

Estudio Quimioestratigráfico de La Formación Villeta En Pozos de Perforación, Cuenca de
Putumayo

Luis Carlos Pabón Martínez

Fayber Andrés Pereira González

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Geólogos

Director

Mario García González

PhD. En geología

Codirector

Edgar Ramiro Pineda Martinez

Geólogo

Codiretor

David Alfonso Serrano Ferreira

Geólogo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Químicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2017

Dedicatoria

A mis padres y a mis hermanas Adriana y Laura por ser esa familia tan incondicional y siempre comprensiva conmigo, por estar ahí y enseñarme a ser y a sentir, por ser esa fuerza y ese apoyo que me recuerda el rumbo que quiero para mi vida y permitir llenarme de ganas y motivos para hacerlo.

A mis amigos de la vida, del colegio, cercanos a mi casa y a todas esas personas que permitieron que hoy los llame amigos, por todo lo aprendido, lo vivido, por entenderme y compartir parte de su vida con la mía. Por apoyarme en todo lo que se me ocurrió hacer.

Dedico también esta felicidad que siento hoy a todas las personas que encontré en campo, doy gracias por lo que aprendí y por llenarme de momentos y experiencias esta vida bonita. A la naturaleza que me hizo sentir vivo y a cada animalito con los que hablé y me detuve a compartir un ratito de la vida, los perritos, gatos, vacas pájaros insectos y a todos los paisajes y naturaleza recorrida, a ellos por hacerme recordar más fácil cada lugar y cada momento con sentimientos de nostalgia y felicidad. Por enseñarme a vivir de esta manera, amando no menos al ser humano, pero si muchisisisimo más a la naturaleza.

LUIS CARLOS PABON.

Dedicatoria

¡A mis padres por su incondicional, inquebrantable e inmenso amor y apoyo que me han dado en la vida para lograr mis objetivos personales y profesionales, por el desmesurado esfuerzo que han hecho para educarme y brindarme todo lo bueno que tengo en la vida, por ellos es que he podido lograrlo!

A mis Hermanos Fredy y Jhoan, porque sé que siempre cuento con su apoyo, por darme la mano cuando lo necesito, por esta siempre ahí, en las buenas y en las malas.

FAYBER.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres y mis hermanas Adriana y Laura por estar ahí como mi motivación y tesoro.

A el profe Edgar Ramiro Pineda por su confianza, apoyo y conocimiento aportado. Por su disposición a ayudarnos y por ser un excelente amigo, guía y ejemplo a seguir.

A mi amigo y guía David Serrano que me acompañó y guio siempre enseñándome de su experiencia como persona y profesional.

Y a mis amigos, a mi compañero de tesis por permitirme compartir con él y quienes sabiéndolo o no hicieron parte de esta etapa de mi vida y a la vida misma.

LUIS CARLOS PABON.

Agradecimientos

A nuestro Codirector Edgar Pineda por darnos la oportunidad, el apoyo, y la confianza para poder realizar este proyecto, porque encontré en él una excelente persona de buenos valores, por siempre querer lo mejor para Luis Carlos y para mí en la realización de éste proyecto.

Agradezco en gran manera a nuestro codirector David Serrano, porque siempre estuvo ahí, en las buenas y en las malas, por guiarnos paso a paso con su conocimiento y experiencia en la realización de este proyecto, por su paciencia y dedicación en todo este tiempo, porque encontré un amigo y una excelente persona.

A mi compañero de tesis Luis Carlos, por ser también un gran amigo y excelente persona, por darme la ayuda y apoyo cuando lo necesité.

A los amigos que creyeron desde un principio en mí, y siempre me animaban para poder culminar esta etapa, por su apoyo y afecto, Fernel y katalinyiset.

FAYBER.

Contenido

Introducción	30
1. Planteamiento del Problema	33
2. Justificación	35
3. Objetivos	37
3.1 Objetivo General	37
3.2 Objetivos Específicos.....	37
4. Localizacion	39
5. Marco Teórico.....	40
5.1 Rayos X.....	40
5.2 Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (Xrf)	41
5.2.1 Absorción de los rayos X.....	42
5.2.2 Emisión de rayos X fluorescentes.....	43
5.2.3 Análisis cuantitativo de la fluorescencia de rayos X	44
5.2.4 Metodología para la obtención de los datos de fluorescencia de rayos X.	45
5.2.5 Aplicación de la espectrometría de fluorescencia de rayos x en la descripción litológica en los pozos trabajados.	48
5.3 Espectrometría de Difracción de Rayos X (Drx)	53

5.3.1 Concepto DRX.....	53
5.3.2 Principio científico.....	54
5.3.3 Identificación de minerales a partir de difracción de rayos X.	55
5.3.4 Metodología para la obtención de datos de difracción de rayos X	56
5.4 Registros de Pozo.....	58
5.4.1 Registro de potencial espontaneo (SP).	59
5.4.2 Registros Resistivos	61
5.4.3 Registros de porosidad.....	63
5.4.3.1 Registro sísmico.....	63
5.4.3.2 Registro de densidad.....	65
5.4.3.3 Registro Neutrón.....	66
5.4.4 Registro Gamma Ray (GR).....	68
5.4.5 Registro Caliper (CAL).....	69
6. Marco Geológico	71
6.1 Estratigrafía General de La Cuenca Putumayo.....	72
6.1.1 Formación Saldaña.....	75
6.1.2 Formación Caballos.....	76
6.1.3 Formación Villeta.....	77
6.1.3.1 Litoestratigrafía de la Formación Villeta.....	78
6.1.3.2 Ambiente de sedimentación de la Formación Villeta.....	81
6.1.4 Formación Rumiayaco.....	84
6.1.5 Formación Pepino	85
6.1.6 Formación Ortegaza.....	87

6.2 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DE LA CUENCA DE PUTUMAYO.....	88
6.2.1 Precámbrico	88
6.2.2 Carbonífero - Pérmico.....	88
6.2.3 Triasico - Jurásico	88
6.2.4 Megasecuencia de Cretácico.....	89
6.2.4.1 Aptiano Superior a Albaniano.	91
6.2.4.2 Albiano Superior - Cenomaniano Medio.....	92
6.2.4.3 Cenomaniano-Turoniano.	92
6.2.4.4 Maastrichtiano Tardío – Paleoceno Temprano.....	93
6.2.5 Paleoceno Tardío a Eoceno Medio.	94
6.2.6 Eoceno Tardío a Mioceno Medio	95
6.2.7 Mioceno Tardío Hasta El Presente	95
6.3 Marco Tectónico y Estructural.....	97
7. Metodología	103
7.1 Fase de Recopilación y Análisis Bibliográfico.....	103
7.2 Fase de Inventario y Carga de Datos	104
7.3 Fase de Interpretación de la Información Recopilada.....	105
7.4 Fase de Integración	105
7.5 Fase de Analisis de Resultados y Conclusiones	106
8. Resultados.....	107
8.1 Tipo y Calidad de la Información Disponible.....	107
8.1.1 Información disponible de los registros de pozo	107

8.1.2 Información disponible de los núcleos de perforación.	109
8.2 Corrección, Ajuste y Edición de los Registros de Pozo.....	110
8.2.1 Corrección en profundidad.	112
8.2.2 Corrección de respuestas anómalas.	112
8.2.3 Normalización de curvas.....	113
8.2.4 Ajuste de los datos de núcleos a profundidad de registros de pozo.	115
8.2.5 Construcción de curvas sintéticas.	116
8.2.6 Redes Neuronales.....	116
8.3 Definición de Litotipos	118
8.4 Definición de Electrofacies.....	119
8.5 Modelamiento Estratigrafico	122
8.5.1 Descripción de los núcleos de perforación.	122
8.5.1.1 Definición de litofacies y asociaciones litológicas.	123
8.6 Modelo Sedimentologico	152
8.6.1 Gamma Ray en la definición de ambientes de depositacion.....	153
8.6.2 Estuarios dominados por mareas.	154
8.6.2.1 Barras mareales.....	157
8.6.3 Plataforma clasica somera.	158
8.7 Identificación de Litotipos a Partir de Drx (Quimioestratigrafia)	160
8.8 Identificación de Litotipos a Partir de Xrf (Quimioestratigrafia)	163
8.8.1 Ecuaciones para la identificación de litotipos.....	165
8.8.1.1 Ecuación para las Arcillas.....	165
8.8.1.2 Ecuación para la Sílice.....	166

8.8.1.3 Ecuación para los Carbonatos.....	166
8.8.2 Calculo del TOC a partir de los datos de XRF	167
8.8.3 Descripción generalizada de litotipos en pozos analizados POR XRF.....	175
8.8.3.1 Pozo ACAE-2 Y ACAE-10.....	175
8.8.3.2 Pozo ACAE-12.....	182
8.8.3.3 Pozo Hormiga-1X.....	188
8.8.3.4 Pozo Loro-7 ^a	191
8.8.4 Análisis cuantitativo de XRF.....	197
8.8.4.1 Miembro Villeta C.....	198
8.8.4.2 Miembro Villeta T.....	199
8.8.4.3 Miembro Villeta B.....	200
8.8.4.4 Miembro Villeta U.....	200
8.8.4.5 Miembro Villeta A.....	201
8.8.4.6 Miembro Villeta M.....	202
8.8.4.7 Miembro Villeta N.....	203
8.9 Integración de Drx, Xrf Y Registros de Pozo.....	204
9. Conclusiones.....	214
Referencias Bibliográficas.....	217
Apéndice.....	225

Lista de Tablas

Tabla 1.	Resultados análisis XRF sobre la muestra de ripios.....	48
Tabla 2.	Se observa los resultados arrojados por el difractor de rayos X después del proceso anteriormente explicado donde se observa el porcentaje en peso de los minerales identificados para el pozo Hormiga-1X.....	58
Tabla 3.	Se observa un esquema detallado de base a techo de los eventos geológicos ocurridos en el área de estudio.....	97
Tabla 4.	Inventario de las curvas básicas de registros disponibles en cada uno de los pozos de los campos Acae, Hormiga, Loro y San Miguel, los pozos que presenten color amarillo corresponden a los pozos con XRF.	108
Tabla 5.	Información de los núcleos de perforación de los pozos trabajados y sus respectivos registros de pozo.	110
Tabla 6.	Inventario de los pozos corregidos.	114
Tabla 7.	Corrección en profundidad de los datos de núcleos pertenecientes al pozo Hormiga-1X.	115
Tabla 8.	Características principales de las facies asociadas a bahía dominada por mareas y plataforma.....	123
Tabla 9.	Nomenclatura de las litofacies identificadas a partir de núcleos de perforación descritos con su respectivo código de nomenclatura según Farrell K.M. et al. (2012).....	124
Tabla 10.	Pozos con Intervalos con núcleos, examinados en este estudio.	125

Tabla 11. Elementos y sus respectivos porcentajes que componen el bulk de sílice, carbonatos y arcillas del pozo Hormiga-1X.....	167
Tabla 12. Datos de TOC basados en XRF para el pozo Hormiga-1X.....	169
Tabla 13. Definición de Litotipos a partir de DRX y XRF.	205

Lista de Figuras

- Figura 1. A) Ubicación de la cuenca de Putumayo en Colombia. B) Ubicación regional de la cuenca de Putumayo al suroccidente de Colombia. C) Ubicación aproximada del área de trabajo, se observan las franjas de color verde que indican los campos petroleros activos en la cuenca..... 39
- Figura 2. Esquema foto efecto en el átomo de titanio. A) Generación de hueco en la órbita K del átomo. B) Emisión de fotones por el átomo en la capa $K\alpha$ y $K\beta$ 43
- Figura 3. Se ilustra un espectro que se obtuvo mediante un instrumento que dispersa energía. Con dicho equipo, la abscisa está calibrada generalmente en número de canal o energía en keV. Cada punto representa el número de conteos acumuladas en uno de los varios cientos de canales. 45
- Figura 4. Se observa el flujo metodológico para la obtención de datos XRF..... 46
- Figura 5. A). Fotografía de una muestra de ripios de perforación. B) Zoom de la fotografía A donde se observa a detalle la disposición de los ripios. 47
- Figura 6. Esquema de difracción del modelo de Bragg. 55
- Figura 7. A) Se observa un ejemplo de la diferencia del ordenamiento atómico de los picos de difracción por DRX. B) Se observa un ejemplo de los diferentes minerales identificados en los picos de difracción por DRX. 56
- Figura 8. A) ejemplo de un registro SP que muestra la línea de shale y arenas. B) Ejemplo del cambio en la curva del registro SP en diferentes litologías 61
- Figura 9. Ejemplo de un registro de resistividad corrido en uno de los pozos trabajados. 62

Figura 10. Ejemplo de un registro sónico.	64
Figura 11. Ejemplo de un registro de densidad.....	65
Figura 12. Ejemplo de un registro neutrónico.....	67
Figura 13. Ejemplo de un registro Gamma Ray.....	69
Figura 14. Ejemplo de registro Caliper.....	70
Figura 15. A) se observa la ubicación geográfica de la cuenca Caguán-Putumayo. B) se observa la descripción de los límites geológicos de la cuenca Caguán-Putumayo y su extensión a Ecuador y Perú en las cuencas de Oriente y Maraón respectivamente. Además, se observa el Arco de Vaupés como ejemplo de separador geomorfológico de cuencas.	72
Figura 16. Columna estratigráfica tipo de la cuenca Putumayo.	73
Figura 17. Columna cronoestratigráfica de las cuencas Oriente, Putumayo, Caguán y Llanos. .	74
Figura 18. Se observa el ambiente de depositación generalizado de la Formación Villeta.	82
Figura 19. Se observa la inconformidad angular de las rocas del Triásico-Jurásico con las rocas del Cretácico.	89
Figura 20. Perfiles esquemáticos transversales de la Cordillera de los Andes a la latitud de la Cuenca Putumayo. A). Muestra la evolución desde una plataforma continental pericratónica. B) Progresivamente invertida. C) Conformación actual. Las flechas rojas y amarillas indican el transporte principal de sedimentos y las flechas blancas movimientos verticales relativos. 1) Frente Andino. 2) Trenes estructurales intermedios. 3) Ambiente de plataforma.....	91
Figura 21. Esquema evolutivo idealizado de la evolución tectonosedimentaria de la cuenca Putumayo.	95

Figura 22. Perfil geológico actual de la Cuenca de Putumayo.	96
Figura 23. A). Trenes estructurales que afectan a los campos Hormiga, Loro, Acae, San Migue, Orito. B) Esquema tectónico de la cuenca de Putumayo con las tres zonas de deformación reconocidas: 1) Zona compresional Andina al occidente y 2) Zona de plataforma del antepaís con reactivaciones transpresionales. A: depósitos carbonaticos, B: basamento no cristalino y C: basamento cristalino. Línea verde discontinua indica el límite de depositación de la Formación Villeta.	99
Figura 24. Mapa residual del Tope del Paleozoico de la cuenca de Putumayo.	100
Figura 25. Perfil 2 correspondiente al trazo mostrado en la Figura 24 del mapa de anomalías de Bouguer. Muestra un basamento de composición compleja afectado por tectónica de inversión.	102
Figura 26. Se observa la secuencia de pasos generalizados para la realización de este proyecto.	103
Figura 27. Estadística de registros por pozos. Densidad de información y porcentaje de incertidumbre.	109
Figura 28. A) Se observa el registro SP corregido de una manera errónea. B) Se observa el registro SP corregido en base a las arcillas del registro Gamma Ray.	111
Figura 29. Corrección en profundidad de la curva DT del pozo Acae-7. El Shift no supera 1 ft.	112
Figura 30. Se eliminó mala corrida de la herramienta DT en el pozo Acaé-7.	113
Figura 31. A) Encerrado en negro se encuentran los valores correctos para la respuesta del registro GR para la Formación Villeta y encerrados en rojo están las respuestas anómalas dadas por el registro GR para la misma formación, las cuales se disponen a	

normalizar. B) Estadística de las curvas con respuesta correcta para Formación Villeta junto con la estadística de la respuesta normalizada de la misma curva..... 114

Figura 32. A) Corrección en profundidad a partir de las curvas CGR-GR para el Core-1 del pozo Hormiga-1X. B) Corrección en profundidad a partir de las curvas CGR-GR para el Core-2 del pozo Hormiga-1X. C) Corrección en profundidad a partir de las curvas CGR-GR para el Core-3 del pozo Hormiga-1X..... 115

Figura 33. A) Construcción del registro sintético de resistividad donde se asume que dichos valores están asociados a las características de las litologías presentes (Pozo Acae-10). B) Construcción del Gamma Ray sintético a partir de pozos vecinos (Pozo Acae-4). C) Construcción del registro sintético del sónico en zonas donde no se dispone directamente de los datos (pozo Acae-5). 116

Figura 34. Reproducción de curvas sintéticas a partir de redes neuronales y el grado de incertidumbre asociado los datos de entrada (Densidad, resistividad y Gamma Ray). 117

Figura 35. Flujo de trabajo para el desarrollo de la metodología en el modelamiento de litotipos. 118

Figura 36. Gráfico de Litología Gamma Ray – ResS, pozos Acae. La combinación de las curvas de Rayos Gamma y Resistividad somera permitió la identificación rápida de arcillas y/o shale a partir de un cluster (color gris) con características de alta radioactividad y baja resistividad, como se aprecia en la figura..... 121

Figura 37. Gráfico de Litología Gamma RHOB-NPHI, Pozos Acaé. La combinación de las curvas de Densidad y Neutrón permitió la identificación rápida de dos tipos de calizas (tipo 1, en azul oscuro las calizas tipo Wackestone, valores bajos de Neutrón

principalmente y tipo 2, en azul más claro las calizas tipo Mudstone, valores más altos de Neutrón.	121
Figura 38. Se utiliza la nomenclatura propuesta por Farrell K.M., et al. (2012) que consiste en determinar una facies sedimentaria inicialmente por sus características texturales y luego se complementa con una estructura sedimentaria física o biogénica principal....	125
Figura 39. Facie 1, Lutita negra silicificada. Pozo Hormiga-1X, 9810 ft.....	127
Figura 40. Facies Wackestone, pozo Hormiga-1X, 10437 ft.....	128
Figura 41. Facies Lodolita negra disgregada, Hormiga 1X, 9803 ft.....	129
Figura 42. Arcillolita negra, Hormiga 1X, 10435 ft.	130
Figura 43. Arcillolita masiva, Hormiga 1X, 9810 ft.....	131
Figura 44. Facies Mudstone Calcáreo, pozo Hormiga 1X, 9830 ft.	132
Figura 45. Facies Arcillolita masiva pozo Hormiga 1X, 9837 ft.....	133
Figura 46. Fácies Lutita negra físil. Hormiga 1X, 10433 ft.	134
Figura 47. Facies Wackestone, Wackestone calcáreo, Orito 105, 6600 ft, y Hormiga 1X, 10412 ft.	135
Figura 48. Facies Mudstone Calcáreo laminado, pozo Hormiga-1X, 10585 ft.	136
Figura 49. Facies Wackestone fracturado y con grietas de disolución, Orito-105, 6596 ft, y Orito-5, 5000 ft.	137
Figura 50. Facies Arenisca glauconítica: Arenisca de grano fino a medio con Glauconita sin estructura. Loro-12D, 10660 ft.	138
Figura 51. Facies Arenisca con Glauconita y cemento calcáreo. Loro-12D, 10659ft.	139
Figura 52. Facies Arenisca glauconítica bioturbada: Hormiga-1X, 10611 ft.	140

Figura 53. Facies Arenisca glauconítica bioturbada: Hormiga-1X, 10611 ft.	141
Figura 54. Facies arenisca fina a media con estratificación cruzada. Acae-1, 10324 ft.	142
Figura 55. Facies Arenisca fina a media, con estratificación cruzada. Acae-1, 10325 ft.	143
Figura 56. Packstone bioclástico color gris, Orito-5, 4997ft.	144
Figura 57. Lutita negra calcárea.....	145
Figura 58. Grainstone. Loro-12D 1, 10657 ft.	146
Figura 59. Arcillolita-Limolita masiva, pozo Orito-105, 5576 pies ft.....	147
Figura 60. Arcillolita-Limolita masiva, pozo Orito-105, 5577ft.	148
Figura 61. Arenisca con fracturas rellenas de calcita, 6558ft.	149
Figura 62. Arenisca de grano fino a medio con Glauconita sin estructura, pozo Loro 12D, 10660 ft.	150
Figura 63. Lutita negra con intercalaciones milimétricas de Arenisca fina a limo, pozo Orito- 105, 6606 ft.	151
Figura 64. Arenisca fina a media, con estratificación cruzada. Acae-1, 10343 ft.	152
Figura 65. Respuesta del Gamma ray y posibles ambientes de depositación asociados.	153
Figura 66. Electroformas básicas que patrones de depositación: agradación, retrogradación y progradación.....	154
Figura 67. Estuario Betsiboka, Madagascar, Análogo actual de la Arenisca T Inferior y Arenisca U Inferior.....	155
Figura 68. Modelo conceptual de una bahía estuarina.	156
Figura 69. Reservorios (color amarillo) en una bahía estuarina.	157
Figura 70. Estructura interna de una barra.....	157
Figura 71. Modelo conceptual de una plataforma somera.	158

Figura 72. Modelo conceptual de un perfil costero y plataforma somera mostrando la ubicación de las principales litofacies reconocidas en este estudio.....	160
Figura 73. Crossplot densidad vs neutrón, para identificar la composición mineralógica de carbonatos a partir de datos DRX (pozo Hormiga-1X) donde los valores azules me indican un bajo contenido de carbonatos.	161
Figura 74. Crossplot densidad vs neutrón, para identificar la composición mineralógica de Silice a partir de datos de DRX (pozo Hormiga-1X).....	162
Figura 75. Crossplot Densidad vs Neutron, para identificar la composición mineralógica de arcillas a partir de datos de DRX. Para el Pozo Hormiga-1X.....	162
Figura 76. Se observan los datos XRF de los pozos Acae-2, Acae-10, Acae-12, Hormiga-1X y Loro-7A.....	164
Figura 77. Ejemplo de curva Bulk resultado en gris se representa la arcilla, en amarillo la sílice y en azul el carbonato. Datos de 0 a 100.....	167
Figura 78. Se observa el comportamiento del V y su relación con el TOC y litologías de la Formación Villeta.	168
Figura 79. Se observan los valores obtenidos de TOC de acuerdo a los procesos matemáticos mencionados anteriormente y su respectiva normalización, los puntos verdes representan dichos valores.	170
Figura 80. Ejemplo de Datos composicionales construidos a partir de elementos identificados por XRF.....	171
Figura 81. 0-56% contenido de arcillas medidos con fluorescencia de rayos X.	172
Figura 82. 56-100% contenido de arcillas medido con fluorescencia de rayos X.	172
Figura 83. 0-56% contenido de sílice medidos con fluorescencia de rayos X.....	173

- Figura 84. 56-100% contenido de sílice medido con fluorescencia de rayos X. 173
- Figura 85. 0-10% contenido de carbonato medidos con fluorescencia de rayos X. 174
- Figura 86. 9-100% contenido de carbonato medido con fluorescencia de rayos X. 174
- Figura 87. A) Pozo Acae-2. B) Pozo Acae-10. Los círculos de color rojo muestran el cambio abrupto en la variación de la concentración elemental de una profundidad a otra. Los círculos verdes muestran una variación gradual de la concentración elemental en profundidad. Los círculos amarillos muestran estabilidad en la concentración elemental en profundidad. 181
- Figura 88. Se observa la variación composicional por XRF en las profundidades determinadas. Los círculos rojos muestran el cambio abrupto en el contenido elemental de una profundidad a otra. Los círculos verdes identifican la variación gradual de la concentración elemental a medida que cambia la profundidad. Los círculos amarillos muestran la no variación en el contenido elemental a medida que hay un cambio en profundidad. 187
- Figura 89. Se observa la variación en la concentración y composición elemental en el pozo Hormiga-1X en los intervalos donde se realizó XRF. 190
- Figura 90. Se observa la composición elemental del pozo Loro-7A. Los círculos rojos muestran un cambio abrupto en la composición elemental a medida que varía la profundidad. Los círculos verdes muestran una variación gradual de la concentración en profundidad y los círculos amarillos muestran la no variación en la concentración a medida que varía la profundidad. 195
- Figura 91. Resultado de la integración y correlación de los pozos Acae-2, Acae-10, Hormiga-1X, Acae-12 y Loro-7A a partir de datos de la técnica instrumental XRF después de

su debida normalización, manejo estadístico y edición donde se observa la generación de los diferentes tipos de roca que se pudieron interpretar y su disposición de manera generalizada.....	197
Figura 92. A) Pozo Acae-10. B) Pozo loro-7A. Ver anexo 1.	199
Figura 93. Miembro Villeta B, relación Si/Ca, valores menores a 1 indican alto contenido de Calcio. A) Litotipos XRF. B). Valores numéricos XRF.	200
Figura 94. A) Análisis numérico de elementos por XRF. B). se observa la variación en el ambiente de sedimentación interpretado a partir de las relaciones V/K.	201
Figura 95. A) litotipos generados por XRF. B). Valores números de las relaciones elementales.	203
Figura 96. Se comparan los resultados obtenidos del DRX y la información relacionada a fluorescencia de rayos X (XRF).....	204
Figura 97. Gráficos de litología elaborados para definir litotipos basados en la respuesta de los registros. Las principales discriminantes fueron los registros: Gamma Ray, Neutrón y Densidad.....	206
Figura 98. Resumen de los tipos de roca asociados y discriminados desde el punto de vista composicional. De igual manera se incorpora la tabla de colores de acuerdo al diagrama ternario para los campos Acae, Loro y Hormiga.	207
Figura 99. Litotipos definidos para los Campos Acae, Hormiga y Loro: Litotipo 1) Areniscas Limpias; Litotipo 2) Areniscas Arcillosas; Litotipo 3) Areniscas Calcáreas; Litotipo 4) Wackestone, Packstone, Grainstone; Litotipo 5) Mudstone; Litotipo 6) Shale Silíceo; Litotipo 7) Arcillolita; Litotipo 8) Arcillolita Calcárea.	207

- Figura 100. A) Grafico Th/K vs Th/U donde se identifican las zonas de adsorción de Uranio, transicionales y de aporte continental B) Grafico Th/k vs Th/U donde se identifican los mismos dominios ambientales que en la gráfica A, pero discriminado por datos de TOC. C) Integración de datos de Gamma Ray espectral, litotipos, registros de pozo y TOC construido a partir de elementos. 208
- Figura 101. Construcción de la fragilidad a partir de datos mineralógicos (Sílice, Calcio, Arcillas y TOC)..... 209
- Figura 102. Gráfico tipo clúster Densidad vs Neutrón con los litotipos interpretados. De los campos Acae, Loro y Hormiga. 211
- Figura 103. Gráfico tipo clúster RESD vs NPHI con los litotipos interpretados. De los campos Acae, Loro y Hormiga. 211
- Figura 104. Gráfico tipo clúster RESD vs RHOB con los litotipos interpretados. De los campos Acae, Loro y Hormiga. 212
- Figura 105. Análisis estadístico de los principales registros de pozo para la Formación Villeta, pozo Hormiga-1X. En la figura se observa el análisis estadístico (percentiles P10, P50 y P90) de los principales registros de pozo discriminantes y por Litotipo. 212
- Figura 106. Template Análisis. La figura muestra el set de datos empleados para la integración de la información de pozo para la definición de litotipos en el pozo Hormiga-1X. 213

Lista de Apéndices

Ver apéndice adjunto en Cd y puede visualizarse en base de datos de la biblioteca

Apéndice A. Resultados Difracción de Rayos X.....	225
Apéndice B. Análisis Cuantitativo de Xrf	225

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO QUIMIOESTRATIGRÁFICO DE LA FORMACIÓN VILLETA EN POZOS DE PERFORACIÓN, CUENCA DE PUTUMAYO*.

AUTORES: Pabón Martínez, Luis Carlos
Pereira González, Fayber Andrés**.

PALABRAS CLAVES: Sedimentología, quimioestratigrafía, registros de pozo, Formación Villeta, geoestadística.

DESCRIPCIÓN:

La realización de un modelo sedimentológico y generación de un modelo matemático para interpretar la estratigrafía de la Formación Villeta en la cuenca de Putumayo, se produjo en base a la integración y aplicación de las técnicas de análisis instrumental de XRF Y DRX con los registros de pozo y núcleos de perforación.

Se tomó la información de los registros de pozo, después de su debida corrección junto con los datos de XRF y DRX, los cuales muestran la composición elemental y los compuestos químicos de las rocas respectivamente; posteriormente se llevaron estos datos a profundidad y se realizaron los análisis estadísticos respectivos sobre los cuales se obtuvieron los rangos numéricos para la clasificación y generación de los litotipos de la Formación Villeta. Paralelamente se determinaron a partir de los núcleos de perforación veintiocho litofacies sedimentarias en donde se dio una interpretación de los ambientes de depositación de la formación, esto fue posible relacionando la variación de la concentración de los diferentes elementos químicos representativos de dichos ambientes, en los pozos con datos de XRF y registros de pozo.

Por medio de los registros de pozo (esencialmente registros eléctricos y Gamma Ray) se realizaron las electrofacies para la Formación Villeta, posteriormente correlacionadas con las facies obtenidas en el análisis de los núcleos de perforación. Se obtuvieron los litotipos de la Formación Villeta. Éste trabajo consistió en la integración y aplicación de las técnicas de análisis instrumental con los métodos indirectos ya conocidos para mejorar la efectividad y practicidad en la exploración y desarrollo de un campo petrolero.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Geología. Director: PhD. Mario García González. Codirector: Geol. Edgar Ramiro Pineda Martínez. Codirector: Geol. David Alfonso Serrano Ferreira.

ABSTRACT

TITTLE: CHEMOSTRATIGRAPHY STUDY ON DRILLING WELLS OF THE VILLETA FORMATION, PUTUMAYO BASIN*.

AUTHORS: Pabón Martínez, Luis Carlos
Pereira González, Fayber Andrés**.

KEYWORDS: Sedimentology, Chemostratigraphy, Well logs, Villeta Formation, Geostatistics.

DESCRIPTION:

The realization of one Sedimentological model and the generation of one mathematical model for understanding of the stratigraphy in Villeta Formation of the basin Putumayo, produced in base of the integration and application of the technics of instrumental analysis of XRF and DRX with well logs and drilling cores.

The well logs information was taken after its correction along with the data of XRF and DRX, which show the elemental composition and the chemical compounds of the rocks; later this data was taken deep and a respective statistical analysis was done, based on these the numerical ranges were obtained in order to classify and generate of the lithotypes of the Villeta Formation. Parallel to the drilling cores, twenty-eight lithofacies were determined, at this point of the training deposits environments were also determined, this was possible relating the variation of the concentration of the different chemical elements that are representative of certain environments, in the drilling cores with XRF data and well logs.

Through the well logs (electrics and Gamma Ray) the electrofacies were made for the Villeta Formation, later correlated with the facies obtained in the analysis of drilling cores. The lithotypes were obtained of the Villeta Formation. This work consisted in the integration and application of the technics of instrumental analysis with the indirect methods that are already known to improve the effectiveness and practicality in the exploration and development of one oil field.

* Research project

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Director: PhD. Mario García González. Codirector: Geol. Edgar Ramiro Pineda Martínez. Codirector: Geol. David Alfonso Serrano Ferreira.

Introducción

Las herramientas geológicas y químicas para la exploración de hidrocarburos han proporcionado en los últimos años técnicas más efectivas y eficaces, las cuales muestran resultados positivos, siendo determinantes para generar mayor eficiencia y practicidad en el proceso de evaluación geológica de un yacimiento.

En este trabajo se muestra la complementación de las técnicas de análisis instrumental con el estudio de la estratigrafía para generar un procedimiento más eficiente y económico, procesar e interpretar la información litológica de una formación geológica cuando no se cuenta con las herramientas tradicionales, particularmente cuando no hay información, es limitada o no se pueden extraer de forma continua los núcleos de perforación por daños en la formación, entre otros.

La metodología desarrollada ha sido compartida por parte de ECOPETROL S.A.-ICP, la cual abarca desde el proceso de recolección de datos, control de calidad, clasificación y organización de la información hasta la evaluación estadística la cual permite identificar la concentración de rangos elementales por cada tipo de roca.

El desarrollo de los flujos de trabajo e implementación de la metodología requirió un esfuerzo importante en la adecuación, optimización, interpretación y control de los resultados, debido a la información disponible para el desarrollo del estudio, la cual fue limitada debido a la alta

heterogeneidad de la Formación Villeta, por ende, se hace énfasis en el alto grado de incertidumbre debido a la calidad de la data.

La etapa inicial consistió en la identificación de las facies litológicas de la Formación Villeta en base a la descripción de núcleos de perforación, entre los aspectos más importantes para su identificación se encuentran la variabilidad de las características texturales y composicionales como el tamaño de grano, contacto entre capas, estructuras sedimentarias, grado de impregnación de hidrocarburos, presencia de fósiles (bivalvos, conchas, entre otros), identificación de minerales.

La segunda etapa inicia con la interpretación sedimentológica involucrando las técnicas químicas de análisis instrumental de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) la cual se utilizó para construir un modelo composicional de acuerdo a las relaciones químicas elementales obtenidas junto con la técnica instrumental como la difracción de rayos X (DRX) que mostró la composición de la roca en base a los compuestos químicos inorgánicos de la muestra.

La tercera etapa se centra en la evaluación de la información disponible y la calidad de los datos que dificultan la interpretación, se emplea la diferencia entre el bit size y el Caliper con el fin de determinar el índice de Calidad de Hueco (ICH) y la corrección del registro de densidad (ρ_{drho}) para poder definir los diferentes centroides asociados a la composición y propiedades composicionales y petrofísicas. Esto se realiza a partir del análisis de Cluster (ρ_{hob} vs N_{phi} , ρ_{hob} vs $RESD$, GR vs ρ_{hob}). Para el caso de pozos con mala calidad de la información se emplearon métodos de inteligencia artificial (redes neuronales y lógica difusa).

La cuarta etapa se basa en el amarre roca-registro, con el fin de disminuir la incertidumbre asociada a la interpretación de registros eléctricos y las diferentes variables que pueden dar lugar a interpretaciones erróneas tales como el tipo de lodo de perforación, matriz en la cual se corrieron los registros de porosidad, desfases en profundidad, errores de la herramienta, daños a la formación, presión, temperatura, tipo de fluidos, conductividad térmica de la roca entre otros. Finalmente se hace interpretación de los análisis obtenidos a partir de la evaluación conjunta de las técnicas mencionadas, con el fin de definir un modelo de litotipos.

1. Planteamiento del Problema

En ocasiones, dentro de la búsqueda y exploración de hidrocarburos, se presentan limitantes tanto técnicas como financieras, creando la necesidad de implementar nuevos y mejores métodos de exploración, sencillos y económicamente viables.

Dado que en ciertas circunstancias no se cuenta con la información geológica necesaria y completa, como los métodos indirectos de exploración o extracción de núcleos de perforación de una forma continua y completa en todos los pozos en donde se trabaja, los análisis por XRF y DRX se convierten en una herramienta y método útil en la búsqueda eficiente y práctica en la exploración de hidrocarburos y producción de campos petroleros, permitiendo trabajar sobre la base de muestras de zanja (ripios) y abriendo la posibilidad de generar una evaluación estratigráfica, basado en la presencia de la variación y concentración de los elementos químicos (quimioestratigrafía) los cuales pueden caracterizar ciertos tipos de ambiente de formación, fuente de aporte de los sedimentos, la definición de litotipos representativos de una formación geológica, permitiendo el análisis e interpretación de las rocas sedimentarias representadas en secciones estratigráficas.

¿Pueden las técnicas de análisis instrumental trabajar complementariamente con las herramientas de exploración de hidrocarburos (registros de pozo, muestras de zanja, núcleos de perforación) como un recurso práctico y alternativo en la interpretación estratigráfica de una zona de interés? Basados en esta pregunta es cómo durante el desarrollo del trabajo se pretende

generar un modelo sedimentológico y estratigráfico para la Formación Villeta en la cuenca de Putumayo teniendo como recurso la información que proporciona la técnica de análisis instrumental de espectrometría por fluorescencia de rayos X, la difracción de rayos X, integrándolas con los registros de pozo e información de núcleos de perforación.

2. Justificación

La prospección de hidrocarburos en la cuenca de Putumayo en los últimos años ha sido de gran importancia debido a su alto potencial exploratorio, según ANH (2010) es de 255 MBP a 2200 MBP. Esto se debe a que la prospección de hidrocarburos en la Cuenca ha estado enfocada a detectar trampas de tipo estructural y estratigráfico que involucran las formaciones geológicas del Cretácico y Cenozoico (ANH, 2010). Las características litoestratigráficas de la Formación Villeta permiten tener las condiciones ideales para que tenga un excelente potencial como generadora de hidrocarburos en la cuenca de Putumayo.

La quimioestratigrafía es una herramienta geológica útil y práctica en la industria y la academia ya que por medio de ella se pueden determinar las características litoestratigráficas tanto de yacimientos convencionales como de no convencionales, esto hace que la quimioestratigrafía y sus diversos componentes trabajados de la manera adecuada sea una herramienta versátil y práctica que puede abarcar grandes ámbitos en la exploración de hidrocarburos.

La incorporación de la quimioestratigrafía como método de fácil acceso y bajo costo (en comparación con otras técnicas más costosas), asociable con las técnicas tradicionales de exploración, permite realizar una interpretación más robusta y completa en el proceso de reconstrucción estratigráfica para una unidad o formación sobre la cual se tenga interés exploratorio. Esto permite generar un modelo estratigráfico basado en composiciones y

estructuras químicas de las unidades y litologías presentes permitiendo clasificar composicionalmente las litologías de interés, correlacionar y soportar esto con información de la formación o cuenca objeto de estudio o exploración.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Caracterización estratigráfica de la Formación Villeta en la cuenca de Putumayo por medio de la integración de las técnicas de análisis instrumental de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) y difracción de rayos X (DRX) con las herramientas tradicionales de exploración de hidrocarburos en los pozos de estudio.

3.2 Objetivos Específicos

- Interpretación de los ambientes de depositación de la Formación Villeta en la cuenca de Putumayo en base a la composición química elemental suministrada por los análisis de núcleos de perforación, análisis DRX y XRF.
- Identificación de los diferentes tipos de roca para la Formación Villeta en base a características texturales, composicionales, resultados obtenidos por técnicas instrumentales como espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF), difracción de rayos X (DRX) y registros de pozo.
- Implementar un sistema de interpretación automatizado de litotipos (unidades de roca) a partir de información derivada de núcleos de perforación, muestras de zanja,

quimioestratigrafía y registros de pozo, a lo largo del perfil de cada uno de los pozos involucrados en el estudio de acuerdo al grado de incertidumbre de la información.

- Contribuir a la generación de conocimiento que permita evaluar el potencial de desarrollo de los campos involucrados y la identificación de nuevas oportunidades a un costo más bajo.

4. Localización

El área de estudio está localizada al Suroccidente de Colombia, en la cuenca Caguán-Putumayo, la cual abarca parte de los departamentos de Meta, Caquetá y Putumayo. Limita al Occidente con la Cordillera Oriental y al Oriente con el escudo de Guyana; al Norte con la serranía de la Macarena y al sur con el límite internacional con Ecuador y Perú, la cuenca de Putumayo tiene un área de 50.000 Km² aproximadamente y se extiende geológicamente al Sur tomando el nombre de cuenca de Oriente en Ecuador y cuenca de Marañón en Perú (ANH, 2010).

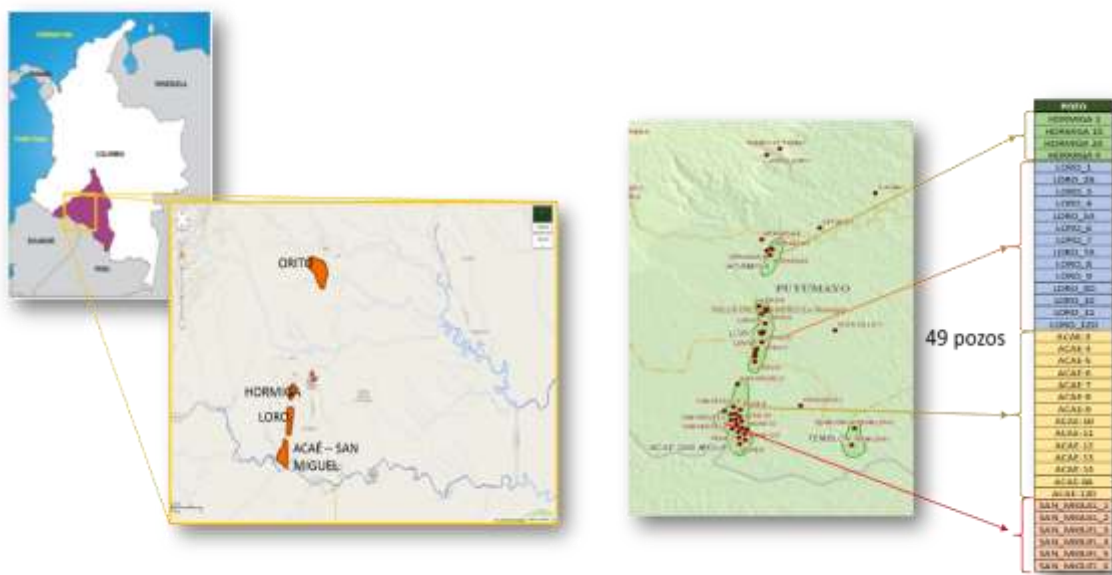


Figura 1. A) Ubicación de la cuenca de Putumayo en Colombia. B) Ubicación regional de la cuenca de Putumayo al suroccidente de Colombia. C) Ubicación aproximada del área de trabajo, se observan las franjas de color verde que indican los campos petroleros activos en la cuenca.

Adaptado de: ANH (2010) y Google Maps (2016). Modificada por los autores.

5. Marco Teórico

La geoquímica sedimentaria suministra dos tipos de datos: los que sirven para interpretación genética de los materiales (útiles en sedimentología y petrología sedimentaria) y los relativos a la evolución térmica en una sección estratigráfica (que sirven para comparación, correlación, con otras secciones estratigráficas, entre otros). Esto constituye el objetivo de la quimioestratigrafía. La quimioestratigrafía es la rama de la estratigrafía que estudia e interpreta la composición química de las rocas sedimentarias y su asociación con los eventos geológicos que dieron paso a su formación.

Dentro de las herramientas de análisis instrumental que se utilizan dentro de la quimioestratigrafía y durante el desarrollo de este trabajo están la espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) y la difracción de rayos X (DRX), a continuación, se explicará el principio químico y físico de estas técnicas y su aporte como método de complementación en la identificación geológica de una zona. Para poder abordar y entender la espectrometría de fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X es necesario tener claro el concepto de los rayos X y su origen.

5.1 Rayos X

En 1895 el físico alemán Wilhem Röntgen, experimentando con un tubo de rayos catódicos, produjo rayos tenues que causaban que una pantalla fluoresca, o centellee (Abraham, 2009).

Dicho tubo Röntgen lo rodeó con un grueso cartón y volvió a encender los rayos, y cuando se dio cuenta, una segunda pantalla dentro de la habitación estaba encendida; él siguió experimentando y se dio cuenta que los rayos traspasaban las paredes de la habitación, como en su momento no se sabía la naturaleza de estos rayos, él decidió llamarlos “Rayos X” (Abraham, 2009).

Los rayos X son radiación electromagnética de longitud de onda corta que se producen cuando se desaceleran los electrones de alta energía o por transiciones de electrones que están en los orbitales internos de los átomos (Skoog et al., 2008). Su energía dentro del espectro electromagnético está situada entre el lejano ultravioleta y los rayos gama, la energía de los rayos X convencionalmente es expresada en kiloelectronvolts (keV) (Meléndez y Camacho, 2009). Los valores de las longitudes de onda de los rayos X están entre aproximadamente 10- 5Å a 100 Å (Skoog et al., 2008).

5.2 Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (Xrf)

En los últimos años las técnicas de análisis instrumental han proporcionado grandes aportes en la generación del conocimiento en diversas áreas de la industria y la academia, de una manera eficiente y práctica, una de esas técnicas es la de la fluorescencia de rayos X.

La espectrometría de fluorescencia de rayos X es una técnica de espectroscopia atómica la cual es empleada cuando se quiere conocer con rapidez la composición elemental exacta de una sustancia, pues permite determinar todos los elementos del sistema periódico, desde el Flúor hasta el Uranio, en muestras sólidas, en polvos y en líquidos (Martínez et al., 2006). Cabe

resaltar que entre mayor sea el número atómico del elemento mayor será la efectividad de este método. La fluorescencia de rayos X se puede explicar en dos etapas, la absorción de rayos X y la emisión de rayos X fluorescentes.

5.2.1 Absorción de los rayos X. Un haz de rayos X se hace pasar a través de una fina lámina de materia, su intensidad o potencia generalmente disminuye como consecuencia de la absorción y la dispersión (Skoog et al., 2008). Los experimentos han mostrado que el decremento fraccional en la intensidad de un haz de rayos X cuando pasa a través de cualquier sustancia homogénea es proporcional a la distancia atravesada, y esto a su vez depende de la composición de dicha sustancia (Limón, 2012).

Cuando un átomo absorbe la energía recibida de los fotones de rayos X, esto produce una excitación que genera una alteración en la estructura de dicho átomo, dicha alteración se debe a que la radiación X incidente o primaria expulse electrones de capas interiores del átomo (Martínez et al., 2006). Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes. Éste proceso hace que el átomo pase de un estado basal o equilibrado a otro de mayor energía (inestable) de lo que resultan transiciones en diferentes estados energéticos en el átomo, los cuales son únicos para cada átomo en particular (Meléndez y Camacho, 2009). Luego de esto, iones excitados electrónicamente vuelven a su estado fundamental mediante transiciones en las que intervienen electrones de los niveles de mayor energía (Skoog et al., 2008).

El bombardeo de los átomos con fotones de energía suficientemente alta hace que los electrones de las órbitas internas de los átomos salten al exterior tal como se muestra en la Figura 2A. Este

proceso se llama efecto fotoeléctrico y genera la formación de un ión positivo atómico (Martínez et al., 2006). Éste proceso continúa con la emisión de rayos de rayos X fluorescentes que se explicará a continuación.

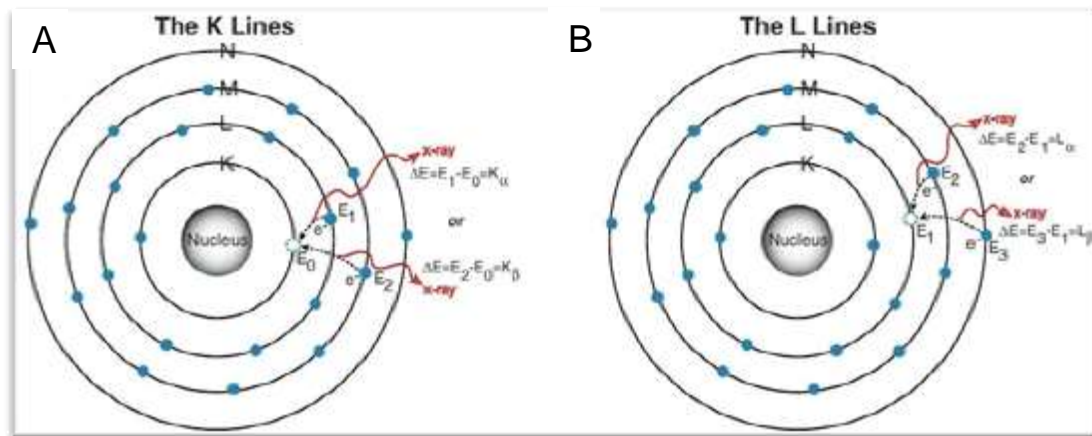


Figura 2. Esquema foto efecto en el átomo de titanio. A) Generación de hueco en la órbita K del átomo. B) Emisión de fotones por el átomo en la capa $K\alpha$ y $K\beta$.

Adaptado de: Martínez et al. (2006).

5.2.2 Emisión de rayos X fluorescentes Cuando los electrones de las orbitas externas de este ion se desplazan a ocupar la vacante en orbitas internas, se produce un exceso de energía y se libera en forma de un fotón de rayos X secundario, esto se observa en la Figura 2B (Martínez et al., 2006). Los rayos secundarios generados a partir del proceso de absorción y emisión anteriormente explicado se denominan rayos X fluorescentes. El fotón de rayos X emitido tendrá una energía específica igual a la diferencia entre las dos energías de enlace de un electrón de las capas interna y adyacente, y esta energía es única para cada elemento (Meléndez y Camacho, 2009).

Debido a la configuración orbital de cada elemento es que se puede conocer la intensidad de energía que emite por fluorescencia de rayos X, es decir, cada elemento tiene su propia emisión de intensidad de energía y por medio de esto es que se pueden identificar los elementos presentes en una muestra. Por tanto, si se identifica la longitud de onda o energía de cada una de estas radiaciones características, se podrá conocer los elementos que componen la muestra, y con esto medir sus intensidades, para conocer sus respectivas concentraciones.

5.2.3 Análisis cuantitativo de la fluorescencia de rayos X Además de utilizar la energía o longitud de onda de los rayos X emitidos para la identificación de elementos, la intensidad de los rayos X permite el análisis cuantitativo (Meléndez y Camacho, 2009). Por esta razón fue importante entender lo que se explicó en los ítems anteriores, el por qué cada elemento puede generar sus propias intensidades de rayos X fluorescentes para ser diferenciados en el análisis cuantitativo. Las intensidades de los rayos X son directamente proporcionales a la concentración del elemento, es decir, cuanto más intensa es la emisión o fluorescencia en mayor cantidad se encuentra el elemento a cuantificar (Meléndez y Camacho, 2009). En la Figura 3 se ilustra un ejemplo de los resultados que arroja la técnica XRF en una muestra.

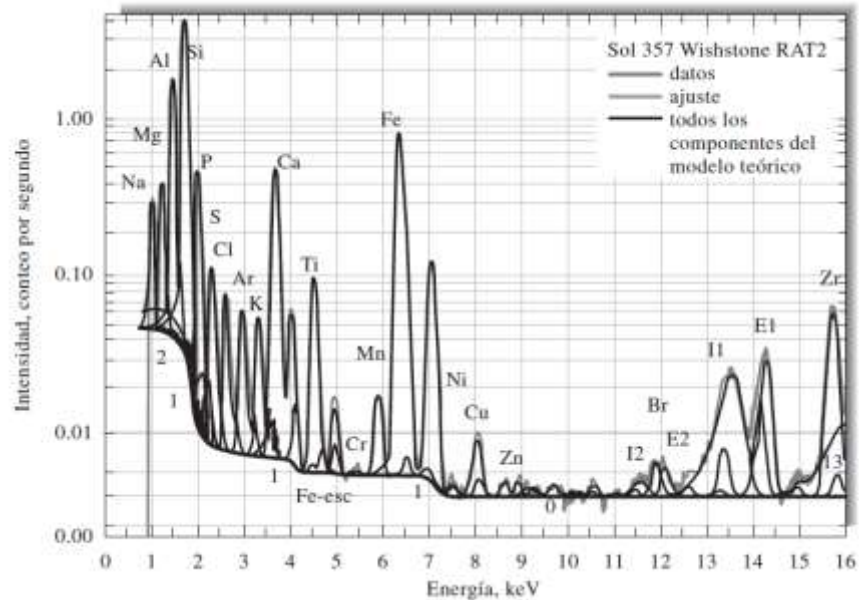


Figura 3. Se ilustra un espectro que se obtuvo mediante un instrumento que dispersa energía. Con dicho equipo, la abscisa está calibrada generalmente en número de canal o energía en keV. Cada punto representa el número de conteos acumuladas en uno de los varios cientos de canales.

Adaptado de: Skoog et al. (2008).

5.2.4 Metodología para la obtención de los datos de fluorescencia de rayos X. Los datos de fluorescencia de rayos X (XRF) utilizados para la realización de este proyecto fueron dados por parte de ECOPETROL-ICP, entidad que contrató a la empresa FIT (Fluid Inclusion Technologies) para realizar los análisis por fluorescencia de rayos X de los pozos Acae-2, Acae-10, Acae-12, Hormiga-1X y Loro-7A. esta se encuentra ubicada en 2217 N. Avenida Yellowod, Broken Arrow, Estado de Oklahoma, Estados Unidos. Es importante mencionar que los análisis XRF fueron realizados sobre Muestras de Zanja. A continuación, se describirá la metodología generalizada aplicada a las muestras de zanja para la generación de los datos XRF aplicada por FIT (2016).



Figura 4. Se observa el flujo metodológico para la obtención de datos XRF.

El primer paso es la limpieza correcta de la muestra, para esto se aplica a los ripios un solvente químico que elimina los residuos del lodo perforación, los lodos de perforación comúnmente se componen por un mineral de alta densidad, este es el sulfato de Bario ($BaSO_4$), utilizado comúnmente como agente densificante para todos los tipos de fluidos de perforación. La muestra de ripios se somete a un lavado cuyos solventes químicos permiten remover el sulfuro de Bario, permitiendo así disminuir el grado de incertidumbre del lector XRF, si esto no se realiza, el lector del espectrómetro XRF leería este compuesto químico y generaría datos erróneos de la composición elemental de un ripio analizado.

Posteriormente se toma una fotografía en alta definición y una fotografía por excitación de rayos ultravioleta, el último se realiza para poder identificar madurez termal de la roca, y posibles características orgánicas de la misma. El tamaño de la foto es de aproximadamente 35mm y representa un alto porcentaje de la cantidad de la muestra. La Figura 5 muestra un ejemplo de las fotografías tomadas por FIT a cada una de las muestras.

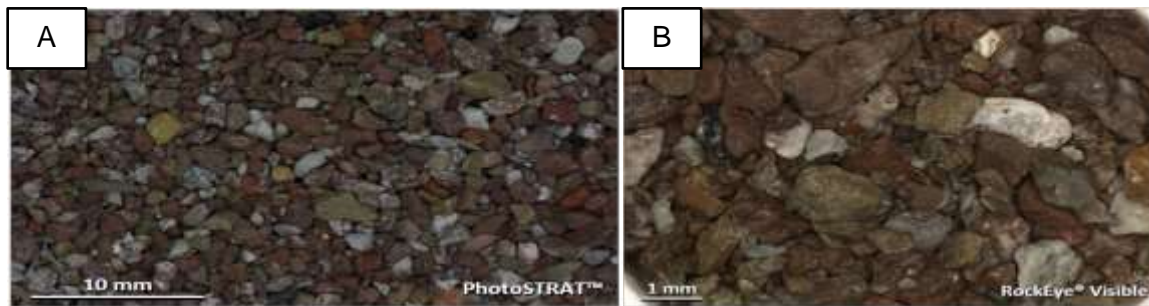


Figura 5. A). Fotografía de una muestra de ripios de perforación. B) Zoom de la fotografía A donde se observa a detalle la disposición de los ripios.

Adaptado de: FIT (2016).

El último paso es realizar el análisis por fluorescencia de rayos X a la muestra, para esto se lleva la muestra al espectrómetro de dispersión de energías y este se encuentra conectado a un computador, se dispone la muestra en una ranura, allí se hacen incidir los rayos X y en la pantalla del computador se genera una imagen (Ver Figura 3), a ésta imagen se realiza un tratamiento normativo de datos y por último se obtienen las concentraciones elementales que tiene cada muestra de ripios, las cuales son medidas en partes por millón (ppm). En la Tabla 1 se observan los resultados para el análisis que se realizó a la muestra de ripios de la Figura 5.

Tabla 1. Resultados análisis XRF sobre la muestra de ripios.

PDQ-XRF			
Element	ppm	Element	ppm
Mg	---	Rb	236
Al	76,724	Sr	242
Si	207,700	Zr	193
P	---	Nb	44
S	1,581	Mo	58
Cl	---	Pd	---
K	14,903	Ag	34
Ca	8,286	Cd	---
Ti	5,231	Sn	---
V	273	Sb	---
Cr	573	Ba	---
Mn	---	W	---
Fe	49,681	Au	---
Ni	---	Pb	47
Co	---	Bi	---
Cu	---	Th	---
Zn	132	U	---
As	---	BaI	634,062
Se	---		

Nota: FIT (2016).

5.2.5 Aplicación de la espectrometría de fluorescencia de rayos x en la descripción litológica en los pozos trabajados. La aplicación de esta técnica instrumental para realizar los objetivos del trabajo tiene el fin de identificar los elementos presentes en una muestra de roca, como principio para reconocer los diferentes litotipos, interpretar los ambientes de sedimentación de la Formación Villeta entre otros. Esto basado en las asociaciones de elementos como marcadores básicos para determinar los parámetros establecidos de las diferentes litologías. Estas asociaciones elementales que conforman los minerales son la base de la quimioestratigrafía, por medio de ellas se puede conocer la composición litológica de la roca, las facies, las condiciones y ambiente de formación, sedimentación de las rocas, entre otros.

Es importante destacar que el análisis de la composición elemental de las muestras por espectrometría de fluorescencia de rayos X tiene como finalidad mostrar las características inorgánicas de la roca. Con el fin de apropiar la información que se obtiene a partir de los análisis de XRF se describen algunos de los elementos más representativos en los cuales se basa la definición e identificación de litotipos y cambios litológicos.

- **Magnesio (Mg):** Se encuentra asociado a zonas con ambientes anóxicos ya que permite la preservación de la materia orgánica. También se puede emplear como indicador de rocas como arcillas y carbonatos. En el caso de los carbonatos se puede asociar con procesos de dolomitización donde se dan intercambios iónicos entre CaCO_3 Y Mg.
- **Aluminio (Al):** Este elemento se encuentra asociado principalmente a arcillas y feldespatos. El Aluminio presenta una baja solubilidad durante los procesos diagenéticos.
- **Calcio (Ca):** Se encuentra relacionado a rocas con altos contenidos de CaCO_3 , yeso/anhidrita (esta se hidrata y altera a yeso). En general, éste mineral se asocia a los carbonatos y éste varía de acuerdo a los elementos que se asocien al Calcio, como Magnesio, Hierro, entre otros. Puede ser indicador de zonas de profundización asociado a las calizas.
- **Silicio (Si):** Es el principal componente de la Sílice, está asociado principalmente al Cuarzo y por ende a las areniscas, en una concentración menor el Silicio se puede asociar a las arcillas con altos contenidos de Sílice y feldespato (el feldespato principalmente depende del protolito sedimentario y el grado de retrabajamiento de las rocas que llegaron a la cuenca).

- Fosforo (P): Se encuentra fuertemente ligado a los fosfatos, tiene que ver con partes óseas de peces y otros organismos, los cuales también pueden ser transportados por las corrientes de Upwelling, las cuales transportan sedimentos desde el fondo del mar llevándolos a las líneas de costa.
- Azufre (S): Está relacionado con minerales como la pirita, anhidrita y zonas con alto contenido de TOC cuando se asocia con la pirita.
- Cloro (Cl): Se asocia principalmente a sal. Este elemento no solo aparece durante procesos diagenéticos, también puede aparecer por tectónica salina y movimiento de fluidos relacionados a este evento, así como también a la circulación de fluidos en la roca por fracturas y demás.
- Potasio (K): Se encuentra fuertemente relacionado a las arcillas, feldespatos y poco común a la sal (sales de Potasio). Las concentraciones de Potasio en determinados tipos de rocas dependen del ambiente de depositación, está asociado en un sentido inverso al TOC, a valores altos de TOC se encuentran valores bajos de Potasio.
- Plomo (Pb): se asocia a sulfuros, arcillas, posible asociación orgánica. indicativo de las aguas del fondo sulfurosos.
- Torio (Th): Los valores de Th altos pueden estar asociados con la presencia de minerales pesados, particularmente en depósitos de arena de canal que superan una disconformidad

erosiva. Los valores de Th incrementados también pueden estar asociados con un aporte incrementado de arcillas terrígenas. El Torio puede ser derivado de rocas ígneas félsicas y ésta directamente asociado al contenido de TOC, a medida que aumenta el TOC en una formación geológica también aumenta el contenido de Torio.

- Titanio (Ti): Se asocia a rocas ígneas principalmente a las que contienen un alto porcentaje de rutilo e ilmenita. Por lo general este elemento se asocia a las arcillas y presentan una baja solubilidad durante la diagénesis.
- Vanadio (V): Desde el punto de vista químico es el que presenta mayor afinidad a sustituir el Al en minerales como Illita y Clorita. Típicamente asociado a ambientes reductores es decir con poca disponibilidad de Oxígeno. Se puede asociar de manera directa a la concentración de materia orgánica en Shales y Carbón. Puede estar ligado a elementos como el Mn y el K.
- Cromo (Cr): Se encuentra asociado a las arcillas y Lag Deposits. En términos generales se deriva de la meteorización de rocas de origen volcánico, específicamente rocas de magmas ultramáficos. En los Lag Deposits se encuentran asociados a la materia orgánica y algunas arcillas con elementos pesados. De igual manera se puede relacionar con materia orgánica producto de algas marinas ya que termodinámicamente es inestable bajo condiciones anóxicas.
- Manganeso (Mn): Se asocia a arcillas y carbonatos. Cuando se tiene el manganeso en exceso es relacionado a zonas altamente profundas, e incluso se puede ver una concentración mucho mayor en arcillas que se depositaron en bajas tasas de sedimentación.

- Carbono (C): Oligoelemento en arcillas, carbón y rocas fosfatadas; enriquecidas en nódulos de ferromanganeso y depósitos manganíferos; posiblemente procedentes de la lixiviación de rocas volcánicas seguido de concentración en las aguas profundas de ambientes anóxicos.
- Estroncio (Sr): Se asocia a carbonatos; sustitutos de calcio y es particularmente indicativo de materiales esqueléticos aragoníticos, ooides y lodos dentro de la piedra caliza. las Dolomías y los carbonatos altamente recristalizados tienen contenidos más bajos de Estroncio.
- Circón (Zr): Este elemento está asociado con el cuarzo y por ende con las areniscas y en menor proporción con los limos detríticos. El uso en crossplots con Si para distinguir el cuarzo detrítico de sílice biogénico es uno de sus usos más comunes.
- Molibdeno (Mo): asociado con la materia orgánica; es el principal representante del TOC, es decir, directamente proporcional al contenido de TOC, a mayor concentración de TOC mayor contenido de Molibdeno; asociado con minerales de sulfuro y las indicaciones de H₂S en las aguas del fondo anóxicas.
- Hierro (Fe): Este elemento se encuentra asociado a las arcillas, carbonatos, Pirita; puede concentrarse en los sedimentos ricos orgánicos.
- Zinc (Zn): Este elemento se encuentra asociado a las arcillas; posible indicador de la productividad; asociado con la materia orgánica y los suelos de Azufre enriquecido reducido; también al H₂S en las aguas profundas; puede estar asociada con Cd.

- Uranio (U): Este elemento suele estar asociado con el aumento de la materia orgánica, a mayor contenido de Uranio mayor contenido de materia orgánica, y por ende el contenido de TOC también aumenta, son directamente proporcionales, se relaciona con secuencias estratigráficas condensadas marinas, el Uranio es un indicador redox y es soluble en sus estados oxidados.

5.3 Espectrometría de Difracción de Rayos X (Drx)

5.3.1 Concepto DRX. Desde su descubrimiento en 1912 por Von Laue, la difracción de rayos X ha proporcionado un medio adecuado y práctico para la identificación cualitativa y cuantitativa de compuestos cristalinos y sobre el ordenamiento y espaciado de los átomos en materiales cristalinos (Betancourth et al., 2010).

La técnica de difracción de rayos X ha sido ampliamente utilizada en la caracterización de minerales, esto se debe en gran medida a que más de un 95% de los materiales de la superficie terrestre presentan estructura cristalina y únicamente para algunos materiales de baja cristalinidad como los Ópalos, óxidos de Manganeseo y algunos óxidos de hierro la caracterización obtenida por DRX debe complementarse con otros métodos que cumplen con la condición de tener una estructura cristalográfica definida, pues la información obtenida de la interacción entre los rayos X y los cristales se basa en la difracción producida por un conjunto de átomos en un arreglo ordenado (Puig, 2015).

Como se dijo anteriormente todos los minerales son cristalinos, es decir, disponen sus componentes químicos (átomos, iones, moléculas) de forma regular, llenando el espacio. Eventualmente, todos los cristales pueden desarrollar formas exteriores poliédricas, aunque gran parte de la masa mineral no manifiesta esta propiedad necesariamente (Melgarejo et al., 2010).

La celda es una unidad, en forma de paralelepípedo, que repetida e idénticamente llena todo el espacio del cristal. La descripción de la celda proporciona toda la información sobre la estructura cristalina del mineral, y, por ende, diferenciar a un mineral de otro debido a que la estructura cristalina de cada mineral es única, aunque su composición química en algunos casos sea parecida.

5.3.2 Principio científico. La difracción es un fenómeno de dispersión de rayos X en el cual participan todos los átomos que constituyen el material irradiado. Debido al ordenamiento periódico de los átomos en una estructura cristalina, los rayos dispersados en distintos átomos llevan entre sí un cierto desfase, interfiriendo en su trayectoria posterior, solo algunos de estos presentarán interferencia constructiva (Vasquez et al., 2015). Tal como se muestra en la Figura 6, las condiciones para la interferencia constructiva, entre ondas diferentes se cumple solo cuando: $n\lambda = 2 d \sin\theta$. dónde: λ es la longitud de onda del haz incidente de rayos X d es la distancia interplanar. θ es el ángulo de incidencia medido entre los planos en consideración y el haz incidente. Esta fórmula corresponde a la llamada Ley de Bragg y es la ecuación fundamental de DRX (Vasquez et al., 2015).

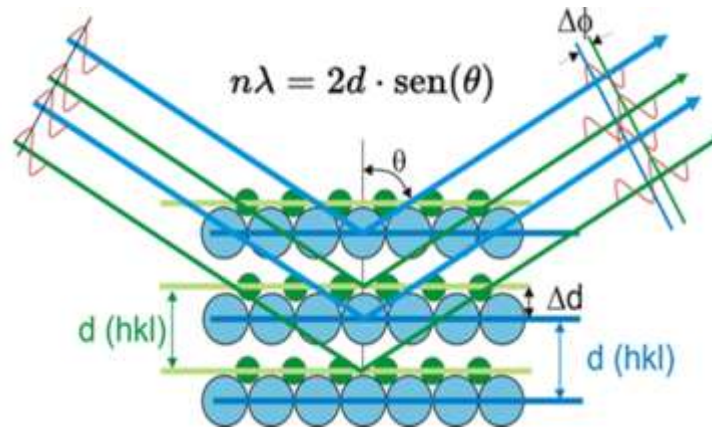


Figura 6. Esquema de difracción del modelo de Bragg.

Adaptado de: Vasquez et al. (2015).

5.3.3 Identificación de minerales a partir de difracción de rayos X. En DRX, la λ de los rayos X es fija, y cada plano de átomos produce un pico de difracción en un ángulo θ específico. En un difractograma cada pico de difracción es producido por una familia de planos atómicos, la posición de cada pico indica la distancia interplanar $d(hkl)$ entre los planos atómicos del cristalito (Melgarejo et al., 2010). La intensidad del pico de difracción está asociado a los átomos que están presentes y la ubicación de éstos en los planos atómicos (Figura 7A). En la Figura 7B se puede observar cómo las diferentes estructuras cristalinas que se representan en los diferentes picos muestran los distintos minerales que tiene una muestra.

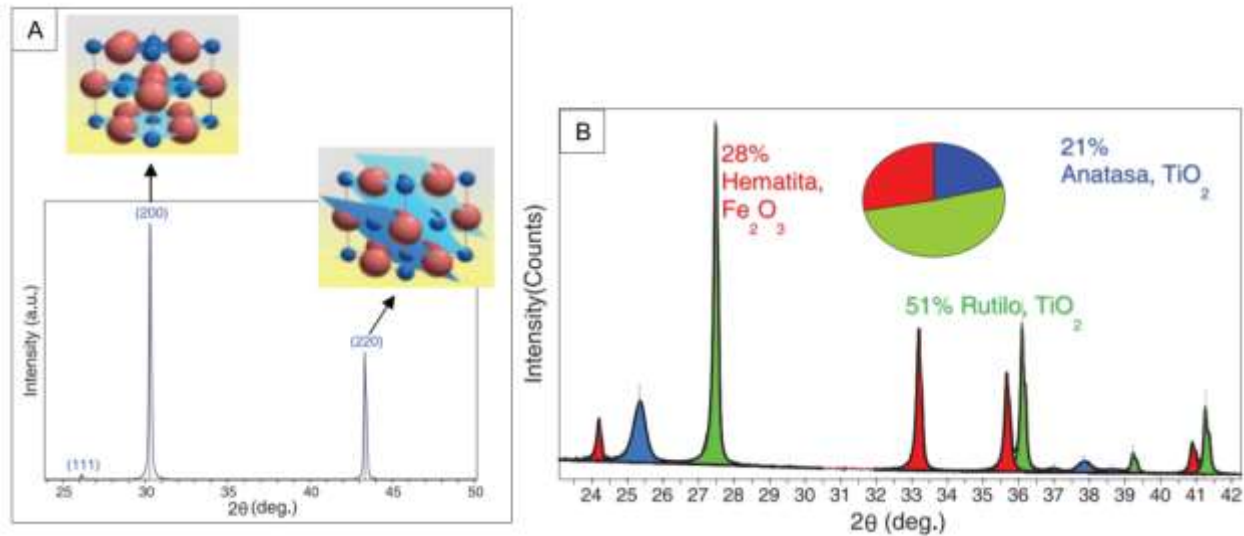


Figura 7. A) Se observa un ejemplo de la diferencia del ordenamiento atómico de los picos de difracción por DRX. B) Se observa un ejemplo de los diferentes minerales identificados en los picos de difracción por DRX.

Adaptado de: Vazquez et al. (2015).

5.3.4 Metodología para la obtención de datos de difracción de rayos X. Los análisis por difracción de rayos X fueron realizados a partir de muestras de núcleos de perforación en el pozo Hormiga-1X, este pozo es el que más tiene núcleos a diferentes profundidades. Dichos análisis se realizaron en ICP (Instituto Colombiano del petróleo) en el laboratorio de difracción de rayos X.

Los perfiles de difracción fueron adquiridos en un difractómetro Rigaku D/MAX IIIB, equipado con un monocromador de grafito de haz curvo, un detector de centelleo de TII, una ranura de divergencia de $0,1^\circ$ y de recepción de 0,3 mm. Se trabajó en el rango de 5 a 90° , usando la radiación $K\alpha_1$ del cobre ($\lambda=1,54056\text{nm}$) a 40 kV, 20 mA, con paso de barrido de $0,02^\circ$

y un tiempo de 2 s/paso. A continuación, se describirá de una manera generalizada el proceso de obtención de datos DRX entregados por ICP.

En primer lugar, se selecciona el punto donde se desea de los núcleos de perforación donde se desea realizar el análisis, dichas muestras previamente se limpian de hidrocarburo y residuos del lodo de perforación por medio de soluciones químicas, y se secan antes de ser molidas.

La muestra molida se pesa, pasa por agua, y se trata con una mezcladora sónica. El líquido semi-sólido que resulta se centrifuga para fraccionar la muestra en 4 (cuatro) micrones; posteriormente se guarda la muestra suspendida con partículas menores a 4 micrones. La fracción de la muestra con partículas suspendidas mayores a 4 micrones se seca y pesa para determinar el porcentaje en peso de la fracción tamaño limo y arcilla. La porción de la muestra con partículas menores a 4 micrones se prepara con una sustancia de plata pura para orientar las partículas de arcilla. La muestra se monta en estado seco y se somete al análisis por difracción de rayos X, después se practica un tratamiento con vapor de glicol etileno durante 24 horas, y se vuelve a someter la muestra a los rayos X. La fracción de la muestra con partículas suspendidas mayores a 4 micrones se procesa y somete a DRX.

Los difractogramas se analizan para obtener el contenido mineralógico de la muestra utilizando un algoritmo para procesar perfiles. Las áreas integradas del algoritmo de perfil se calculan y corrigen aplicando los coeficientes para minerales comunes. Los resultados de los análisis de difracción de rayos X se reportan como porcentaje-peso para la mineralogía total de la roca. Las fracciones con los minerales de arcilla se analizan por separado y también se reportan

en la misma tabla junto con la mineralogía total de la roca, en la Tabla 2 se observa una tabla con los resultados emitidos por el laboratorio de difracción de rayos X del ICP, donde se observa el porcentaje en peso de los principales grupos mineralógicos. En el anexo A se puede observar esto.

Tabla 2. Se observa los resultados arrojados por el difractor de rayos X después del proceso anteriormente explicado donde se observa el porcentaje en peso de los minerales identificados para el pozo Hormiga-1X.

ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X PARA EL POZO HORMIGA-1X, FORMACIÓN VILLET, CUENCA DE PUTUMAYO											
No.	Profundidad (Ft)	Arcillas	Cuarzo	Feldespato K	Feldespato Na	Carbonatos			Pirita	Yeso	Otros
		%Peso	%Peso	%Peso	%Peso	Calcita %Peso	Dolomita %Peso	Siderita %Peso	%Peso	%Peso	%Peso
1	9795'	32	57	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6	<5
2	9797'	16	74	ND	ND	ND	ND	ND	ND	5	<5
3	9800'	24	61	ND	ND	<5	ND	ND	ND	<5	<5
4	9801'	17	67	ND	ND	<5	ND	ND	ND	6	<5
5	9802'	14	75	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6	<5
6	9803'	9	62	ND	ND	6	ND	<5	<5	8	<5
7	9804'	13	72	ND	ND	<5	ND	ND	ND	<5	<5
8	9806'	8	77	ND	ND	<5	ND	ND	ND	<5	<5
9	9807'	10	80	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<5	<5
10	9808'	8	81	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6	<5
11	9809'	10	80	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<5	<5
12	9810'	17	73	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<5	<5
13	9811'	16	70	ND	ND	Tr	ND	ND	ND	9	<5
14	9812'	11	74	ND	ND	<5	ND	ND	ND	5	<5
15	9813'	17	69	ND	ND	Tr	ND	ND	ND	9	<5
16	9815'	18	72	ND	ND	Tr	ND	ND	ND	5	<5
17	9821'	9	76	<5	Tr	Tr	ND	ND	ND	<5	<5
18	9822'	7	72	Tr	<5	<5	ND	ND	ND	6	<5
19	9823'	14	76	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<5	<5
20	9824'	13	77	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<5	<5
21	9825'	13	67	<5	<5	Tr	ND	ND	ND	<5	<5
22	9826'	11	78	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6	<5

Nota: ICP (2016).

5.4 Registros de Pozo

Los registros de pozo son una herramienta fundamental para el estudio indirecto de las propiedades de las rocas y fluidos en profundidad. Las aplicaciones de los registros de pozo en la

industria de los hidrocarburos han contribuido de manera significativa a la caracterización y cuantificación de petróleo y gas y su disposición e interacción con las rocas en el subsuelo.

En el ámbito científico y académico los registros de pozo son una herramienta poderosa que permite inferir la configuración estratigráfica y estructural de las rocas en profundidad para entender el origen, disposición, transporte de las mismas y de los gases y fluidos presentes, que se encuentran formando parte de los diferentes sistemas petrolíferos y geológicos de una determinada región. Todo esto gracias a las propiedades de las rocas tales como la resistividad eléctrica, la conductividad, la capacidad para transmitir y reflejar energía por medio de la velocidad del sonido, su radioactividad, su temperatura, contenido de hidrogeno, densidad, entre otros.

Éste trabajo se enfocó en la interpretación litológica de la Formación Villeta en la cuenca de Putumayo a partir de los diferentes registros obtenidos en los pozos trabajados, a continuación, se describirán los principales registros de pozo que fueron utilizados para este fin.

5.4.1 Registro de potencial espontaneo (SP). La curva del registro SP muestra el potencial eléctrico (voltaje) producido por la interacción del agua de formación innata, el fluido de perforación conductivo y ciertas rocas selectivas de iones (Schlumberger, 1989). Si la curva en el registro se inclina a la izquierda será negativa, si se inclina a la derecha es positiva y esto depende fundamentalmente de la diferencia de salinidad entre el agua de formación y el filtrado, ésta curva se mide en mili voltios (mv).

Por lo general, frente a Lutitas, la curva del potencial espontaneo SP define una línea más o menos recta en el registro, la cual se denomina “línea base de Lutitas”. Frente a formaciones permeables la curva muestra deflexiones de dicha línea base, las cuales, en capas de suficiente espesor, tienden a alcanzar una deflexión esencialmente constante que se ha dado a llamar una “línea base de arenas” (Ver Figura 8A).

Éste registro puede ser usado para distinguir entre shales impermeables y arenas permeables y porosas. El límite de cada capa permeable puede ser definido y su espesor, calculado. En el espesor de las capas, la deflexión alcanza un máximo y se estabiliza (Ver Figura 8B). La respuesta a capas delgadas produce una corta distorsión y exhibe una forma redondeada. Un contacto de shale puede ser calculado comparando la deflexión de una arena arcillosa y una arena limpia (Bassiouni, 1994).

La detección de los hidrocarburos por la desaparición de la curva SP es otro uso de este registro (Assaad, 2009). La presencia de shale en una formación permeable reduce la deflexión de la curva SP. La curva SP puede ser suprimida por capas delgadas, arcillosas y por la presencia de gas, en la Figura 9B se observa esto, además se muestra un ejemplo de la interacción del registro SP en diferentes litologías.

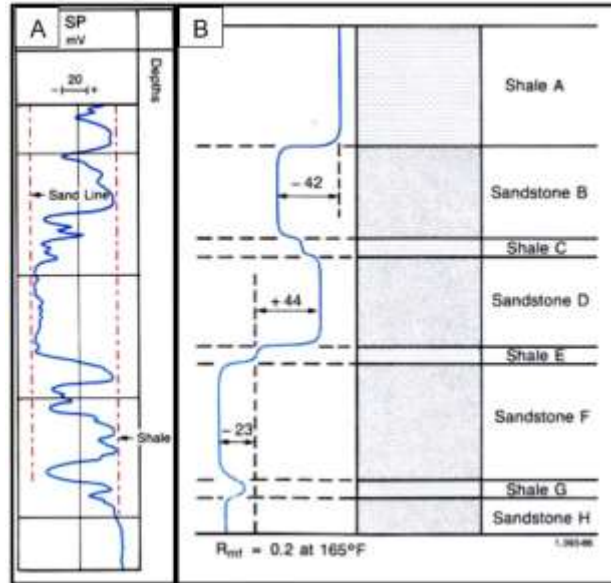


Figura 8. A) ejemplo de un registro SP que muestra la línea de shale y arenas. B) Ejemplo del cambio en la curva del registro SP en diferentes litologías

Adaptado de: Schlumberger (1989).

5.4.2 Registros Resistivos. El registro resistivo es un registro eléctrico que determina la porosidad, resistividad e hidrocarburos versus zonas con fluidos, puede definir zonas permeables. Para deducir la resistividad de la formación en la zona no invadida, las medidas de resistividad se usan solas o en combinación (PEMEX, 2000).

En este tipo de perfil se envía corriente a la formación a través de electrodos y se miden los potenciales eléctricos en otros. Los valores de resistividad obtenidos pueden indicar la ausencia o presencia de hidrocarburos. Para realizar la medición es necesario que el pozo esté lleno de un fluido conductor (Colmenares y Murillo, 2013).

El registro de resistividad mide la resistencia que tiene una roca al flujo de corriente eléctrica, y de éste se puede interpretar que las rocas que tienen más resistividad son las Calizas y el Carbón, luego las areniscas con fluidos, pero, no todos los fluidos tienen alta resistividad, por ejemplo, en las Areniscas con agua salada reflejan que la resistividad es muy baja. El registro de inducción eléctrica (IEL) es un registro eléctrico que mide la conductividad, el registro de conductividad hace lo inverso al registro de resistividad, éste calcula la conductividad eléctrica que puede pasar por una roca. La resistividad se mide en ohmio-m, siendo la R de las formaciones por lo general entre 0.2 y 2000 ohmio-m.

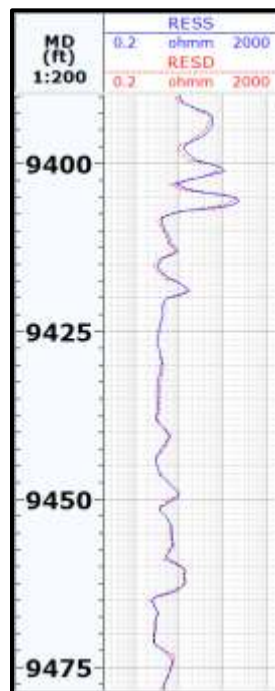


Figura 9. Ejemplo de un registro de resistividad corrido en uno de los pozos trabajados.

Como se mencionó anteriormente, un reservorio que contenga agua salada muestra valores de resistividad bajos mientras que un reservorio que contenga petróleo presenta valores altos, por

ello, este tipo de registros son de gran importancia porque se puede diferenciar entre el agua y el petróleo a la hora de interpretarlos. (Colmenares y Murillo, 2013).

5.4.3 Registros de porosidad. La porosidad de las rocas puede obtenerse a partir del registro sínico, el registro de densidad o el registro de neutrones. Todas estas herramientas ven afectada su respuesta por la porosidad, los fluidos y la matriz de la formación. Si los efectos de fluidos y matriz se conocen o se pueden determinar, la respuesta de la herramienta puede relacionarse con la porosidad, por lo tanto, estos instrumentos se mencionan con frecuencia como registros de porosidad (Schlumberger, 1989).

5.4.3.1 Registro sínico. El principio básico de esta herramienta sínica consiste de un transmisor que emite impulsos sínicos y un receptor que capta y registra los impulsos. El registro sínico es simplemente un registro en función del tiempo t , que requiere una onda sonora para atravesar un pie de formación. Este es conocido como tiempo de tránsito, Δt ; t es el inverso de la velocidad de la onda sonora, el tiempo de tránsito para una formación determinada depende de su litología y su porosidad (Schlumberger, 1989). El intervalo de tiempo (Δt) de una formación incrementa debido a la presencia de hidrocarburos. Los efectos de los hidrocarburos deben ser corregidos, de lo contrario la porosidad sínica obtenida podría ser muy alta (Assaad, 2009).

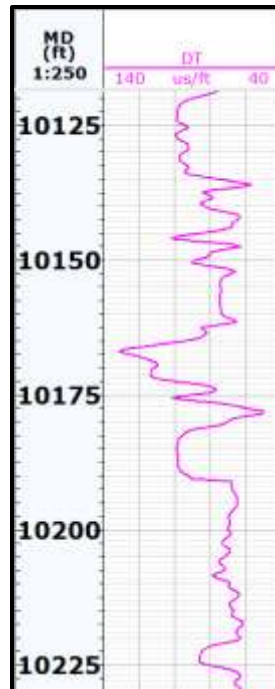


Figura 10. Ejemplo de un registro sónico.

La variación en la velocidad del sonido depende de las propiedades texturales y composicionales como tamaño de grano, matriz, cemento, contenido de minerales, entre otros y de la porosidad en la roca. (Colmenares y Murillo, 2013). Una roca que tenga una alta porosidad disminuye la velocidad del sonido a través del material de la roca y al mismo tiempo aumenta el tiempo de tránsito. La porosidad calculada en base al registro acústico generalmente se compara con la obtenida mediante el registro de densidad, a fin de tener una estimación de la porosidad secundaria o del volumen de Lutitas.

Las aplicaciones de este registro son diversas, como determinar la porosidad y litología, en conjunto con otras herramientas, determinar propiedades mecánicas de una formación, evaluar condiciones de permeabilidad (Colmenares y Murillo, 2013).

5.4.3.2 *Registro de densidad.* Este registro es usado principalmente para determinar la porosidad de la formación, sin embargo, conjuntamente con otros perfiles se emplea también para la evaluación de formaciones arcillosas, identificación de minerales y evaluar formaciones de litología compleja, entre otros (Schlumberger, 1989).

El registro de densidad mide la densidad de electrones de una formación. El dispositivo de densidad consta de una fuente de energía de rayos gamma que se emiten hacia la formación (Schlumberger, 1989). Los rayos gamma colisionan con los electrones en la formación, la colisión resulta en una pérdida de energía de las partículas de los rayos gamma. La densidad de electrones puede ser relacionada a la densidad aparente (bulk density ρ_b) de la formación en g/cc. (Schlumberger, 1989). A continuación, en la Figura 11 se observa un ejemplo de un registro de densidad corrido en uno de los pozos trabajados.

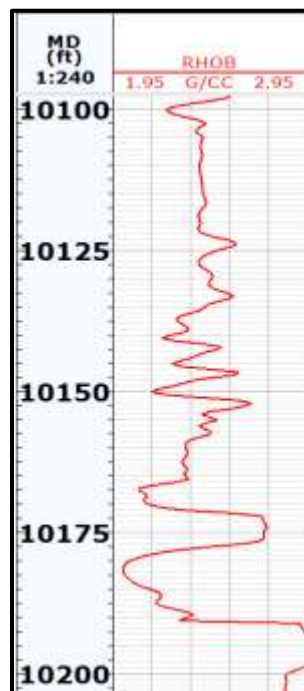


Figura 11. Ejemplo de un registro de densidad.

Entre sus aplicaciones, las más destacadas son la determinación de la porosidad, la evaluación de arenas arcillosas, detección de gas. Si la formación se encuentra saturada de gas, las medidas de densidad (RHOB) serán bajas, debido a que una formación saturada de gas presenta densidades electrónicas menores que cuando se encuentra saturada de agua. Por lo tanto, la curva se desviará hacia la izquierda (Colmenares y Murillo, 2013). La arcilla en las formaciones también puede afectar la interpretación, aunque las propiedades de las arcillas varían con la formación y la ubicación, las densidades típicas para capas y laminaciones arcillosas son del orden de 2.2 a 2.65 g/cm³ (Schlumberger, 1989).

5.4.3.3 Registro Neutrón. El Neutrón es una de las partículas elementales del átomo, es eléctricamente neutra y su masa es igual a la del átomo de Hidrogeno (Skoog et al., 2008). Los registros neutrónicos se utilizan principalmente para delinear formaciones porosas y para determinar su porosidad. Responden principalmente a la cantidad de Hidrógeno en la formación. Por lo tanto, en formaciones limpias cuyos poros estén saturados con agua o aceite, el registro de neutrones refleja la cantidad de porosidad saturada de fluido (Schlumberger, 1989). En la Figura 12 se observa un ejemplo de un registro neutrónico corrido en uno de los pozos trabajados.

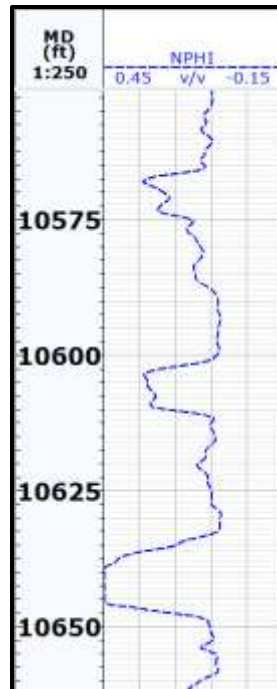


Figura 12. Ejemplo de un registro neutrónico.

El registro de neutrones se utiliza en combinación con otros registros de porosidad para la interpretación de la litología y de la arena arcillosa. Las zonas de gas con frecuencia pueden identificarse al comparar el registro de neutrones con otro registro de porosidad o con un análisis de muestras, una combinación del registro de neutrones con uno o más registros de porosidad proporciona valores de porosidad e identificación de litología aún más exactos, incluso una evaluación del contenido de arcilla (Bassiouni, 1994). Sin embargo, el gas tiene un efecto en las lecturas de éste registro ya que el reemplazo del líquido por gas en el espacio poroso de una roca, disminuye la concentración de Hidrogeno del fluido en los poros. Como resultado de esto, la curva del perfil neutrónico, calibrada en función de la porosidad saturada de líquido, dará una porosidad anormalmente baja (Schlumberger, 1989).

5.4.4 Registro Gamma Ray (GR). El registro Gamma Ray mide de manera continua la radioactividad natural de las formaciones penetradas por un pozo vs la profundidad. Todas las rocas tienen alguna radioactividad. La fuente más común de radioactividad es el K40 (Potasio) y los elementos radioactivos Uranio y Torio. El material original radioactivo es producido en rocas ígneas. Estas son posteriormente distribuidas por procesos de meteorización en formaciones sedimentarias durante la erosión, transporte y depositación (Bassiouni, 1994).

Las Lutitas son las que contienen la mayor concentración de sales radioactivas y por lo general, son mucho más radioactivas que las arenas, calizas y dolomitas, sin embargo, existen algunas excepciones, un alto nivel de radioactividad no siempre es asociado con la presencia de minerales arcillosos (Schlumberger, 1989).

Los rayos gamma son impulsos de ondas electromagnéticas de alta energía que son emitidos espontáneamente por algunos elementos radioactivos. El registro Gamma Ray se mide en unidades API, generalmente, las arenas limpias y los carbonatos tienen niveles de radioactividad que varían entre 15 a 20 unidades API, mientras que en las Lutitas la fluctuación es entre 120 y 140 unidades API (Schlumberger, 1989). En la Figura 13 se ilustra un ejemplo de un registro Gamma Ray corrido en uno de los pozos trabajados.

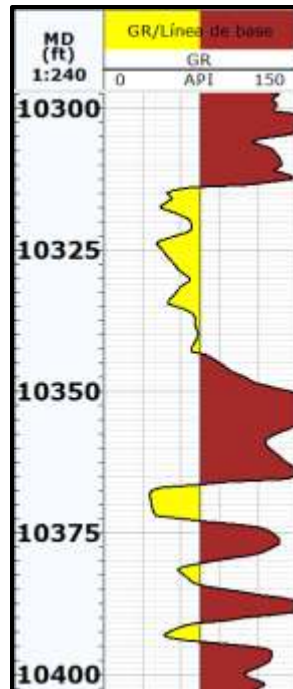


Figura 13. Ejemplo de un registro Gamma Ray.

El registro de GR es particularmente útil para definir las capas arcillosas cuando el SP está distorsionado (en formaciones muy resistivas), cuando el SP es insignificante, el Gamma Ray también se puede utilizar para delinear minerales no radioactivos (Schlumberger, 1989).

5.4.5 Registro Caliper (CAL). El registro Caliper es una herramienta de pozos que proporciona una medición continua del tamaño y forma de una perforación, Al perforar una zona fracturada, los bordes rocosos de las fracturas a menudo se despostillan, y agranda el agujero en el plano del sistema de fractura (Schlumberger, 1989).

Éste registro muestra la variación de diámetro de la perforación haciendo uso de dos o más brazos articulados que se empujan contra la pared del pozo. Cada brazo está conectado a un potenciómetro que hace que la resistencia al cambio como el diámetro de los cambios de pozo

genere una señal eléctrica variable que representa la forma cambiante de la perforación (Schlumberger, 1989).

Dependiendo del diámetro de la apertura que registre el Caliper se puede inferir en rasgos generales el tipo de roca que se está perforando, siendo las de mayor diámetro rocas blandas como arcillas, lutitas, shale, entre otros, y las de menor diámetro, rocas como las calizas, las areniscas, entre otros (Bassiouni, 1994). En la Figura 14 se observa el registro caliper corrido para uno de los pozos trabajados.

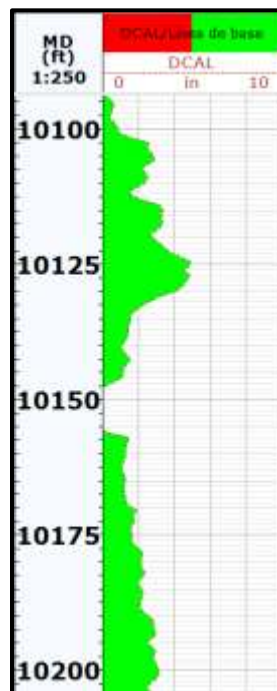


Figura 14. Ejemplo de registro Caliper

6. Marco Geológico

La Cuenca sedimentaria Caguán-Putumayo abarca una región de 110.304 km², de los cuales 50.000 km² pertenecen a la Cuenca Putumayo y está localizada en el suroeste de Colombia; al norte se localiza el sector Caguán y al sur el sector Putumayo. Limita al occidente con la Cordillera Oriental y al oriente con el Escudo de Guyana; al norte con la Serranía de la Macarena y al Sur con el límite internacional con Ecuador (ANH, 2011).

Hace parte junto con la cuenca de Oriente de Ecuador de una cuenca de Antepaís (Foreland) con respecto a la cadena montañosa andina la cual se extiende hacia el sur conformando un complejo de cuencas mucho más grande que incluye hacia el sur la gran cuenca de Oriente en el Ecuador, y la cuenca de Marañón en el Perú (ANH, 2011). Este complejo a su vez hace parte del sistema de cuencas subandinas que se presentan a lo largo de América del Sur, al este de la Cordillera de Los Andes, y que se encuentran separadas entre sí generalmente por arcos de basamento, como es el caso del Arco de Vaupés, que separa a la cuenca del Putumayo de la cuenca de los Llanos Orientales en Colombia (Mora et. al. 1998).

Aunque la Cuenca Caguán comparte historia geológica, caracterización estratigráfica y estructural semejante y complementaria con la cuenca Putumayo, entre otros aspectos geológicos, éste estudio se va enfocar en la caracterización geológica de la cuenca de Putumayo.

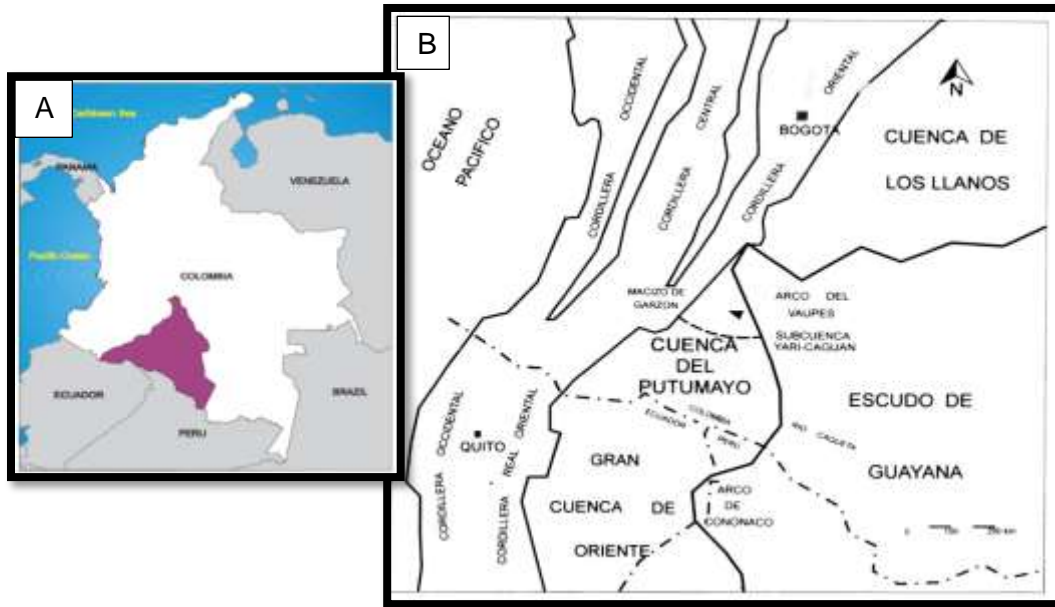


Figura 15. A) se observa la ubicación geográfica de la cuenca Caguán-Putumayo. B) se observa la descripción de los límites geológicos de la cuenca Caguán-Putumayo y su extensión a Ecuador y Perú en las cuencas de Oriente y Marañón respectivamente. Además, se observa el Arco de Vaupés como ejemplo de separador geomorfológico de cuencas.

Adaptado de: ANH (2010) y Mora et al. (1998). Modificado por los autores.

6.1 Estratigrafía General de La Cuenca Putumayo

En la cuenca de Putumayo se han determinado las siguientes unidades litoestratigráficas que se formaron desde el Jurásico hasta el tiempo presente. Las formaciones que hacen parte de la cuenca de Putumayo de base a techo son, Motema y Saldaña del Jurásico, las Formaciones Caballos y Villeta del Cretácico, las Formaciones Rumiayaco, Pepino y Orteguzaza y del Neógeno las Formaciones Orito Belén, Ospina y Caimán. En síntesis, El registro sedimentario de la cuenca Putumayo puede ser dividido en secuencias bien diferenciadas: una informalmente

denominada pre-Cretácico, desarrollada previamente al Aptiano, otra depositada durante el Cretácico Tardío separada de la anterior por una discordancia angular de primer orden y una tercera secuencia depositada durante el Paleógeno y Neógeno.

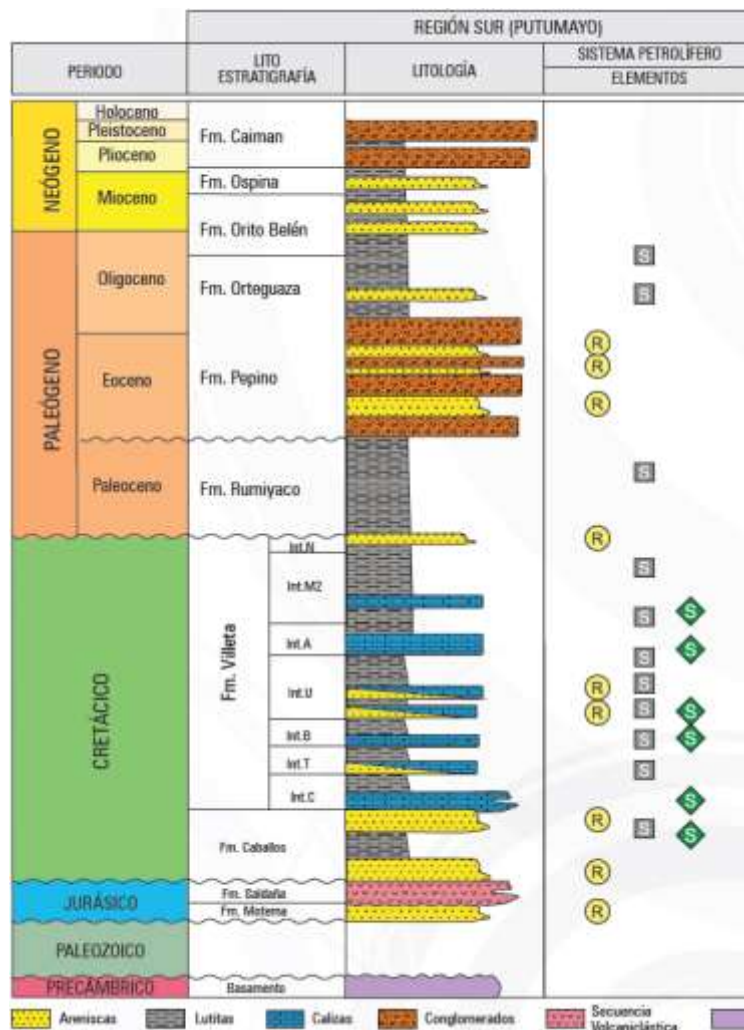


Figura 16. Columna estratigráfica tipo de la cuenca Putumayo.

Adaptado de: ANH (2010).

En la Figura 17 se observa el cuadro cronoestratigráfico de esta zona, allí se observan las correlaciones estratigráficas de las formaciones en el transcurso del tiempo de las Cuencas

aledañas a la cuenca de Putumayo, la disposición y caracterización de la secuencia estratigráfica que se han determinado hasta la actualidad.

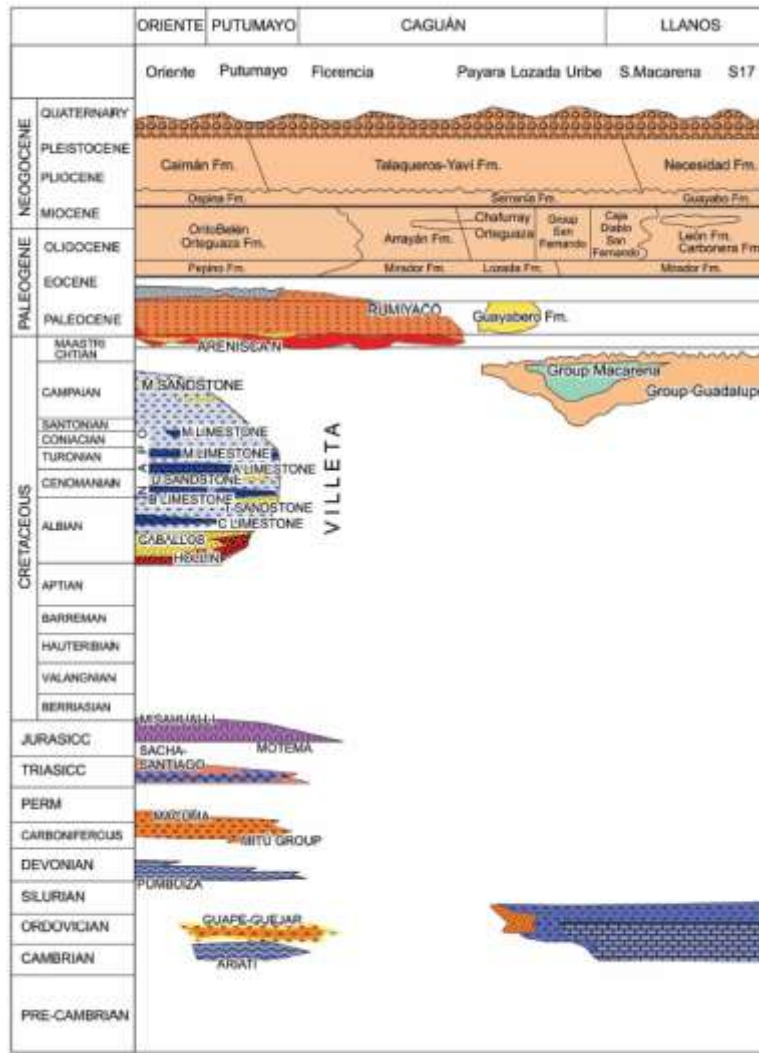


Figura 17. Columna cronoestratigráfica de las cuencas Oriente, Putumayo, Caguán y Llanos.

Adaptado de: ANH (2010).

A continuación, se mostrará una descripción generalizada de las formaciones geológicas que conforman la cuenca de Putumayo haciendo énfasis en la Formación Villeta la cual es objeto de estudio.

6.1.1 Formación Saldaña. Según Núñez (2003) esta formación se correlacionó sobre la presencia de secuencias volcánicas de la zona y fueron Grosee (1930) y Royo y Gomez (1942) quienes le asignaron este nombre. Litológicamente, la Formación Saldaña se compone de una sucesión de capas finas, medias y gruesas macizas, con fracturamiento medio a alto, de rocas volcánicas lavas y piroclastitas, de textura porfirítica a afanítica, composición riolítica, dacítica, latítica, traquítica y andesítica; las tobas son líticas, cristalinas, vítreas y mezclas de ellas. También se encuentran aglomerados, arenitas tobáceas, Limolitas y Tufas. Los colores son muy variados desde verde hasta negro. El tamaño de grano varía entre tobas de ceniza y lapilli, hasta aglomerados (Núñez, 2003).

De acuerdo con secciones estratigráficas medidas por Geoestudios (1993), el espesor de la Formación Saldaña es cercano a los 3.000 m, mientras que otros autores como Núñez (2003) lo señalan de 1700m aproximadamente. El contacto inferior con el Complejo Garzón es discordante, aunque también se infiere fallado a través de las fallas Suaza, Santa Helena y Florencia Norte. El contacto superior con la Formación Caballos es discordante, debajo de las areniscas glauconíticas de esta unidad (SGC, 2015). Cediél et al., (1981) la datan con base en su posición estratigráfica, en el Triásico superior y Jurásico inferior.

Bayona et al., (1994) proponen para la Formación Saldaña, un ámbito de acumulación con influencia volcánica, ligados al desarrollo de márgenes convergentes, en un predominio de retroarco (back-arc).

6.1.2 Formación Caballos. Según Núñez (2003) La primera referencia que se tiene, en el área, sobre las rocas equivalentes a la Formación Caballos se debe a Grosse (1935) quien diferenció en la cuenca alta del río Caquetá una unidad que denominó “piso de areniscas blancas”. El término de Formación Caballos es introducido en el área por Miley y McGirk (1948).

La Formación Caballos se encuentra distribuida en el área de piedemonte de la Cordillera Oriental, en forma de delgadas franjas con rumbo aproximado N50E. Se caracteriza por una morfología de suaves pendientes estructurales buzando al SE, características que permiten diferenciarla del Complejo Garzón (Nuñez, 2003).

Litológicamente la Formación Caballos se compone de Cuarzoarenitas limpias, de color blanco, estratificadas en capas medias a gruesas; el tamaño de grano es medio a grueso, subredondeado, calibrado medio y porosidad aparentemente alta. Dentro de las capas arenosas son frecuentes las interlaminações finas de carbón bituminoso y Arcillolitas carbonosas (Nuñez, 2003). El contacto inferior de esta unidad es discordante tanto sobre la Formación Saldaña como sobre el Complejo Garzón. El contacto superior con la Formación Villeta se observa transicional a neto, ANH y UPTC (2009) señala que este contacto es neto y abrupto.

Mora et al., (1998) indican que la edad de la Formación Caballos, con base en análisis palinológicos de muestras provenientes del pozo Catira, es Albiano tardío a Cenomaniano. Según Nuñez (2003) El espesor de esta formación oscila entre los 40 y 150 m.

La Formación Caballos se depositó en un ambiente de alta influencia continental y acumulación en canales marinos. La parte media exhibe características de ambientes de acumulación dominados por olas con alta energía, en una zona influenciada por un delta, mientras que las capas de cuarzoarenitas de la parte superior exhiben texturas y estructuras sedimentarias que evidencian mayor profundidad en los ámbitos de acumulación, con menos influencia de las olas (Nuñez, 2003).

6.1.3 Formación Villeta. Según Núñez (2003) la primera referencia, en el área de la cuenca de Putumayo, a secuencias comparables con la Formación Villeta se debe a Grosse (1935). Para ésta formación, Grosse (1935) es quien primero la referencia en la cuenca de Putumayo. La introducción del término Formación Villeta, en la cuenca del Putumayo, se debe a Miley y McGirk (1948). El nombre “Villeta” se definió originalmente en la región del municipio de Villeta (Hettner, 1892). Allí, se entiende el Grupo Villeta como una unidad predominantemente lodolítica que ocurre entre las Formaciones La Naveta y Arenisca Dura, abarcando edades de Barremiano a Campaniano, como lo ilustra Julivert (1968).

En la cuenca de Putumayo, la Formación Villeta tiene una posición estratigráfica y límites que difieren marcadamente de los del Grupo Villeta del valle superior de Magdalena, y por su edad de Albiano a Santoniano correlaciona solo con una parte de este grupo (Mora et al., 1998). De acuerdo a lo anterior se observa que la Formación Villeta presenta una ambigüedad en su nombre.

Sin embargo, como éste nombre ya es caracterizado y tradicionalmente usado por la industria petrolera y la academia, y en general ha sido el más destacado para describir el tipo de rocas que agrupa, en este trabajo se ha decidido continuar tomando el nombre de “Villeta” para esta formación.

Para la caracterización litoestratigráfica de la Formación Villeta se decidió tomar la nomenclatura estratigráfica planteada por ECOPETROL debido a que otros autores como Mora et al., (1998) plantean para el miembro inferior y superior de esta Formación otros nombres como Formación Masaya e Iglesias respectivamente, y así, otros autores le han dado a algunas formaciones de ésta cuenca su propia nomenclatura.

6.1.3.1 Litoestratigrafía de la Formación Villeta. La Formación Villeta descansa normalmente sobre la Formación Caballos, pero su límite superior a veces es disconforme, a veces paraconforme con la Formación Rumiyaco y, a veces fallado con las Formaciones Rumiyaco y Pepino. El espesor de la Formación oscila entre 320 y 380 m. (Núñez, 2003). Esta formación se extiende por gran parte de la cuenca de Putumayo y se acuña hacia el noreste por la acción del sistema de fallas del piedemonte de la Cordillera Oriental.

La Formación Villeta se encuentra distribuida en el área de piedemonte de la Cordillera Oriental, en forma de franjas muy delgadas con rumbo aproximado N50E. Esta se caracteriza por una morfología muy suave con pendientes estructurales buzando al SE, característica entre los dos paquetes arenosos de las Formaciones Caballos y Rumiyaco. (SGC, 2015). La Formación Villeta se divide en dos miembros, el miembro Villeta Inferior y el miembro Villeta superior.

Miembro Villeta Inferior (Albiano-Cenomaniano): Se reconocen 6 intervalos litoestratigráficos, las facies más gruesas, Grainstone, Packestone, Packstone /Wackstone se caracterizan por la presencia de Bivalvos, Ostreidos y en menor proporción Gasterópodos y Equinodermos, fragmentos de conchas generalmente recristalizados y sin una orientación preferencial, Peloides micritizados y Glauconita con bioclastos. Estos intervalos se encuentran separados por capas delgadas a medias de arcillas, lodos, y shales, los intervalos litoestratigráficos descritos por Rosello et al., (2006) son:

- Intervalo C: Se compone litológicamente de Caliza tipo Packestone de color castaño claro de Moluscos con matriz micrítica, con un espesor promedio 20.7 m - 68 pies.
- Intervalo T: Se compone de una sucesión de Cuarzoarenitas de color gris, de grano fino a medio, bien seleccionadas y Lodolitas oscuras. Las Cuarzoarenitas se estratifican en capas gruesas a muy gruesas, tabulares a lenticulares, que se toman onduladas hacia el tope del intervalo, este intervalo tiene un espesor de 78 m.
- Intervalo B: Caliza gris a negro tipo Wackestone/Packstone de Foraminíferos Planctónicos con un espesor promedio de 15.2 m - 50 pies.
- Intervalo U: Arenas de cuarzo grises claras, de grano fino a medio, feldespatos y Líticos, y capas delgadas de Shales negros carbonosos con un espesor promedio de 6.7 m – a 42m.

- Intervalo A: Caliza gris a negra tipo Wackestone con fragmentos dispersos de fósiles, cuyo espesor promedio 18.3 m - 60 pies, máxima 51.8 m - 170 pies en algunos pozos petroleros.
- Intervalo M2: Desarrollo de calizas similares a la caliza A y de arenas siliciclásticas de plataforma media donde hay depósitos de tormenta, con un espesor promedio de 11.3 m - 37 pies.

Miembro Villeta Superior (Cenomaniano-Maastrichtiano): predominan las facies arcillosas y limosas y en menor proporción facies calcáreas generalmente como delgados niveles de Wackestone y Packstone de bioclastos. En general, el miembro Villeta Superior está compuesto por capas delgadas a media de arcillas, limos y shales.

Intervalo N: Sobre este intervalo rocoso existen diferentes tipos de nomenclatura debido a que diversos autores la han clasificado en diferentes formaciones geológicas, o simplemente la clasifican como una formación independiente, conocida como la Formación "Neme". Por ejemplo, autores como Caceres y Teatin (1985) la incluyen como un miembro de la Formación Villeta; Mora et al., (1998) la atribuyen como miembro de la Formación Rumiyaco, ANH y UPTC (2009) la describen como la Formación "Neme" con el objeto de diferenciar la unidad de Cuarzoarenitas que yace entre las Formaciones Villeta y Pepino y que corresponde en posición estratigráfica a la Formación Rumiyaco de la cuenca de Putumayo. Para este trabajo el miembro "Neme" se clasifica como un intervalo del miembro superior de la Formación Villeta debido a que así es conocido y utilizado por la industria petrolera.

El intervalo N Tiene un espesor promedio de 170 m y hacia el norte cubre discordantemente al Complejo Garzón, al sur a las Formaciones Orito Belén y Caballos. Litológicamente se compone de capas medias a gruesas de Litoarenitas a Sublitoarenitas de grano fino a grueso de color gris medio a gris claro con fragmentos fósiles de hojas y esporádicas impregnaciones de Bitumen. Esta sucesión arenosa presenta laminación inclinada, intercaladas con paquetes de lodolitas dispuestas en capas delgadas tabulares. (ANH; UPTC, 2009).

Es frecuente observar dentro de las rocas que conforman la secuencia laminación plano paralela, escamas de peces, abundantes Pellets y Oolitos, fragmentos de materia orgánica, intensa bioturbación, así como impresiones de Amonitas y Bivalvos articulados. En general, la sucesión sedimentaria de la Formación Villeta es predominantemente lodolítica, con algunas intercalaciones de calizas y arenitas (Nuñez, 2003).

Del análisis de palinomorfos encontrados dentro de la Formación Villeta, Geoestudios (1993) pudo determinar una edad de Albiano - Campaniano para la acumulación de esta unidad. Para el intervalo superior, en el que son frecuentes las arenitas, se obtuvieron edades que van del Santoniano al Campaniano. Sin embargo, Nuñez (2003) le asignan una edad que va desde Cenomaniano hasta Santoniano.

6.1.3.2 Ambiente de sedimentación de la Formación Villeta. La Formación Villeta se depositó en un ambiente de rampa monoclinal carbonatico submeridional con pendientes del orden de 2° hacia el Occidente. Durante su depositación las oscilaciones del mar permitieron la formación de cuerpos carbonáticos y arenosos, la cuenca era más profunda hacia el SW, y se somerizaba hacia

el NE y la depositación de ésta formación muestra evidencia de la transgresión máxima del Cretácico (Rosello et al., 2006). Durante el Cretácico Temprano, la cuenca de Putumayo, se encontraba emergida, sujeta a procesos asociados a exposición subaérea. En el Aptiano, se inicia un gran ciclo transgresivo, con pequeñas caídas del nivel del mar, que permite la depositación de la Formación Villeta.

La Formación Villeta corresponde a una depositación marginal durante el intervalo comprendido entre el Albiano y el Maastrichtiano Temprano. El miembro Inferior de la formación corresponde a una sedimentación de plataforma calcárea con episodios terrígenos, los intervalos litoestratigráficos de este miembro representan periodos de sedimentación marina interrumpidos por periodos de aporte continental y el Villeta Superior a una sedimentación más restringida con bajas condiciones de energía de depositación y poca fauna (Rosello et al., 2006), la Figura 18 representa de manera generalizada lo anteriormente explicado.

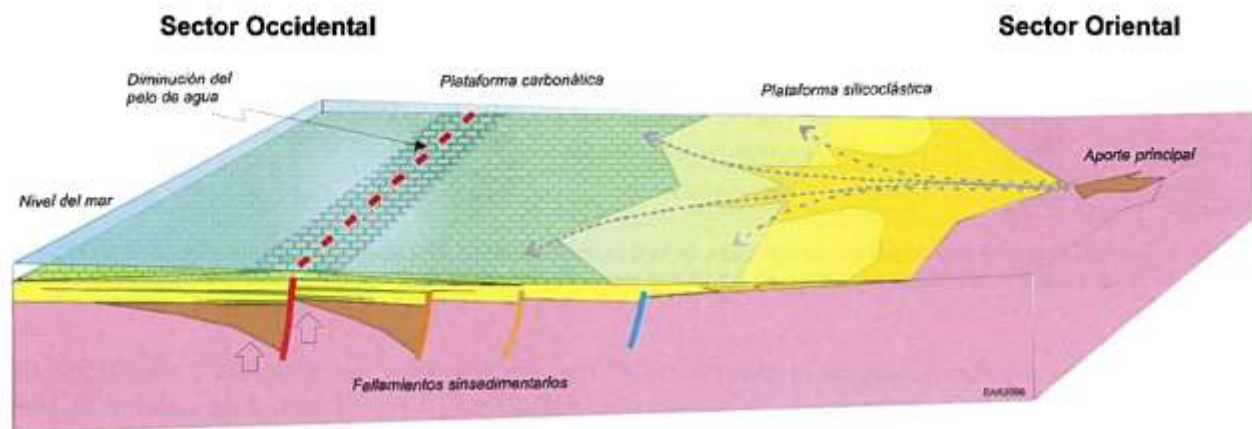


Figura 18. Se observa el ambiente de depositación generalizado de la Formación Villeta.

Adaptado de: Rosello et al. (2006).

El ambiente de depósito de los carbonatos (Grainstone, Packstone, Packstone/Wackestone entre otros) de los intervalos de la Formación Villeta corresponde a bancos arenosos de bordes de plataforma, que son acumulaciones de restos de organismos que no han sido cementados en etapas tempranas de sedimentación y que pueden variar en su forma y posición por acción de corrientes y oleaje o grandes tormentas (Rosello et al., 2006). En este sub-ambiente predominan las condiciones de alta energía lo que implica un fracturamiento-rompimiento, de los fragmentos esqueletales que conforman estos bancos, debido a la abrasión (Rosello et al., 2006).

Las facies de Packstone, Packstone/Wackestone, Wackestone/Packstone (Intervalos C, B, A y M2 del miembro inferior de la Formación Villeta) de bioclastos que se observan dentro de secuencias de lodolitas presentan generalmente fragmentos de conchas distribuidas de forma aleatoria y con la concavidad hacia la base, lo cual sugiere que fueron depositadas por eventos de alta energía que se interpretaron como depósitos de tormentas dentro de una plataforma media (Rosello et al., 2006).

Las facies arenosas corresponden en su mayoría a cuarzo arenitas grises a gris olivas generalmente bioturbadas, arenitas con laminación ondulosa, Arenitas lodosas bioturbadas y en menor proporción arenitas con estratificación cruzada. Se interpretaron como depósitos de Shoreface y de Barras desarrolladas al borde de una plataforma. (Rosello et al., 2006). Éste sub-ambiente se habría dado en los Intervalos T y U del miembro Inferior de la Formación Villeta.

Las facies de arcillolitas, limolitas y shales generalmente de color gris medio a gris oscuro con laminación plana paralela, ocasionalmente restos de conchas y foraminíferos planctónicos,

con bioturbación de Thalassinoides se interpretaron como depósitos de plataforma media a plataforma externa. Estas facies son las que separan los diferentes intervalos del miembro de la Formación Villeta (Rosello et al., 2006).

De acuerdo con ANH y UPTC (2009) el depósito de la Formación Villeta se produce en respuesta a una subida del nivel de base, y se evidencia en el cambio facial y en los valores altos del registro de rayos gamma. Sin embargo, éste mismo evento según Rosello et al., (2006) está asociado el miembro superior de la Formación Villeta.

En general el ambiente de depósito está caracterizado por periodos de sedimentación marina interrumpidas por periodos de aporte continental; desarrollándose en general en la parte Inferior de la unidad un ambiente intermareal afectado por la acción de tormentas, representadas por los niveles calcáreos, que hacia el tope de la unidad evolucionan a ambientes de plataforma media a externa representados por las sucesiones espesas de lodolitas negras (SGC, 2015).

6.1.4 Formacion Rumiayaco. Según Núñez (2003) el nombre de esta unidad corresponde a Miley y McGirk (1948); adicionalmente señala que Cucalón y Camacho (1966) en la compilación geológica de la frontera entre Colombia y Ecuador vuelven a utilizar este nombre para la formación.

La Formación Rumiayaco se encuentra distribuida en el área de piedemonte de la Cordillera Oriental, en forma de franjas muy delgadas con rumbo aproximado N50E. Se caracteriza por una morfología muy suave, ondulada (SGC, 2015). Esta Formación está conformada por una

sucesión monótona, predominantemente arcillolítica de color rojo y gris, con diversas tonalidades, en la cual se intercalan capas delgadas de Conglomerados finos, Areniscas Cuarzosas, Líticas y Sublíticas. En general, las capas de Arcillolitas se presentan en estratos gruesos tabulares, con moderada a alta bioturbación. La gran mayoría de las veces las estructuras internas de las capas se han perdido por la bioturbación, y se observa madrigueras verticales; frecuentemente contienen Óxidos de Hierro (Nuñez, 2003).

La Formación Rumiayaco se observa en contacto neto y concordante con la infrayacente Formación Villeta (SGC, 2015), Mora et al., (1998) señala que el contacto inferior es un contacto neto erosivo con las lodolitas de la Formación Iglesias (Villeta Superior). Según Nuñez (2003) el contacto inferior es también transicional. El contacto superior es una paraconformidad con la Formación Pepino. El espesor de la Formación oscila entre los 300 y 800m (SGC, 2015). Autores como Olsson (1956) consideran la acumulación de la Formación entre el Maastrichtiano - Paleoceno Temprano.

El análisis de las facies encontradas en la Formación Rumiayaco indica que ella es el resultado de la acumulación de sedimentos finos en fondos someros y bien oxigenados, que permitieron la abundancia de organismos; el ambiente de deposición se considera como predominantemente continental, con incursiones marinas locales, teniendo en cuenta la presencia de dinoflagelados, especialmente hacia la parte inferior de la secuencia (Mora et al., 1998).

6.1.5 Formación Pepino. La Formación Pepino fue definida por Miley y McGirk (1948), cerca de la Inspección de policía de Pepino en el Municipio de Mocoa (Nuñez, 2003).

De acuerdo con Núñez (2003) está dividida en tres miembros: el miembro inferior conformado por capas muy gruesas a medianas, subtabulares de Sublitoarenitas de grano grueso y medio, localmente conglomeráticas con Guijos y Gránulos de Cuarzo, Chert gris y Feldespato Potásico. El miembro medio consiste de lodolitas grises con laminación plano paralela, frecuentes niveles bioturbados, restos carbonosos y Costras de oxidación con intercalaciones de capas delgadas a muy gruesas de Arenitas de grano medio a grueso localmente con Gránulos y Guijos de Chert gris y negro. El segmento superior corresponde a un paquete de capas gruesas de Conglomerados, Sublitoarenitas y Cuarzoarenitas, esporádicamente impregnadas por hidrocarburos; localmente con lentes de lodolitas gris oscuras. ANH; UPTC (2009) reconoce un espesor de 350 y 400 m.

ANH; UPTC (2009) y Núñez (2003) afirman que los contactos superior e inferior son discordantes con las Formaciones Rumiayaco y el Grupo Orito respectivamente. Mora et al., (1998) sin embargo señalan que el contacto inferior sería neto erosivo mientras el contacto superior sería concordante con la Formación Orteguzza. Sin embargo, según SGC (2015) el contacto superior es discordante, aunque desde Florencia hacia el sur se observa en contacto fallado con esta unidad a través de la Falla del Borde Amazónico.

En cuanto a la edad de esta unidad Geoestudios (1993) señala que la edad de la unidad con base en palinomorfos es Eoceno-Oligoceno. Mora et al., (1998) con base también en Palinomorfos establece una edad Eoceno tardío para la parte inferior de la unidad.

De acuerdo con Mora et al., (1998) el ambiente de depósito de esta unidad se interpreta como depósitos de flujos de detritos, barras longitudinales o rezagos de canal, a partir de flujos de alta energía o abanicos aluviales.

6.1.6 Formación Orteguaza. La Formación Orteguaza es la más antigua de las dos unidades en que se dividió el Grupo Orito; las Formaciones Orteguaza y Orito-Belén. El Grupo Orito fue definido por Miley y McGirk (1948). Ésta Formación está constituida por Arcillolitas grises claras a oscuras (eventualmente negras), macizas y con laminación fina planoparalela, Arcillolitas moteadas, con interposiciones aisladas de capas delgadas a gruesas de arenitas de grano fino a medio macizas y con laminación plano paralela e inclinada (Nuñez, 2003).

La Formación Orteguaza cubre discordantemente a la Formación Pepino, contacto muy notorio por la definición de dos morfologías características; la primera definida por la Formación Pepino como los primeros filos del frente montañoso y la segunda la Formación Orteguaza, caracterizada por un paisaje ondulado de colinas redondeadas (SGC, 2015).

Esta unidad está cubierta a su vez por los depósitos aluviales de las corrientes mayores de la región. Aunque la unidad suprayacente, la Formación Orito-Belén, no aflora en la zona, se estima que la Formación Orteguaza tiene un espesor aproximado de unos 500 m. (ANH; UPTC, 2009).

6.2 Evolución Geológica de La Cuenca de Putumayo

6.2.1 Precámbrico. Durante el Precámbrico una tectónica pasiva se desarrolló sobre el borde del cratón de la Guyana, generando una tectónica de grabens y paleo-altos, sobre rocas metamórficas y plutónicas. Allí, se generaron cuencas con una tendencia N-S, entre ellas la cuenca de Putumayo, donde se depositaron varios ciclos sedimentarios (SGC, 2015). En esta cuenca las rocas más antiguas se identifican en afloramientos en el macizo de Garzón, con edades proterozoicas (Rodríguez et al., 2003).

6.2.2 Carbonífero - Pérmico. Posteriormente del Carbonífero al Pérmico se desarrolló un sistema de rift continental el cual originó de norte a sur sistemas de fallas de Horst y Grabens (Ver Figura 20B), Esta actividad tectónica continuó durante el Triásico y Jurásico medio y se ha evidenciado tanto en la cuenca de Putumayo como la del valle superior de Magdalena (ANH, 2009). La evidencia de estos procesos fue hallada por la ANH (2009) donde en los mapas de anomalías de Bouguer se puede interpretar un modelo del basamento y los bloques de Horts, Grabens y las zonas marginales al oeste de las cuencas afectadas por finales de los procesos tectónicos orogénicos.

6.2.3 Triásico - Jurásico. Las rocas volcánicas y vulcano clásticas de la Formación Saldaña, son interpretados como producto de una cuenca transarco, lo que sugiere la presencia de un arco volcánico continental y una zona de subducción al oeste del área actual, (ver Figura 20C) (Rodríguez et al., 2003); la extensión de éste arco magmático según Romeuf et al., (1995) va desde Colombia hasta Perú y se evidencia en el Monzogranito de Mocoa para la cuenca de

Putumayo y el Stock de Payandé para el Valle Superior del Magdalena. Durante este tiempo la actividad tectónica en la Cuenca de Putumayo es de tipo distensivo (ANH, 2009).

La información sísmica de las cuencas Putumayo y Oriente muestra inconformidades angulares en la parte superior de este ciclo (Ver Figura 19). Este hecho que es interpretado como un cambio en la tendencia dinámica, pasando de periodo de rifting a los primeros impulsos de subducción andina (Jaramillo y Escovar, 1980; Bayona et al., 1994).

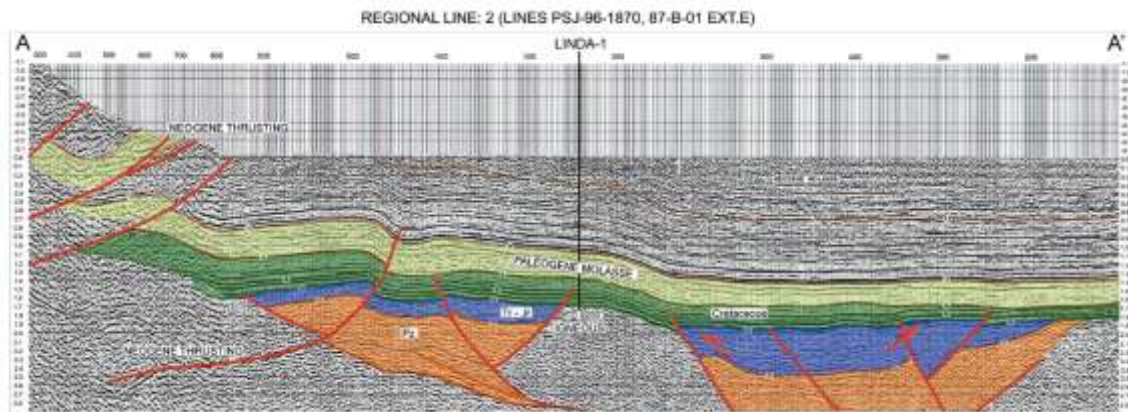


Figura 19. Se observa la inconformidad angular de las rocas del Triásico-Jurásico con las rocas del Cretácico.

Adaptado de: ANH (2009).

6.2.4 Megasecuencia de Cretácico. Esta fase se desarrolla durante el Cretácico y es caracterizada por una incursión marina con el desarrollo de una sedimentación de plataforma marina en una cuenca trasarco formada durante la fase extensional Jura-Triásica explicada anteriormente. Se depositan de manera discordante sobre los sedimentos Jurásicos una serie de Areniscas en ambientes transicionales costeros (Formación Caballos) y sobre estas se empieza a

depositar una sucesión de calizas, margas y shales con algunas intercalaciones arenosas en un ambiente de plataforma de carbonatos (Formación Villeta). Durante esta fase el espacio para acomodar los sedimentos es formado por subsidencia térmica de la cuenca trasarco. Los espesores de estas unidades aumentan progresivamente hacia el oeste sin que se observen cambios abruptos que indiquen actividad de las fallas normales desarrolladas durante la fase de extensión previa (Aguilera, 2000).

Complementando lo anterior, la cuenca de Putumayo contiene rocas del Cretácico con edades que varían de Aptiano a Maastrichtiano, con la presencia de las Formaciones Caballos y Villeta, donde las variaciones repentinas del nivel del mar son los predominantes. La presencia de progradación en las facies sedimentarias que cambian rápidamente de fluvial y clástico de playa a facies de plataforma mixtos corresponden a eventos de regresión forzada, según lo expresado por Posamentier et al., (1999). Estas Formaciones registran los primeros pulsos del levantamiento de la Cordillera Centro-Occidental de la cuenca de Putumayo. ANH (2009) ha subdividido la evolución de las secuencias estratigráficas del Cretácico en las siguientes:

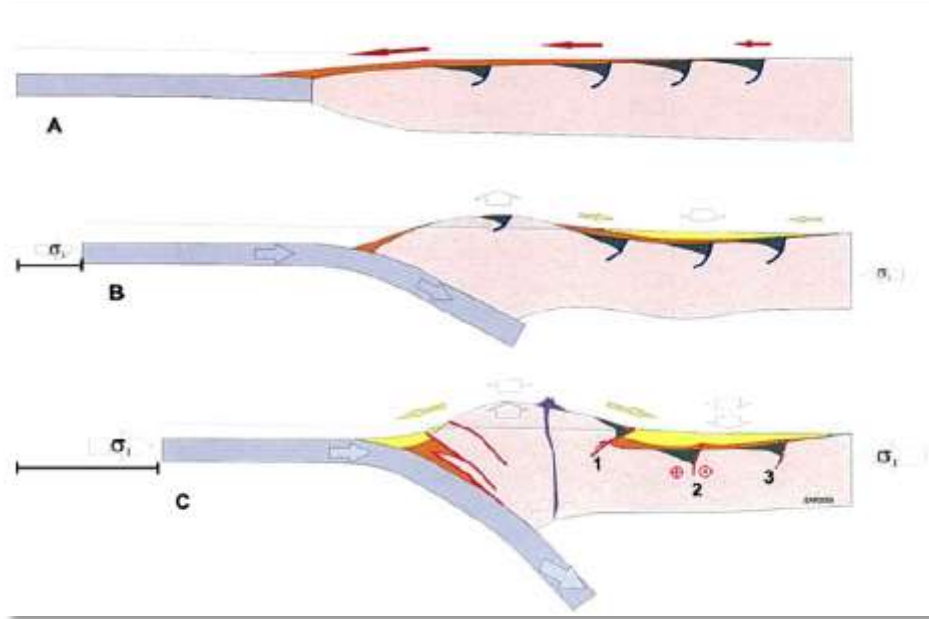


Figura 20. Perfiles esquemáticos transversales de la Cordillera de los Andes a la latitud de la Cuenca Putumayo. A). Muestra la evolución desde una plataforma continental pericratónica. B) Progresivamente invertida. C) Conformación actual. Las flechas rojas y amarillas indican el transporte principal de sedimentos y las flechas blancas movimientos verticales relativos. 1) Frente Andino. 2) Trenes estructurales intermedios. 3) Ambiente de plataforma.

Adaptado de: Rosello et al. (2006).

6.2.4.1 Aptiano Superior a Albaniano. En éste intervalo de tiempo se depositó la Formación Caballos, una secuencia típica de esta formación presenta en la base de un sistema fluvial que llena el valle de la cuenca de Putumayo dada por una superficie de erosión que se desarrolló en el Jurásico. Por encima de esta secuencia continental se depositan arenas de alta energía relacionada con ambientes deltaicos dominados por ondas, las cuales gradan hacia las arenas depositadas en ambientes de estuario, dominado por mareas (Mora et al., 2010).

6.2.4.2 *Albiano Superior - Cenomaniano Medio*. Durante este tiempo se empezaron a depositar las rocas basales de la Formación Villeta, donde los intervalos de las Areniscas T, calizas B, y arcillas superpuestas en estas Calizas B. Las Areniscas T corresponden a sedimentos depositados en el inicio de un evento transgresivo que se produjo después de una caída del nivel de base (Hacq et al., 1987). Debido a su composición y textura se deduce que fueron depositadas en un ambiente de sistema fluvial con influencia estuarina y de mareas. Suprayaciendo a las anteriores areniscas se encuentran las calizas B, éstas fueron depositadas en una plataforma marina poco profunda, sus facies gruesas consisten en Grainstone, Packstone, Packstone/Wackestone, entre otros. Esto compone un sistema de depósito transgresivo, cuyo ciclo termina con la deposición de arcilla intercaladas con calizas y algunas areniscas de entornos de plataforma proximal.

6.2.4.3 *Cenomaniano-Turoniano*. Un nuevo ciclo comienza con la depositación transgresiva de las Areniscas U, después de una rápida caída del nivel de base (Hacq et al., 1987). Componiendo un sistema de canal estuarino con influencia de mareas. Éstas arenas tienen una extensiva área en toda la cuenca, que las hace atractivas para la exploración de hidrocarburos. Suprayaciendo a estas arenas se depositaron unas secuencias calcáreas y después una secuencia lodosa, lo cual indica unas facies de un ambiente proximal e indican el final del evento transgresivo y el inicio de una etapa de un prisma de alto nivel.

- Turoniano – Campaniano: Este ciclo se caracteriza por la depositación de la secuencia de Areniscas M2, las cuales pueden estar más condensadas al oeste de cuenca de Putumayo.

- Campaniano – Maastrichtiano: la base del ciclo es formado por las areniscas M1, cuyos depósitos se dio en canales de un ambiente transicional estuarino o sistemas deltaicos marcando inicio del evento transgresivo. Posteriormente, secuencias de lodos se depositaron al Este de la cuenca y se desarrollaron en depósitos de plataforma medio y externo con depósitos de tormentas ocasionales que corresponderían a facies calcáreas de las secuencias anteriores. Luego, en las partes central y oriental de la cuenca se depositaron las Arenas N, conforme un sistema progradante con el desarrollo de facies de canal de marea.

Se debe mencionar que, al final de la deposición de la Formación Villeta, durante Maastrichtiano, varios pulsos tectónicos relacionados con la orogenia andina ocurrieron. Esta característica parece haber influido en la dirección y la distribución de sedimentos de estas secuencias finales.

Durante todo el periodo del Cretácico, el espacio para acomodar los sedimentos es formado por subsidencia térmica de la cuenca trasarco. Los espesores de estas unidades aumentan progresivamente hacia el Oeste sin que se observen cambios abruptos que indiquen actividad de las fallas normales desarrolladas durante la fase de extensión previa (Triásico- Jurásico).

6.2.4.4 Maastrichtiano Tardío – Paleoceno Temprano. Aguilera (2000) clasifica a este periodo como una fase de antepaís temprana, ésta fase se desarrolla con el depósito de intercalaciones de lodolitas, limolitas y areniscas finas delgadas de la Formación Rumiyocho en un ambiente transicional continental.

El espesor de la Formación Rumiayaco aumenta rápidamente hacia el oeste hasta alcanzar espesores cercanos a los 3000 pies lo cual indica un importante aumento en la subsidencia de la cuenca en esa dirección y dado el carácter transicional continental de los sedimentos es probable que el incremento en la subsidencia hacia el oeste haya sido causado por el desarrollo de una cuenca de antepaís como resultado del levantamiento de la proto – Cordillera Central.

Es posible además que como resultado de la extensión de la corteza que da origen a la cuenca de antepaís se reactiven algunas de las fallas normales de la fase de extensión (rift) con saltos pequeños que reacomoden la flexión de la corteza y ayuden a generar el espacio para estos depósitos.

6.2.5 Paleoceno Tardío a Eoceno Medio. Allí se presenta un periodo de exposición subaérea y erosión que implica un descenso importante en el nivel base de la cuenca. En zonas del Valle Superior del Magdalena localizadas en el departamento del Huila, al oeste de la cuenca, se observa el desarrollo de estructuras compresionales en este periodo que corresponderían con una fase más avanzada del desarrollo de la Cordillera Central, pero no es claro que esta estructuración haya afectado a la cuenca del Putumayo, al menos en su sector más occidental, ya que en la sísmica y los pozos se observa que los espesores de las unidades depositadas posteriormente aumentan de manera consistente hacia el Oeste y además se encuentran deformados de la misma manera que las unidades infrayacentes. Es decir, hay concordancia geométrica antes y después de este periodo de erosión en la cuenca.

6.2.6 Eoceno Tardío a Mioceno Medio. En este intervalo de tiempo Aguilera (2000) lo describe como la fase de antepaís tardía, donde se depositan los sedimentos lutíticos y arenosos de ambientes predominantemente transicionales costeros muy espesos, que corresponden a las Formaciones Orito-Belén, Orteguzza y Pepino. Al igual que la Formación Rumiyaco, los espesores de estas unidades aumentan hacia el oeste como resultado del desarrollo de una cuenca de antepaís producto del desarrollo continuado de la Cordillera Central y/o el desarrollo de la Proto-Cordillera Oriental.

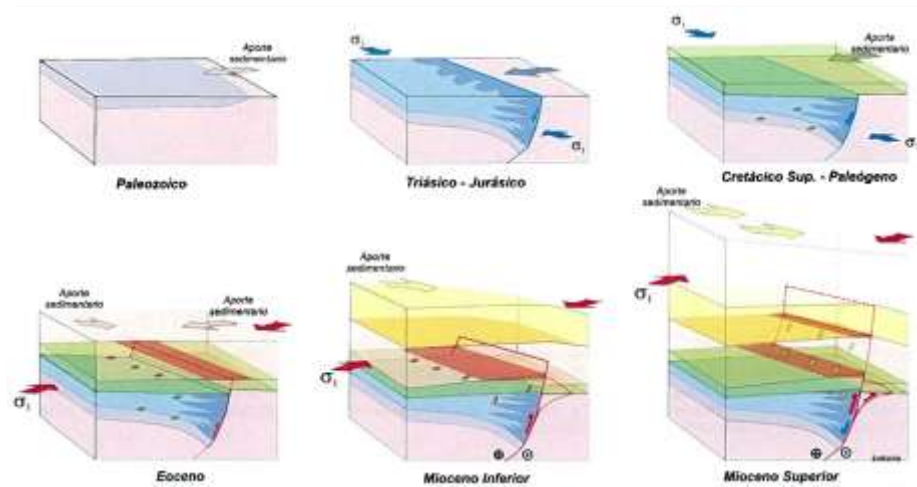


Figura 21. Esquema evolutivo idealizado de la evolución tectonosedimentaria de la cuenca Putumayo.

Adaptado de: Rosello et al. (2006).

6.2.7 Mioceno Tardío Hasta El Presente. Aguilera (2000) describe este tiempo como la fase de Orogenia Andina, en esta fase se desarrolla la actual configuración de la cuenca con el desarrollo de pliegues por propagación de falla formados por la inversión de las fallas normales

Jurásicas, como resultado de la compresión generada por un sistema de cabalgamiento con orientación NE-SW y vergencia SE que marca el límite de la cuenca con la actual Cordillera.

Es en esta fase cuando se desarrollan las estructuras del actual piedemonte de la Cordillera en donde se encuentran las principales acumulaciones de la cuenca y es en esta deformación en la que se involucran todas las unidades previamente depositadas de acuerdo con lo observado en la sísmica de la Figura 23. En la zona Centro-Oriental de la cuenca continúa la subsidencia y se depositan las formaciones Ospina y Caimán. En la Figura 22 se observa la configuración geológica actual generalizada de la Cuenca de Putumayo.

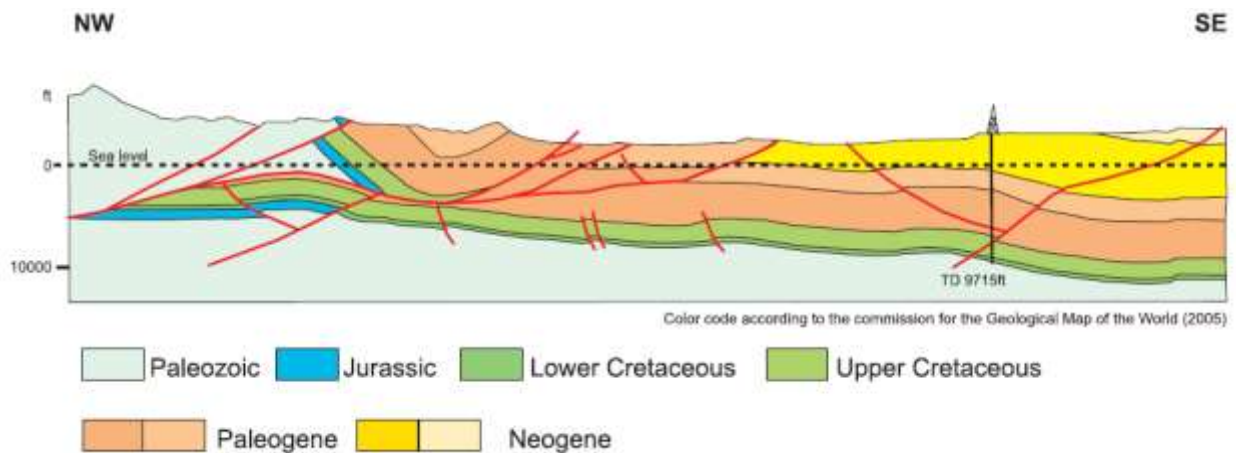
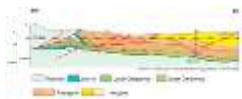

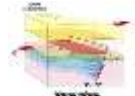
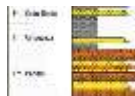
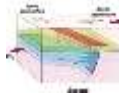

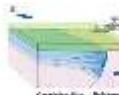



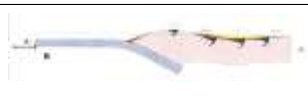




Figura 22. Perfil geológico actual de la Cuenca de Putumayo.

Adaptado de: ANH (2007).

Tabla 3. Se observa un esquema detallado de base a techo de los eventos geológicos ocurridos en el área de estudio

TIEMPO GEOLÓGICO	EVENTO	DESCRIPCIÓN	FORMACIÓN DEPOSITADA
MIOCENO TARDÍO HASTA EL PRESENTE		Configuración actual de la cuenca con el desarrollo de pliegues por propagación de falla formados por la inversión de las fallas normales Jurásicas. Deposición Fm. Ospina y Caiman (Aguilera, 2000)	
EOCENO TARDÍO A MIOCENO MEDIO		Fase de antepaís tardía, aumentan espesores al oeste de la Cuenca Se depositan las Formaciones Orito-Belén, Orteguaza y Pepino (Rosello et al., 2006)	
PALEOCENO TARDÍO A EOCENO MEDIO		Deposición de la Formación Rumiwayco, se reactivan algunas fallas normales de la fase de extensión (rift) con saltos pequeños que reacomoden la flexión de la corteza y ayudan a generar el espacio para estos depósitos (Aguilera, 2000).	
MEGASECUENCIA DE CRETÁCICO		Deposición Formaciones Caballo y Villeta. Durante todo este periodo del Cretácico, el espacio para acomodar los sedimentos es formado por subsidencia térmica de la cuenca trasarco (Aguilera, 2000)	
TRIASICO-JURÁSICO		Las rocas volcánicas de la Formación Saldaña, son interpretadas como producto de una cuenca trasarco, lo que sugiere la presencia de un arco volcánico continental y una zona de subducción al oeste del área actual. La actividad tectónica en la Cuenca de Putumayo es de tipo distensivo (Rosello. et.al.,2006)	
CARBONÍFERO-PÉRMICO		Se desarrolló un sistema de rift continental el cual originó de norte a sur sistemas de fallas de Horst y Grabens (ANH, 2009)	
PRECÁMBRICO		Una tectónica pasiva se desarrolló sobre el borde del cratón de la Guyana, generando una tectónica de grabens y paleo-altos (SGC, 2015)	

6.3 Marco Tectónico y Estructural

La cuenca de Putumayo presenta dos zonas estructuralmente bien definidas (Ver Figura 23) separadas por el sistema de fallas de Orito-Loro-Hormiga de rumbo Norte-Sur (Aguilera, 2000).

La primera zona es una plataforma, localizada hacia el Este en el antepaís donde dominan secuencias sedimentarias con disposiciones subhorizontales y con inclinaciones leves hacia el Occidente en las que se desarrollan estructuras con relieves suaves y rumbo predominante Norte-Sur generadas por fallamientos del basamento con reactivaciones transpresivas Andinas, éstas

fallas presentan fallas normales de poco desplazamiento en dirección Nororiente-Suroccidente y la cubierta sedimentaria tiende a acuñarse hacia el Oriente (Rosello et al, 2006).

La segunda zona se localiza al occidente del sistema de fallas Orito-Loro-Hormiga y presenta un mejor desarrollo de fallamiento inverso con una historia de desarrollo relativamente compleja ya que se observan en este sector fallas con vergencias opuestas y saltos variables que generan múltiples pliegues por propagación de falla, y es en este tipo de estructuras en donde se han encontrado la mayor parte de las acumulaciones de hidrocarburos en la cuenca, también se han observado anticlinales asimétricos en dirección predominante Nororiente-Suroccidente asociados a fallas de cabalgamiento buzando en dirección Occidente (Aguilera, 2000).

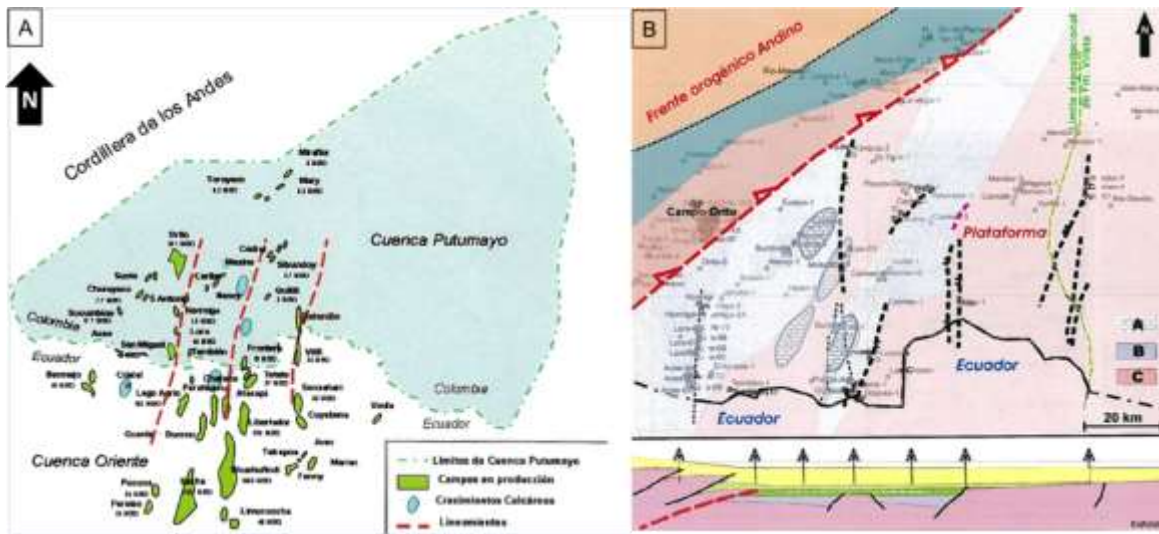


Figura 23. A). Trenes estructurales que afectan a los campos Hormiga, Loro, Acae, San Miguel, Orito. B) Esquema tectónico de la cuenca de Putumayo con las tres zonas de deformación reconocidas: 1) Zona compresional Andina al occidente y 2) Zona de plataforma del antepaís con reactivaciones transpresionales. A: depósitos carbonáticos, B: basamento no cristalino y C: basamento cristalino. Línea verde discontinua indica el límite de depositación de la Formación Villeta.

Adaptado de: Rosello et al. (2006).

En la Figura 24 se observa el trazo de un perfil en el mapa de anomalías de Bouguer para la cuenca de Putumayo en donde se muestra una interpretación de las diferentes estructuras que interactúan en la cuenca.

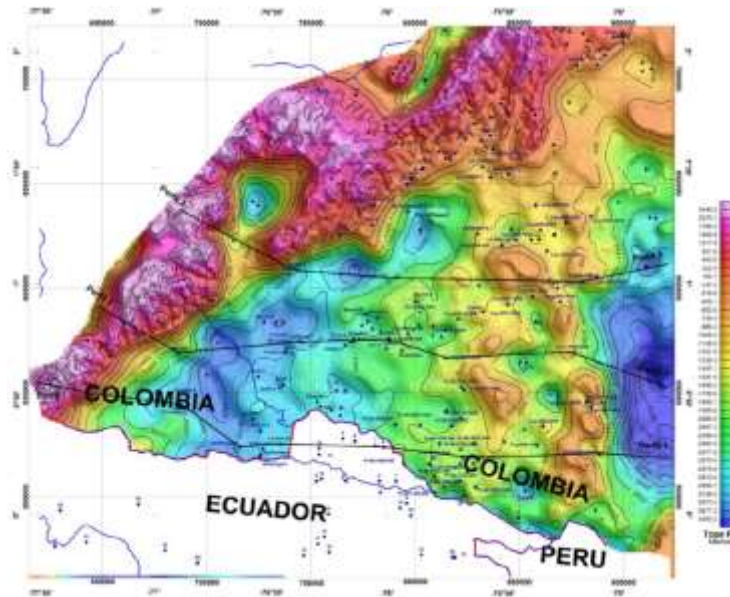


Figura 24. Mapa residual del Tope del Paleozoico de la cuenca de Putumayo.

Adaptado de: ANH (2009).

En la cuenca de Putumayo, los altos y bajos estructurales de orientación Nor-Noroccidente que son bien conocidos en Ecuador continúan dentro de territorio colombiano, destacándose claramente la continuación de la cuenca de Oriente-Marañón. Estos Grabens y Horst se han identificado muy bien en la cuenca, con periodos de reactivación durante el Devoniano – Carbonífero y Triásico - Jurásico, resultado de procesos regionales de apertura de cuencas de rift peri e intracratónicas, algunas de las cuales muestran evidencias de inversión tectónica incipiente durante el Cenozoico visible (ANH y UPTC, 2009).

El basamento Pre-Cretácico aflora o se encuentra próximo a la superficie actual del terreno a lo largo del Piedemonte de la Cordillera Oriental y en los altos estructurales de orientación Norte-Sur en el extremo oriental del área. Al Oriente de este alto estructural central, orientado Norte-Sur, que sirve como límite a la cuenca del Putumayo se observa cómo las secuencias,

probablemente Paleozoicas rellenan un Graben, con espesores de sedimentos superiores a los 5000 m. La porción central elevada se caracteriza por un basamento muy complejo, con presencia de altos y bajos que se conoce como Alto de Florencia (Rosello et al, 2006).

Al Occidente de este alto hasta el Piedemonte se desarrolla la porción más interesante de la cuenca de Putumayo, que en su parte más profunda las secuencias sedimentarias tienen espesores comprendidos entre los 3800 m a 4000 m de profundidad como se puede observar en la Figura 25. Estos bajos estructurales constituyen sub-cuencas, donde muy posiblemente se encuentren unidades Paleozoicas-Jurásicas nunca exploradas. Si los altos de basamento central forman estructuras de cierre o acuñamientos en las secuencias Terciarias suprayacentes, hidrocarburos generados en las unidades Cretácicas o más antiguas provenientes de las partes profunda de las cuencas pueden haberse entrampado en los mismos (ANH y UPTC, 2009).

El modelo geológico mostrado en la Figura 25 sustenta que el fallamiento es predominantemente normal y de ángulo alto, y que los residuos controlados positivos y negativos son principalmente producidos por contrastes laterales de densidad entre el basamento cristalino Precámbrico y los semigrábens Jurásico-Paleozoicos afectados por tectónica de transpresión.

7. Metodología

Con el fin de cumplir los objetivos planteados en este trabajo se generó una metodología la cual permitió llevar una secuencia ordenada del proyecto y tener un enfoque general del flujo de trabajo realizado. Esta metodología consistió en cinco fases, las cuales muestran paso a paso cada uno de los procesos a seguir dentro de la realización del proyecto.



Figura 26. Se observa la secuencia de pasos generalizados para la realización de este proyecto.

7.1 Fase de Recopilación y Análisis Bibliográfico

Esta fase es una de las más amplias, ya que se realizó durante el transcurso del proyecto. Consistió en la recopilación de información relacionada con el tema de este trabajo, analizar sus conceptos y antecedentes, los cuales permitieron tener un conocimiento previo del área de enfoque de estudio y los métodos analíticos instrumentales a utilizar.

La lectura y entendimiento, de los múltiples conceptos que ocupó el proyecto, comenzando con la técnica de análisis instrumental útil de espectrometría de fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X y las técnicas tradicionales utilizadas en la exploración de hidrocarburos como las muestras de zanja, los núcleos de perforación y los registros de pozo fueron la base para el desarrollo del mismo.

La optimización de tiempos y hacer más eficiente en el uso de la información que se empleó durante el proceso de evaluación, inició con el desarrollo del inventario, selección, clasificación y carga de la información disponible.

Una vez estructurada la base de datos se construyeron los flujos de trabajo establecidos para asegurar la completitud y simetría de la información disponible, con el fin de identificar los alcances del estudio y el posible grado de incertidumbre asociado.

7.2 Fase de Inventario y Carga de Datos

En esta fase se recopilamos los datos disponibles para realizar el proyecto. Dentro de la revisión se seleccionaron pozos que tuvieran el Set de registros y análisis necesarios para hacer una buena interpretación química y litológica de las zonas de interés, así como la información de algunos intervalos de profundidad que se obtuvieron de algunos pozos de perforación. Se involucró los procesos de recopilación, selección y clasificación de la información. Al generar la base de datos se debe desarrollar la estandarización de los archivos, empleando y clasificando según sea el tipo de documento, los formatos y nemónicos establecidos por los estándares de la industria. La carga

de datos se debe realizar para visualizar las características litológicas y químicas de la Formación Villeta en la cuenca de Putumayo.

Esta fase se considera de gran importancia, ya que de esta depende la correlación de datos y que el resultado sea exitoso y el esperado. El producto final es la organización y tabulación de la información disponible, así como la base de datos del estudio en la plataforma de interpretación.

7.3 Fase de Interpretación de La Información Recopilada

En base a la información obtenida previamente se planteó el entendimiento y clasificación de los datos, tanto los obtenidos en pozo (Muestras de zanja y Núcleos de perforación, registros de pozo) como la interpretación de los análisis de la técnica de análisis instrumental de espectrometría de fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X.

7.4 Fase de Integración

Una vez interpretados los registros, análisis químicos, y la descripción litoestratigráfica de las muestras de zanja y los núcleos de perforación, se integra la información proveniente de los núcleos de perforación y registros de pozo, bajo un concepto orientado por la experiencia y el conocimiento geológico de la cuenca de Putumayo, con el objetivo de definir los litotipos que conforman la Formación Villeta en el área de estudio y sus relaciones con el modelo estratigráfico. Se da paso a la generación de un modelo quimioestratigráfico teniendo en cuenta

litologías, la correlación entre estas y el resultado de las técnicas de análisis instrumental y de registro de pozo obtenidos.

7.5 Fase de Análisis de Resultados y Conclusiones

En esta fase se dará respuesta a los objetivos propuestos por medio de los resultados obtenidos en los análisis y se plantearán las ventajas de la quimioestratigrafía y su uso como metodología en la exploración de hidrocarburos comparada con otros métodos.

8. Resultados

8.1 Tipo y Calidad de la Información Disponible

8.1.1 Información disponible de los registros de pozo. La información disponible para el desarrollo del estudio fue entregada por ECOPETROL S.A.-ICP y comprende datos de registros de pozo en formato digital, al igual que datos de laboratorio. Los registros de pozo se recibieron en archivos ASCII con formatos LAS, LIS y DLIS. Así mismo, se entregó información de algunas imágenes de registros y corridas en formato TIFF para algunos pozos.

En total, existe disponibilidad de cuarenta y cinco (45) registros de pozos, de los cuales treinta y nueve (39) pozos están perforados en el área de estudio y seis (6) pozos del campo Orito que no están dentro del área de estudio. Se identifica la cantidad y calidad de la información entregada asignando un grado de incertidumbre a cada pozo, representado con valores (1-4), los cuales corresponden a la calidad de la información desde los rangos de baja, media, alta y muy alta, respectivamente según la disponibilidad y continuidad de los registros por pozo.

Tabla 4. Inventario de las curvas básicas de registros disponibles en cada uno de los pozos de los campos Acae, Hormiga, Loro y San Miguel, los pozos que presenten color amarillo corresponden a los pozos con XRF.

POZO	LITOLÓGICOS				POROSIDAD			RESISTIVIDAD			SINTÉTICOS	# DE SINTÉTICOS	INCERTIDUMBRE ASOCIADA	
	CALIPER	SP	GR	NPHI	NEUT	RHOB	DT	RESS	RESO	RSFL				
ACAE 2	X	X	X	X				X	X	X		X	6	1
ACAE 3	X	X	X	X				X	X	X				2
ACAE 4	X	X	R					X	X	X		X	1	3
ACAE 5	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	11	1
ACAE 6	X	X	X	X			X	X	X	X	X			1
ACAE 7	X	X	X	X			X	X	X	X	X			1
ACAE 8	X		R				X	X	X	X	X			3
ACAE 8A	X	X	X	X			X		X	X				2
ACAE 9	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	4	1
ACAE 10	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	2	1
ACAE 11	X	X	X	X			X	X	X	X	X			2
ACAE 12	X	X	X	X			X	X	X	X	X			3
ACAE 13D	X		X				X	X						4
ACAE 13	X	X	X	X			X	X	X	X				2
ACAE 14	X	X	X	X			X	X	X	X	X			3
HORMIGA-1	X	X	X	X			X	X	X	X	X			3
HORMIGA-1X	X	X	X	X			X	X	X	X	X			1
HORMIGA-2A	X	X	X	X			X	X	X	X	X			3
HORMIGA-4	X	X	X	X			X	X	X	X	X			3
LORO-1	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	1	3
LORO-2A	X	X	X				X	X	X	X	X			3
LORO-3	X	X	X				X	X	X	X	X			3
LORO-4	X	X	X			X	X	X	X	X				3
LORO-5A	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	5	3
LORO-6	X		X				X		X					4
LORO-7	X	X	X			X	X	X	X	X				3
LORO-7A	X	X	X	X			X	X	X	X	X			2
LORO-8	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	3	2
LORO-9	X	X	X	X			X	X	X	X	X			3
LORO-30	X	X	X	X			X	X	X	X	X			3
LORO-10	X	X	X	X			X	X	X	X	X			2
LORO-11	X	X	X	X			X	X	X	X	X			2
LORO-120	X	X	X	X			X	X	X	X	X			3
SAN MIGUEL-1	X	X	X	X			X	X	X	X	X			2
SAN MIGUEL-2	X	X	X	X			X	X	X	X	X			2
SAN MIGUEL-3	X	X	X	X			X	X	X	X	X			2
SAN MIGUEL-4	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	1	2
SAN MIGUEL-5	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	1	1
SAN MIGUEL-6	X	X					X	X	X	X	X			3

X
ANÁLISIS XRF NO HAY REGISTRO DE POZO

En el campo Acae, el registro presente en la mayoría de pozos es el Gamma Ray, junto con los registros resistivos; para el campo Hormiga, es el NPHI (Neutrón), seguido del DT (Sónico); mientras que para el campo Loro, son el SP y Gamma Ray y finalmente para el campo San Miguel el NPHI, SP y resistivos, presentan la información más completa.

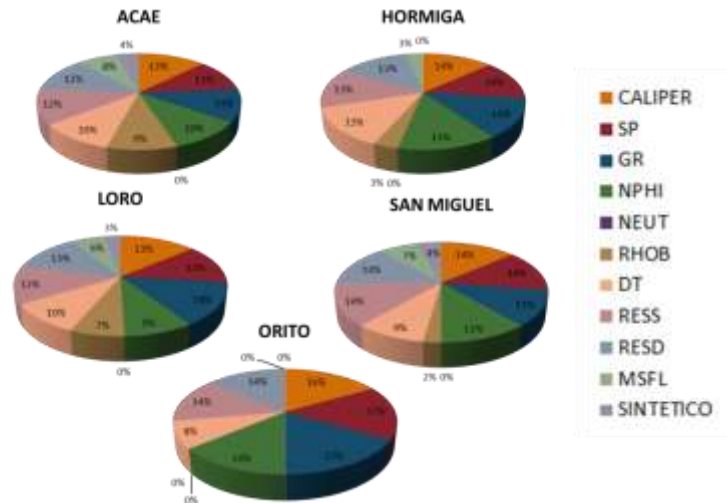


Figura 27. Estadística de registros por pozos. Densidad de información y porcentaje de incertidumbre.

Los pozos del campo Orito, presentan una pobre información de registros eléctricos y adicionalmente no tienen interpretación de unidades, ni topes asociados. Una vez finalizada la estructura de la base de datos, se da paso a la etapa de edición de registros de pozo que consta: Merge de curvas, edición de datos anómalos, estandarización de nemónicos, shift de curvas respecto a los resistivos entre otros procesos necesarios para desarrollar una buena integración de la data disponible.

8.1.2 Información disponible de los núcleos de perforación. Se realizó la descripción sedimentológica y estratigráfica orientada a la definición de litotipos de 204.8 pies de núcleos de perforación, distribuidos en ocho pozos perforados en el área de estudio.

Tabla 5. Información de los núcleos de perforación de los pozos trabajados y sus respectivos registros de pozo.

POZO	NÚCLEO		ESPESOR	GAMMA RAY	ANÁLISIS PETROFÍSICOS		DESCRIPCIÓN
	TOPE (ft)	BASE (ft)			BÁSICOS	ESPECIALES	
ACAE-1	10324	10343	6				
LORO-9D	10300	10320,42	11,58	X			
LORO-12D	10652	10666,42	14,42	X			
HORMIGA-1X	9795	9838	110,58	X	X	X	X
	10410	10423					
	10428	10437					
	10570	10615,58					
HORMIGA-2A	10715	10733	18,8				
ORITO-4	5800	5813,92	13,92				
ORITO-5	4994	5002	8				
ORITO-105	5571	5575,33	21,5		X	X	
	5576	5580					
	6595	6607,5					
			204,8	Nota: Espesor aproximado de la formación Villeta: 990 ft			
			No hay datos				

La preservación, calidad de los núcleos y cubrimiento de la formación de interés es limitada y restringida, principalmente a las unidades Villeta, Caliza A, U20, Caliza B, Arena T y T10. Así mismo, solo existe registros de Gamma Ray de núcleos (espectral) en tres (3) de los ocho (8) pozos descritos, lo que incrementa la incertidumbre asociada a la ubicación en profundidad de las facies y asociaciones sedimentológicas del núcleo respecto al pozo.

8.2 Corrección, Ajuste y Edición de Los Registros de Pozo

El primer trabajo que se debió realizar para este proyecto fue corregir los registros de pozo originales que se obtuvieron donde se evidenciaron diversos errores, a continuación, se mostrarán algunos ejemplos de estos y sus respectivos ajustes y correcciones, esto es muy

importante ya que de este paso depende que se pueda dar una buena interpretación de los registros de pozo y no caer en resultados erróneos.

En la siguiente Figura se puede observar un error del registro SP en el pozo Acae-5, esto se debe probablemente a que la corrección del registro se hizo en base a las arcillas de manera errónea, para corregir esto se volvió a cargar el registro SP original y se corrigió respecto a las arcillas identificadas en el Gamma Ray.

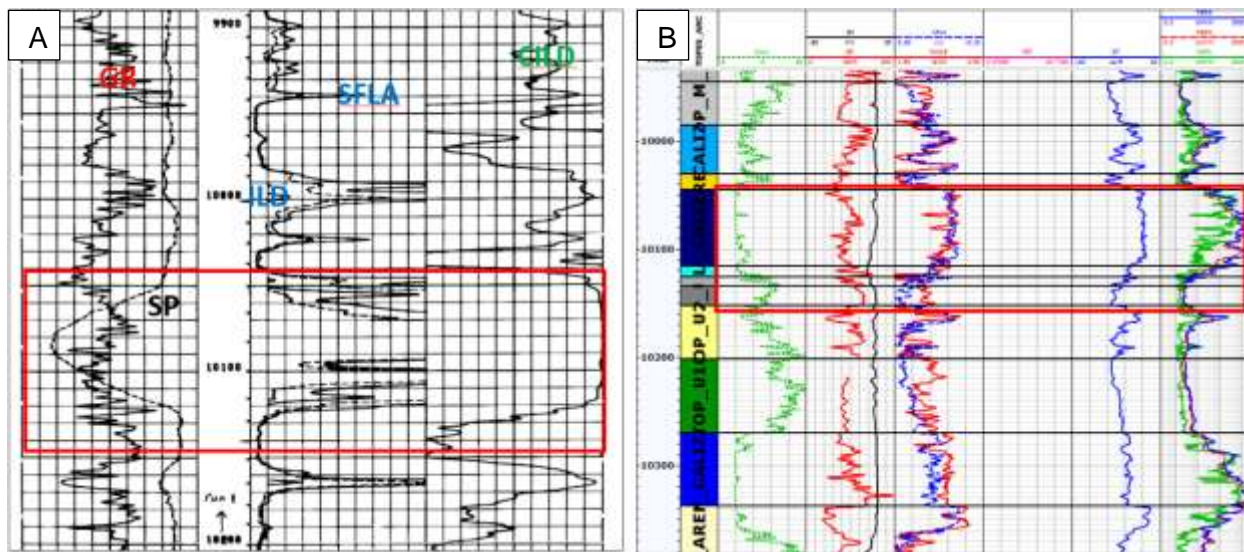


Figura 28. A) Se observa el registro SP corregido de una manera errónea. B) Se observa el registro SP corregido en base a las arcillas del registro Gamma Ray.

Se llevaron a cabo una serie de ediciones sobre los registros de pozo, correspondientes en su mayoría a pequeños desfases en profundidad de las curvas RHOB y DT, al igual que la normalización de algunas curvas correspondientes también al registro GR para los pozos Acae-2, Acae-3, Acae-4, Hormiga-1, Hormiga-2A, Hormiga-4, Loro-2A, Loro-4, Loro-5A, Loro-6, Loro-7, Orito-3, Orito-4, Orito-5, San Miguel-1 y San Miguel-2.

8.2.1 Corrección en profundidad. Se hicieron afinaciones en profundidad no mayores a 1 ft para las curvas RHOB y DT como se muestra en la Figura 29 de esta manera se evita interpretaciones erradas en la determinación de litotipos.

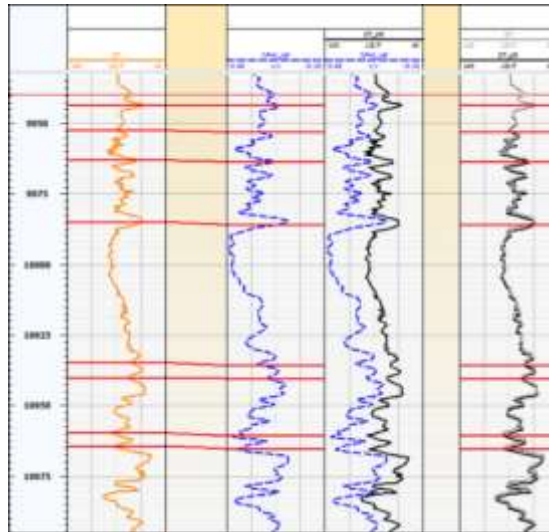


Figura 29. Corrección en profundidad de la curva DT del pozo Acae-7. El Shift no supera 1 ft.

8.2.2 Corrección de respuestas anómalas. Se eliminó respuesta anómala para el registro DT en el pozo Acaé-7 provocada aparentemente por un pegue de la herramienta en la unidad M50 (Ver Figura 30). Aparentemente, la herramienta pudo sufrir pega al repetir el valor 84.25 Ms/Ft por ende se elimina.

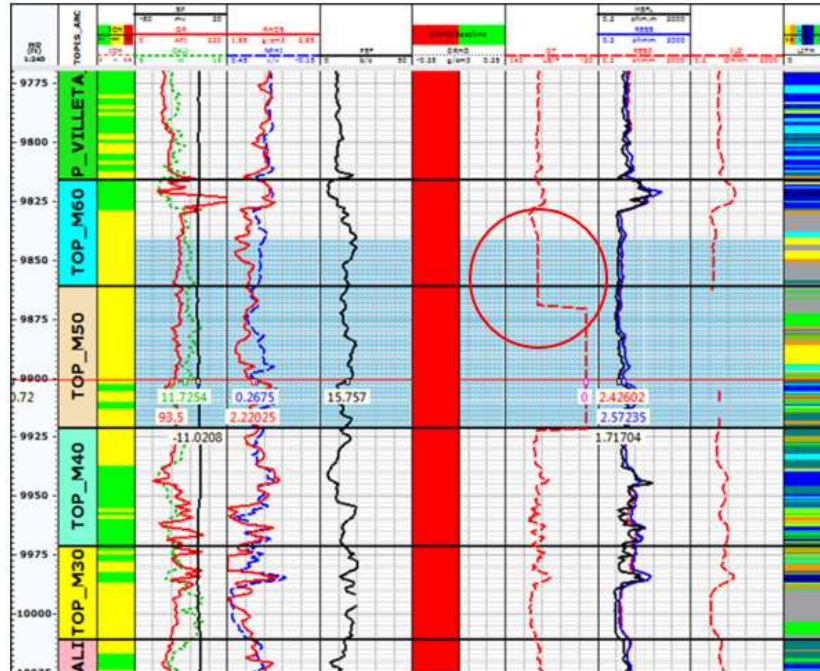


Figura 30. Se eliminó mala corrida de la herramienta DT en el pozo Acaé-7.

8.2.3 Normalización de curvas. El principal objetivo de normalizar los valores de Gamma Ray es para crear una buena distribución de litotipos y no dar paso a un alto grado de incertidumbre dentro de las interpretaciones. Se presentan evidencias que en San Miguel-1 y San Miguel-2 el Gamma Ray del que se dispone es de hueco entubado.

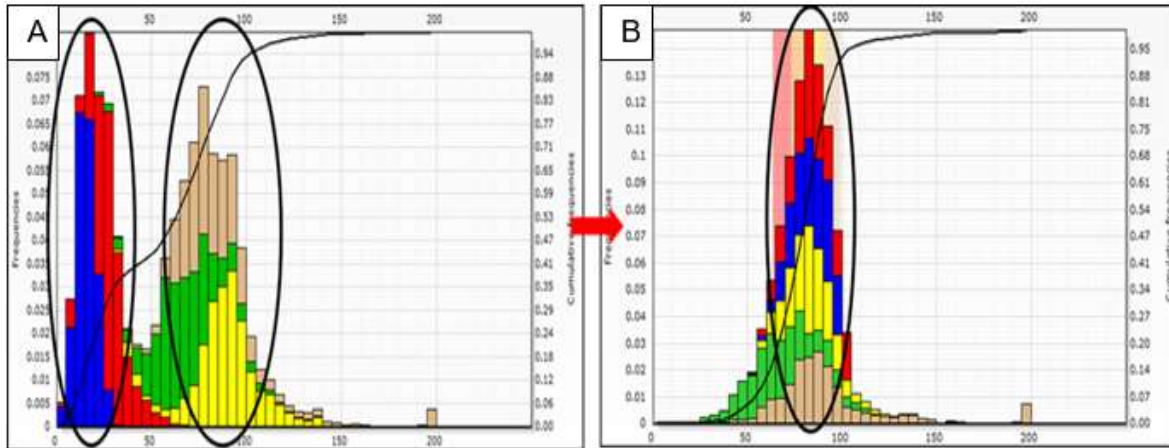


Figura 31. A) Encerrado en negro se encuentran los valores correctos para la respuesta del registro GR para la Formación Villeta y encerrados en rojo están las respuestas anómalas dadas por el registro GR para la misma formación, las cuales se disponen a normalizar. B) Estadística de las curvas con respuesta correcta para Formación Villeta junto con la estadística de la respuesta normalizada de la misma curva.

A continuación, se muestra el inventario de los registros a los cuales se les hizo corrección por pozo.

Tabla 6. Inventario de los pozos corregidos.

POZO	EDICIÓN Y CORRECCIÓN	CURVA FINAL
ACAE-2	Normalización registro Gamma Ray	GR_NORM
ACAE-3	Normalización registro Gamma Ray	GR_NORM
ACAE-4	Normalización registro Gamma Ray	GR_NORM
ACAE-5	Corrección curvas RHOB	RHOBc
ACAE-6	Corrección curvas RHOB y DT	RHOBc, DTc
ACAE-7	Corrección curvas DT	DTc
ACAE-8	Corrección curvas DT	DTc
ACAE-8A	Corrección curvas RHOB	RHOBc
ACAE-9	Corrección curvas RHOB	RHOBc
ACAE-11	Corrección curvas RHOB y DT	RHOBc, DTc
HORMIGA-1	Normalización registro Gamma Ray	GR_NORM
HORMIGA-1X	Corrección curvas RHOB	RHOBc
HORMIGA-2A	Normalización registro Gamma Ray	GR_NORM
HORMIGA-4	Normalización registro Gamma Ray	GR_NORM
SAN MIGUEL-1	Normalización registro Gamma Ray	GR_NORM
SAN MIGUEL-2	Normalización registro Gamma Ray	GR_NORM

8.2.4 Ajuste de los datos de núcleos a profundidad de registros de pozo.

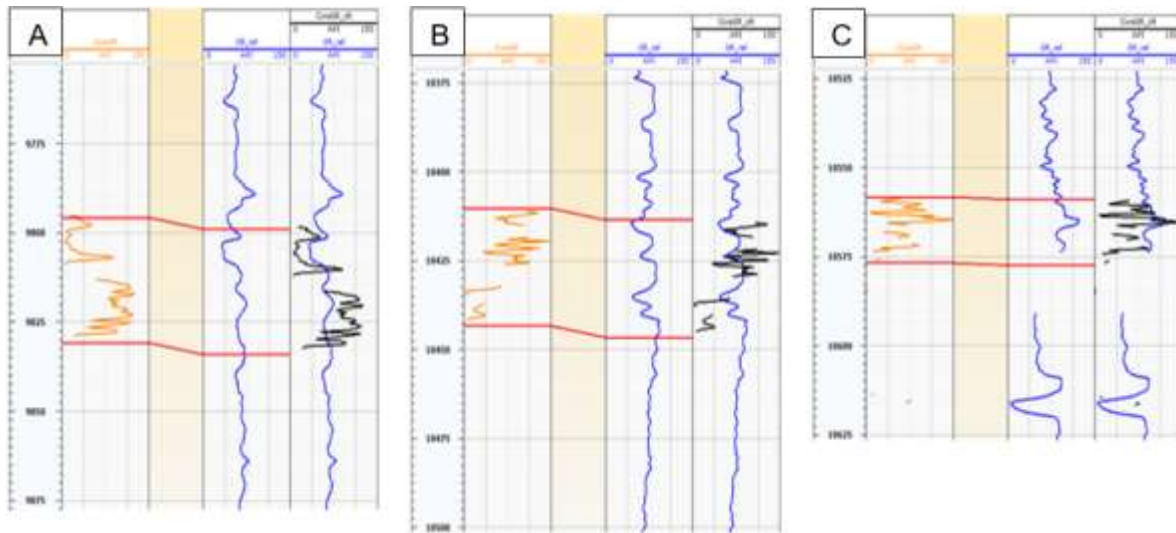


Figura 32. A) Corrección en profundidad a partir de las curvas CGR-GR para el Core-1 del pozo Hormiga-1X. B) Corrección en profundidad a partir de las curvas CGR-GR para el Core-2 del pozo Hormiga-1X. C) Corrección en profundidad a partir de las curvas CGR-GR para el Core-3 del pozo Hormiga-1X.

Se realizó el ajuste de la información de núcleos a profundidad de registros para el pozo Hormiga-1X por medio de las curvas CGR y GR teniendo como resultado final la corrección mostrada en la Tabla 7.

Tabla 7. Corrección en profundidad de los datos de núcleos pertenecientes al pozo Hormiga-1X.

CORE	TOPE	SHIFT
1	9795,655	3,277344
	9830,817	3,277344
2	10410,25	3,277344
	10443,28	3,277344
3	10558,24	0,6542969
	10576,71	0,6542969

8.2.5 Construcción de curvas sintéticas. Para el desarrollo de este módulo básicamente se tuvo en cuenta la continuidad de la curva, respuestas anómalas asociadas a la calidad del hueco, litología o factores ambientales. Uno de los principales era la construcción de registros resistivos en algunas calizas ya que la herramienta que tomaba la resistividad en la litología se salía de rango u otro posible caso se digitalizara mal la curva.

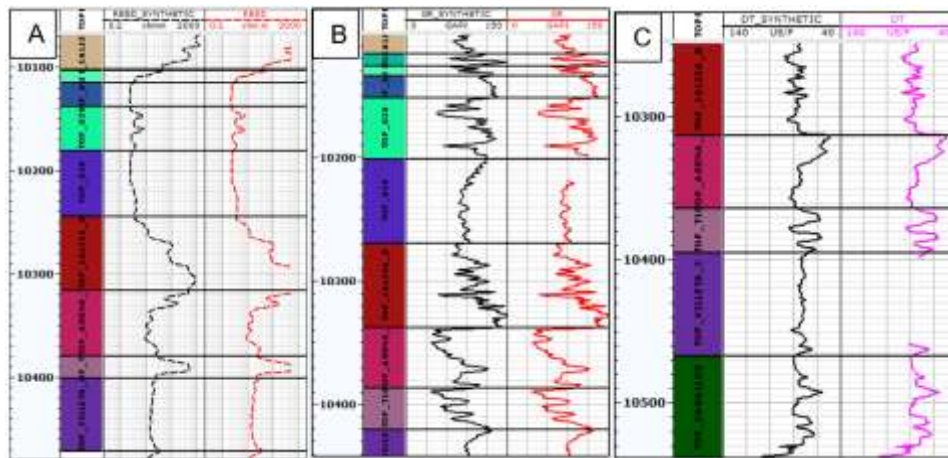


Figura 33. A) Construcción del registro sintético de resistividad donde se asume que dichos valores están asociados a las características de las litologías presentes (Pozo Acae-10). B) Construcción del Gamma Ray sintético a partir de pozos vecinos (Pozo Acae-4). C) Construcción del registro sintético del sónico en zonas donde no se dispone directamente de los datos (pozo Acae-5).

8.2.6 Redes Neuronales. El método empleado para la construcción de los registros fue a partir de redes neuronales (Ver Figura 34). La razón por la cual no emplearon otros métodos se debe a la incertidumbre asociada a los daños de hueco. Debido a que no son segmentos de registros que tengan un cubrimiento importante en el pozo brinda seguridad el grado de

confiabilidad de la información adquirida. Además, se tiene un control de los resultados con pozos vecinos que tiene un buen set de datos.

Los pozos que finalmente se trabajaron en reconstruir curvas incompletas y llevarlas a curvas sintéticas son: Acae-2, Acae-4, Acae-5, Acae-9, Acae-10, Hormiga-4, Loro-1, Loro-4, Loro-5A, Loro-7, Loro-8, San Miguel-4 y San Miguel-5.

Una vez completas las curvas y teniendo en cuenta el grado de incertidumbre a la cual se asocia la reproducción de registros a partir de redes neuronales, se procede a la construcción de los litotipos por pozo de esta manera se logra vincular la mayor cantidad de información.

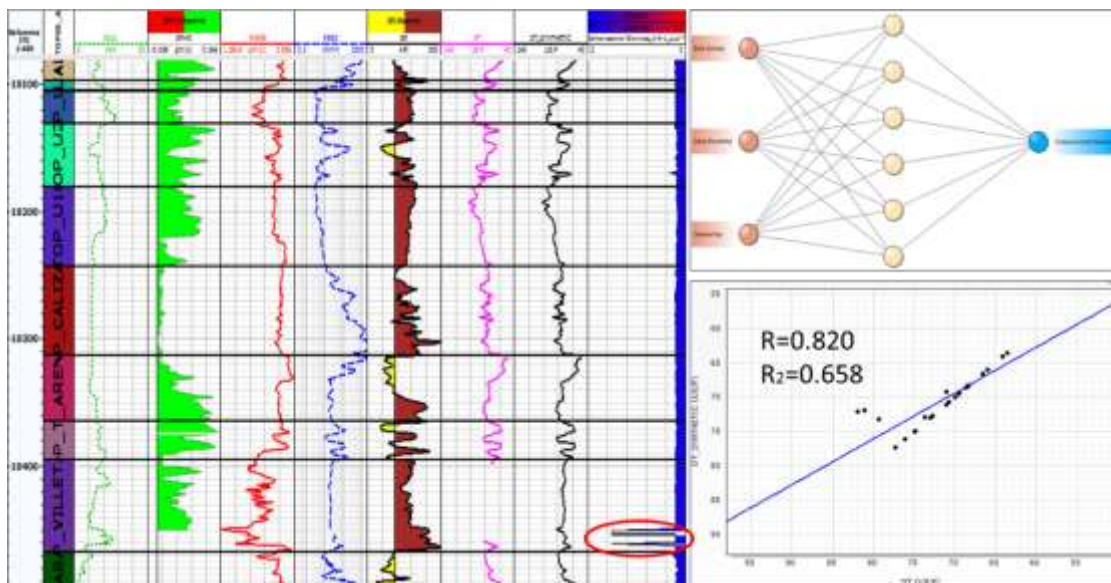


Figura 34. Reproducción de curvas sintéticas a partir de redes neuronales y el grado de incertidumbre asociado los datos de entrada (Densidad, resistividad y Gamma Ray).

8.3 Definición de Litotipos

La definición de litotipos se realizó a partir de la integración de información de registros de pozo con información derivada de núcleos de perforación, bajo la orientación y conocimiento de la geología regional de la cuenca. En el proceso de integración de la información, se implementaron rutinas de interpretación geológica de registros a partir de gráficos de litología y la definición de agrupaciones tipo clúster a partir de la combinación de diferentes curvas de registros como densidad, neutrón, rayos gamma espectral, resistividades y sónico guiadas por las litofacies y asociaciones litológicas interpretadas en los núcleos de perforación.

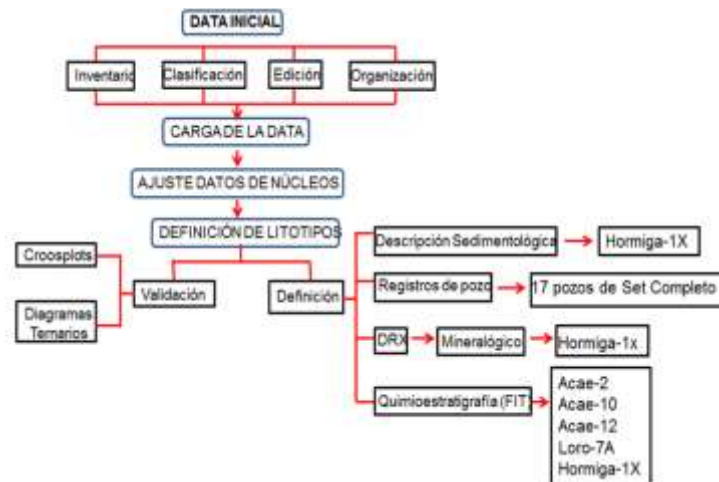


Figura 35. Flujo de trabajo para el desarrollo de la metodología en el modelamiento de litotipos.

Adaptado de: ICP (2016). Modificado por los autores.

8.4 Definición de Electrofacies

La definición de los principales grupos litológicos, fueron interpretados a partir de una metodología que consiste en identificar diferentes electrofacies a partir de cluster en múltiples gráficos de litología, entre los cuales sobresalen Densidad – Neutrón, Densidad – Potencial Fotoeléctrico, Densidad aparente de matriz – Factor U aparente de matriz y Gamma Ray – Resistividad somera. Cada uno de estos gráficos de litología, permite identificar uno o dos grupos litológicos de acuerdo a su respuesta característica de los registros de pozo, por ejemplo, los intervalos arcillosos son mejor definidos con la combinación de la curva de Rayos Gamma y Resistividad Somera.

Se identificaron por lo menos siete (7) asociaciones litológicas a partir de electrofacies distribuidos en las diferentes unidades de interés:

- Arcillas: Definidas principalmente por la relación de arcillosidad (altos valores de Gamma Ray) y Resistividad somera (bajos valores, RESS < 5 ohm.m).
- Areniscas Arcillosas: Definidas principalmente por cortes de arcillosidad sobre la curva VshGR en el cluster asociado a rocas silisiclásticas, valores altos de Neutrón y valores bajos de Densidad.
- Areniscas Tipo A: Se encuentran principalmente asociadas a las unidades T Inferior y U Inferior. Son definidas por cortes de arcillosidad sobre la curva VshGR en el cluster

asociado a rocas silisiclásticas, valores bajos de Densidad (entre 2.45 gm/cc y 2.55 gm/cc) y valores promedios de Neutrón (aproximadamente 17 UP).

- Areniscas Calcáreas: Este tipo de roca se caracteriza por un aumento de la densidad (valores entre 2.57 gm/cc y 2.67 gm/cc) y una disminución de la curva Neutrón (menor a 0.12 UP). Esta configuración de las curvas indica que las propiedades petrofísicas disminuyen, posiblemente por la concentración de cemento calcáreo (aumento de los valores de RHOB), mostrando una roca más apretada, lo que genera aumentos relativos en la resistividad de la formación.
- Calizas: Se identifican principalmente en los gráficos de litología RHOC – NPHI y RHOMa – DTMa (Ver Figura 37) en cluster asociados a valores relativamente altos de densidad, valores bajos de neutrón y altas resistividades. Con base en las lecturas de la herramienta de Rayos Gamma, se interpreta que las Calizas varían del tipo Mudstone (altas lecturas) identificadas como Calizas Tipo 2, a tipo Wackestone/ Packstone (bajas lecturas) principalmente identificadas como Calizas Tipo 1. La idea de dividir las calizas en dos subgrupos, parte de la importancia del volumen de lodo en la generación de fracturas y definición del sistema de yacimiento fracturado.

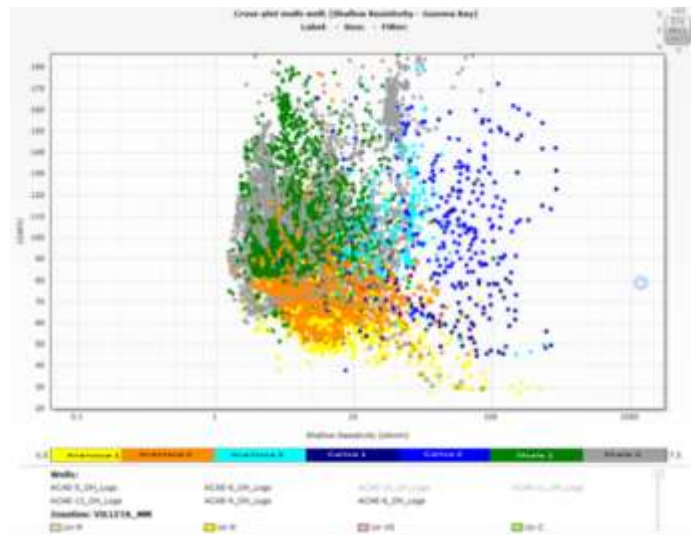


Figura 36. Gráfico de Litología Gamma Ray – ResS, pozos Acae. La combinación de las curvas de Rayos Gamma y Resistividad somera permitió la identificación rápida de arcillas y/o shale a partir de un cluster (color gris) con características de alta radioactividad y baja resistividad, como se aprecia en la figura.

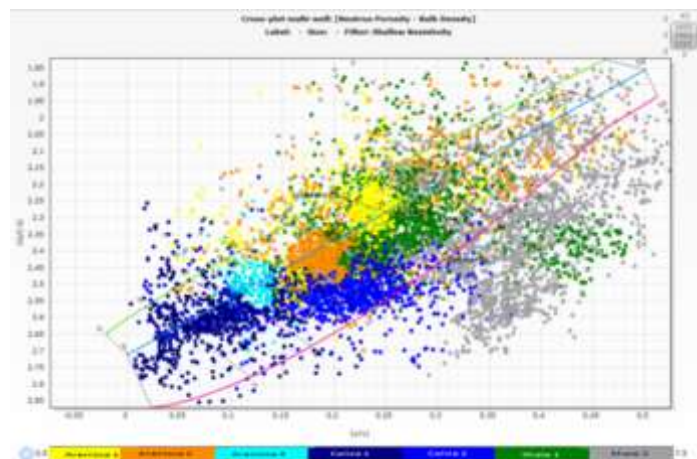


Figura 37. Gráfico de Litología Gamma RHOB-NPHI, Pozos Acaé. La combinación de las curvas de Densidad y Neutrón permitió la identificación rápida de dos tipos de calizas (tipo 1, en azul oscuro las calizas tipo Wackestone, valores bajos de Neutrón principalmente y tipo 2, en azul más claro las calizas tipo Mudstone, valores más altos de Neutrón).

8.5 Modelamiento Estratigrafico

Durante este estudio se recopiló y analizó la información sedimentológica y estratigráfica disponible a partir de núcleos de perforación, registros eléctricos y literatura científica. Con dicha información se analizó la distribución vertical y áreal de facies y la variación en la relación acomodación-sedimentación para así construir un marco estratigráfico sólido coherente con un marco geológico regional.

El modelamiento estratigráfico adoptó un flujo de trabajo que involucró la revisión de núcleos de perforación, carga de registros eléctricos estandarizados/ normalizados en la plataforma de interpretación. La definición de electrofacies se realizó a partir de la integración de información núcleo-registro y extrapolación de la información a los pozos carentes de núcleo. Esta metodología permitió la identificación de ciclos estratigráficos y la definición de superficies de correlación entre pozos.

8.5.1 Descripción de los núcleos de perforación. En esta fase se analizaron los núcleos de perforación, para la Formación Villeta, de los campos Acae, Loro, Hormiga y Orito de la cuenca de Putumayo, disponibles en la Litoteca Nacional Bernardo Taborda Arango. El objetivo principal del análisis fue la identificación de los diferentes litotipos presentes en profundidad para cada una de las unidades de la Formación Villeta, que disponen núcleos.

Adicionalmente, se revisó la información correspondiente a litofacies y asociaciones faciales. La interpretación de las facies en términos de ambientes sedimentarios fue comparada con las

Para la definición de las litofacies y los correspondientes litotipos se tuvieron en cuenta parámetros texturales principalmente, diferenciación de tamaño de grano y presencia de matriz o cemento en los intervalos. En el análisis de los núcleos de perforación para los campos en estudio, en la cuenca de Putumayo se reconocieron veintiocho (28) Litofacies, las cuales fueron reducidas a 7 litotipos (Ver Tabla 9).

Tabla 9. Nomenclatura de las litofacies identificadas a partir de núcleos de perforación descritos con su respectivo código de nomenclatura según Farrell K.M. et al. (2012).

LITOFACIES (NÚCLEOS DESCRITOS)				
FACIES	CODIGO	DESCRIPCIÓN	CALIDAD DE RESERVORIO	COLOR ID
1	Miam	Lutita gris negra, fracturas, silicificada	Pobre	
2	W	Wackestone	Pobre a nula	
3	Clam	Arcilloita negra disgregada	Nula	
4	Clam	Arcilloita calcárea, fósiles	Pobre	
5	Cm	Arcilloita masiva, fracturas	Nula	
6	M	Mudstone calcáreo con fósiles	Pobre	
7	Cm	Arcilloita masiva, fracturas	Pobre	
8	Miam	Lutita negra fisil	Nula	
9	W	Wackestone gris medio, fósiles	Pobre a nula	
10	M	Mudstone laminado, fósiles, fracturas	Nula	
11	W	Wackestone, fracturas abiertas, cemento calcáreo	Pobre	
12	S	Arenisca glauconítica	Pobre	
13	Siam	Arenisca glauconítica calcárea/silicea	Pobre a nula	
14	Sbiot	Arenisca glauconítica bioturbada, ripples	Pobre	
15	Sbiot	Arenisca bioturbada, ripples	Pobre	
16	W	Wackestone con fragmentos de arenisca glauconítica	Pobre a nula	
17	Sx	Arenisca con glauconita (<2%) y estratificación cruzada	Buena	
18	Sx	Arenisca con glauconita, matriz calcárea y estratificación cruzada	Buena	
19	P	Packstone	Pobre a nula	
20	Miam	Lutita negra calcárea	Pobre	
21	G	Grainstone	Pobre a nula	
22		Diorita	Nula	
23	Z	Arcilloita negra	Nula	
24	Z	Arcilloita-limolita gris verde, café	Pobre	
25	S	Arenisca con fracturas rellenas de calcita	Pobre	
26	S	Arenisca con cemento siliceo	Pobre	
27	sMrh	Lutitas intercaladas con areniscas glauconíticas	Nula	
28	Sbiot	Arenisca glauconítica bioturbada	Pobre	

Se describieron en total ocho (8) pozos de los campos Acae, Loro, Hormiga y Orito, para análisis sedimentológico y estratigráfico, correspondientes a 204.79 pies de núcleos de perforación.

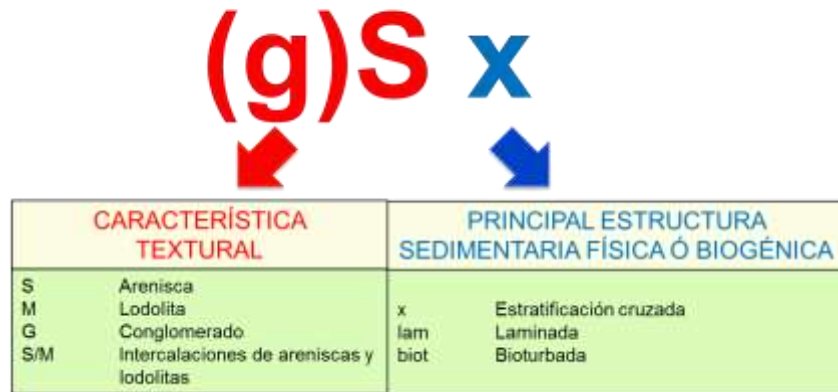


Figura 38. Se utiliza la nomenclatura propuesta por Farrell K.M., et al. (2012) que consiste en determinar una facies sedimentaria inicialmente por sus características texturales y luego se complementa con una estructura sedimentaria física o biogénica principal.

Adaptado de: Farrell et al. (2012).

Tabla 10. Pozos con Intervalos con núcleos, examinados en este estudio.

POZO	INTERVALO (Pies)	ESPESOR (Pies)
Hormiga 1X	9795-9838	43
	10410-10423	13
	10428-10437	9
	10570-10615,58	45,58
Hormiga 2A	10715-10733,8	18,8
Orito 4	5800-5813,91	13,91
Orito 5	4994-50002	8
Orito 105	5571-5580	9
	6595-6607,5	12,5
Acae 1	10324-10327	3
	10340-10343	3
Loro 9D	10300-10303	
	10311,58-10320,16	
Loro 12D	10652-10666,42	
TOTAL		204,79 Pies

- Análisis de facies: Adicionalmente a la definición de litofacies, se extractó información sedimentológica de los núcleos; tipo de contacto entre capas, variaciones en espesor, variación en el tamaño de grano, estructuras sedimentarias físicas y biológicas, grado de impregnación de hidrocarburos, entre otros, con el fin de lograr un mejor entendimiento de la distribución de facies, sus ambientes de depositación asociados y sus patrones en los registros eléctricos. Se usaron núcleos de diferentes campos con el fin de orientar el modelo sedimentológico y reducir la incertidumbre en la interpretación de la respuesta de los registros eléctricos. Estas litofacies fueron posteriormente reducidas a siete (7) litotipos.

A continuación, se detalla la descripción textural y la interpretación ambiental de las veintiocho (28) litofacies identificadas durante la descripción de los núcleos de perforación

(Ver Figuras 39 - 64).

Litofacies

1. Lutita negra

- Descripción: Lutita negra físil, fracturas paralelas abiertas de alto ángulo (77°) y menores a 1mm de abertura, contiene lodo $> 95\%$. Roca silicificada.
- Calidad de Reservorio: Pobre, la presencia de fracturas podría crear porosidad secundaria.
- Ambiente de depositación: Plataforma marina somera. La abundancia de materia orgánica indica condiciones de alta generación y preservación de materia orgánica, posiblemente de origen marino.



Figura 39. Facie 1, Lutita negra silicificada. Pozo Hormiga-1X, 9810 ft.

2. Wackestone

- Descripción: Wackestone masivo color gris verdoso de grano fino, de matriz micrítica, con Bivalvos de hasta 3 cm, matriz y cemento calcáreo con nódulos de Siderita.
- Calidad de Reservoirio: Pobre.
- Ambiente de depositación: Plataforma calcárea.



Figura 40. Facies Wackestone, pozo Hormiga-1X, 10437 ft.

3. Arcillolita negra disgregada

- Descripción: Lutita de color negro a gris, masiva, foliación poco desarrollada. No presenta bioturbación. Contiene lodo > 95%.
- Calidad de Reservorio: Nula.
- Ambiente de depositación: Plataforma somera con abundante producción de materia orgánica.



Figura 41. Facies Lodolita negra disgregada, Hormiga 1X, 9803 ft.

4. Arcillolita Calcárea

- Descripción: Arcillolitas Calcáreas de color negro a gris, no consolidada, abundantes restos de peces, bivalvos pequeños. No presenta bioturbación. Contiene lodo > 95%.
- Calidad de Reservoirio: Pobre. La disolución de microfósiles podría crear porosidad secundaria.
- Ambiente de depositación: Plataforma marina somera.



Figura 42. Arcillolita negra, Hormiga 1X, 10435 ft.

5. Arcillolita masiva

- Descripción: Arcillolita masiva de color negro a gris, no laminada, consolidada, fracturas de alto ángulo (75°). Contiene lodo $> 95\%$ (Ver Figura 43).
- Calidad de Reservorio: Nula.
- Ambiente de depositación: Plataforma somera.



Figura 43. Arcillolita masiva, Hormiga 1X, 9810 ft.

6. Mudstone Calcáreo

- Descripción: Mudstone Calcáreo color negro grisáceo (Ver Figura 44). Frecuentemente aparecen fósiles pequeños de bivalvos, con moldes de disolución, planos de fisilidad discontinuos, fracturas paralelas abiertas, nódulos con recristalización de Pirita.
- Calidad de Reservorio: Se considera pobre, debido a la presencia de arcillas mayor a 20%.
- Ambiente de depositación: Plataforma somera con alta producción de materia orgánica, ambiente poco oxigenado.



Figura 44. Facies Mudstone Calcáreo, pozo Hormiga 1X, 9830 ft.

7. Arcillolita Masiva

- Descripción: Arcillolita negra masiva, abundante materia orgánica depositada en ambiente anóxico. Contiene lodo > 95%.
- Calidad de Reservoirio: Pobre, las fracturas sub-horizontales podrían crear porosidad secundaria.
- Ambiente de depositación: Plataforma marina somera. La abundancia de materia orgánica indica condiciones de alta generación y preservación de materia orgánica, posiblemente de origen marino.



Figura 45. Facies Arcillolita masiva pozo Hormiga 1X, 9837 ft.

8. Lutita Negra Físil

- Descripción: Lutita negra físil, abundante materia orgánica depositada en ambiente anóxico. Contiene lodo > 95%.
- Calidad de Reservorio: Nula.
- Ambiente de depositación: Plataforma marina somera. La abundancia de materia orgánica indica condiciones de alta generación y preservación de materia orgánica, posiblemente de origen marino.



Figura 46. Fácies Lutita negra fósil. Hormiga 1X, 10433 ft.

9. Wackestone

- Descripción: Wackestone calcáreo fosilífero color verde-grisáceo, soportado por matriz lodosa >10%, granos esqueléticos y no esqueléticos, glauconita.
- Calidad de Reservorio: Pobre-Nula.
- Ambiente de depositación: Plataforma carbonatada, zona subtidal.



Figura 47. Facies Wackestone, Wackestone calcáreo, Orito 105, 6600 ft, y Hormiga 1X, 10412 ft.

10. Mudstone Laminado, fósiles, fractura

- Descripción: Mudstone calcáreo laminado, color negro grisáceo. Frecuentemente aparecen fósiles pequeños de bivalvos.
- Calidad de Reservorio: Debido a la presencia de lodo y arcillas mayor a 20%, se considera nula.
- Ambiente de depositación: Plataforma calcárea somera de baja energía. Posiblemente una rampa, con alta producción de materia orgánica, ambiente poco oxigenado.



Figura 48. Facies Mudstone Calcáreo laminado, pozo Hormiga-1X, 10585 ft.

11. Wackestone fracturado, con grietas de disolución

- Descripción: Wackestone calcáreo soportado por matriz lodosa granos esqueléticos y no esqueléticos >10%, Glauconita, fracturas paralelas de alto ángulo.
- Calidad de Reservorio: Pobre.
- Ambiente de depositación: Plataforma carbonatada, zona subtidal.



Figura 49. Facies Wackestone fracturado y con grietas de disolución, Orito-105, 6596 ft, y Orito-5, 5000 ft.

12. Arenisca Glauconítica

- Descripción: Arenisca sin estructura, con glauconita, puede presentar láminas de materia orgánica. El contenido de cuarzo varía entre 47 a 70%, glauconita de 5 – 20%, matriz arcillosa 5%, cemento 15 - 20%, puede aparecer con matriz y nódulos de Siderita y fosfatos (Ver Figura 50).
- Calidad de Reservoirio: Pobre.
- Ambiente de depositación: Upper Shoreface.



Figura 50. Facies Arenisca glauconítica: Arenisca de grano fino a medio con Glauconita sin estructura. Loro-12D, 10660 ft.

13. Arenisca glauconítica, cemento calcáreo

- Descripción: Arenisca de grano fino a medio sin estructura, con glauconita, puede presentar láminas de materia orgánica. El contenido de Cuarzo varía entre 47 a 70%, glauconita de 5 – 20%, matriz arcillosa 5%, cemento 15 - 20%, puede aparecer con matriz y nódulos de Siderita y fosfatos.
- Calidad de Reservoirio: Pobre a nula.
- Ambiente de depositación: Upper Shoreface.



Figura 51. Facies Arenisca con Glauconita y cemento calcáreo. Loro-12D, 10659ft.

14. Arenisca glauconítica, bioturbada, ripples

- Descripción: Arenisca de grano fino, sin estructura, con glauconita, puede presentar láminas de materia orgánica. El contenido de cuarzo varía entre 47 a 70%, glauconita de 5 – 20%, matriz arcillosa 5%, cemento 15 - 20%, puede aparecer con matriz y nódulos de Siderita y fosfatos.
- Calidad de Reservorio: Pobre.
- Ambiente de depositación: Upper Shoreface.



Figura 52. Facies Arenisca glauconítica bioturbada: Hormiga-1X, 10611 ft.

15. Arenisca, bioturbada, ripples

- Descripción: Arenisca de grano fino, con ripples, puede presentar láminas discontinuas de lodo. El contenido de cuarzo varía entre 47 a 70%, matriz arcillosa 5%, cemento 15 - 20%.
- Calidad de Reservorio: Pobre.
- Ambiente de depositación: Plataforma calcárea, zona subtidal.



Figura 53. Facies Arenisca glauconítica bioturbada: Hormiga-1X, 10611 ft.

16. Wackestone con fragmentos de Arenisca Glauconítica

- Descripción: Wackestone calcáreo soportado por matriz lodosa >10%, granos esqueléticos y no esqueléticos incluyendo fragmentos de Arenisca Glauconita.
- Calidad de Reservorio: Pobre a nula.
- Ambiente de depositación: Plataforma calcárea, zona subtidal.

17. Arenisca con glauconita, estratificación cruzada.

- Descripción: Arenisca fina a media, color blanco, soportado por granos, glauconita, bioturbación tipo ophiomorpha, láminas discontinuas de óxidos de Hierro.
- Calidad de Reservorio: Buena.
- Ambiente de depositación: Shoreface superior



Figura 54. Facies arenisca fina a media con estratificación cruzada. Acae-1, 10324 ft.

18. Arenisca Glauconítica calcárea con estratificación cruzada

- Descripción: Arenisca fina con estratificación cruzada planar 90% de Cuarzo, trazas de feldespato, laminas discontinuas de óxidos de Hierro, trazas de Muscovita, Glauconita, matriz arcillosa 5%, trazas de cemento calcáreo.
- Calidad de Reservoirio: Buena.
- Ambiente de depositación: Shoreface superior.



Figura 55. Facies Arenisca fina a media, con estratificación cruzada. Acae-1, 10325 ft.

19. Packstone bioclástico

- Descripción: Packstone calcáreo fosilífero, soportado por granos esqueléticos y no esqueléticos, matriz < 10%, trazas de óxido de Hierro y glauconita.
- Calidad de Reservorio: Pobre a nula.
- Ambiente de depositación: Plataforma carbonatada, zona subtidal.



Figura 56. Packstone bioclástico color gris, Orito-5, 4997ft.

20. Lutita negra calcárea, fracturas horizontales

- Descripción: Lutita negra con microfósiles calcáreo, fracturas discontinuas abiertas subhorizontales, frágil, poco densa (Ver Figura 57).
- Calidad de Reservorio: Se considera pobre, debido a la presencia de lodo y arcillas mayor a 20%.
- Ambiente de depositación: Plataforma somera de baja energía, con alta producción de materia orgánica, ambiente poco oxigenado.



Figura 57. Lutita negra calcárea.

21. Grainstone con glauconita

- Descripción: Grainstone constituidos por granos carbonaticos y glauconita. Los granos están en contacto unos con otros y constituyen entre el 80 y 90% del total de la roca.
- Calidad de Reservorio: Pobre a nula.
- Ambiente de depositación: Plataforma carbonatada, zona subtidal.



Figura 58. Grainstone. Loro-12D 1, 10657 ft.

22. Diorita

- Descripción: Roca volcánica cristalina (intrusión de alto nivel) de composición andesítica con cristales de Piroxeno, Plagioclasa, Hornblendas. De acuerdo a Vasquez (2007), diques de composición basáltica en el Campo Orito tienen una edad de 6.1 Ma. y corresponden a un volcanismo de arco, asociado a subducción, que en tiempo coincide con la edad de generación de hidrocarburo en la cuenca de Putumayo (Figura 56).
- Calidad de Reservorio: Nula.
- Ambiente de depositación: Volcanismo intraplaca subaéreo.

23. Arcillolita-Limolita negra masiva

- Descripción: Roca masiva de color negro, tamaño de grano entre limo y arcilla, abundante materia orgánica, posiblemente depositada en un ambiente de baja energía.
- Calidad de Reservorio: Nula.
- Ambiente de depositación: Plataforma marina somera.



Figura 59. Arcillolita-Limolita masiva, pozo Orito-105, 5576 pies ft.

24. Arcillolita-Limolita masiva

- Descripción: Arcillolita a Limolita color gris-café, abundantes óxidos de hierro, matriz arcillosa, fractura de alto ángulo, 20 cm de largo, abiertas (Ver Figura 60).
- Calidad de Reservorio: Nula.
- Ambiente de depositación: Upper shoreface.



Figura 60. Arcillolita-Limolita masiva, pozo Orito-105, 5577ft.

25. Arenisca con fracturas rellenas con calcita.

- Descripción: Arenisca de cuarzo (>80%), grano medio, presenta fracturas cerradas de 2 -3 cm, subhorizontales, rellenas de calcita (Ver Figura 61).
- Calidad de Reservorio: Pobre.
- Ambiente de depositación: Shoreface Superior.



Figura 61. Arenisca con fracturas rellenas de calcita, 6558ft.

26. Arenisca fina con óxidos, glauconita, bioturbada

- Descripción: Arenisca sin estructura, bioturbación tipo teichichnus, con glauconita. El contenido de Cuarzo varía entre 47 a 70%, glauconita < 5 %, matriz arcillosa 5%, cemento 15 - 20%.
- Calidad de Reservorio: Pobre, muy baja porosidad.
- Ambiente de depositación: La presencia de bioturbación tipo teichichnus y glauconita sugiere un ambiente de Shoreface inferior.



Figura 62. Arenisca de grano fino a medio con Glauconita sin estructura, pozo Loro 12D, 10660 ft.

27. Lutita con intercalaciones milimétricas de Arenisca fina

- Descripción: Lutita negra fósil, intercalaciones milimétricas de arenisca fina a limo, bioturbación moderada a baja, laminación lenticular. Abundante materia orgánica depositada en ambiente anóxico. Contiene lodo > 95% (Ver Figura 63).
- Calidad de Reservorio: Nula.
- Ambiente de Reservorio: Plataforma marina somera a zona de transición. La abundancia de materia orgánica indica condiciones de alta generación y preservación de materia orgánica, posiblemente de origen marino.



Figura 63. Lutita negra con intercalaciones milimétricas de Arenisca fina a limo, pozo Orito-105, 6606 ft.

28. Arenisca glauconítica bioturbada

- Descripción: Arenisca de grano medio con matriz y cemento arcilloso Glauconita ~4%. Sorteado moderado a pobre, bioturbación tipo ophiomorpha. Laminas discontinuas de lodo y/o hidrocarburo residual.
- Calidad de Reservorio: Pobre.
- Ambiente de Reservorio: Shoreface Superior, sobre la línea de buen tiempo hasta la línea de marea baja.



Figura 64. Arenisca fina a media, con estratificación cruzada. Acae-1, 10343 ft.

8.6 Modelo Sedimentológico

Para establecer el modelo sedimentológico del área de estudio en la cuenca de Putumayo se trató de definir un modelo de ambiente de depositación en el cual los subambientes propuestos sean consistentes con los datos tanto de núcleos de perforación, registros eléctricos y a correlaciones dentro de la cuenca.

Este análisis permite proponer para las Unidades T y Unidades U de la Formación Villeta, un ambiente de depositación de un sistema transgresivo. Sin embargo, hacia el tope de la Arenisca U, el ambiente de depositación con influencia mareal cambia a un ambiente de depositación de plataforma somera.

8.6.1 Gamma Ray en la definición de ambientes de depositación. El registro Gamma Ray muestra los cambios en el contenido de arcilla en la formación. Estos cambios en el contenido de arcilla están relacionados con variaciones en el tamaño de grano y sorteo de la roca, los cuales, a su vez, están controlados por el ambiente deposicional. Por tanto, basándose en la respuesta que presenta el Gamma Ray y correlacionado con datos de núcleos y otros registros, se pueden definir diferentes tipos de depósitos (Ver Figura 65).

El registro gamma ray también es usado para estudios de secuencia estratigráfica porque definen patrones de depositación como son: agradación, progradación y retrogradación (Ver Figura 66).

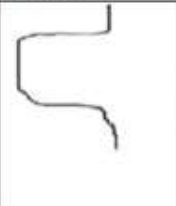
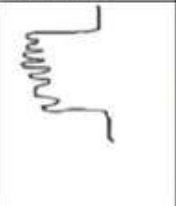
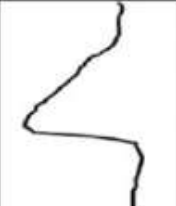


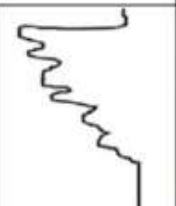
Forma	Suave	Ambiente	Aserrada	Ambiente
Cilindro Depositación uniforme		Dunas eólicas, Arenas mareales, Canales fluviales		Distributarios deltáicos, Canales turbidíticos, Abanicos de agua profunda proximales
Campana Secuencia granodecreciente		Arenas mareales, Canales fluviales, Arenas aluviales, barras de punto		Arenas lagunales, Distributarios deltáicos, Canales turbidíticos, Abanicos de agua profunda proximales
Embudo Secuencia granocreciente		Barras de barrera Playa Crevasse splay		Barras de boca de entrada de distributarios, Dedos de delta marinos, Canales turbidíticos, Abanicos de agua profunda distales

Figura 65. Respuesta del Gamma ray y posibles ambientes de depositación asociados.

Adaptado de: Emery et al. (1996).

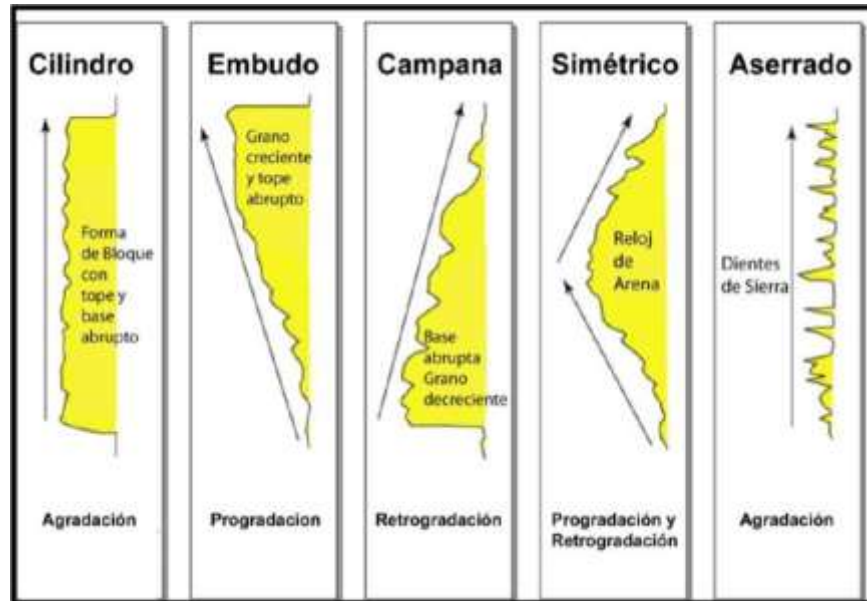


Figura 66. Electroformas básicas que patrones de depositación: agradación, retrogradación y progradación.

Adaptado de: Emery et al. (1996).

8.6.2 Estuarios dominados por mareas. A partir del análisis de núcleos de perforación de la cuenca, se han definido facies de una bahía dominada por mareas para las zonas proximales de los miembros T Inferior, U Inferior y posiblemente la Arenisca N. Esta bahía tiene una estratigrafía muy similar a la de estuarios dominados por mareas, sin embargo, no existe la presencia de valles incisos.

Un estuario dominado por mareas es una zona donde un río se junta con el mar y en donde predominan la acción de las mareas sobre los efectos de la descarga continental (Ver Figura 67). Dentro de este tipo de ambientes, los sedimentos progradan formando acumulaciones de arenas separadas localmente por sectores con mayor presencia de sedimentos lodosos.

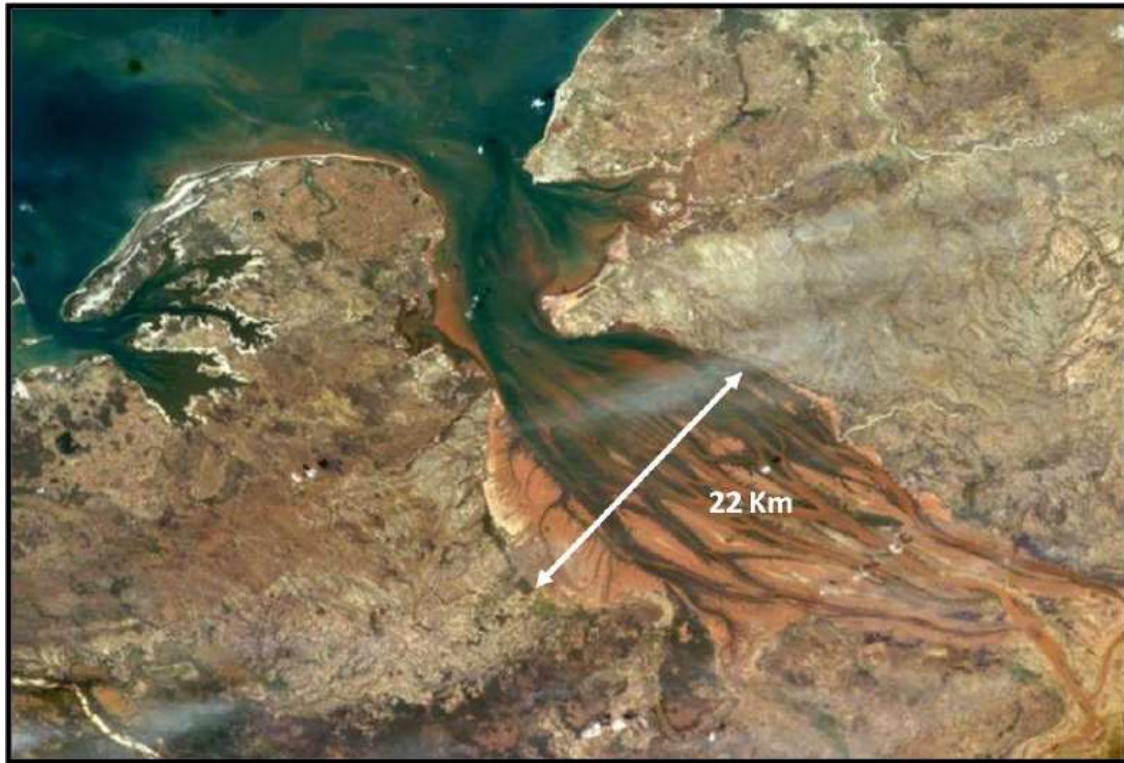


Figura 67. Estuario Betsiboka, Madagascar, Análogo actual de la Arenisca T Inferior y Arenisca U Inferior.

Adaptado de: NASA (2004).

Boyd et al., (2006) diferencia tres zonas principales en ambientes de estuarios: planicie lodosa, barras/canales mareales y planicies arenosas (Ver Figura 68). Las planicies lodosas (mud flat) corresponden a lodolitas bioturbadas, con laminación flaser. Las planicies arenosas (sand flat) con arenas finas con cantidades variables de arcilla, que presentan estructuras típicas de influencia mareal, tales como laminación flaser, crinkle y lenticular, pueden presentar bioturbación. Mientras que para barras y canales mareales (tidal sand bar and channels) se observan arenas de grano medio a fino con dobles capas de lodo y estratificación cruzada.

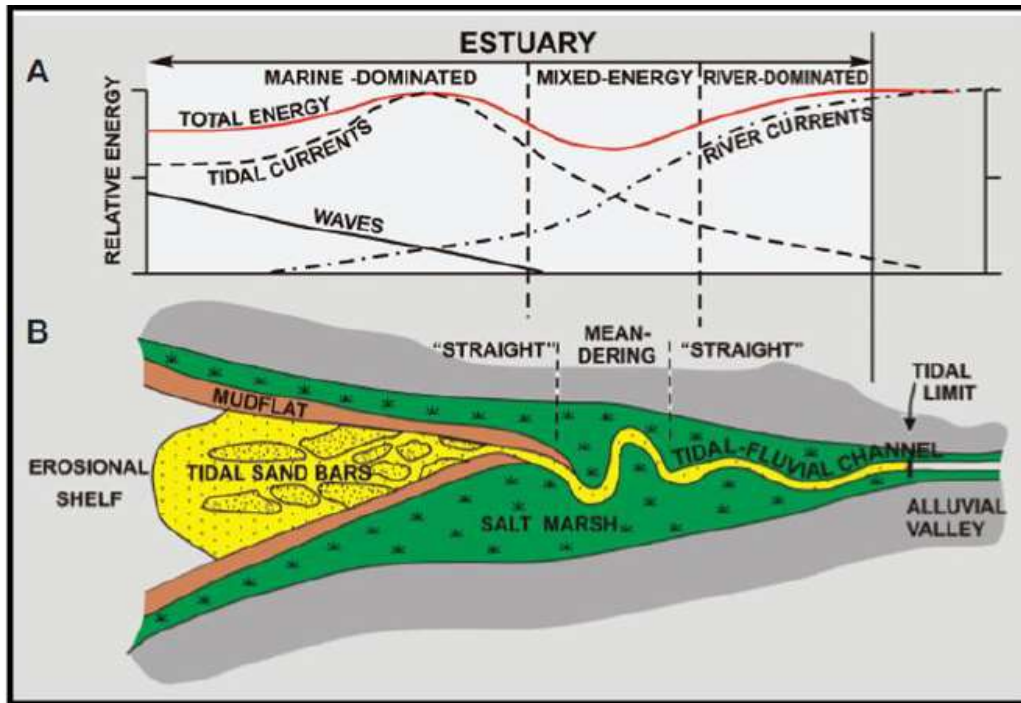


Figura 68. Modelo conceptual de una bahía estuarina.

Adaptado de: Boyd et al. (2006).

En un ambiente estuarino influenciado por mareas, las facies reservorios están restringidas a los canales y barras mareales y las facies no reservorio o con poca calidad de reservorio corresponden a depósitos de planicie mareal lodosa (Ver Figura 69).

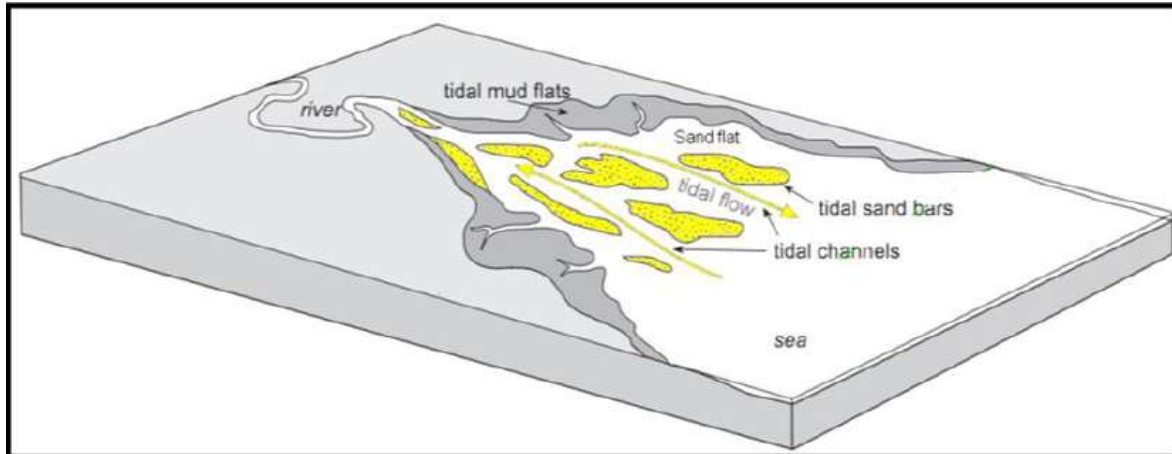


Figura 69. Reservorios (color amarillo) en una bahía estuarina.

Adaptado de: Nichols, 2009. Modificado por los autores.

8.6.2.1 *Barras mareales*. En sistemas no confinados las barras tienden a formarse en hileras múltiples, elongadas de forma paralela a las corrientes de marea.

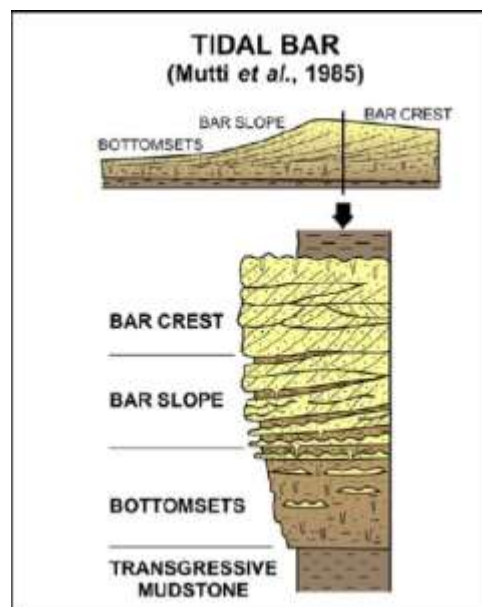


Figura 70. Estructura interna de una barra.

Adaptado de: Mutti et al. (1985).

8.6.3 Plataforma clástica somera. En los núcleos analizados en la cuenca Putumayo para la Formación Villeta, los ambientes identificados corresponden a una plataforma clástica somera, que varía a una plataforma calcárea. El cambio a plataforma calcárea ocurre cuando el aporte de sedimentos se detiene, posiblemente a la inundación de las zonas fuente, combinando con cambios climáticos, que controlan la formación de carbonatos.

La plataforma clástica somera puede ser dividida en cuatro zonas: Foreshore, Shoreface, Transición y Plataforma.

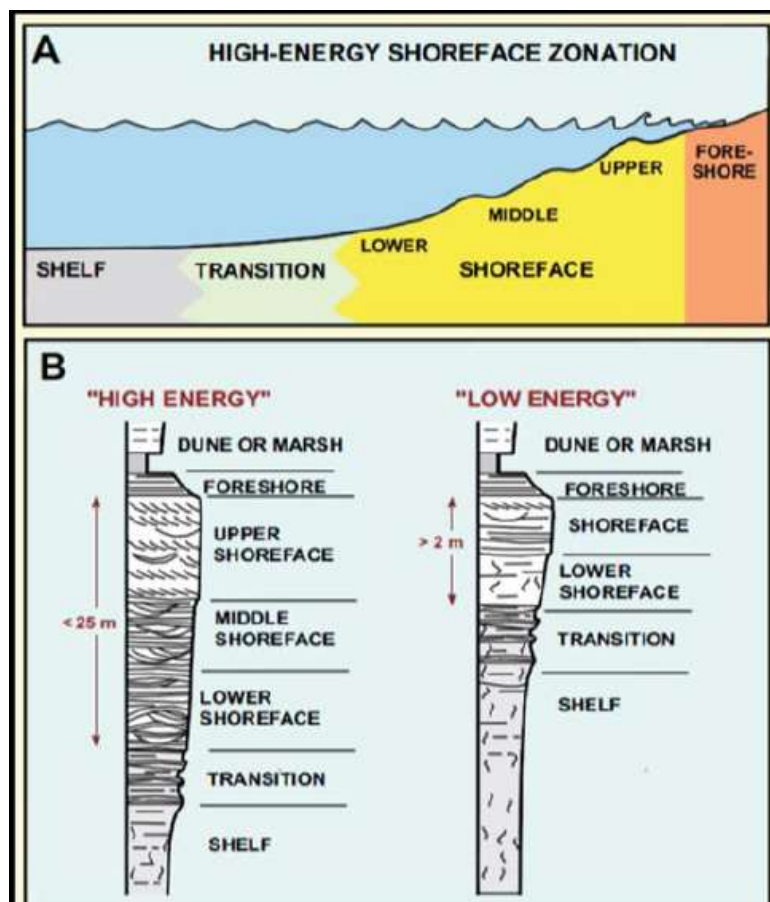


Figura 71. Modelo conceptual de una plataforma somera.

Adaptado de: Clifton (2006).

La zona de foreshore corresponde a arenas, finas láminas que se depositan entre el nivel de marea alta y el nivel de marea baja.

La zona de Shoreface son depósitos arenosos de grano fino a grueso grano crecientes, con estratificación cruzada hacia el tope y puede presentar estructuras de tormenta a la base (swaley cross stratification y hummocky cross stratification) y bioturbación. El límite superior del Shoreface es el nivel de marea baja y el límite superior corresponde al nivel de olas de buen tiempo.

La Zona de Transición es una intercalación de arenas finas y lutitas, puede presentar bioturbación. Esta zona se encuentra entre el nivel de olas de buen tiempo y el nivel de olas de tormenta. La Plataforma comprende una serie de lutitas que pueden presentar bajo grado de bioturbación al tope y laminación paralela. Se considera depósitos de plataforma a todos aquellos sedimentos depositados bajo el nivel de olas de tormenta.

En ambientes de plataforma somera, las facies reservorio se encuentran en el Shoreface y las facies con menor calidad de reservorio por la presencia de arcillas son las correspondientes a la parte más profunda del Shoreface y a la zona transicional entre el Shoreface y la Plataforma. Otro factor que puede afectar la calidad del reservorio es la cantidad de glauconita, pero la formación de este mineral no depende de la profundidad del nivel del mar y por tanto puede presentarse en cualquiera de las cuatro zonas de la plataforma clásica somera.

En la Figura 72 se presenta un perfil costero a plataforma con la ubicación de las principales litofacies reconocidas en los pozos analizados en la cuenca de Putumayo. Las facies de mayor

energía se ubican en la zona de Shoreface, mientras que las facies de menor energía y con mayor contenido de lodos se ubican en las zonas más profundas de plataforma.

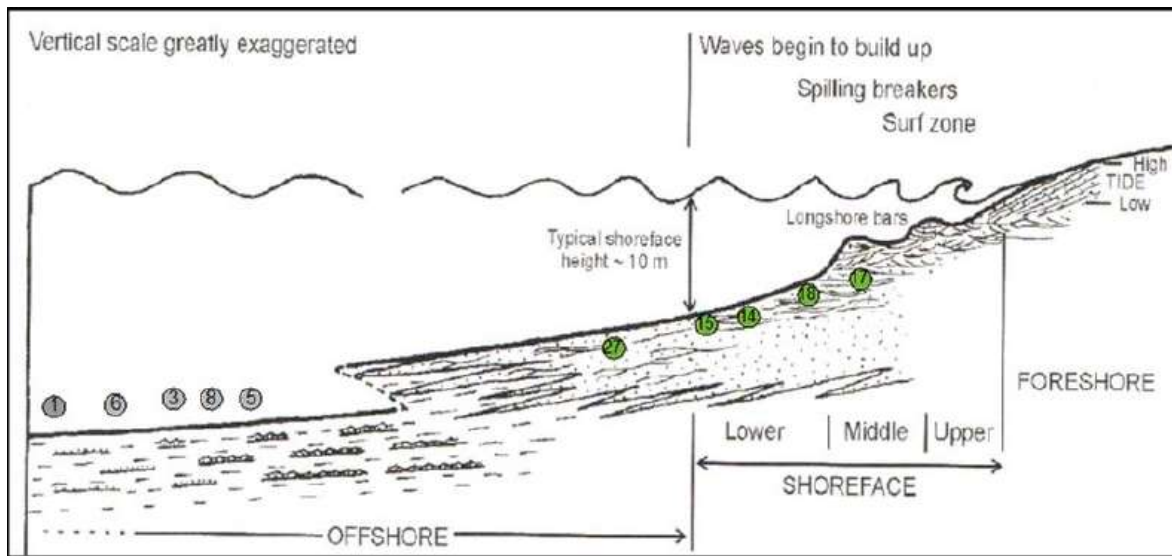


Figura 72. Modelo conceptual de un perfil costero y plataforma somera mostrando la ubicación de las principales litofacies reconocidas en este estudio.

Adaptado de: Emery et al. (1996).

8.7 Identificación de Litotipos a Partir de Drx (Quimioestratigrafía)

La definición de tipos de roca se realizó a partir de la integración de información de registros de pozo con información derivada de núcleos de perforación. Para la identificación y agrupación de litotipos se evaluaron las repuestas de los registros de pozo, los cuales responden a los cambios en las propiedades de la roca y amarrados con la data correspondiente a la información proveniente de los núcleos de perforación como datos de laboratorio y descripción sedimentológica.

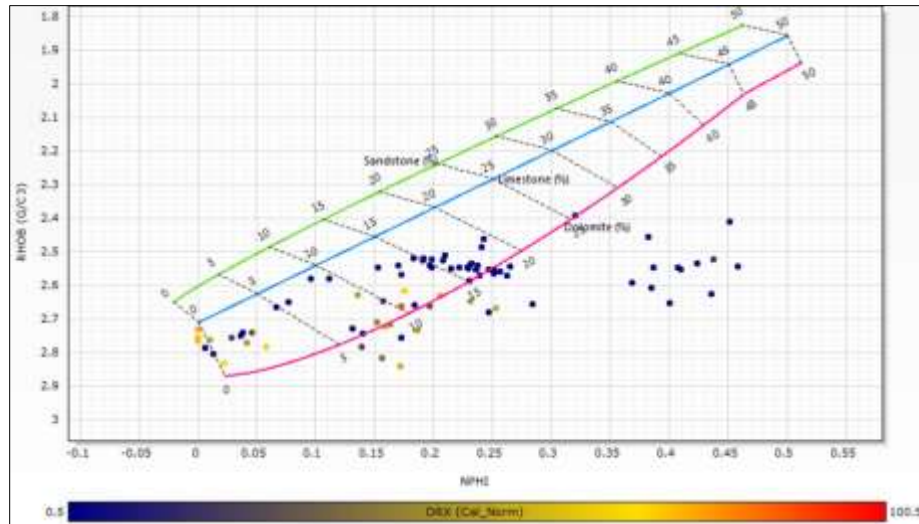


Figura 73. Crossplot densidad vs neutrón, para identificar la composición mineralógica de carbonatos a partir de datos DRX (pozo Hormiga-1X) donde los valores azules me indican un bajo contenido de carbonatos.

Un método preliminar es emplear el análisis cluster donde se vincula la respuesta de los registros con los datos del DRX (a profundidad de registro). Con el fin de identificar zonas con determinado predominio composicional, el cual permite desarrollar algunas distribuciones litológicas. Respecto a las rocas asociadas a contenidos mineralógicos altos en carbonato se encuentran asociados a los rangos de neutrón bajo e intermedio no mayor al 15%. (Ver Figura 74).

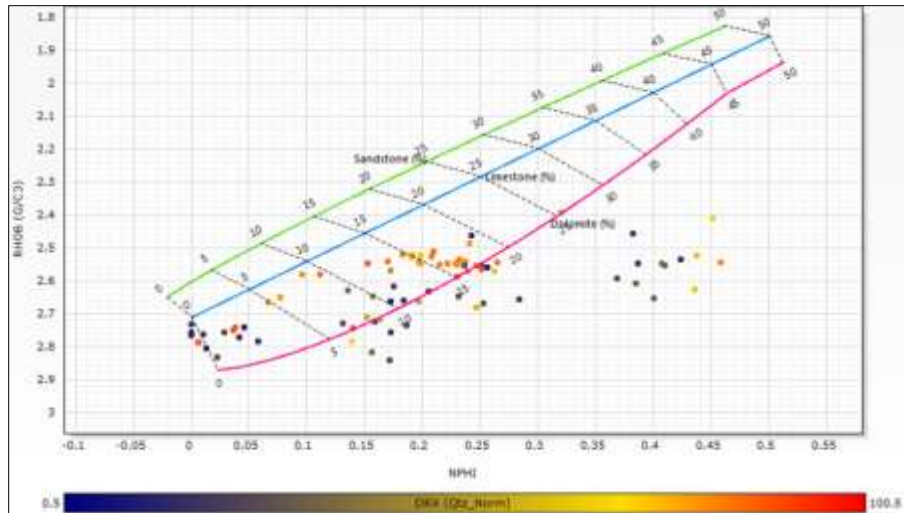


Figura 74. Crossplot densidad vs neutrón, para identificar la composición mineralógica de Silice a partir de datos de DRX (pozo Hormiga-1X).

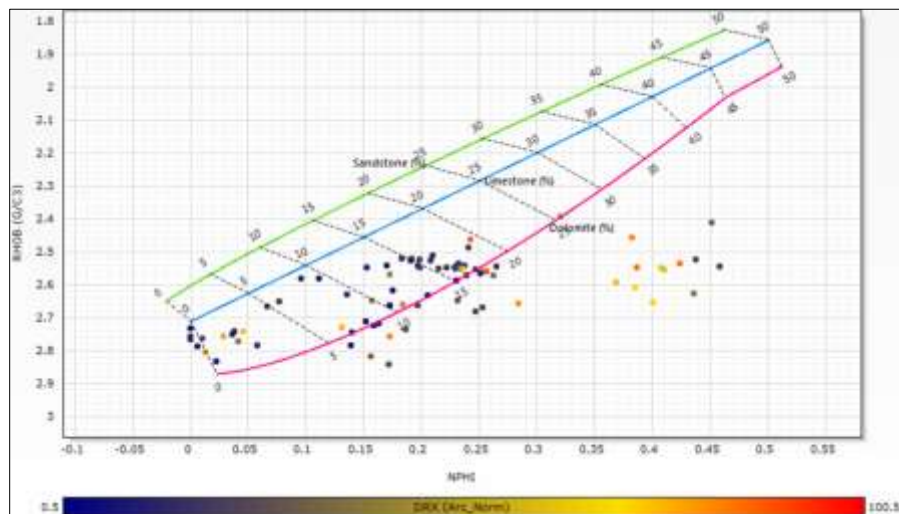


Figura 75. Crossplot Densidad vs Neutron, para identificar la composición mineralógica de arcillas a partir de datos de DRX. Para el Pozo Hormiga-1X.

Respecto al contenido de sílice se encuentra asociado a rocas con rangos de porosidad media, medidos por el registro neutrón (1% - 2%) aproximadamente. A pesar que la densidad no

funciona como buena discriminante el neutrón permite desarrollar algunas aproximaciones (Ver Figura 75).

Finalmente, la respuesta hacia las litologías con mayor tendencia composicional a las arcillas. Los valores de porosidad indicados por el registro neutrón son los más altos (3% - 5%), si se compara con las demás litologías que presentan contenidos menores de minerales arcillosos.

8.8 Identificación de Litotipos a Partir de Xrf (Quimioestratigrafía)

Dentro de los elementos identificados en los análisis de XRF se prestó mayor importancia a Al, Fe, K, Rb, Ti, Ca, Si y Zr. Esto debido a las implicaciones que tienen relacionados a los diferentes tipos de litologías o litotipos encontrados y su posible ambiente de depositación según las variaciones en sus rangos. En la Figura 76 se muestra el compilado de los datos para los elementos anteriormente nombrados en los pozos Acae-2, Acae-10, Acae-12, Hormiga-1X y Loro-7A. ubicados y relacionados en profundidad entre sí. De esta manera se facilita comprender la variabilidad en los valores de XRF para cada elemento y agrupar los picos y variaciones representativas, también es de fácil lectura la densidad de puntos y la resolución con la que fueron tomados los datos en cada uno de los pozos.

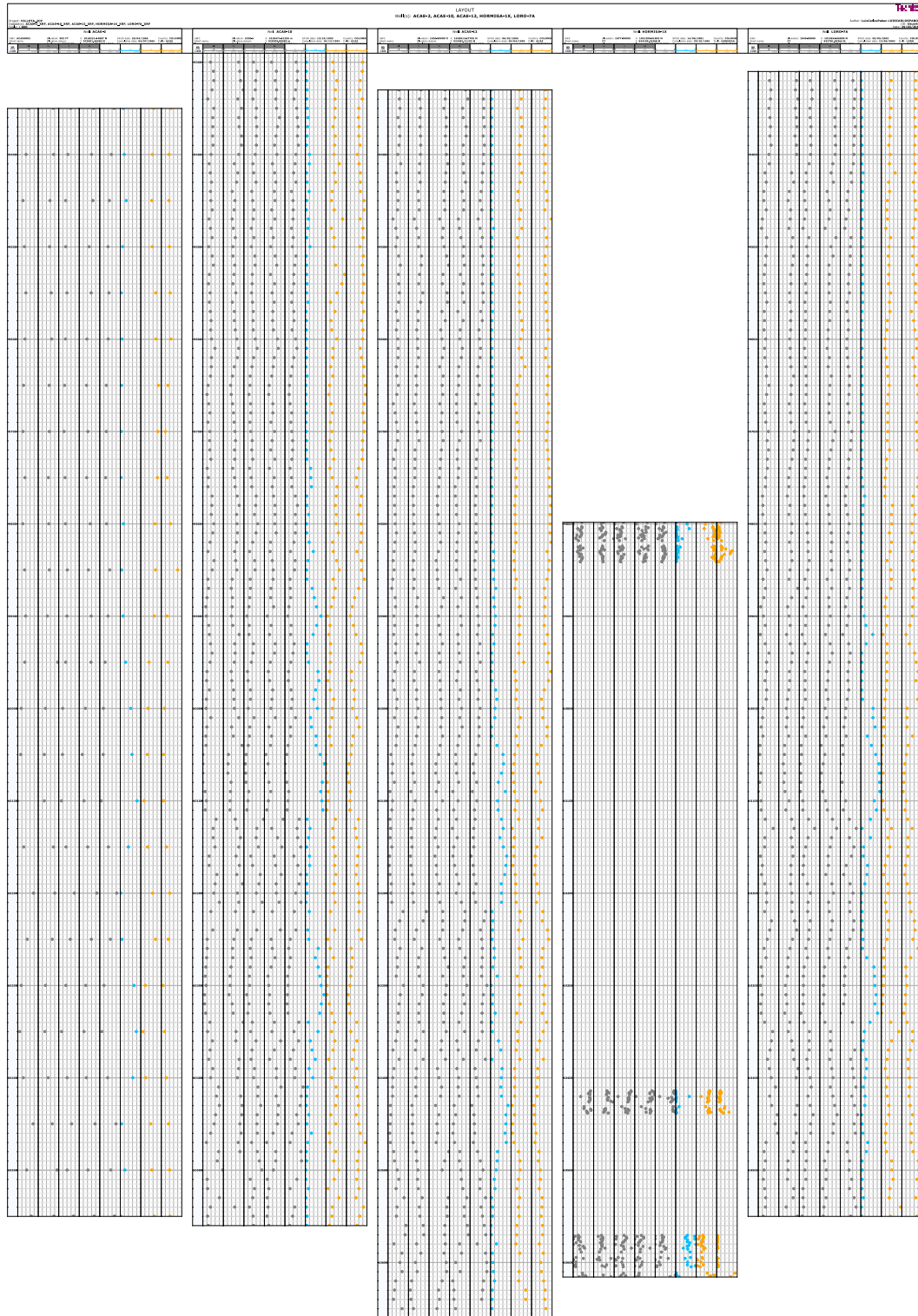


Figura 76. Se observan los datos XRF de los pozos Acae-2, Acae-10, Acae-12, Hormiga-1X y Loro-7A.

8.8.1 Ecuaciones para la identificación de litotipos. Las siguientes ecuaciones fueron realizadas con el apoyo de ICP (2016). Para la identificación de litotipos a partir del resultado de los análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) es necesario generar algunas ecuaciones y procedimientos matemáticos con el fin de procesar, interpretar, normalizar y ajustar los resultados arrojados por XRF a la litología de la Formación Villeta de una manera proporcional y coherente.

Tomando como base para las arcillas, sílice y carbonatos al Al, Si y Ca respectivamente, se seleccionan los elementos con tendencias similares a estos para agruparlos como variable en la obtención del Bulk o compilaciones elementales que generan los litotipos para la formación. A continuación, se describen dos sencillos pasos para la generación de litotipos a partir de XRF:

- Se desarrolla una ecuación con los elementos seleccionados.
- Se da un peso a cada elemento involucrado dentro de la ecuación acorde a la similitud que se tenga en la tendencia, abundancia del elemento en la roca y composición química.

8.8.1.1 Ecuación para las Arcillas. Para los pozos involucrados se definió la siguiente ecuación para determinar el contenido de minerales arcillosos.

- $Arcillas_XRF = (Al_norm * 0.7) + (Fe_norm * 0.1) + (Ti_norm * 0.1) + (Na_norm * 0.1)$

El Aluminio y Silicio, se involucran en la composición química de la mayoría de arcillas, por otro lado, el Potasio se ve involucrado en la composición química de la Illita (Scopelliti et al.,

2006). El Magnesio y Hierro, se involucran en la composición química de la Clorita. Por último, el Rubidio y Titanio se incluyen en la ecuación porque presentan gran similitud en la tendencia.

8.8.1.2 Ecuación para la Sílice. Para obtener la ecuación que refleje el contenido de minerales silíceos sencillamente se toma al Sílice como elemento principal, asociándolo a al Circón por la tendencia que éstos dos elementos tuvieron el resultado de XRF.

- Cuarzo (SiO₂)_{XRF}=(Si_norm*0.9) +(Sr_norm*0.1)

8.8.1.3 Ecuación para los Carbonatos. La composición de los carbonatos por XRF de la formación Villeta básicamente se dio con la siguiente ecuación, donde el calcio indudablemente es quien tiene mayor participación, mientras el Manganeso y Estroncio también se asoció a este elemento.

- Carbonatos_XRF=(Ca_norm*0.7)+(Mn_norm*0.3)

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de la distribución porcentual de la compilación de los elementos que forman el Bulk de los carbonatos, las arcillas y el Sílice, estos valores numéricos pueden cambiar dependiendo de los elementos presentes en los resultados de XRF para cada uno de los pozos y la concentración de los mismos.

Tabla 11. Elementos y sus respectivos porcentajes que componen el bulk de sílice, carbonatos y arcillas del pozo Hormiga-1X.

POZO	ARCILLAS				SILICE		CARBONATOS	
	Al	Fe	Ti	Na	Si	Sr	Ca	Mn
Hormiga 1X	0,7	0,1	0,1	0,1	80	50	40	10

Nota: ICP (2016).

Al normalizar los valores obtenidos por las ecuaciones anteriores se obtiene el Bulk de la formación para cada pozo como se observa en la Figura 77. Éste mismo procedimiento se realizó para cada uno de los pozos en donde se realizaron los análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X.

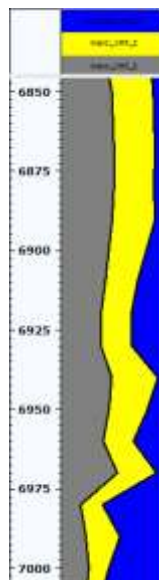


Figura 77. Ejemplo de curva Bulk resultado en gris se representa la arcilla, en amarillo la sílice y en azul el carbonato. Datos de 0 a 100.

8.8.2 Calculo del TOC a partir de los datos de XRF. La disponibilidad del TOC dentro de las diferentes litologías se encuentra ligada al medio en que se depositó y en que se preservó.

En los dos histogramas se muestra el comportamiento estadístico del Vanadio y el Molibdeno, dos de los elementos que reflejan mejor el comportamiento del TOC.

Los picos de frecuencias más altos se encuentran en los intervalos donde hay predominio de carbonatos, mientras que las zonas con una menor disponibilidad de TOC se encuentra ligada a litologías con predominio de arcillas.

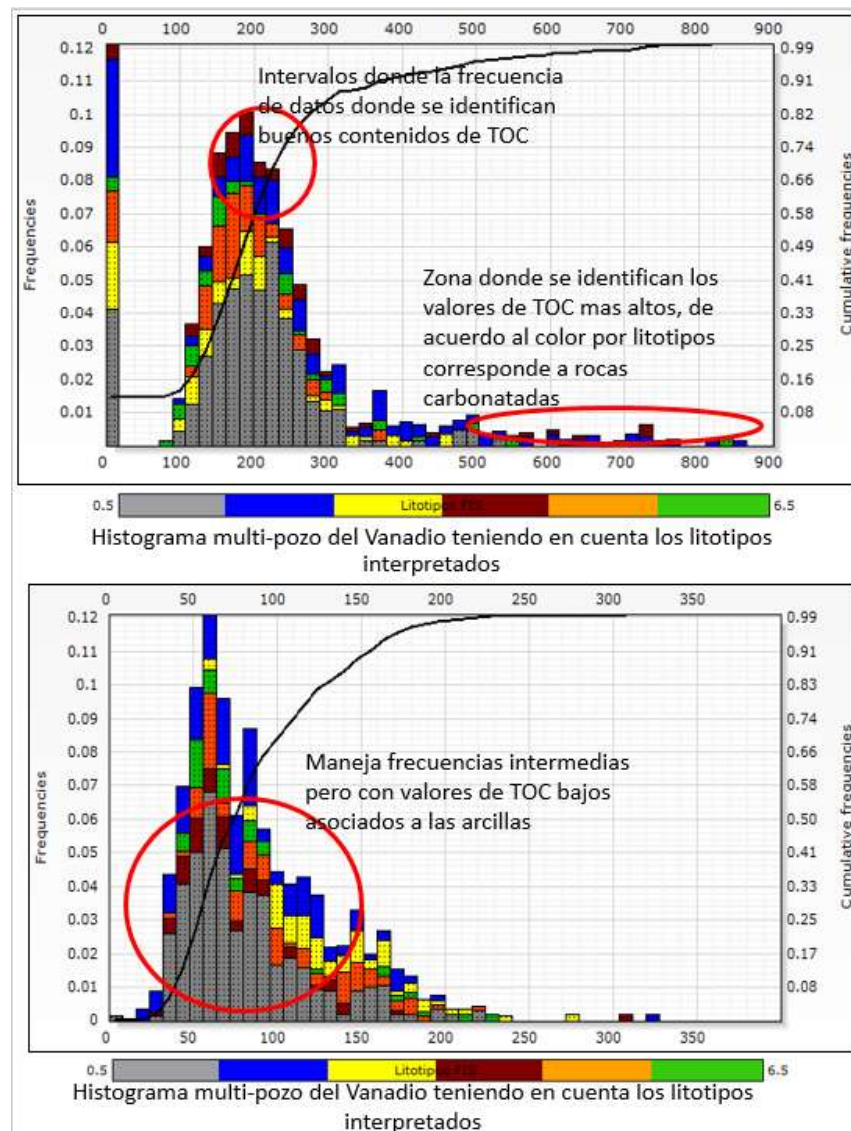


Figura 78. Se observa el comportamiento del V y su relación con el TOC y litologías de la Formación Villeta.

Al igual que se hizo para la identificación de elementos usados para determinar el contenido de arcillas, sílice y carbonatos son seleccionados los elementos relacionados al contenido de Mo que presenten mejor respuesta y tengan mayor densidad de datos. Entre los elementos relacionados con Mo se encuentran: V, Mo, Cr, Zn, S, Cu. Teniendo al V, Mo y el Cr como los más representativos. Para los pozos trabajados donde se realizó análisis por XRF se realizó el cálculo del TOC, creándose la siguiente ecuación:

- $TOC_{XRF}=(V_{norm}*0.85)+(Mo_{norm}*0.05)+(Fe_{norm}*0.05)$

A continuación, un ejemplo donde se muestra el pozo hormiga-1X y la distribución porcentual que se le dio a los elementos potencialmente marcadores de TOC.

Tabla 12. Datos de TOC basados en XRF para el pozo Hormiga-1X.

POZO	ELEMENTOS		
	V	Mo	Fe
Hormiga 1X	0,85	0,1	0,05

Al normalizar los valores obtenidos por las ecuaciones anteriores se obtiene la curva de TOC para cada pozo.

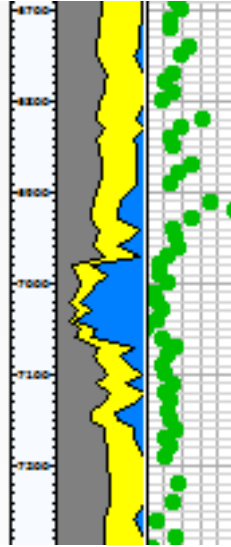


Figura 79. Se observan los valores obtenidos de TOC de acuerdo a los procesos matemáticos mencionados anteriormente y su respectiva normalización, los puntos verdes representan dichos valores.

La quimioestratigrafía es una herramienta en la cual por medio de la toma de datos de pozo de XRF espectrometría de fluorescencia de rayos se logra determinar la proporción de elementos químicos presentes en las rocas definiendo Ca, Si, K, Na, V, Ti, Zn entre otros. De acuerdo a las relaciones mineralógicas es posible determinar el tipo de litología de acuerdo a la abundancia de determinados elementos (Ver Figura 80).

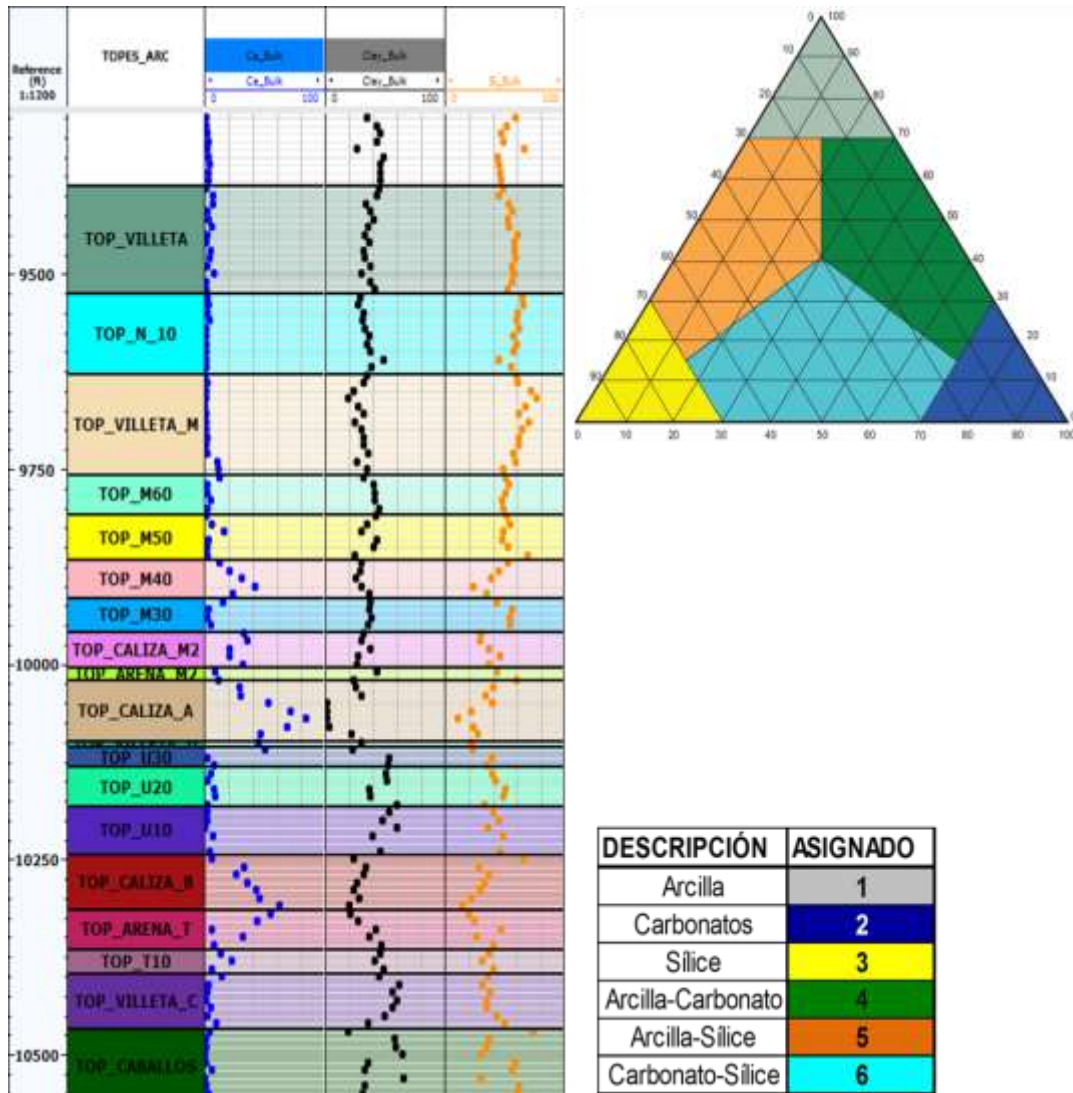


Figura 80. Ejemplo de Datos composicionales construidos a partir de elementos identificados por XRF.

A partir de la quimioestratigrafía se construye una curva composicional similar al DRX donde a partir de datos composicionales se pueden estimar algunas características y de igual manera tipos de roca, involucrándolos en un análisis Cluster y definiendo los posibles centroides de acuerdo a las características de las rocas (Ver Figuras 81 a 86).

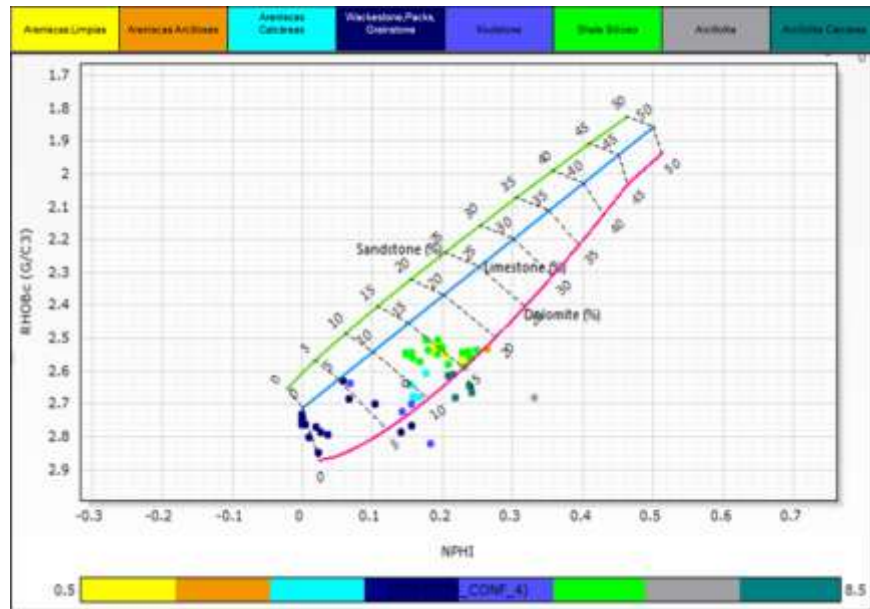


Figura 81. 0-56% contenido de arcillas medidos con fluorescencia de rayos X.

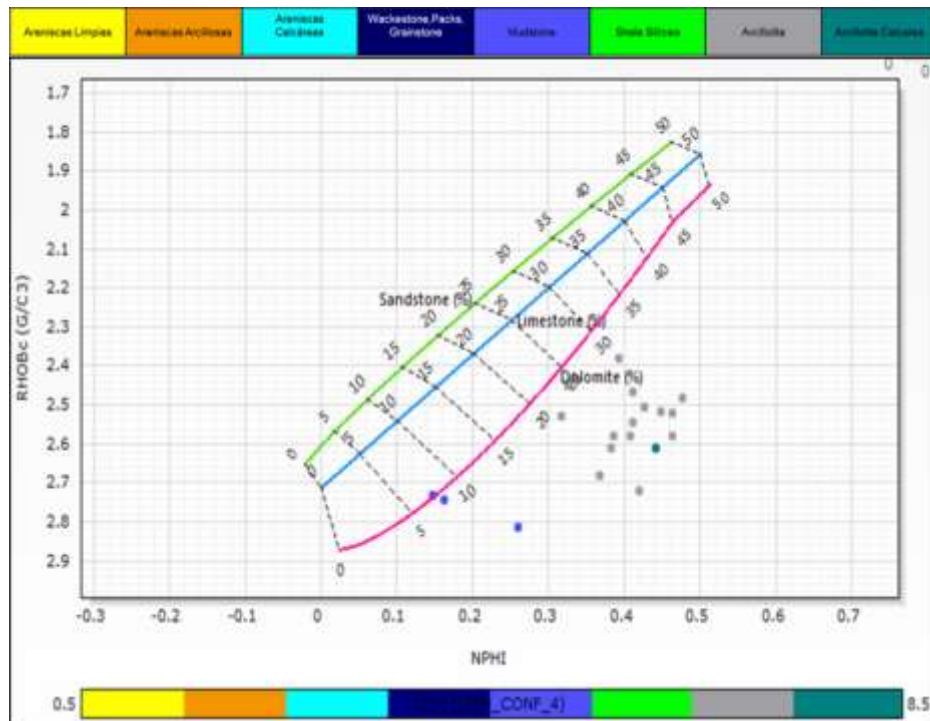


Figura 82. 56-100% contenido de arcillas medido con fluorescencia de rayos X.

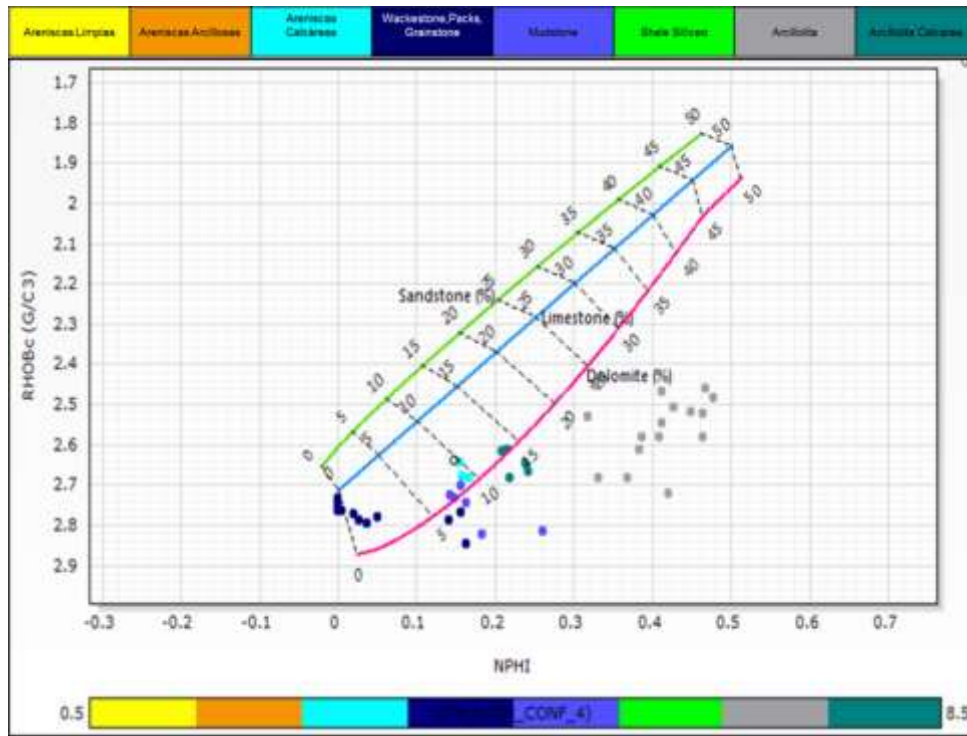


Figura 83. 0-56% contenido de sílice medidos con fluorescencia de rayos X.

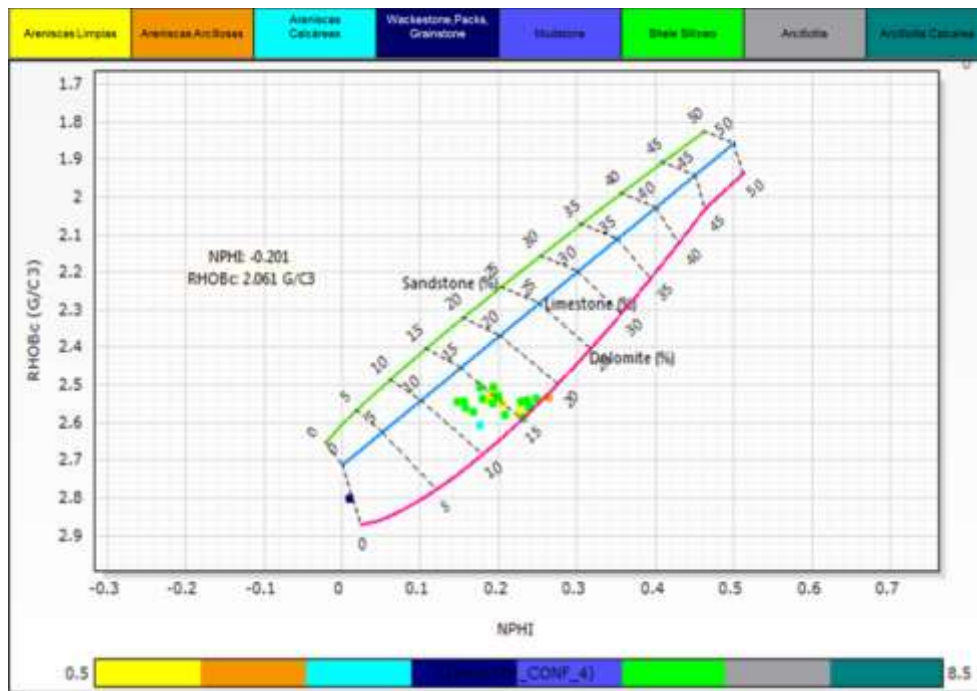


Figura 84. 56-100% contenido de sílice medido con fluorescencia de rayos X.

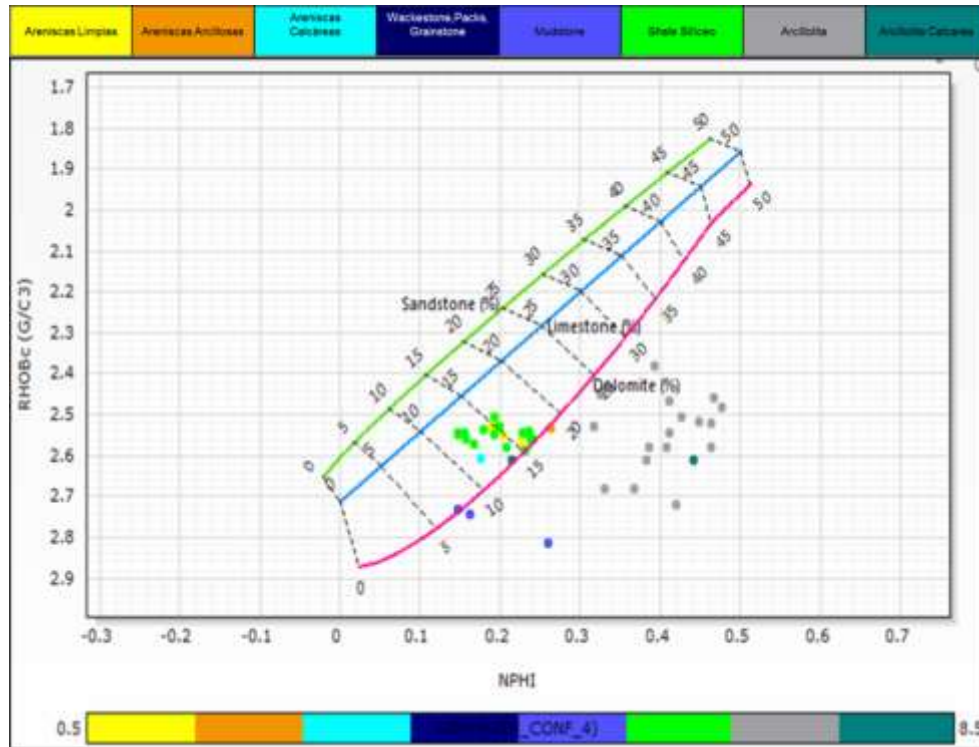


Figura 85. 0-10% contenido de carbonato medidos con fluorescencia de rayos X.

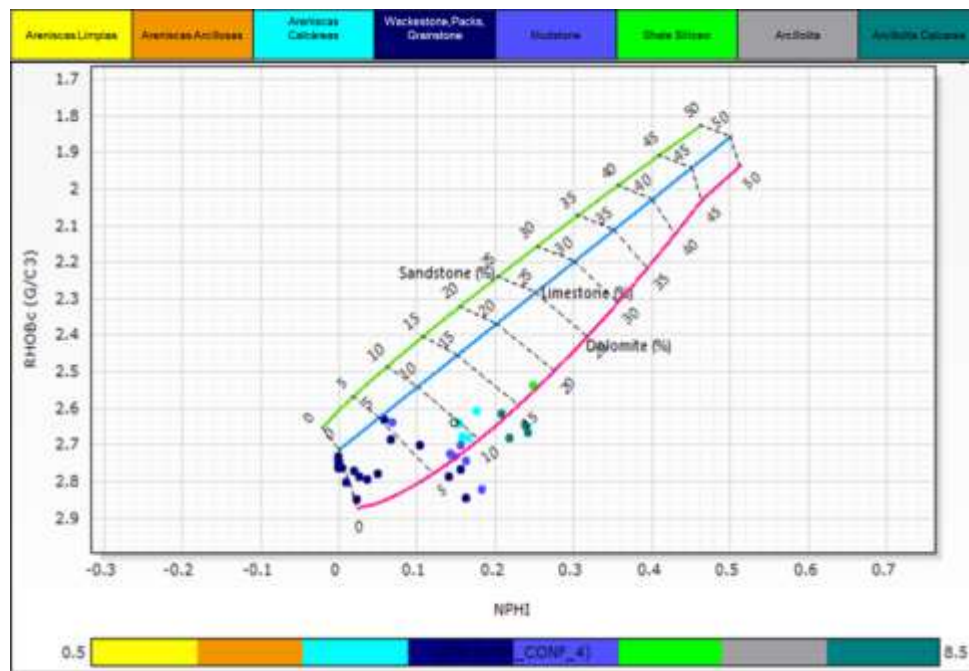


Figura 86. 9-100% contenido de carbonato medido con fluorescencia de rayos X.

8.8.3 Descripción generalizada de litotipos en pozos analizados por XRF. De acuerdo a lo anteriormente explicado, a continuación, se describirá de una manera generalizada la relación y la secuencia entre los elementos más representativos y tenidos en cuenta para diferenciar e identificar cada uno de los litotipos descritos dentro de los pozos con la mejor calidad de información y menor grado de incertidumbre asociada. Para esto se seleccionaron los pozos Acae-2, Acae-10, Acae-12, Loro-7A y Hormiga-1X que cuentan con los análisis instrumentales de XRF.

8.8.3.1 Pozo ACAE-2 Y ACAE-10. Debido a que los datos del pozo Acae-2 tienen una baja resolución, éste se asoció al pozo Acae-10 el cual cuenta con un mayor número de datos, y estratigráficamente se pueden correlacionar por su semejanza en los valores de los datos, además de una mayor resolución que permite asociar las litologías definidas en éste con el pozo Acae-2. Las relaciones químicas entre los pozos son concordantes.

Miembro Villeta C: De base a techo la Formación Villeta en el pozo Acae-2 inicia a una profundidad de 10455 ft con el Miembro Villeta C que se extiende a 10375 ft haciendo relación a este mismo miembro dentro del pozo Acae-10, en el miembro Villeta C inicia a los 10468 ft, terminando en 10400 ft. En orden de base a techo dentro del miembro Villeta C se obtuvieron los siguiente litotipos, hacia la base unas Arenas limpias seguidas de unas Arenas arcillosas en donde disminuye gradualmente el contenido de Silicio y aumenta el contenido de Aluminio debido a su arcillosidad, seguido de esto se tiene una capa de aproximadamente 80 ft de Arcillas identificada por altos niveles de Aluminio, hacia el techo del Miembro Villeta C se tiene una

capa de aproximadamente 15 ft de Arcillolita Calcárea (moderado contenido de Calcio dentro de una escala de 0 a 350.000 ppm, y notable presencia de Aluminio).

Miembro Villeta T: En el Pozo Acae-2 Inicia de base a techo a una profundidad de 10375 ft a 10300 ft y en el pozo Acae-10 se extiende desde 10400 ft. hasta 10315 ft aproximadamente. Hacia la base se identifica una delgada capa de Arcillas, seguido por un paquete de 20 ft. de Arcillas Calcáreas las cuales presentan un moderado contenido de Calcio, Suprayaciendo a estas Arcillas Calcáreas se encontró otra capa delgada de Arcillas, A partir del tope de estas arcillas el contenido de Calcio aumenta gradualmente y disminuye el contenido de Aluminio, esto se relacionó con un paquete de Carbonatos hasta el tope la cual en su base contiene aproximadamente 10 ft. de Arenas Calcáreas.

Miembro Villeta Caliza B: En el pozo Acae-2 inicia desde 10300 ft a 10230 ft y en el pozo Acae-10 se inicia en 10315 ft. hasta 10240 ft la base de éste miembro continúa con Carbonatos hasta los 10280 ft, luego los suprayacen 10 ft de Arenas Calcáreas con un rango alto de Silicio y Calcio, mostrando una variación litológica a Carbonatos nuevamente, posteriormente, se observa un cambio litológico de Carbonatos a Arenas limpias evidenciado por un cambio abrupto en la composición elemental disminuyendo el contenido de Calcio y aumentando el contenido de Sílice; en el tope de éste miembro se deposita una delgada capa de Arenas Arcillosas donde se evidencia la disminución del contenido de Silicio y aumento de Aluminio.

Miembro Villeta U: Inicia en el pozo Acae-2 en 10240 ft hasta 10085 ft. y en el pozo Acae-10 desde 10240 ft a 10095 ft. ECOPETROL S.A-ICP divide este Miembro en diferentes Topes con el fin de tener un mejor manejo de la Información.

- Tope U 10: Hacia la base se denominó el tope U10 con Arenas limpias hacia la base, posteriormente, por el contenido de Aluminio el cual aumentó gradualmente y el de Silicio que es estable se evidencia un cambio a Arenas Arcillosas, por último, el contenido de Silicio es casi nulo y el Al aumenta, siendo esta netamente Arcillas.
- Tope U 20: Se describen aproximadamente 20 ft de Arenas Calcáreas con valores intermedios de Al y Ca, hacia el techo de éste tope se identificó una intercalación de Arcillas y Arcillolitas calcáreas debido a la variación en los valores de Aluminio y Calcio.
- Tope U 30: Está compuesto por Arcillas con alto nivel de Al y un notable contenido de Ca, el cual a medida que avanza hacia el techo toma valores al nivel máximo de Calcio lo cual representa el inicio de un nivel de carbonatos, dichos Carbonatos continúan con valores similares hasta el tope nombrado como Tope U Shale, y Tope U Villeta.

Miembro Caliza A: En el pozo Acae-2 inicia en 10085 ft a 10015 ft aprox. y en el pozo Acae-10 desde 10095 ft a 10020 ft. Éste Miembro está compuesto netamente de Carbonatos y Arenas Calcáreas hacia el techo las cuales presentan un aumento en el contenido de Calcio, Silicio y Aluminio, éste último en baja proporción, respecto a los Carbonatos infrayacentes.

Miembro Villeta M2: En el pozo Acae-2 inicia en 10015 ft hasta 9950 ft y en el pozo Acae-10 va desde 10020 ft. a 9960 ft. aproximadamente. Éste miembro se dividió en dos topes.

- Tope Arena M2: Se identificó como una Arena calcárea con alto contenido de Silicio y bajos contenidos de Calcio.
- Tope Caliza M2: se describió en su base por Arenas Calcáreas, se observa el contenido de Calcio dentro de un rango medio y bajo contenido de Silicio, hacia el techo suprayacen una capa de Carbonatos con bajo contenido de Silicio y alto contenido de Calcio.

Miembro Villeta M: En el pozo Acae-2 inicia desde 9950 ft a 9752 ft y en el pozo Acae-10 en 9960 ft a 9757 ft aproximadamente. Éste Miembro se subdividió en 4 Topes.

- Tope M 30: Inicia de base a techo con unas Arenas limpias de aproximadamente 10 ft, intercaladas con 10 ft de Arenas arcillosas y nuevamente 15 ft de Arenas limpias, las cuales se diferencian de las Arenas arcillosas por su alto nivel de Silicio y bajo Aluminio, posteriormente hacia el techo de éste tope, suprayaciendo a las Arenas limpias se observan 20 ft de Arenas arcillosas.
- Tope M 40: En la base se identifican 10 ft de Arenas Calcáreas, posteriormente se observa un aumento en el nivel de Calcio el cual representa 12 ft de Carbonatos los cuales suprayacen a las Arenas Calcáreas, hacia la parte media se encuentra suprayaciendo a los

Carbonatos 30 ft de Arenas Calcáreas que tienen un aumento gradual en el contenido de Silicio hacia techo hasta llegar a unas Arenas limpias.

- Tope M 50: Inicia con la continuidad de las Arenas limpias, posteriormente se depositan unos 25 ft aproximadamente de Arenas arcillosas identificadas por su aumento en el contenido de Aluminio, hacia la parte media de este tope se describió una capa de 10 ft de Arenas Calcáreas (se interpreta por el aumento moderado en el contenido de Calcio), posteriormente, se depositan unas Arenas limpias las cuales tienen un aumento en los valores de Al cambiando litológicamente a Arenas arcillosas.
- Tope M 60: Inicia con la continuidad de 10 ft de Arenas arcillosas intercaladas con Arenas Calcáreas, posteriormente se depositan 25 ft de Arenas arcillosas y arenas Calcáreas dado el aumento en el contenido de Calcio hacia el tope.

Miembro Tope Villeta M: En el pozo Acae-2 inicia en 9752 ft a 9620 ft y en el pozo Acae-10 en 9960 ft a 9627 ft aproximadamente. Se observa la continuación de 20 ft adicionales de Arenas Calcáreas, una gran disminución del contenido de Calcio y un aumento radical en el contenido de Silicio lo cual se interpreta como un cambio litológico mostrando unas Arenas limpias de gran espesor (aproximadamente 105 ft) y continúan hasta terminar el tope de este Miembro.

Miembro Tope Villeta N: En el pozo Acae-2 inicia desde 9620 ft a 9395 ft y en el pozo Acae-10 en 9627 ft a 9385 ft aproximadamente. Este miembro se dividió en 2 Topes.

- Tope N 10: Se identifica iniciando en la base con una secuencia de Arenas arcillosas de aproximadamente 30 ft, posteriormente se observa un aumento en el contenido de Silicio y disminución en el contenido de Aluminio mostrando así una secuencia de Arenas limpias de 70 ft aproximadamente, posteriormente, en el techo del Miembro aumenta el contenido de Aluminio interpretándose como una depositación de Arenas arcillosas.
- Tope Villeta: Se compone de 110 ft de Arenas limpias evidenciadas por el alto contenido de Silicio y bajo contenido de Calcio y Aluminio, luego, suprayaciendo a las Arenas se identifican 10 ft con un aumento del contenido de Calcio correspondiente a Arenas Calcáreas, y en el techo, la Formación Villeta finaliza con una secuencia de Arenas arcillosas.

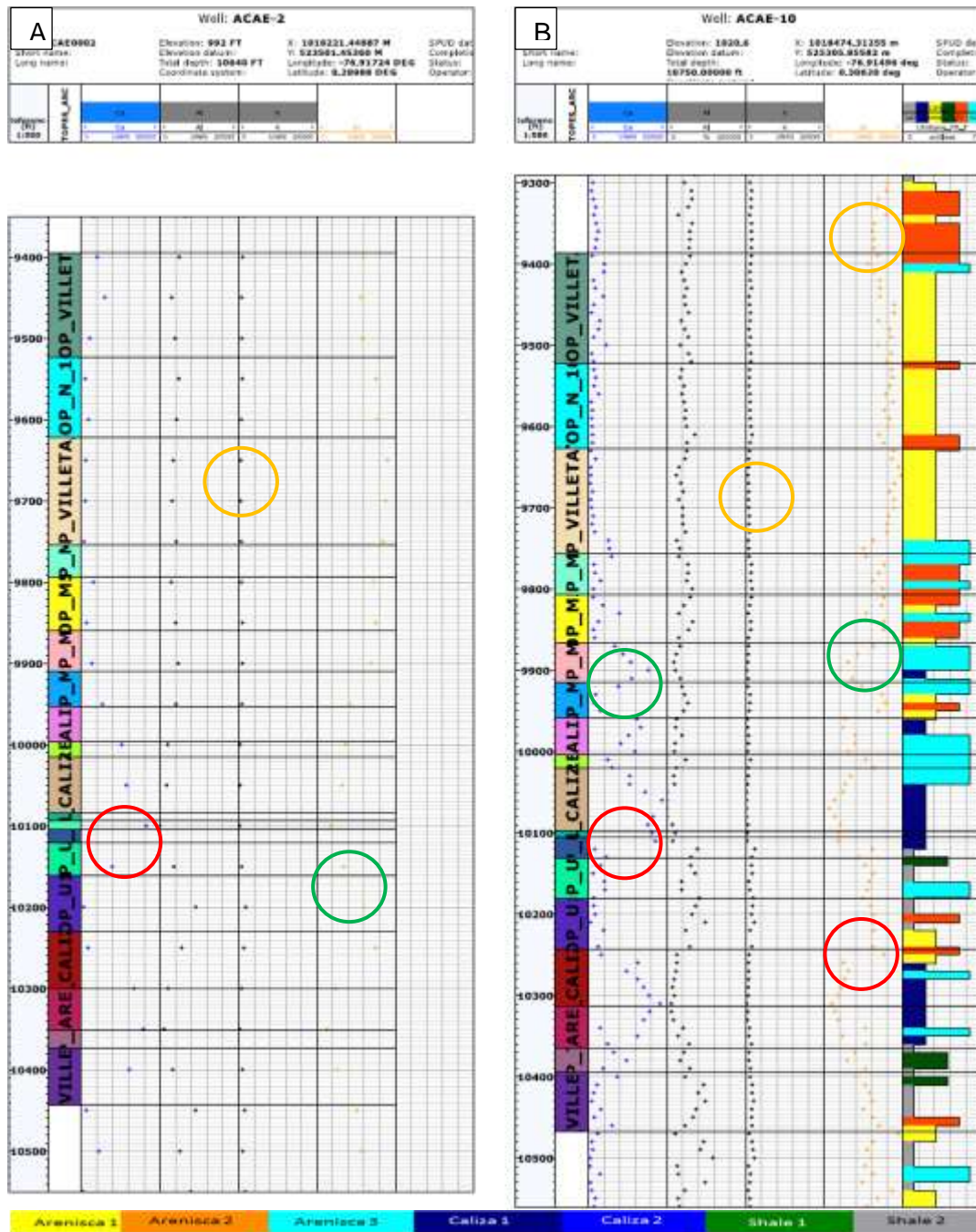


Figura 87. A) Pozo Acae-2. B) Pozo Acae-10. Los círculos de color rojo muestran el cambio abrupto en la variación de la concentración elemental de una profundidad a otra. Los círculos verdes muestran una variación gradual de la concentración elemental en profundidad. Los círculos amarillos muestran estabilidad en la concentración elemental en profundidad.

8.8.3.2 *Pozo ACAE-12*. Miembro Villeta C: Este inicia desde una profundidad de 10560 ft a 10490ft. Hacia la base de este miembro una capa de Arenas Calcáreas identificadas por el moderado contenido de Silicio y Aluminio, suprayaciendo a dichas Arenas se depositó una capa de Arcillas con un espesor aproximado de 20 ft (se evidencia por aumento del contenido de Aluminio), por último, hasta el techo de este miembro se depositó una secuencia de Arcillas calcáreas, esto se identifica por el aumento en el contenido de Calcio y disminución en el contenido de Silicio, el valor de Aluminio se mantiene en un valor medio.

Miembro Villeta T: inicia en 10490 ft hasta 10400 ft aproximadamente.

- Tope T 10: Inicia en la base con una disminución en el contenido de Aluminio y aumento en el contenido de Calcio reflejando una capa de Arenas Calcáreas de aproximadamente 20ft, hasta el techo de este miembro y suprayaciendo a las arenas Calcáreas se observó un aumento marcado en el contenido de Calcio y disminución en el contenido de Silicio y Aluminio, evidenciando la presencia de Carbonatos.
- Tope Arena T: Hacia la base se observa la continuidad de los Carbonatos hasta la parte media, aproximadamente 50 ft, luego disminuye el contenido de Calcio, y aumenta moderadamente el de Silicio y Aluminio mostrando un intervalo de Arcillas Calcáreas de 20 ft aproximadamente, en el techo de este tope se evidencia un aumento en el contenido de Silicio y Aluminio para mostrar 20 ft de Arenas Calcáreas.

Miembro Caliza B: Inicia en 10400 ft hasta 10327 ft aproximadamente. Este miembro de base a techo evidencia una disminución en su contenido de Calcio y un aumento en los valores de silicio y Aluminio, hacia la base se identificó una capa de 50ft de Arcillas Calcáreas, suprayaciendo a estas Arcillas Calcáreas se observa una intercalación de Arcillas con Arenas arcillosas hasta llegar al techo de este Miembro.

Miembro Villeta U: Éste miembro comienza en 10327 ft hasta 10170ft.

- Tope U 10: Hacia la base Arenas arcillosas donde el contenido de Aluminio aumenta hacia la parte media de este tope cambiando así a una capa de Arcillas con un espesor de 20 ft aproximadamente, suprayaciendo a dichas Arcillas se identificó 20 ft de Arcillas Calcáreas en donde aumenta el contenido de Aluminio, finalizando, hasta el techo de este tope se depositó una intercalación entre Arcillas y Arenas Calcáreas las cuales se diferencian por su variación en el Contenido de Aluminio y Calcio.
- Tope U 20: En su base se depositaron 20 ft de Arenas limpias evidenciadas por su alto valor en el contenido de Silicio, luego se depositaron hacia la parte media una secuencia de Arcillas (disminución del Silicio, aumento de Aluminio y presencia de un valor representativo en los valores de Potasio), finalmente, hacia el techo de este tope se observa un aumento marcado en el contenido de Calcio y disminución notable en el contenido de Aluminio y Silicio, interpretándose como una secuencia de Carbonatos.

- Tope U 30: Se encuentra compuesto por aproximadamente 15 ft de Arenas Calcárea marcada por la disminución moderada en el contenido de Silicio y aumento en el contenido de Calcio.
- Tope U Shale: Esta tope continua con la secuencia de Arenas Calcáreas, cambiando litológicamente a Carbonatos evidenciado por el aumento en el contenido de Calcio y disminución del Silicio y Aluminio.
- Tope Villeta U: Está compuesto por aproximadamente 10 ft de Carbonatos.

Miembro Caliza A: Inicia en 10170 ft hasta 10098 ft, comienza en la base de este miembro con la continuidad de los Carbonatos con un espesor de 10 ft aproximadamente, posteriormente el contenido de Calcio disminuye, y aumenta el contenido de Silicio, Aluminio y Potasio se mantiene estable mostrando hacia el techo de este miembro una secuencia de Arenas Calcáreas.

Miembro M2: Inicia desde 10098 ft hasta 10023 ft aproximadamente.

- Tope Arena M2: En la base se observa un alto contenido de Calcio, disminución de Silicio y Aluminio mostrando una secuencia de Carbonatos, los valores de Calcio disminuyen a medida que ascendemos hacia el techo depositándose una secuencia de Arenas calcáreas de 10 ft aproximadamente.

- Tope Caliza M2: Continúa la secuencia de Arenas Calcáreas con un espesor de 10 ft, el contenido de Aluminio aumenta y el Silicio disminuye, interpretándose como 10 ft de Arcillas Calcáreas, hacia la parte media el contenido de Ca aumenta, el Al disminuye para la depositación de 10 ft de Carbonatos, desde la parte media hacia el techo de este miembro se observa una disminución gradual en el contenido de Ca y aumento de Si y Al correspondiente a una secuencia de Arenas Calcáreas suprayacidas por 20 ft de Arenas arcillosas.

Miembro Villeta M: Comprende el intervalo desde 10023 ft a 9820 ft aproximadamente.

- Tope M 30: Hacia la base se observa un aumento en el contenido de Calcio y disminución en el contenido de Si y Al pasando de una capa de Arenas arcillosas a 40 ft de Arenas calcáreas, en el techo de este miembro se observa un aumento gradual en el contenido de Si y disminución en el Ca correspondiente a una secuencia de Arenas limpias.
- Tope M 40: Continúa la secuencia de Arenas limpias 20 ft aproximadamente, evidenciándose en la parte media un aumento de Al para una secuencia de 10 ft de Arenas arcillosas, continuando con Arenas limpias hasta el techo del tope.
- Tope M 50: Éste tope se comprende en su mayoría por Arenas limpias con una capa de 15 ft de Arenas Calcáreas hacia el techo.

- Tope M 60: Éste tope está compuesto en su totalidad por Arenas limpias con alto contenido de Silicio, bajo Calcio y moderado contenido de Aluminio.

Miembro tope Villeta M: Comienza desde 9820 ft hasta 9690 ft. Hacia la base y la parte media de este Miembro se observó un alto contenido de Silicio, bajos valores de Calcio los cuales corresponden a una capa de aproximadamente 100 ft de Arenas limpias, hacia el techo de este miembro se depositaron 20 ft de Arenas arcillosas reflejadas en una leve disminución en el contenido de Silicio y aumento en el contenido de Aluminio, la secuencia continua con Arenas limpias hacia el tope de este Miembro.

Miembro Villeta M: Inicia desde 9690 ft hasta 9420 ft. El Tope N 10 y el Tope Villeta presentan comportamiento similar en la variación elemental, correspondiendo a una intercalación entre Arenas limpias y Arenas arcillosas cuya variación en espesor es de 10ft a 60 ft diferenciándose entre ellas por los valores en el contenido de Aluminio y Silicio, en estos dos topes predominan las Arenas arcillosas. En la Figura 88 se puede observar lo anteriormente explicado.

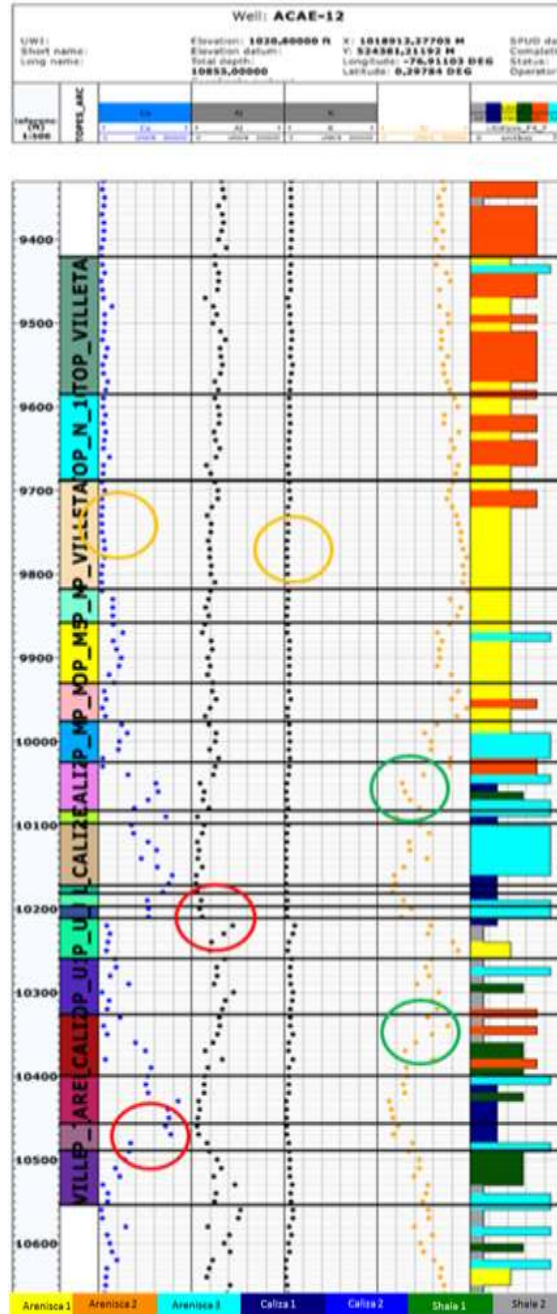


Figura 88. Se observa la variación composicional por XRF en las profundidades determinadas. Los cirulos rojos muestran el cambio abrupto en el contenido elemental de una profundidad a otra. Los círculos verdes identifican la variación gradual de la concentración elemental a medida que cambia la profundidad. Los círculos amarillos muestran la no variación en el contenido elemental a medida que hay un cambio en profundidad.

8.8.3.3 *Pozo Hormiga-IX*. Los análisis por XRF para este pozo se realizaron en los siguientes intervalos de profundidad: 10620ft a 10560 ft, 10440 ft a 10410 ft y de 9850 ft a 9800ft por ello de describen solamente los Miembros correspondientes a estas profundidades.

Miembro Villeta T: Para este Miembro en el intervalo de profundidad de 10620 ft a 10560 ft se describirá el Tope T 10.

- Tope T10: Comienza en la base con una delgada capa 3 ft aproximadamente de Arenas arcillosas, suprayaciendo a estas se encuentra una capa de Arcillas de 4 ft de espesor, y seguido de esto se da un aumento en el contenido de Calcio y disminución notable en el contenido de Silicio mostrando una secuencia de Carbonatos de 20 ft aproximadamente, hacia la parte media de este tope se observa una disminución en el contenido de Calcio y aumento de Aluminio donde se identificó la presencia de Arcillas Calcáreas de aproximadamente 23 ft, seguido de esto el contenido de Ca vuelve a aumentar y los valores de Al disminuyen dando como respuesta una capa de Carbonatos de 7 ft aproximadamente, hacia el techo de este tope se observa una intercalación de Carbonatos con Areniscas Calcáreas cuyos espesores varían de 5 ft a 7 ft evidenciados por la variación en el contenido de Si y Ca.

Miembro Villeta U: Para este Miembro en el intervalo de profundidad de 10440 ft a 10410 ft se describirá el Tope T 10.

- Tope U 20: En general, la secuencia se compone en su mayoría por Arcillas, sin embargo, hacia la base se definió una delgada capa de Arenas arcillosas por aumento en el contenido de Silicio, suprayaciendo a dichas Arenas se depositó una capa delgada de Arcillas calcáreas, la cual se evidencia por un aumento en el contenido de Calcio, en el techo de este tope se definió una delgada capa de Carbonatos evidenciado por un alto pico con contenido de Calcio.

Miembro Villeta N: Para este miembro en el intervalo de profundidad de 9850 ft a 9800 ft se describirá el Tope Villeta.

- Tope Villeta: Se compone en general por una intercalación entre Arenas limpias, Arenas arcillosas y Arenas calcáreas, siendo predominante el contenido de Arenas limpias con un espesor de 40 ft aproximadamente, la variación en el contenido de Ca y Si permite diferenciar estos litotipos, para el techo de este tope se definieron areniscas calcáreas de aproximadamente 10 ft.

Lo anteriormente explicado se puede observar a detalle en la Figura 87.

8.8.3.4 *Pozo Loro-7^a*. Miembro Villeta C: Inicia de 10455 ft a 10400 ft, la base de este Miembro se compone de 15 ft de Arcillas aproximadamente, posteriormente, se observa un aumento en el contenido de Ca y disminución de Al evidenciando una capa de 20 ft de Arcillas calcáreas, se vuelve a observar otra secuencia de 10 ft de Arcillas y hacia el techo finaliza con una secuencia de 10 ft de Arcillas calcáreas.

Miembro Villeta T: De 10400 ft a 10320 ft de espesor aproximadamente.

- Tope T 10: Se compone de 20 ft de Arcillas calcáreas, evidenciado en el aumento de los valores de Ca y disminución en el contenido de Si y Al.
- Tope Arena T: En la base continua la secuencia de Arcillas Calcáreas que cambia a una secuencia de 20 ft de Arcillas, marcado por el aumento de Al y Si, la suprayacen 10 ft de Arcillas calcáreas, posteriormente, se identificó un paquete de Carbonatos hasta llegar al techo con un espesor de 20 ft aproximadamente, en este intervalo se da un notable aumento en el contenido de Ca y disminución en el contenido de Si y Al.

Miembro Caliza B: El intervalo va desde 10320 ft a 10245 ft, este miembro continua en su base con la secuencia de Carbonatos con un espesor aproximado de 50 ft, hacia la parte media el contenido de Ca disminuye y el Si aumenta gradualmente, suprayaciendo a los Carbonatos se identificó 10 ft de Arenas calcáreas y 10 ft de Arenas limpias de un alto contenido de Si, mientras el de Ca es casi nulo, se definió como Arenas arcillosas.

Miembro Villeta U: Inicia desde 10245 ft a 10090 ft aproximadamente.

- Tope U 10: Hacia la base se identificó 5 ft de Arenas arcillosas, posteriormente se depositó una capa de 10 ft de Arcillas donde aumenta el contenido de Al, suprayaciendo a estas se definió una capa de 10 ft de Arenas calcáreas, la parte media está compuesta por 30 ft de Arcillas calcáreas aproximadamente, denotadas por la disminución gradual en el contenido de Si y aumento en el contenido de Ca y K, finalmente, en el techo se tiene un aumento gradual en el contenido de Ca, disminución de Si y Al evidenciando la presencia de Carbonatos de 20 ft aproximadamente.
- Tope U 20: Inicia en la base con 10 ft de Arenas calcáreas, se dio una disminución del contenido de Ca y Si, y aumenta el contenido de Al con esto se identifican unas Arcillas calcáreas con un espesor de 15 ft, hacia el techo de este tope aumenta el contenido de Al y K, y el
- Ca disminuye terminando en 5 ft de Arcillas.
- Tope U 30: Se observa la continuidad a las Arcillas con un espesor de 5 ft, posteriormente las suprayace una capa de Arcillolitas calcáreas, finalmente, se observa un aumento en los valores de Ca, una disminución en el Si y Al para esta capa como Carbonatos.
- Tope U Shale: Está compuesto netamente por 10 ft de Carbonatos.

- Tope Villeta U: Continúa la secuencia de Carbonatos y por lo tanto altos niveles en los valores de Ca y muy bajos de Si se evidencian.

Miembro Caliza A: Inicia en el intervalo de 10090 ft a 10030 ft continúan los altos valores de Ca por un espesor aproximado de 40 ft, luego de este punto se observa una disminución gradual en el contenido de Ca y un aumento de Si, definidos como Arenas calcáreas con un espesor de 20 ft.

Miembro Villeta M2: El espesor de este Miembro es de 10030ft a 9990ft aproximadamente.

- Tope Arena M2: se observa un aumento en los valores de Ca y disminución en el Silicio, definiéndose una capa de Arenas calcáreas, luego la suprayacen una capa de Carbonatos.
- Tope Caliza M2: En la base continua con valores altos en Ca identificándose aproximadamente 15 ft de Carbonatos, que los suprayacen 10 ft de Arenas limpias marcadas por su alto contenido de Si y bajo contenido de Ca.

Miembro Villeta M: Inicia en el intervalo de 9990 ft a 9780 ft aproximadamente.

- Tope M 30: continua la secuencia de Arenas limpias con un espesor de 40 ft, estas la suprayacen una capa de Arenas arcillosas de 10 ft evidenciadas por un menor contenido de Si y mayor valor de Al, finalmente, hacia el techo de este tope se definen 10 ft de Arenas calcáreas evidenciado en el aumento gradual del contenido de Ca y disminución del contenido de Silicio.

- Tope M 40: Inicia en la base con 10 ft de Carbonatos y una disminución gradual en el contenido de Ca y aumento de Si para definir 20ft de Arenas calcáreas que suprayacen a los carbonatos.
- Tope M 50: Continúa el aumento gradual de Si y la disminución de Ca definiéndose así 50 ft de Arenas limpias, finalizando hacia el techo con 15 ft de Arenas calcáreas.
- Tope M 60: Continúa con 15 ft de Arenas calcáreas, se observó un pico de aumento del Si en donde se definen 10ft de Arenas limpias, posteriormente, el contenido de Al aumenta donde se definen 20 ft de Arenas arcillosas, este tope finaliza con 20 ft de Arenas limpias.

Miembro Tope Villeta M: El espesor es de 9780 ft a 9645 ft, este miembro inicia con 10 ft de Arenas calcáreas, suprayaciendo a estas Arenas y hasta finalizar el techo se observa una intercalación de Arenas limpias con Arenas arcillosas, predominando el contenido de Arenas limpias con un espesor de aproximadamente 100 ft.

Miembro Villeta N: Tiene un espesor de 9645 ft a 9420 ft, aquí se describen los dos topes de éste Miembro ya que su información elemental es muy semejante. En la base continúan las intercalaciones entre Arenas limpias y Arenas arcillosas, esto se define en base a la variación del contenido de Si el cual disminuye siendo interpretado esto como Arenas arcillosas, y a su vez el valor de Al aumenta en este miembro, se observa una proporción de 50% Arenas limpias y 50% de Arenas arcillosas aproximadamente.

En la Figura 91 se relacionan los pozos con la mejor calidad de información y los más representativos en cuanto a datos confiables para definir los diferentes litotipos. Se hace una correlación entre pozos con el fin de determinar las posibles variaciones tanto litológicas como de los valores de los datos de XRF, permitiendo entender la relación entre valores y rangos de elementos representativos como Aluminio, Calcio, Potasio y Silicio y la definición de litotipos y rocas de interés para la exploración de hidrocarburos en la Formación Villeta de la cuenca de Putumayo

Además de esto se muestra de manera clara como se puede llevar o extrapolar la información de pozos con una gran cantidad de datos (XRF) para apoyar la interpretación y definición estratigráfica de una zona de interés, donde la información sea limitada permitiendo amarrar y complementar datos con el fin de disminuir el rango de incertidumbre de la información.

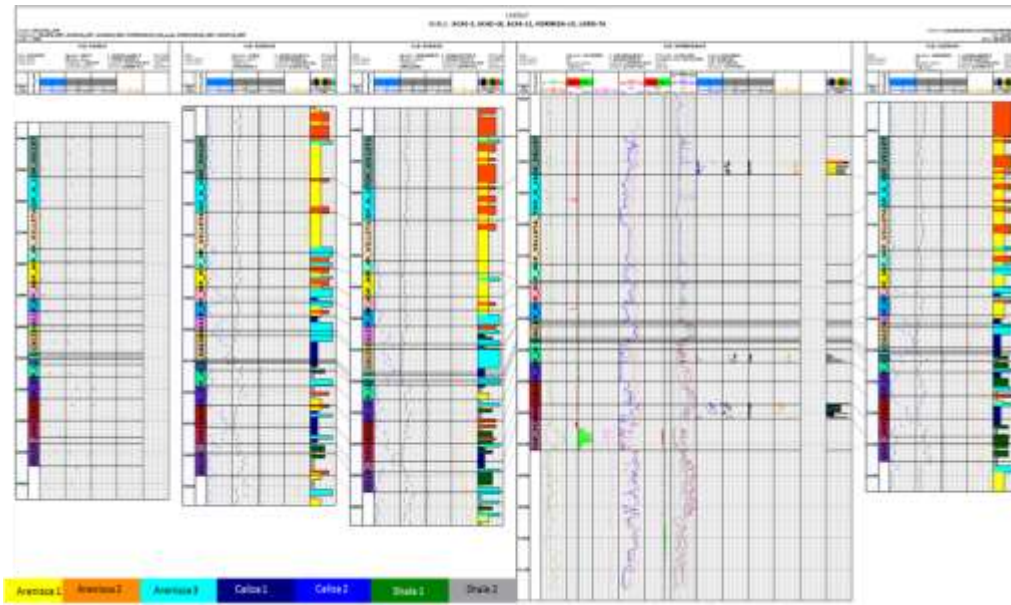


Figura 91. Resultado de la integración y correlación de los pozos Acae-2, Acae-10, Hormiga-1X, Acae-12 y Loro-7A a partir de datos de la técnica instrumental XRF después de su debida normalización, manejo estadístico y edición donde se observa la generación de los diferentes tipos de roca que se pudieron interpretar y su disposición de manera generalizada.

8.8.4 Análisis cuantitativo de XRF. Para el análisis cuantitativo de elementos por XRF se determinó trabajar principalmente con los pozos Acae-10, Acae-12 y Loro-7A debido a que tienen un mayor número de datos y por ende mostrarán mejores resultados de las interpretaciones realizadas (Ver Anexo B). Después de realizar la definición de litotipos, se procedió a realizar esto. El objetivo de éste análisis es mostrar por medio de las relaciones elementales las posibles variaciones en los ambientes de sedimentación, mostrar como la variación en la relación de determinados elementos pueden ser evidentes para determinar la litología de las rocas y su relación con el ambiente de depositación de las mismas y por ultimo corregir de una manera generalizada los topes de los principales miembros (los topes fueron dados por ECOPETROL-

ICP) de la Formación Villeta, Cuenca de Putumayo que no correspondieron por lo interpretado en los litotipos y el análisis cuantitativo de los datos XRF.

En primer lugar, se normalizaron los datos que arrojó la técnica instrumental XRF, para ello se tomó cada dato y se dividió por el valor máximo del rango de datos de cada elemento, esto se realizó con Al, Ca, K, Si, V, y Zn, posteriormente se realizó la relación V/K, Si/Al, Si/K, Ca/K, Si/Ca, V/Al, Ca/Al, V/Si, V/Ca y Si/Zn.

La relación V/K puede evidenciar un aumento o disminución del nivel del mar ya que el Vanadio es un elemento que se relaciona con ambientes anóxicos de baja energía mientras que el Potasio a un ambiente transicional y continental, cuando esta relación es mayor a 1 se puede hablar de un ambiente marino, cuando es menor a 1 de un ambiente transicional o continental, todo esto debe ser correlacionado y coherente con la geología y estratigrafía de la formación. La relación Si/Al muestra si el contenido de Silicio es mayor, igual o menor al de Aluminio en una muestra, cuando es mayor a 1 predomina el contenido de Silicio, y cuando es menor a 1 predomina el contenido de Aluminio, lo mismo se puede interpretar de las demás relaciones. A continuación, se describe de manera generalizada los resultados más destacados del análisis cuantitativo de elementos que se realizó en los pozos Acae-10, Acae-12 y Loro-7A (Ver Anexo B).

8.8.4.1 Miembro Villeta C. La relación V/K en los tres pozos analizados en este Miembro no presenta una variación representativa que indique algún posible cambio en el nivel del mar al momento de la depositación de las rocas. La relación Si/Al muestra una ligera variación viéndose

en los pozos Acae-10 y Acae 12 valores que oscilan entre 0.7 y 1.1 mientras que en el pozo Loro7-A ésta relación disminuye a 0.5 evidenciando un posible cambio lateral facial de rocas con más contenido de Sílice a rocas con menos contenido de Sílice y esto se refleja en los litotipos. La relación Si/K en los pozos Acae-10 y loro-7A es similar (0.6 a 1), mientras en el pozo Ace-12 el valor es menor (0.2), esto evidencia que éste pozo tiene un contenido mayor de Potasio en comparación con los otros pozos.

8.8.4.2 *Miembro Villeta T*. La relación V/K en los pozos Acae-10 y loro-7A muestra un cambio abrupto en los valores en profundidad (10360 ft-10370 ft y 10320-10350ft respectivamente) de 0.7 a 0 y de 1.6 a 0.2 respectivamente, esto evidencia un cambio en el nivel del mar en la depositación de las rocas pasando posiblemente de un ambiente transicional a un ambiente marino. De nuevo se observa que la relación Si/K evidencia que el pozo Acae-12 tiene valores mayores de Potasio en comparación a los pozos Acae-10 y Loro-7A. La relación Si/Ca presenta valores entre 0 y 2 en todos los pozos lo cual muestra un alto contenido de Calcio y un bajo contenido de Silicio, esto se evidencia en los litotipos. Según los litotipos y los datos numéricos de XRF, los topes de este Miembro no están ajustados realmente a la litología ya que el Miembro T representa de manera general Arenas mientras que aquí se observan Carbonatos, Arcillas calcáreas en general.

PROFUNDIDAD	TOPES	V/K	Si/Al	PROFUNDIDAD	TOPES	V/K	Si/Al
A 10310	Tope Arena T	0	1.0322526	B 10300	Tope Arena T	0.8618279	1.105910309
10320		1.1304683	1.4808581	10310		1.0878864	1.477819105
10330		1.8040696	1.2495493	10320	1.2727863	0.695429127	
10340		0.9143053	1.4966941	10330	1.6458364	0.920621173	
10350		0.6896385	0.9980036	10340	0.5578468	0.804306533	
10360		0.763141	1.1228994	10350	0.2147773	0.86369892	
10370		0	1.0710685	10360	0.147802	0.753221867	
10380		0.7137153	1.0097176	10370	0.474765	0.719955996	
10390	Tope T-10	0	1.0699272	10380	Tope T10	0.474975	0.656418433
				10390		0.1489152	0.641283254

Figura 92. A) Pozo Acae-10. B) Pozo loro-7A. Ver apendice 1.

8.8.4.3 *Miembro Villeta B*. La relación V/K en los pozos Acae-10 y Loro-7A muestra un cambio abrupto en los valores en profundidad (10240 ft- 10260ft y 10270 ft- 10300 ft respectivamente) de 0.5 a 1.2 y de 0.2 a 1.08 respectivamente, esto evidencia un cambio en el nivel del mar en la depositación de las rocas pasando posiblemente de un ambiente transicional a un ambiente marino. La relación Si/K es menor nuevamente en el pozo Acae-12 (0.2 a 0.3) en comparación a los pozos Acae-10 y Loro-7A (0.8 a 1). La relación Si/Ca presenta valores entre 0 y 2 en todos los pozos lo cual muestra un alto contenido de Calcio y un bajo contenido de Silicio, esto se evidencia en los litotipos. Este miembro debería empezar a una profundidad mayor a la actual (aproximadamente de 20 a 40 ft más profundo) ya que la secuencia de carbonatos está mas demarcada hacia el tope del Miembro T como se observa en los litotipos, en el pozo Acae-12 se observa que los litotipos no se relacionan con los topes ya que en éste se describen Arenas arcillosas y Arcillas.

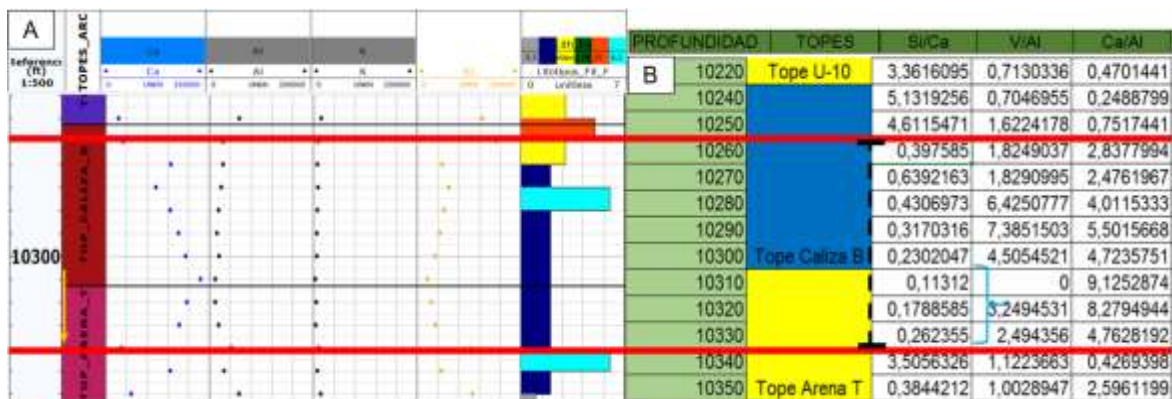


Figura 93. Miembro Villeta B, relación Si/Ca, valores menores a 1 indican alto contenido de Calcio. A) Litotipos XRF. B). Valores numéricos XRF.

8.8.4.4 *Miembro Villeta U*. Este miembro se conforma de diversos cambios en la composición de Calcio, Aluminio y Potasio en general, el contenido de Sílice es menor en relación a estos

elementos. Se observan Arcillas, Arenas calcáreas, Carbonatos y Arcillas calcáreas. La relación V/K muestra que en los pozos Acae-10 y Loro-7A (10110 ft – 10120 ft y 10180 ft – 10190 ft respectivamente) hubo un cambio en el nivel del mar favoreciendo la depositación de Carbonatos cambiando de base a techo de un ambiente transicional a un ambiente marino. En comparación con el miembro Villeta B la relación Si/Ca aumenta mostrando valores mayores de 2, esto evidencia un aumento en el contenido de Sílice. El tope U-shale cuyo espesor es de 20 ft en su máximo espesor no muestra rocas arcillosas sino rocas carbonatadas, por esto se sugiere redefinir el tope.

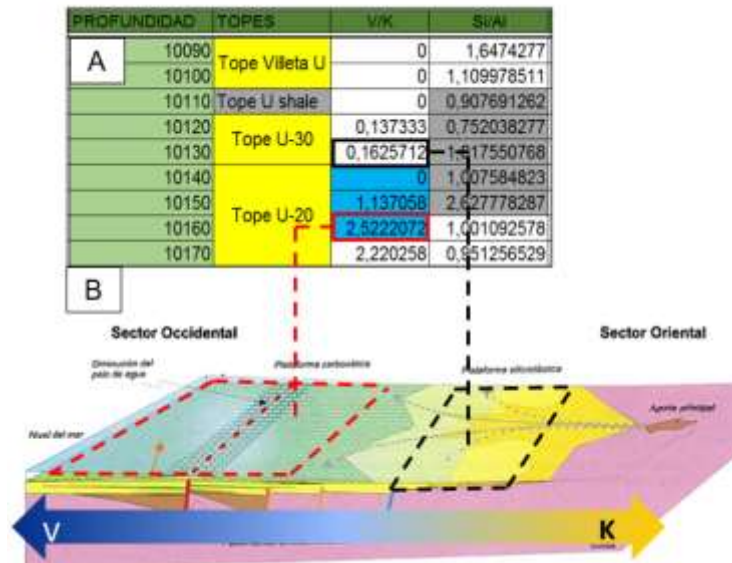


Figura 94. A) Análisis numérico de elementos por XRF. B). se observa la variación en el ambiente de sedimentación interpretado a partir de las relaciones V/K.

8.8.4.5 *Miembro Villeta A.* Este miembro es predominante de rocas carbonatadas, la relación V/K muestra una drástica variación en los pozos Acae-10 y Loro-7A, en las profundidades de 10030 a 10050 ft y 10060 a 10070 ft respectivamente (0.9 a 2.4 y 2.13 a 0 respectivamente) evidenciando un posible cambio en el ambiente de sedimentación afectado por subidas del nivel

del mar. Las relaciones Ca/K en los pozos es alta (valores de 2 a 11) y la relación Si/Ca es baja (valores menores a 1), esto muestra el alto contenido de Calcio y una disminución drástica en Sí en comparación al Miembro Villeta U. Este miembro debería comenzar a unos 20 a 30 ft más de profundidad ya que la secuencia de carbonatos se extiende a esas profundidades y se correlacionaría mejor con los topes inferiores. Se sigue observando un mayor contenido de Potasio por la relación Si/K en el pozo Acae-12 en comparación a los otros pozos. Los Valores de Aluminio en la mayoría de los datos son de cero (0) en el pozo Acae-10, posiblemente relacionado a errores en el resultado de XRF, por esto las relaciones Si/Al, Ca/Al, V/Al son nulas.

8.8.4.6 Miembro Villeta M. Según los valores de XRF, el tope Arena M2 no se relaciona con los resultados de los litotipos, aquí se observan carbonatos y Arenas Calcáreas. La relación V/K en los tres pozos muestran variaciones drásticas en profundidad, en el pozo Acae-10 las variaciones se observan de 9860 ft a 9870 ft (0.9 a 1.3), de 9940 ft a 9970 ft (0.6 a 1.7), en el pozo Acae-12 de 10030 ft a 10060 ft (0.2 a 1) y en el pozo loro-7^a de 9990 ft a 10000 ft (0.3 a 1.04), de 9930 ft a 9940 ft (1.2 a 0.4) y de 9890 ft a 9900 ft de profundidad (4.05 a 0.95). Estas variaciones muestran repetidas variaciones en el nivel del mar en un corto intervalo de tiempo mostrando cambios en la sedimentación lo cual se observa en los litotipos interpretados, generando variaciones de un ambiente marino a ambiente transicional y viceversa. De este miembro se observan diversos litotipos desde carbonatos hasta Arenas limpias, por tanto, la relaciones Si/Al, Ca/K, Si/K entre otros presentan diversas variaciones acordes a los litotipos interpretados, sin embargo, se observa que el contenido de Calcio en el pozo Acae-12 en el tope Caliza M2 es menor que los otros pozos (los valores son de 1 a 3) porque la relación Ca/K es

inferior (valores de 0 a 1). El contenido de Potasio en el pozo Acae-12 continúa alto respecto a los otros pozos.

8.8.4.7 *Miembro Villeta N.* Para este miembro no se observa variación importante en la relación V/K, por tanto, no se evidencia cambios en el nivel del mar y ambiente de sedimentación. Este miembro se compone principalmente de Arenas limpias y Arenas arcillosas. La relación Si/Ca en todos los pozos muestra valores muy altos, por el alto contenido de Sílice y bajo a nulo contenido de Calcio. Los valores de Potasio en el pozo Acae-12 siguen siendo altos, y esto se refleja en la relación Si/K donde es menor a 1 en comparación con los otros pozos. En general las relaciones Si/Al, V/Al, Ca/Al muestran valores concordantes con lo interpretado en los litotipos. En la siguiente figura se observa los posibles cambios del nivel del mar para el pozo Acae-10, esto se verifica en los litotipos interpretados, donde se cambia radicalmente de carbonatos a Arenas limpias y viceversa.

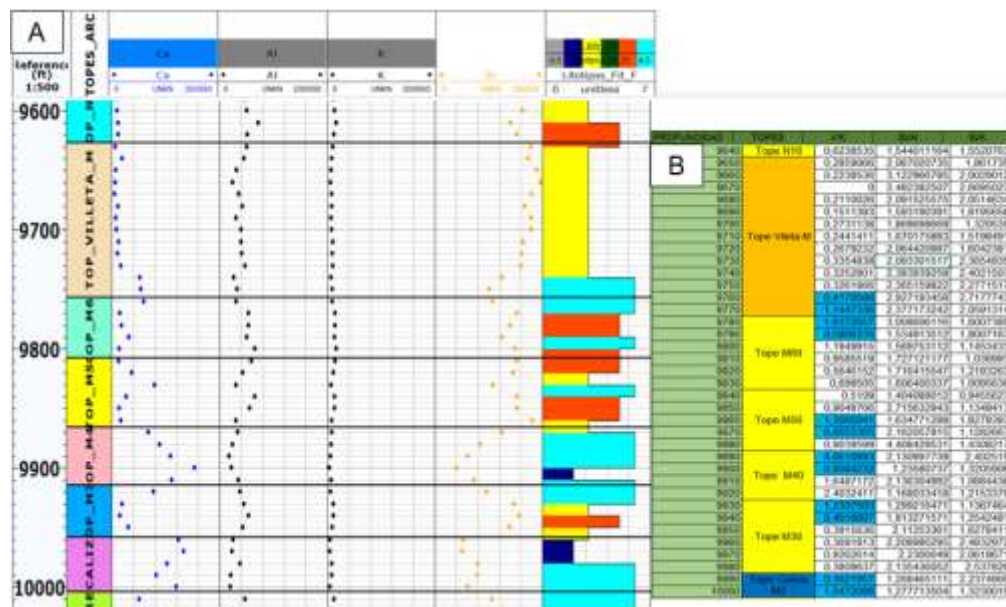


Figura 95. A) litotipos generados por XRF. B). Valores números de las relaciones elementales.

8.9 Integración de Drx, Xrf y Registros de Pozo

Para la integración de los datos es necesario Además de identificar predominios litológicos (Ver Figura 96), intervalos con alto potencial de TOC, se pueden validar ambientes involucrando el registro de Gamma Ray Espectral, el cual ayuda a identificar condiciones de oxidación o reducción de acuerdo al ambiente (Ver Figura 100).

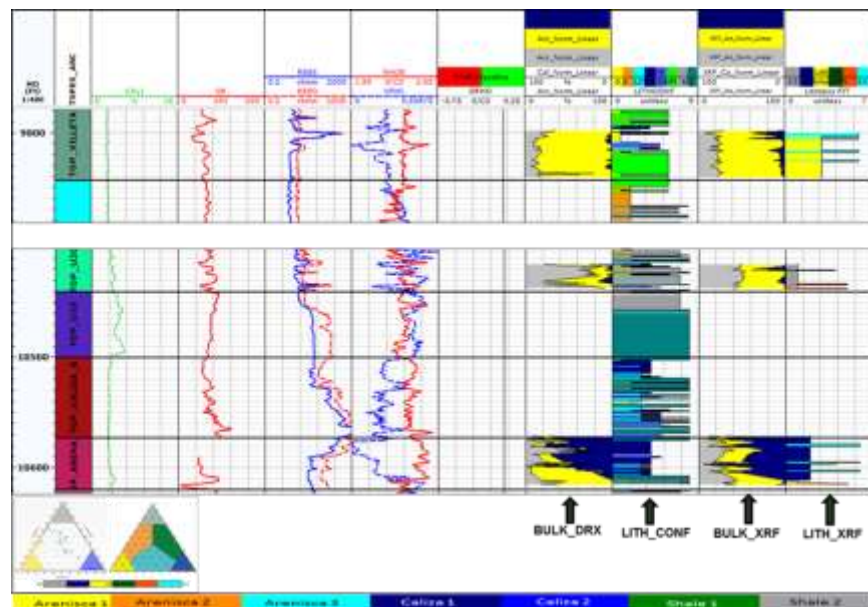


Figura 96. Se comparan los resultados obtenidos del DRX y la información relacionada a fluorescencia de rayos X (XRF).

En base a los resultados se comprueba que estas dos herramientas tanto DRX como el XRF son complementarias, ya que además que permite validar los tipos de roca, permite identificar características adicionales como el TOC y el grado de fragilidad de la roca.

Las equivalencias definidas en cuanto a los tipos de roca permiten dilucidar que la resolución de la herramienta de XRF, es un elemento que puede ayudar a definir de manera gruesa litologías si además involucramos la incertidumbre de la posición en pozo de las muestras de zanja.

Tabla 13. Definición de Litotipos a partir de DRX y XRF.

LITOTIPOS XRF	DESCRIPCIÓN
Litotipo 1	Arcillas
Litotipo 2	Carbonatos
Litotipo 3	Sílice
Litotipo 4	Arcilla-Carbonato
Litotipo 5	Arcilla- Sílice
Litotipo 6	Carbonato- Sílice

Se definieron 6 tipos de roca a partir de la data de XRF. Ya que se cuenta con información de núcleos se pretende discretizar la curva de tipos de roca con el fin de tener un mayor detalle por pozo de tal manera que se logre tener un mayor control por ende se procede a definir tipos de roca a partir de DRX.

Posteriormente se definieron 8 litotipos empleando distintas combinaciones de gráficos para su separación. En conclusión, se emplearon 3 graficas que permiten separar los diferentes tipos de roca (ver Figura 97):

- Densidad vs Neutrón (NPHI vs RHOB)
- Neutron vs Gamma Ray (GR vs NPHI)
- Resistividad vs Gamma Ray (GR vs RESD)

De esta manera se logran discriminar clúster o familias de litologías asociadas al comportamiento físico-químico de la roca. La labor de integración se desarrolla en torno a los registros de pozo y se valida con la información proveniente de núcleos de perforación, tal como: DRX. El cual cabe resaltar que solo un pozo (Hormiga-1X) poseía dicha información (Ver Figura 96).

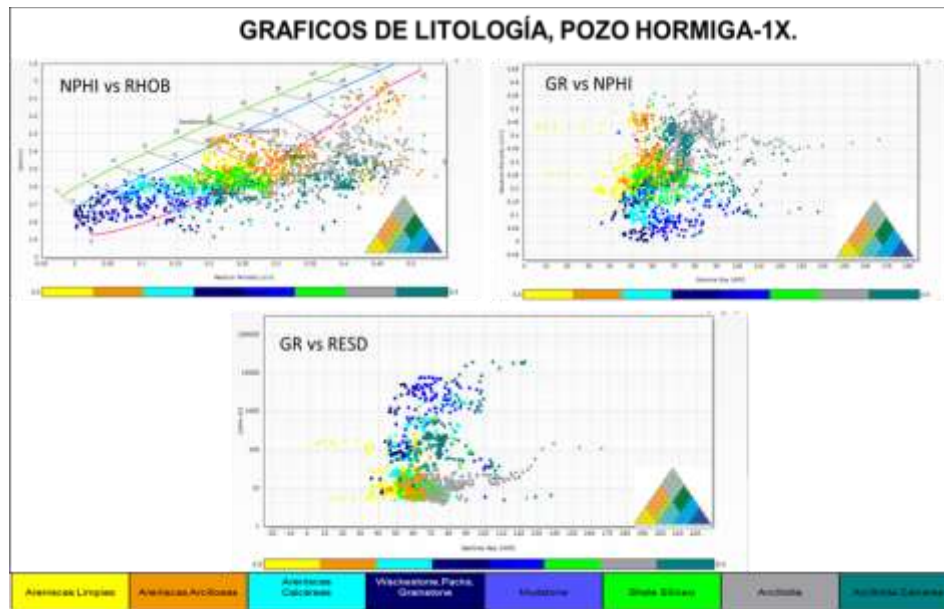


Figura 97. Gráficos de litología elaborados para definir litotipos basados en la respuesta de los registros. Las principales discriminantes fueron los registros: Gamma Ray, Neutrón y Densidad.

Una vez identificados se compilan en un diagrama composicional ternario donde se involucra en cada uno de los ejes carbonato (azul), sílice (amarillo) y arcillas (gris), de esta manera se determina el ambiente de depositación, calidad del reservorio de manera cualitativa (Ver Figura 98) y su correspondiente descripción litológica (Ver Figura 99).



Figura 98. Resumen de los tipos de roca asociados y discriminados desde el punto de vista composicional. De igual manera se incorpora la tabla de colores de acuerdo al diagrama ternario para los campos Acae, Loro y Hormiga.

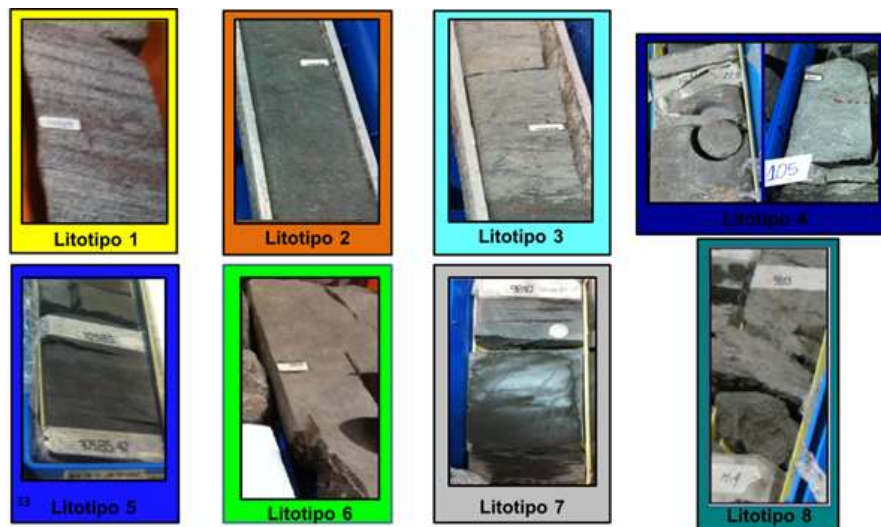


Figura 99. Litotipos definidos para los Campos Acae, Hormiga y Loro: Litotipo 1) Areniscas Limpias; Litotipo 2) Areniscas Arcillosas; Litotipo 3) Areniscas Calcáreas; Litotipo 4) Wackestone, Packstone, Grainstone; Litotipo 5) Mudstone; Litotipo 6) Shale Silíceo; Litotipo 7) Arcillolita; Litotipo 8) Arcillolita Calcárea.

Identificación de Ambientes de Sedimentación a Partir de Registro Gamma Ray Espectral

Además de permitir validar los tipos de roca, también se pueden identificar los intervalos asociados a zonas de máxima inundación teniendo en cuenta el Gamma Ray espectral. A partir de ciertos datos se identificaron zonas con altos contenidos en TOC asociados a zonas de máxima inundación.

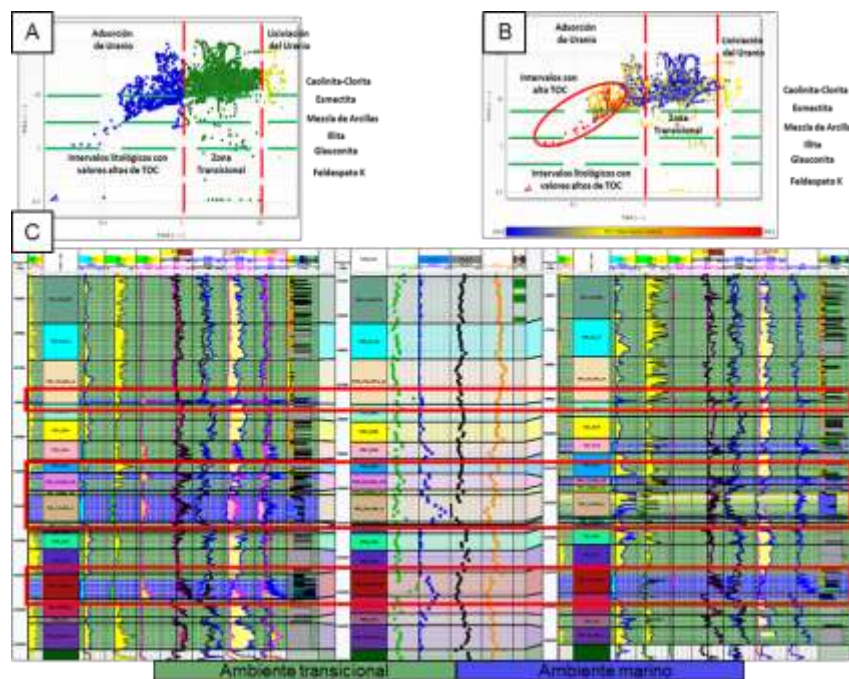


Figura 100. A) Grafico Th/K vs Th/U donde se identifican las zonas de adsorción de Uranio, transicionales y de aporte continental B) Grafico Th/k vs Th/U donde se identifican los mismos dominios ambientales que en la gráfica A, pero discriminado por datos de TOC. C) Integración de datos de Gamma Ray espectral, litotipos, registros de pozo y TOC construido a partir de elementos.

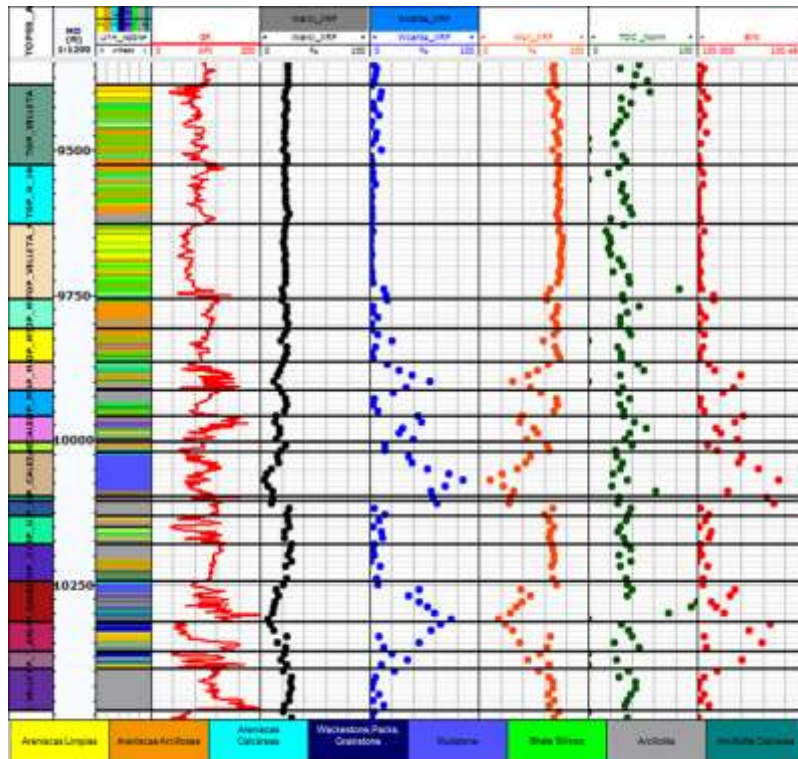


Figura 101. Construcción de la fragilidad a partir de datos mineralógicos (Sílice, Calcio, Arcillas y TOC).

Para poder llevarla a cabo se aplica la ecuación de Chan et al. (2001), para el cálculo de la curva de fragilidad:

- $\text{Brittleness} = \frac{\text{Carbonato} + \text{Silice}}{\text{Carbonato} + \text{Silice} + \text{Arcillas} + \text{TOC}}$

Para corroborar la efectividad del amarre roca-registro se validan los litotipos empleando la data disponible para todos los Campos, con la finalidad de identificar distribuciones particulares asociadas a respuestas de registros permitiendo optimizar la interpretación de los litotipos a través de diagramas ternarios y los gráficos litológicos.

De acuerdo a los análisis clúster y el comportamiento de los registros de pozo se utilizaron Gamma Ray, densidad, neutrón y Resistividad. El análisis estadístico permite ver la distribución de las propiedades y diferentes escenarios los menos probables (Percentil 10), escenario más probable (Percentil 50) y el escenario más optimista (percentil 90), de esta manera analizar las tendencias de los registros para caracterizar de manera individual cada litotipo (Ver Figura 105).

En el estudio se definieron ocho (8) litotipos con base en la respuesta de los registros de pozo y la información de núcleos de perforación, asociados a tres grupos litológicos principales: Litotipos de afinidad siliciclástica, litotipos de afinidad calcárea y litotipos de afinidad arcillosa.

Existen algunos factores para tener en cuenta:

- La resolución, la escala vertical y horizontal de los registros.
- Espesor de las capas de roca.
- Calidad del hueco.
- Tipo de lodo con el que fue perforado el pozo.
- La corrida en la cual se tomaron los registros.

Finalmente, una vez se lleva esta información a los demás pozos se realiza en primera instancia a través del análisis clúster, ya que los centroides han sido definidos a partir de datos de XRF y DRX.

Gráficamente, para ver la distribución de los litotipos de acuerdo a la composición se puede representar mediante diagramas ternarios donde la distribución de los litotipos a partir del

análisis de DRX (Cuarzo, Carbonatos, Arcillas principalmente) se observan las distribuciones de los 8 litotipos definidos marcando cada grupo una familia dominante (Ver Figuras 102 a 104).

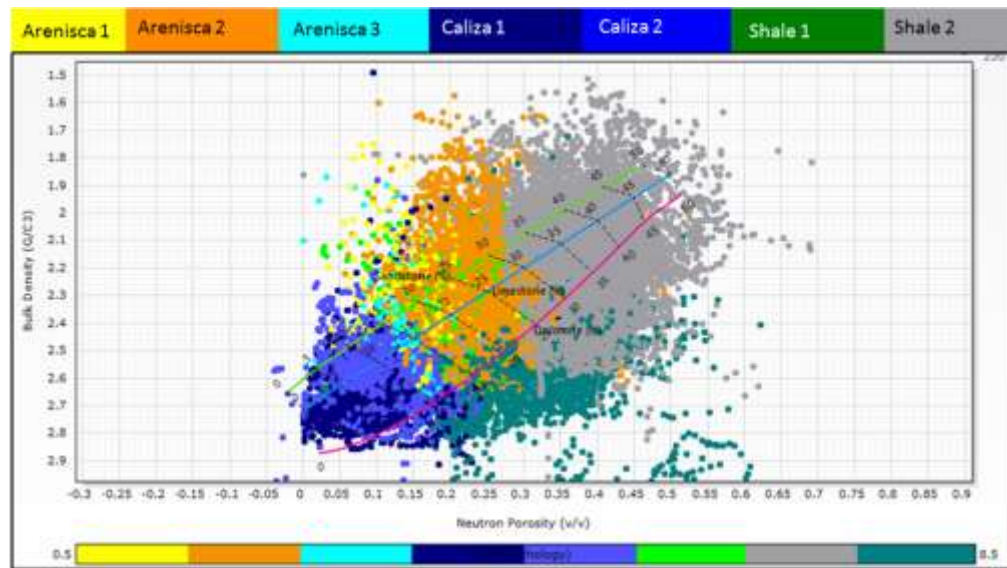


Figura 102. Gráfico tipo clúster Densidad vs Neutrón con los litotipos interpretados. De los campos Acae, Loro y Hormiga.

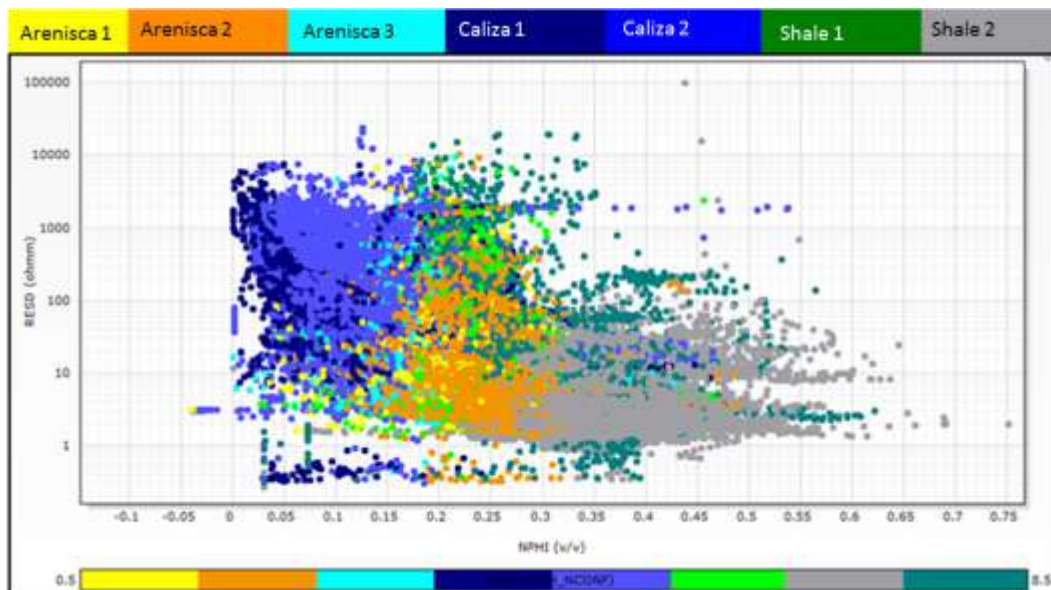


Figura 103. Gráfico tipo clúster RESD vs NPHI con los litotipos interpretados. De los campos Acae, Loro y Hormiga.

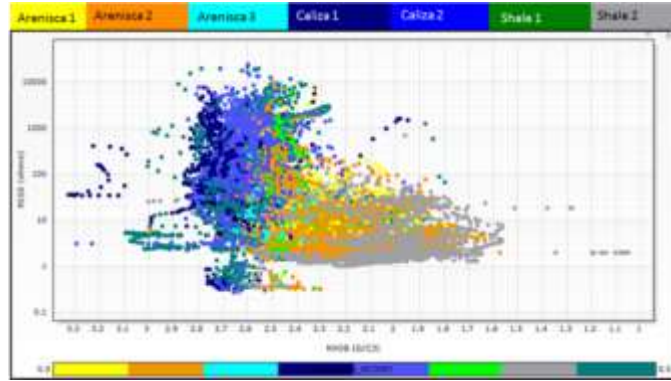


Figura 104. Gráfico tipo clúster RESD vs RHOB con los litotipos interpretados. De los campos Acae, Loro y Hormiga.

LITOTIPO LITH_CONF	GAMMA RAY GR	DENSIDAD RHOB	NEUTRON NPHI	RESISTIVIDAD RESD
1 (Arcillas Limpias)	P10:34,7 P50:49,3 P90:61,05	P10:2,4 P50:2,57 P90:2,59	P10:0,17 P50:0,23 P90:0,32	P10:6,5 P50:10,18 P90:138,2
2 (Arenas Arcillosas)	P10:50,7 P50:59,7 P90:71,5	P10:2,30 P50:2,45 P90:2,56	P10:0,21 P50:0,28 P90:0,42	P10:5,7 P50:7,9 P90:17,2
3 (Areniscas Calcareas)	P10:48,6 P50:55,7 P90:75,6	P10:2,56 P50:2,61 P90:2,66	P10:0,08 P50:0,13 P90:0,19	P10:9,6 P50:27,0 P90:549,7
4 (Wackstone Packstone grainstone)	P10:44,4 P50:50,3 P90:56,3	P10:2,66 P50:2,75 P90:2,80	P10:0,001 P50:0,040 P90:0,17	P10:8,8 P50:245,4 P90:1837,7
5 (Mudstone)	P10:56,0 P50:66,4 P90:87,0	P10:2,62 P50:2,68 P90:2,75	P10:0,040 P50:0,095 P90:0,18	P10:15,8 P50:1751,6 P90:5040,7
6 (Shale Silíceo)	P10:51,5 P50:59,4 P90:73,1	P10:2,50 P50:2,55 P90:2,59	P10:0,17 P50:0,23 P90:0,27	P10:6,1 P50:8,4 P90:14,9
7 (Arcillolita)	P10:68,2 P50:75,5 P90:92,8	P10:2,30 P50:2,47 P90:2,63	P10:0,28 P50:0,38 P90:0,45	P10:5,02 P50:9,5 P90:19,6
8 (Arcillolita Calcareo)	P10:58,5 P50:73,5 P90:95,9	P10:2,48 P50:2,60 P90:2,69	P10:0,19 P50:0,32 P90:0,41	P10:44,0 P50:187,5 P90:1846,9

Figura 105. Análisis estadístico de los principales registros de pozo para la Formación Villeta, pozo Hormiga-1X. En la figura se observa el análisis estadístico (percentiles P10, P50 y P90) de los principales registros de pozo discriminantes y por Litotipo.

Template Final

Finalmente, después de realizar todos los procesos anteriormente mencionados, se realiza un modelo litoógico para la Formación Villeta en la cuenca de Putumayo en el pozo Hormiga-1X, todos los datos e información de los demás pozos se correlacionaron y se migraron a este pozo porque es el que más datos tiene (Núcleos de perforación, Registros de Pozo, DRX y XRF).

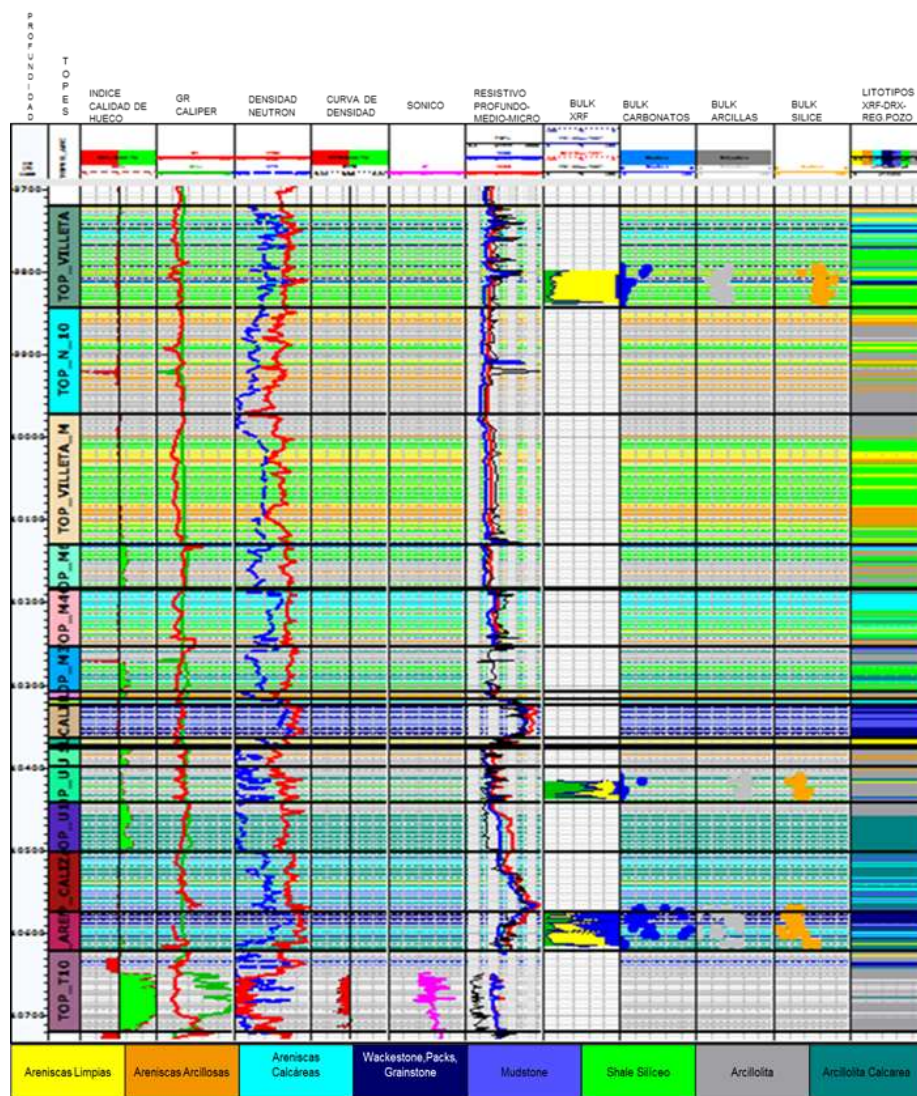


Figura 106. Template Análisis. La figura muestra el set de datos empleados para la integración de la información de pozo para la definición de litotipos en el pozo Hormiga-1X.

9. Conclusiones

El ciclo sedimentario de la formación Villeta en la cuenca de Putumayo, incluyendo las secuencias T y U, fue depositado en respuestas a variaciones en el nivel del mar durante el Cretácico. Estos ciclos tienden a profundizar hacia el tope de la formación. Estos cambios se ven reflejados en la variación de la relación V/K del análisis cuantitativo de XRF en los pozos trabajados.

De acuerdo al análisis cuantitativo de XRF en los pozos Acae-10, Acae-12 y Loro-7A se recomienda ajustar el tope Arenas T-10 del miembro Villeta T, el tope del Miembro B, el tope U-shale del Miembro Villeta U, y el tope del miembro Villeta A. En general, en algunos casos los topes dados por ECOPETROL-ICP no se ajustan a los litotipos y se recomienda ajustarlos para próximos trabajos que se realicen en la zona.

Las areniscas reservorio T y U se depositan luego de caídas del nivel del mar al inicio de los ciclos T y U respectivamente. Estas areniscas son de tipo transgresivo, depositándose durante el TST (transgressive system tract) de cada ciclo. Las zonas proximales de T y U se ubican hacia el este de la Cuenca.

La Arenisca N fue derivada de la Cordillera Central, en la parte oeste de la cuenca de Putumayo.

El yacimiento presenta una alta heterogeneidad sedimentológica, en donde se mezcla diferentes composiciones de roca, de afinidad arcillosa y calcáreas, pasando por rocas siliciclásticas, depositadas en diferentes ambientes de depositación. Esto se evidencia en los litotipos que se generaron a partir de la integración de los registros de pozo, XRF, y núcleos de perforación.

Según lo interpretado en los núcleos de perforación junto con los registros de pozo y la fluorescencia de rayos X (XRF) el ambiente de sedimentación para la Formación Villeta tiene algunas variaciones, en primer lugar se pudo interpretar un ambiente Estuarino influenciado por mareas, posteriormente el ambiente de sedimentación varía desde una Plataforma Clástica Somera hacia una Plataforma Carbonatada, en la Plataforma Clástica somera se observa la variación que va desde el Shoreface superior, medio e inferior hasta la parte offshore, esto se evidencia en lo analizado en los núcleos de perforación. En general se observa el cambio de un ambiente marino pasando a un ambiente transicional.

Respecto a información de núcleos solo fue posible trabajar con el pozo Hormiga-1X (110.58 Pies de núcleos) en el intervalo de interés.

El análisis cuantitativo de XRF fue de gran importancia para comprobar los resultados de los litotipos ya que por medio de las relaciones elementales se evidenció la variación concordante de los mismos en la secuencia estratigráfica, se observaron algunos cambios laterales de facies en los pozos entre otros aspectos significativos.

Se realizó un cálculo de arcillosidad para poder construir algunas de las curvas dañadas o que no se encontraban dentro del set básico (método de Gamma Ray Lineal).

Se identificaron 8 litotipos a partir de información de DRX, XRF y registros de pozo los cuales son: Areniscas limpias, Areniscas Arcillosas, Areniscas Calcáreas, Mudstone, Shale Silíceo, Arcillolitas, Arcillolitas Calcáreas.

Dentro de las zonas con alto potencial petrolífero se resalta, Tope N10, Tope Villeta M, Tope de Calizas M, Tope de Calizas A, Tope de Calizas B, Tope de Arena T y Tope T10 principalmente.

Correlaciones basadas en tendencias mostradas por el registro Gamma Ray no son comparables con correlaciones basadas en análisis secuencial y litológico a partir de núcleos de perforación, los cuales definen intervalos litológicos y parasecuencias genéticamente relacionados.

En general, en este trabajo se pudo mostrar que las técnicas de análisis instrumental pueden ayudar en gran manera a la exploración de un campo petrolero junto con las herramientas tradicionales de exploración cuando la información de dichas herramientas es incompleta haciendo más eficiente y económico la exploración en una zona de interés petrolífero.

Referencias Bibliográficas

Abraham, J. 2009 Estudio de los mecanismos de cristalización y maduración de fosfatos de calcio en medio biológico usando radiación de sincrotrón. Universidad Nacional de Córdoba.

Agencia Nacional De Hidrocarburos (ANH), 2009 Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Cartografía geológica de 51.267,45 km² en la Cuenca Caguán-Putumayo a partir de sensores remotos a escala 1:100.000 y 739 km² con control de campo a escala 1:50.000 en las planchas IGAC 413 y 414 departamentos de Meta, Caquetá, Putumayo: Bogotá, Agencia Nacional de Hidrocarburos..

Agencia Nacional de Hidrocarburos. 2010 Catálogo Open Round. Bogotá, Colombia.

Agencia Nacional de Hidrocarburos. 2011 Geology and hydrocarbon potential. Caguán and Putumayo Basins (Vol. 4.). (F. Cediél, Ed.). Medellín, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT.

Aguilera, R. 2000. Modelos de Generación y Migración de Hidrocarburos en la Cuenca del Putumayo. RA Geología E.U. A.A. 361077 Bogotá, Colombia. roberto_aguilera@rageologia.org.

Assaad F. 2009 Field methods for petroleum geologists.

Bassiouni, Z. 1994 Theory, measurement, and interpretation of well logs.

Bayona, G. A., García, D. F., y Mora, G. 1994 La Formación Saldaña: Producto de la Actividad de Estratovolcanes Continentales en un dominio de Retro-Arco. In F. Etayo-Serna (Ed.), Estudios Geológicos del Valle Superior del Magdalena. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. pp. 1-21.

Betancourth, D., Gómez J., Mosquera, J., Mejía, L. 2010 Análisis por difracción de rayos x de rocas provenientes de región esmeraldífera. Universidad Tecnológica de Pereira. Scientia et Technica Año XVI, No 44.

Boyd, R., Dalrymple, R.W. and Zaitlin, B.A. 2006 Estuarine and incised-valley models. H.W. Posamentier, H.W. and R.G. Walker (Eds) Facies models revisited: SEPM Special Publication, v. 84, pp. 171-237.

Caceres, H., Teatin, P. 1985 Cuenca del Putumayo, Provincia Petrolera Meridional de Colombia. II Simposio Bolivariano: Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. Memorias, Vol. I, Bogota, Colombia. p. 1-80.

Cediel F., Mojica J., Macía, C. 1981 Las formaciones Luisa, Payandé y Saldaña sus Columnas Estratigráficas Características. Geol. Norandina, 3:11-19. Bogotá.

- Chan, F., Qu, Q. and Frenier, W. 2001A Novel Self-Diverting-Acid Developed for Matrix Stimulation of Carbonate Reservoirs. Society of Petroleum Engineers. Symposium on Oilfield Chemistry held in Houston, Texas, Estados Unidos. Schlumberger LTD.
- Clifton, H. E. 1983 Discrimination between subtidal and intertidal facies in pleistocene deposits, Willapa bay, Washington. *Journal of Sedimentary Petrology*.
- Colmenares, S. K. Murillo, J. T. 2013 Manual de laboratorio, geología de hidrocarburos. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Geología.
- Emery, D. 1996. and Myers, K. J. *Sequence Stratigraphy*. London: Blackwell Science, pp. 297.
- Farrell, K. M., Harris, W. B., Mallinson, D. J., Culver S. J., Riggs, S. R., Pierson, J., Self-Trail, J. M. and Lutter J. C. 2012 Standardizing texture and facies codes for a process-based classification of clastic sediment and rock. *Journal of Sedimentary Research*. V.82, 364-378.
- Fluid Inclusion Technologies (FIT). 2016 Resultados de análisis por espectrometría de fluorescencia de rayos X. Informe confidencial para ECOPETROL-ICP. 2217 N. Avenida Yellowod, Broken Arrow, Estado de Oklahoma, Estados Unidos.
- GEOESTUDIOS. 1993 Análisis bioestratigráficos efectuados por BIOSS Ltda., Anticlinal de Romerillo y río Conejo. Informe Interno INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.

Grosse, E. 1935 Acerca de la geología del sur de Colombia I. Informe rendido al Ministerio de Industrias sobre un viaje al Huila y Alto Caquetá. CEGOC, 3: 31-137. Bogotá.

Hacq, U., Hardenbol J., Vail P. 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. Science, 6 March 1987, Vol. 235 no. 4793. pp. 1156 – 1167.

Instituto Colombiano del petróleo. 2016 Archivos y material bibliográfico interno..

Jaramillo, L., Escovar, R., Vesga, C. J. 1980. Edades K/Ar en rocas con alteración hidrotermal asociadas al sistema de pórfido de cobre y molibdeno de Mocoa, Intendencia del Putumayo, Colombia. Geol. Norandina 1:11-18. Bogotá.

Julivert, M. 1968 Lexique Stratigraphique International. Amerique Latine, Colombie (premiere partie) - Precambrien, Paleozoique, Mesozoique et intrusions d'age Mesozoique-Tertiaire. Centre Nat. Rech. Sci.,5(4a):1-651. Paris.

Limon, L. 2012 Espectrometría y difracción de rayos X, generalidades y algunas aplicaciones. Boletín de la asociación mexicana de geólogos del petróleo (AMGP).

Martinez, D. Gil Novoa, A. J. Barón O. D. UPTC. 2006 Espectrometría De Fluorescencia De Rayos X, revista colombiana de física, vol. 38, no. 2.

- Melendez, C. O., Camacho A. 2009 Espectrometría de fluorescencia de rayos X. Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Químicas.
- Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, A., Llovet, X. 2010. Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Dipòsits Minerals, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona, Barcelona.
- Miley, R., McGIRK, D. 1948 Geological report on portions of the Orito Concession, Comisaria de Putumayo. Texas Petroleum Company, Report 345. Bogotá. Colombia.
- Mora, A., Venegas, D., And Vergara Nexos Aara, L. 1998 Estratigrafía del Cretácico Superior y Terciario inferior en el sector Norte de la Cuenca del Putumayo departamento del Caquetá, Colombia. Geología Colombiana, Santafé de Bogotá.
- Mora, A., Mantilla, M., Freitas, M. 2010 Cretaceous Paleography and Sedimentation in the Upper Magdalena and Putumayo Basins, Southwestern Colombia. Article # 50246, International Conference and Exhibition AAPG, Rio de Janeiro, Brazil.
- Mutti, E., Rosell, J., Allen, G. P., Fonnesu, F., Sgavetti, M. 1985 The Eocene Baronia tide dominated delta-shelf system in the Ager Basin. In: Mila, M.D., Rosell, J. (Eds.), Excursion Guidebook, 6th European Regional Meeting. International Association of Sedimentologists, Lleida, Spain, pp. 579–600.

Nichols, G. 2006. *Sedimentology and Stratigraphy*. Blackwell Publishing. Oxford.

Núñez, A. 2003 Reconocimiento geológico regional de las planchas 411 La Cruz, 412 San Juan de Villalobos, 430 Mocoa, 431 Piamonte, 448 Monopamba, 449 Orito y 465. Cartografía geológica cuenca Caguán-Putumayo 110 Churuyaco. Departamentos de Caquetá, Cauca, Huila, Nariño, Putumayo: INGEOMINAS.

PEMEX. 2000 Informe Registros geofísicos.

Posamentier, H.W., Allen, G.P. 1999 Siliciclastic sequence stratigraphy: concepts and applications. *SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology* no. 7, pp. 210.

Puig, T. P. 2015 La difracción de rayos x aplicada a las ciencias de la tierra. Instituto de Geología & LANGEM (Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía), UNAM. IV Reunión Nacional de Difractometría. Acapulco, Guerrero, México.

Ramon, J. C. 1996 Oil geochemistry of the Putumayo Basin, *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro* - Vol. 1 Núm. 2.

Rodríguez, G., Zapata, G., Velázquez, M. E.; Cossio, U.; Londoño, A. C. 2003 Geología de las planchas 367, 368, 389, 390, 391 y 414. INGEOMINAS. Bogotá. pp. 165.

Romeuf, N., Aguirre, L., Soler, P., Feraud, G. y Jaillard, E. 1995 Middle Jurassic Volcanism in the Northern and Central andes. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 22, 2. Santiago de Chile, Chile. pp. 245-259.

Rosello, E. A., Nevistic V. A., Covellone G., Bordarampé C. P., Salvay R.O., Araque L. y Giraudo R. E. 2006. The pre-Aptian records of the Putumayo Basin (Colombia): an alternative HC exploration scenario in a mature basin, IX Simposio Bolivariano, Petroleum Exploration in the Subandean Basins (Cartagena, Colombia).

Schlumberger. 1989 Principios/Aplicaciones de la interpretación de registros.

Scopelliti, G., Bellanca A., Neri, R., Baudin, F., and Coccioni, R. 2006. Comparative high-resolution chemostratigraphy of the Bonarelli Level from the reference Bottaccione section (Umbria–Marche Apennines) and from an equivalent section in NW Sicily: Consistent and contrasting responses to the OAE2. *Chemical Geology*.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). 2015 Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100.000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional identificados por el servicio geológico colombiano grupo 2: zonas sur a y sur b. Bogotá, D.C.

Skoog D. A., Leary J. J. 2008. Análisis instrumental, Sexta edición, McGraw-Hill, España.

RPS QUALITAS. 2012 Fluorescencia de rayos x de dispersión de energía. Informe técnico.

Consultoría química y ambiental. Disponible en: <http://www.rpsqualitas.es/presentacion/presentacion.php>.

Vasquez, M. 2007 Mafic magmatism in the Eastern Cordillera and Putumayo Basin, Colombia:

Causes and consequences, PhD thesis, Universität Potsdam.

Vazquez, Y., Tuesta E. 2015 Aplicación de la técnica de difracción de rayos x (drx) en la

industria minera. Laboratorio de Caracterización Mineralógica Buenaventura Ingenieros - BISA.

Apéndice

Apéndice A. Resultados Difracción de Rayos X

Apéndice B. Análisis Cuantitativo de Xrf