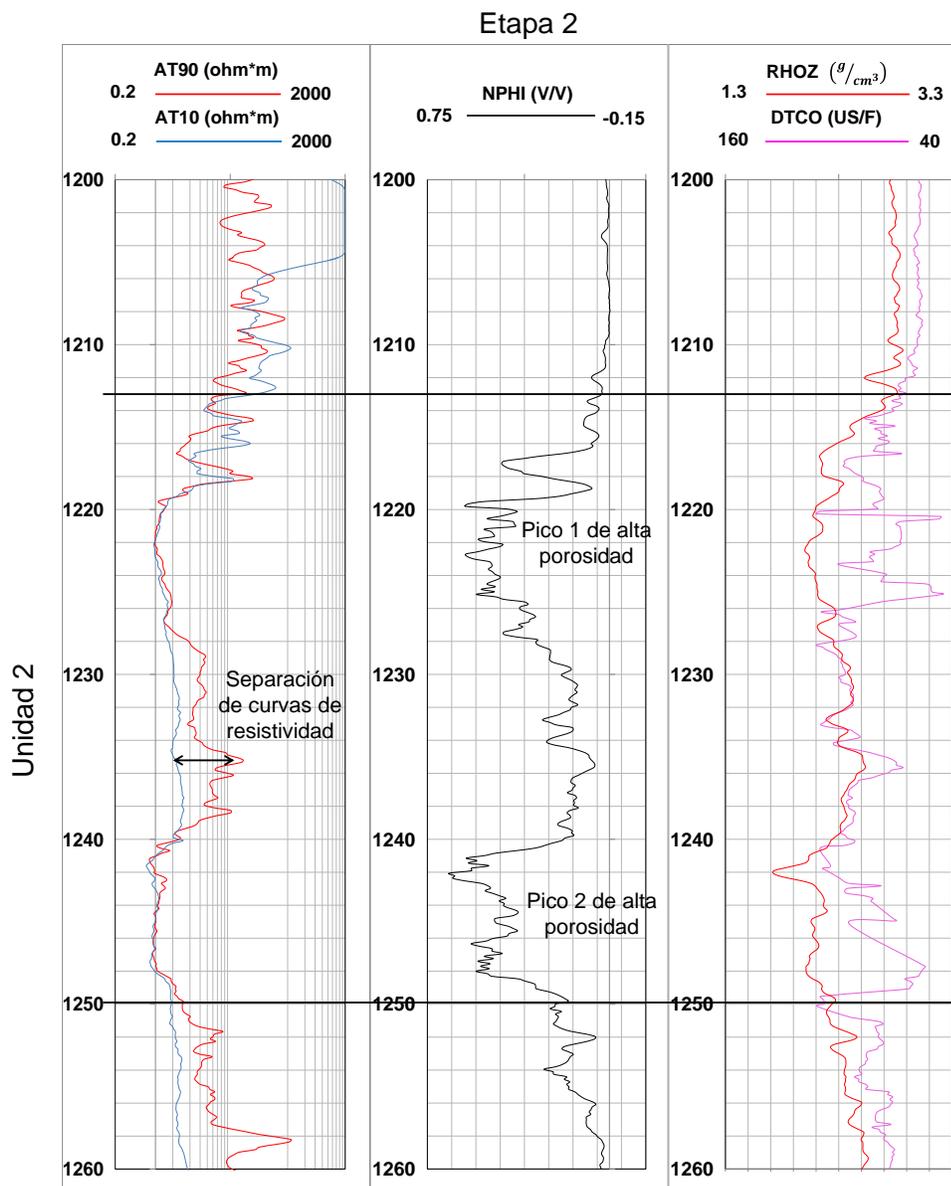


Figura 110. Presentación del registro para la unidad 2 correspondientes a la segunda etapa.

La unidad 4 (Figura 111), presenta una alta porosidad de neutrón con un rango de 0.34 a 0.51 V/V, densidad baja entre 1.89 a 2.14 g/cm³, el registro sónico no presenta una respuesta uniforme. La resistividad somera (AT10) y profunda (AT90) presentan valores por debajo de los 5 ohm*m y no existe una gran separación entre ellas, lo que indicaría que no hubo un gran efecto de invasión del lodo, por lo que la formación podría no ser muy permeable. Sin embargo, la alta porosidad de neutrón y una densidad baja indicarían que los poros de la formación están saturados de agua, por lo que puede interpretarse como una formación arcillosa o alterada con posibilidades de explotación.

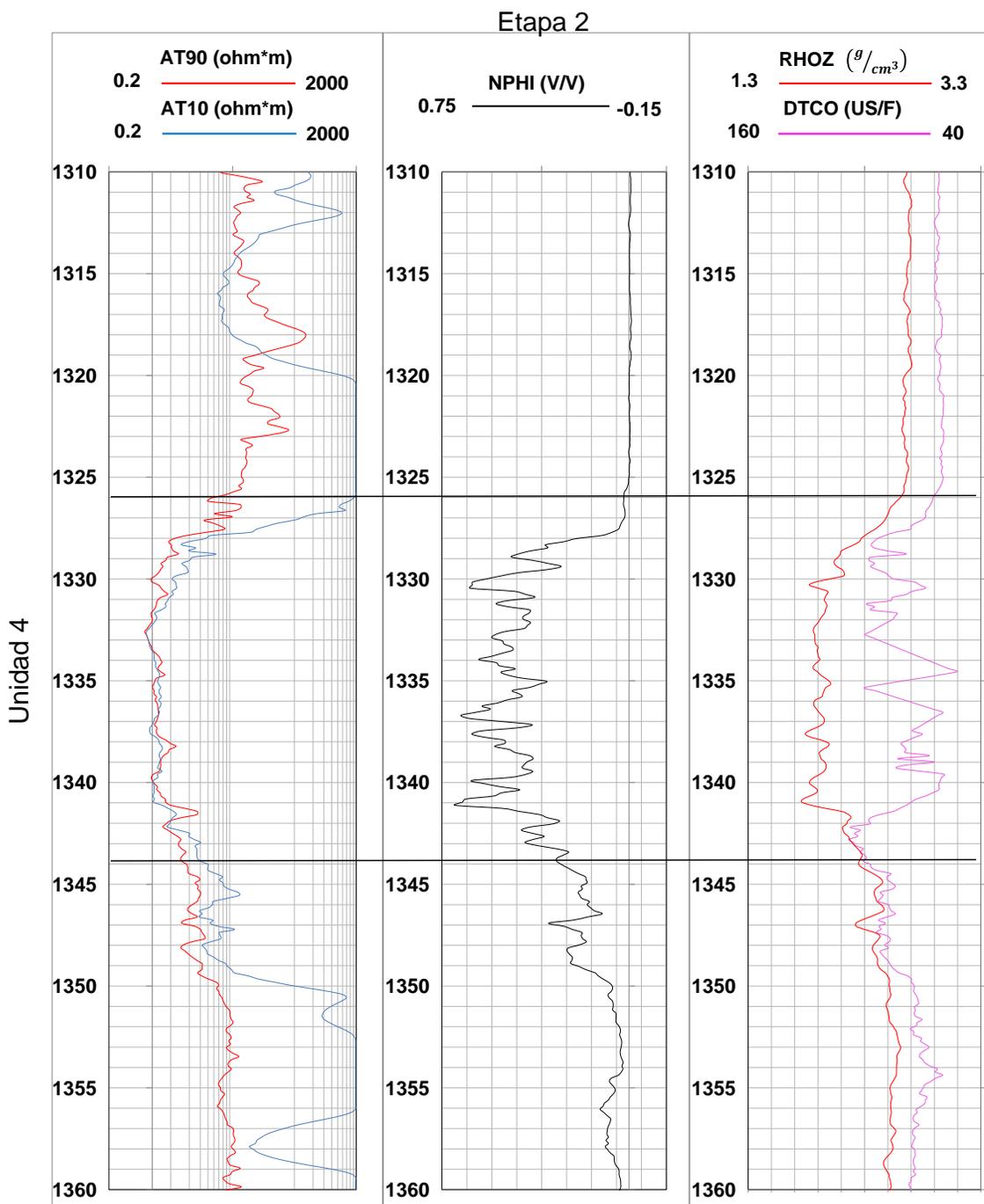


Figura 111. Presentación del registro para la unidad 4 correspondientes a la segunda etapa.

La unidad 6 (Figura 112), presenta una alta porosidad de neutrón, con un rango de 0.22 a 0.51 V/V, una densidad media-baja que varía entre 1.96 y 2.37 g/cm³ y el registro sínico no presenta una respuesta uniforme, por lo que esta unidad presenta diferentes grados de competencia. Las curvas de resistividad somera (AT10) y profunda (AT90), presentan valores por debajo de los 5 ohm*m, sin una gran separación entre ellas, lo que sugiere que no hubo un gran efecto de invasión del lodo, lo que podría indicar que la formación no es muy permeable. Una alta porosidad de neutrón sugiere que los poros de la formación se encuentran saturados de agua, junto con los valores bajos de resistividad y un grado de competencia heterogénea, se puede interpretar como una formación arcillosa o alterada de material volcánico con posibilidades de explotación.

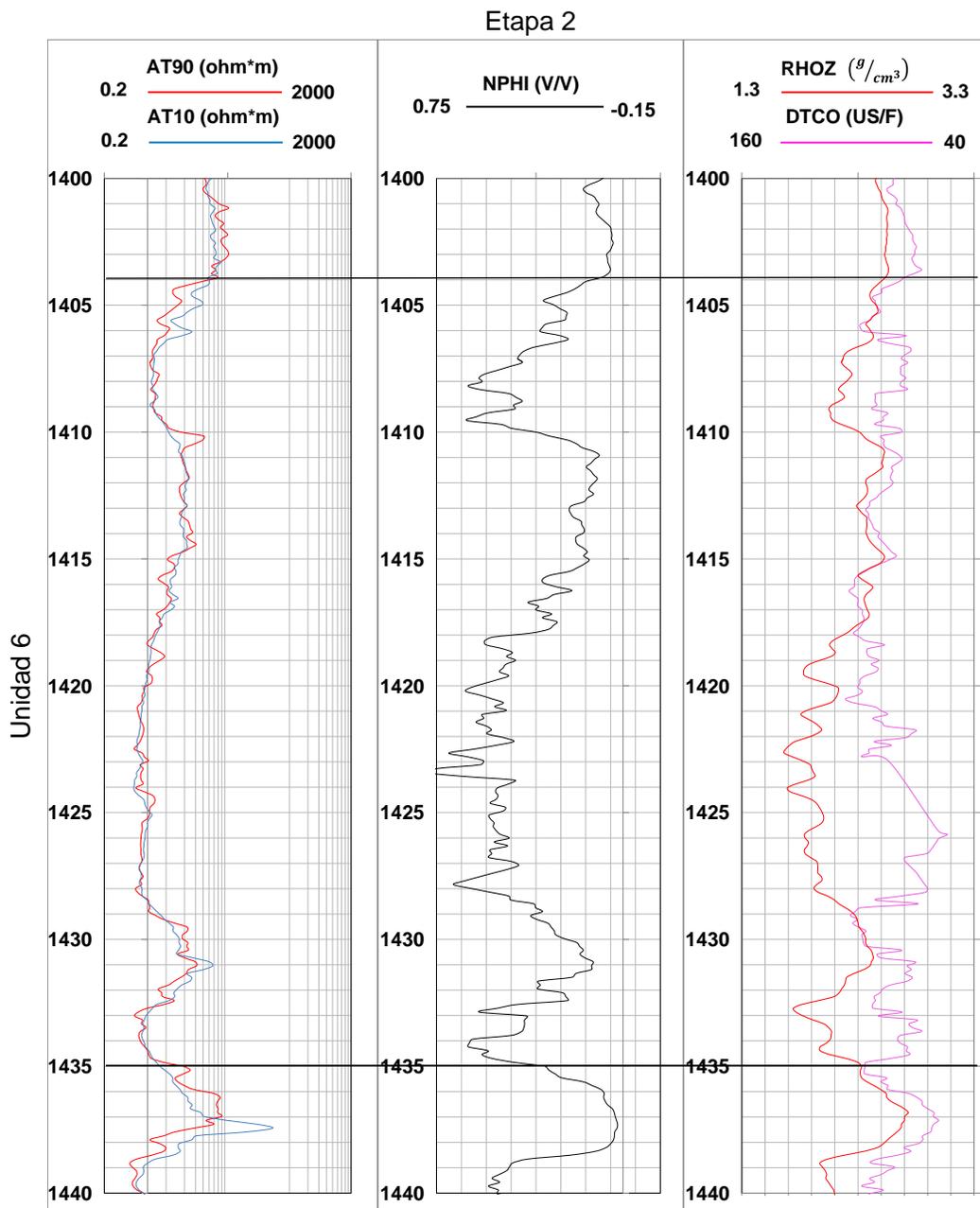


Figura 112. Presentación del registro para la unidad 6 correspondientes a la segunda etapa.

La unidad 8 (Figura 113), presenta una alta porosidad de neutrón, con valores que varían entre 0.17 y 0.39 V/V, una densidad media entre 2.10 y 2.31 g/cm³, el registro sónico muestra una respuesta heterogénea que sugiere variaciones en el grado de competencia de la unidad. Las curvas de resistividad presentan valores menores a los 5 ohm*m y no presentan una separación significativa. Del mismo modo que las unidades 4 y 6, se puede interpretar como una formación arcillosa o alterada de material volcánico, que se encuentra saturada de agua con posibilidades de explotación.

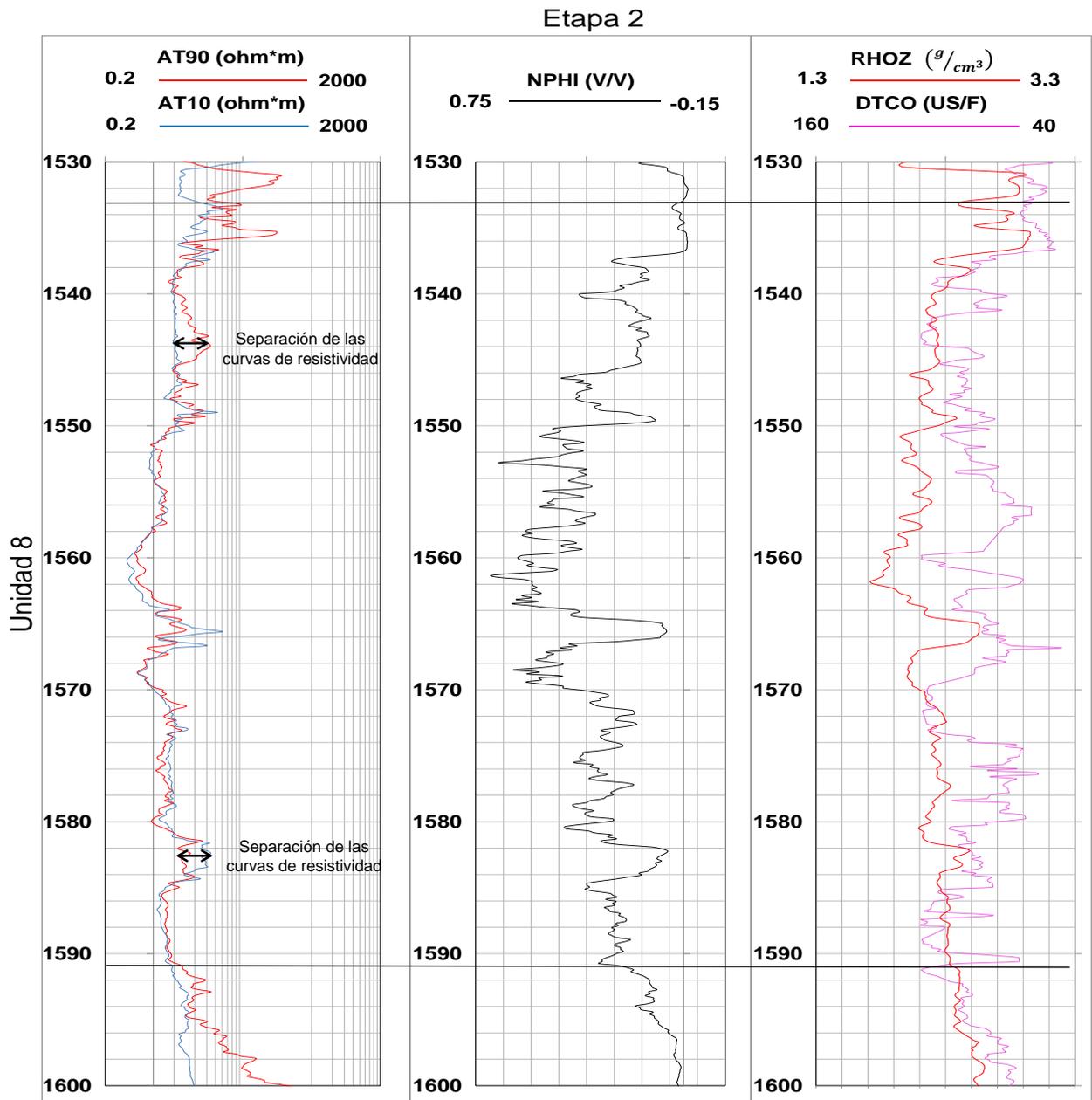


Figura 113. Presentación del registro para la unidad 8 correspondientes a la segunda etapa.

La unidad 10 (Figura 114), presenta una litología compleja, en donde se observa dos efectos en el aumento de los valores de resistividad, y la disminución en sus valores de porosidad de neutrón, en donde el registro de densidad pareciera presentar los mismos

efectos en menor medida, siendo este un poco más constante. El registro sónico no presenta una respuesta uniforme, lo que indica diferencias en el grado de competencia de la formación. La porosidad de la formación es media-baja con valores de 0.09 a 0.27 V/V, la cual presenta una zona de alta porosidad, que está relacionada con densidades y resistividades bajas. Por lo que esta unidad se describe como una intercalación de diferentes materiales de origen volcánico como un conglomerado o brecha volcánica.

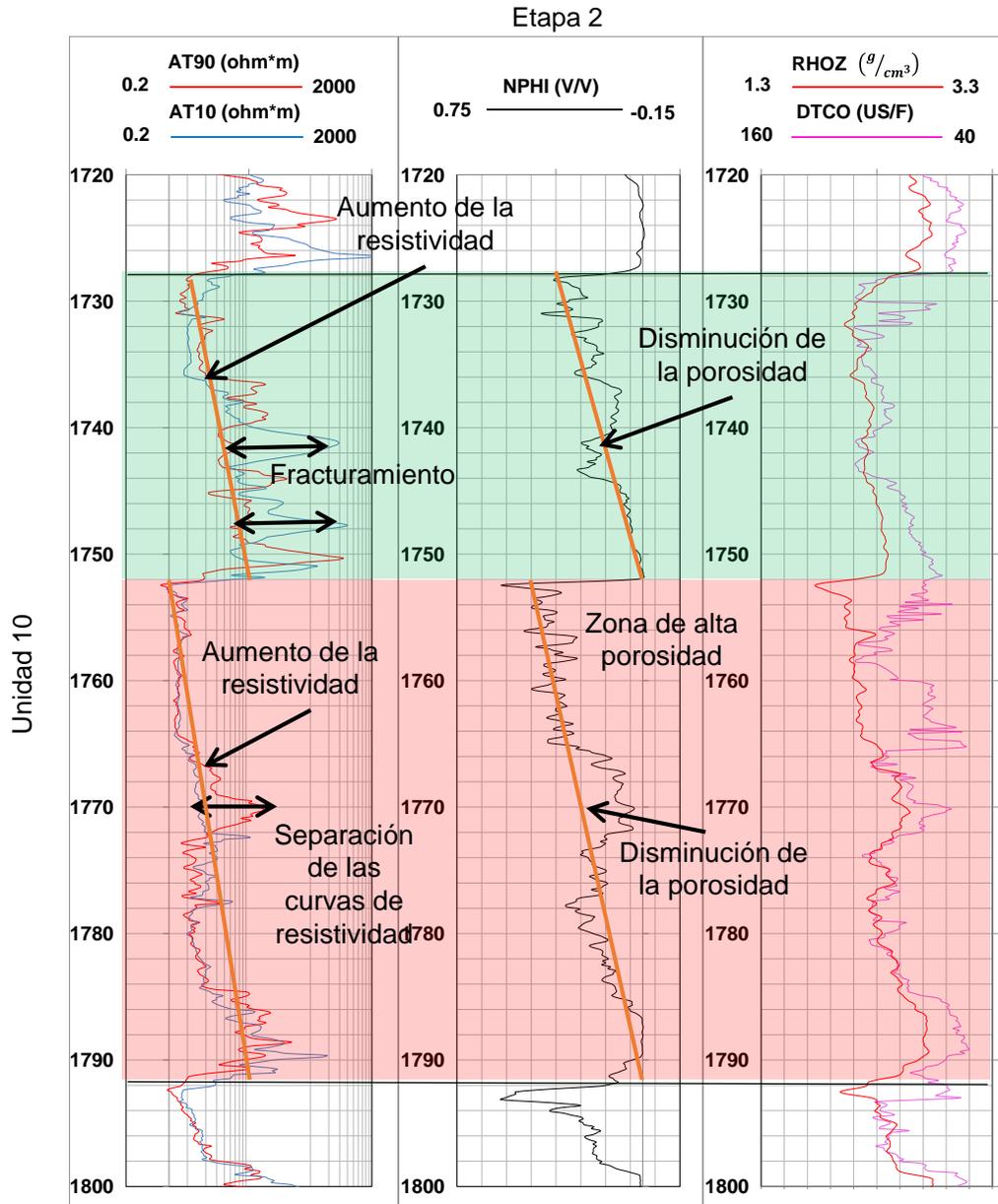


Figura 114. Presentación del registro para la unidad 10 correspondientes a la segunda etapa.

La unidad 13 (Figura 115), se caracteriza por ser una unidad homogénea con valores de resistividad bajos, densidad media-alta, porosidad baja, con valores medio-altos de tiempo de tránsito, que, junto con la información proporcionada por los núcleos, se clasificó como

una unidad de flujos piroclásticos compactados. Por lo que esta unidad no es factible para su explotación.

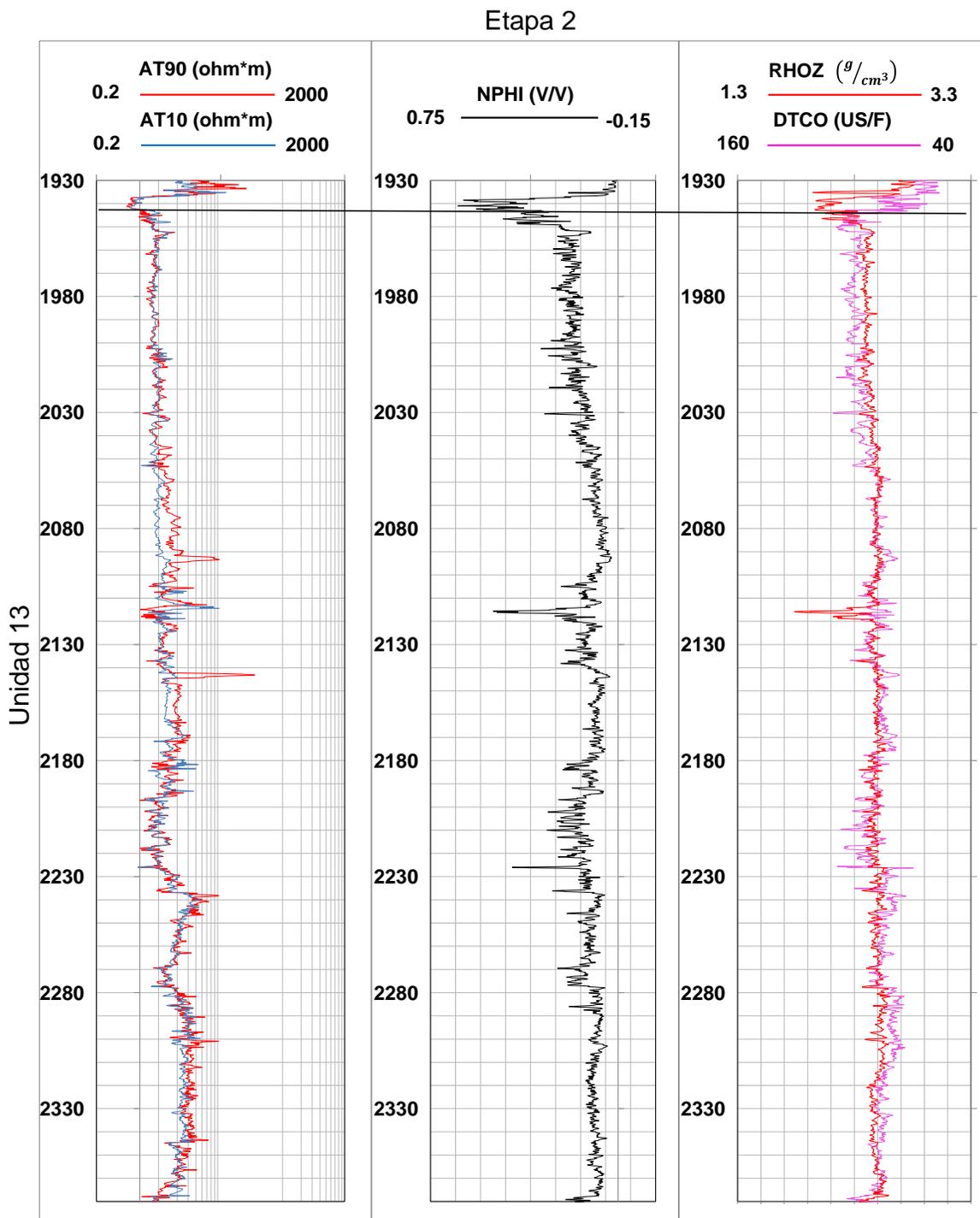


Figura 115. Presentación del registro para la unidad 13 correspondientes a la segunda etapa.

La interpretación de registros geofísicos se basa en el cálculo e identificación de parámetros petrofísicos, los cuales permite delimitar zonas del registro con un interés de explotación de recursos, sin embargo, por lo anterior, en formaciones ígneas los cálculos

e identificación de estos parámetros necesitan de nuevos criterios enfocados para estas nuevas formaciones geológicas, así como de núcleos los cuales permitan la calibración de las herramientas de los registros y obtener los parámetros necesarios para dichos cálculos.

Considero que el cálculo de estos parámetros es muy importante para una buena interpretación, así como la importancia de obtener más núcleos los cuales permitan una mejor calibración de las herramientas y como información geológica para la predicción y distribución de litofacies volcánicas.

Sin embargo, este trabajo no se enfocó en adaptar estos cálculos y criterios para poder utilizarlos en la interpretación del pozo Mirador 2, puesto que esto es un tema muy extenso, el cual puede abarcar su propio trabajo de investigación, y por el tiempo y el enfoque que se dio a este trabajo no fue posible abarcar este tema.

El pozo Mirador 2 forma parte de los estudios de perforación profunda en la Cuenca de México, y aunque existen diferentes perforaciones, es necesario realizar más estudios, para tener más información y con ello un mejor entendimiento sobre las secuencias volcánicas de la cuenca, y poder caracterizar el acuífero profundo para su posible explotación, ya que a diferencia de las rocas sedimentarias, las rocas de origen volcánico difieren en gran medida en sus propiedades de manera lateral, por lo que su correlación entre pozos es compleja.

Considero que la metodología utilizada en este trabajo, servirá para la interpretación de estudios posteriores en estos ambientes volcánicos, que como se mencionó a lo largo de este trabajo, pueden ser reservorios potenciales de acuíferos para su aprovechamiento.

Se recomienda realizar fechamientos a los núcleos para poder complementar la información geológica y estratigráfica.

Se recomienda realizar una correlación con otros pozos, con el fin de identificar la continuidad de las unidades de interés, y caracterizar la extensión del acuífero, así como observar las variaciones en las propiedades de las formaciones.

Se recomienda realizar levantamientos sísmicos, registros eléctricos adicionales o estudios de resistividad para mejorar la resolución y continuidad de las estructuras geológicas.

6. Referencias

- Alatorre Gutierrez, H., & Hernández Torres, V. (2009). Aplicación de los registros geofísicos de imágenes AIT, USI, RST en el sistema petrolero de México.
- Arce, J.L., Layer P.W., Morales-Casique, E., Benowitz, J.A., Rangel, E., Escolero, O. (2013). New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and whole-rock chemistry: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*: 266, 34-49.
- Arce, J.L., Layer, P., Martínez, I., Salinas, J.I., Macías-Romo, M.C., Morales-Casique, E., Benowitz, J., Escolero, O., Lenhardt, N. (2015). Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 123-143.
- Bas, M. L., Maitre, R. L., Streckeisen, A., Zanettin, B., & IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, 27(3), 745-750.
- Bassioni Zaki. (1994). *Theory, Measurement, and Interpretation of Well Logs*. Richardson, Texas.
- Carmichael, R. S. (2017). *Practical handbook of physical properties of rocks and minerals* (1988). CRC press.
- Casique, E. M., Saldaña, J. L. A., Campos, J. L. L., & Fuentes, O. A. E. (2018). Análisis de la estratigrafía y las características hidrogeológicas de los estratos profundos que conforman el subsuelo de la cuenca de México a partir de la perforación de dos pozos profundos, uno a 2000 m y otro a 1570 m denominados Agrícola Oriental no. 2B y 2C. *Boletín del Instituto de Geología*, (121), 105-105.
- De Cserna, Z., De la Fuente, D.M., Palacios, N.M., Triay, L., Mitre, S.L.M., Mota, P.R., 1987, Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la cuenca de México: UNAM, Instituto de Geología, *Boletín* 104, 71.
- Enciso de la Vega S., 1992, Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 10(1), 26-36.
- Garduza, V. (2019). *Manual de Registros Geofísicos de pozo y algunas aplicaciones*. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, AC, 61(2).
- Gómez Rivero O. (1975). *Registros de Pozos 1era Parte: Teoría e Interpretación*. México.
- González Moran, T. (1992). *Estudio hidrogeofísico de la subcuenca de Chalco: Evaluación de impacto ambiental del basurero de Santa Catarina: Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad de los Ciclos Profesional y de Posgrado, Colegio de Ciencias y Humanidades, disertación doctoral, 275 p. (inédita)*.
- González Torres, E. A., Morán Zenteno, D. J., Mori, L., & Martiny, B. M. (2015). Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central

de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 285-297.

- Huang, B., & Pan, B. (2004). Characteristics of log responses and lithology determination of igneous rock reservoirs. *Journal of Geophysics and Engineering*, 1(1), 51-55.
- Lezama-Campos, J. L., Morales-Casique, E., Castrejón-Pineda, R., Arce, J. L., & Escolero, O. A. (2016). Interpretación del registro geofísico del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y su correlación litológica en la cuenca de México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 33(2), 198-208.
- Lugo-Hubp, J., Mooser, F., Pérez-Vega, A., & Zamorano-Orozco, J. (1994). Geomorfología de la sierra de Santa Catarina, DF, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11(1), 43-52.
- Macías, J.L., Arce, J.L., García-Tenorio, F., Layer, P.W., Rueda, H., Reyes-Agustin, G., López-Pizaña, F., Avellán, D., 2012, Geology and geochronology of Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl, and Popocatepetl volcanoes, Sierra Nevada, central Mexico, en Aranda-Gómez, J.J., Tolson, G., Molina-Garza, R.S. (eds.), *The Southern Cordillera and Beyond: Geological Society of America Field Guide*, 25,163-193.
- Manrique B, J. A., & Kairuz H, E. C. (1998). Principios de interpretación de registros de pozo. Manizales: Universidad de Caldas.
- Montero, García, I. A. (2024, 13 de Marzo). Espeleología en la Ciudad de México. [montero.org.mx](https://www.montero.org.mx).
https://www.montero.org.mx/cavernas/espeleologia/medio_ambiente#:~:text=El%20Cerro%20de%20la%20Estrella%20no%20ten%C3%ADa%20originalmente%20la%20forma,de%20origen%20pluvial%20y%20e%C3%B3lica.
- Montes, S. A. G. (2020). Análisis de registros de pozo en la subcuenca San Jorge en el Valle Inferior del Magdalena (Doctoral dissertation, Universidad de Caldas).
- Oviedo de León, A. (1967). Estudio Geológico del Subsuelo, Basado en los Datos Obtenidos de la Perforación del Pozo Profundo Texcoco No. 1: México D.F., Instituto Mexicano del Petróleo, reporte técnico, 95 p.
- Pérez-Cruz, G.A., 1988, Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la ciudad de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de maestría, 83 pp.
- Ran, Q., Wang, Y., Sun, Y., Yan, L., & Tong, M. (2014). Volcanic gas reservoir characterization. Elsevier. ISBN: 978-0-12-417131-2.
- Reyes Hernandez, I. (2012). "Calibración de herramientas de registros geofísicos de pozo". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ricco, Macedo, G. A. (2012). Principios de medición de los registros geofísicos de pozos. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Schön, J. H. (2015). Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics. Elsevier.

- Schlumberger. (1990). Principios y Aplicaciones de la Interpretación de Registros. Schlumberger Educational Services.
- Senergy. (2008). Users Manual Interactive Petrophysics. (Version 3.5). Para Schlumberger. Senergy/PGL.
- Stefansson, V., Gudlaugsson, ST y Gudmundsson, A. (2000). Contenido de sílice y registros de rayos gamma en rocas volcánicas. En Actas del Congreso Mundial de Geotermia, Kyushu – Tohoku, Japón (Vol. 28, págs. 2893-2897).
- Vázquez-Sánchez, E., & Jaimes-Palomera, L. R. (1989). Geología de la cuenca de México: Geofísica Internacional (México), v. 28.
- Villalba, G. L. M., Martínez-Coronel, M., Hernández, R. B. P., Rivera-Tellez, D., & Galeana-Barrera, L. E. (2023). Actualización de la lista de mamíferos silvestres de la Sierra de Santa Catarina, Ciudad de México. Revista Mexicana de Mastozoología (Nueva Época), 13(1), 12-23.