

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS PROFESIONAL

**ESTUDIO PETROMINERALÓGICO DE LAS ARENISCAS DE LA
FORMACIÓN FARRAT EN LA ZONA DE BAÑOS DEL INCA Y
LLACANORA - CAJAMARCA**

Presentado por:

Bach. José Oscar Prado Cachay

Asesor:

MCs. Crispín Zenón Quispe Mamani

CAJAMARCA – PERÚ

2018

AGRADECIMIENTOS

Ante todo, quisiera agradecer a mi familia. A mis padres, que con muchos esfuerzos me han dado su apoyo durante los años de universidad.

A los docentes de Geología de la Universidad Nacional de Cajamarca por su apoyo, amistad y enseñanza durante la carrera. A todos mis amigos que sin esperar nada a cambio compartieron conocimientos, alegrías y tristezas y me brindaron su apoyo para poder realizar la tesis.

Al MCs. Mario Díaz por su apoyo en el análisis petrográfico de las secciones delgadas que se presentan en la tesis.

A todos ellos, Muchas Gracias.

DEDICATORIA

A Dios Por darme las fuerzas necesarias para seguir luchando por mis metas e ideales.

A mis abuelos que están en el cielo, a mi madre Lusmirian Cachay Sánchez y a todas las personas que me dan diferentes motivos para seguir adelante, por brindarme en cada momento su apoyo, cariño y esas palabras sabias que nunca voy a olvidar.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	3
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS	3
2.2. BASES TEÓRICAS.....	4
2.2.1. Estratigrafía	4
2.2.1.1. Estrato	4
2.2.1.2. Estratificación	4
2.2.1.3. Laminación	5
2.2.1.4. Medida de la estratificación	5
2.2.1.5. Formación	6
2.2.2. El Tiempo en Geología.....	6
2.2.2.1. Edades relativas	6
2.2.2.2. Unidades formales definidas por su edad	7
2.2.3. Columna estratigráfica.....	7
2.2.3.1. Representación grafica.....	7
2.2.3.2. Elección de escala.....	8
2.2.3.3. Estructuras sedimentarias	8
2.2.4. Petrografía.....	9
2.2.5. Rocas sedimentarias clásticas	9
2.2.5.1. Areniscas.....	10
2.2.5.2. Principales componentes de las areniscas.....	10
2.2.5.3. Clasificación de las areniscas.....	13
2.2.6. Análisis de procedencia.....	18
2.2.6.1. La composición de los depósitos clásticos	18
2.2.6.2. Factores que afectan la composición de la mineralogía detrítica	19
2.2.6.3. Interpretación del ambiente tectónico	22
2.2.6.4. Tipos de procedencia	22
2.2.6.5. Tipologías de cuarzo en función del tamaño de grano	27

	Pág.
2.2.6.6. Influencia de la litología del área fuente en el contenido de las diferentes tipologías de cuarzo	27
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	28
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	29
3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	29
3.1.1. Geográfica	29
3.1.2. Política	29
3.1.3. Accesibilidad	29
3.1.4. Clima	29
3.1.5. Vegetación	30
3.2. PROCEDIMIENTOS	31
3.2.1. Metodología	31
3.2.1.1. Etapa preliminar al trabajo de campo	31
3.2.1.2. Etapa de campo	31
3.2.1.3. Etapa de gabinete	31
3.2.2. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	32
3.2.3. Técnicas	32
3.2.3.1. Elaboración de secciones delgadas y estudio petrográfico	32
3.2.4. Instrumentos y equipos	32
3.3. GEOLOGÍA LOCAL	33
3.3.1. Formación Farrat	33
3.4. PETROLOGÍA	34
3.5. MARCO ESTRATIGRÁFICO	34
3.5.1. Segmento 1	35
3.5.2. Segmento 2	36
3.5.3. Segmento 3	36
3.6. MARCO PETROGRÁFICO	39
3.6.1. Muestra N° 1	39
3.6.2. Muestra N° 2	40
3.6.3. Muestra N° 3	41
3.6.4. Muestra N° 4	42
3.6.5. Muestra N° 5	43

	Pág.
3.6.6. Muestra N° 6	44
3.6.7. Muestra N° 7	45
3.7. ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	46
3.7.1. Columna estratigráfica.....	46
3.7.2 Clasificación de las areniscas y análisis de procedencia	46
3.7.2.1 Clasificación las areniscas	47
3.7.2.2 Procedencia	48
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	50
4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
4.1.1. Análisis de la clasificación de las areniscas	50
4.1.2. Análisis de la procedencia.....	50
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	52
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
5.1. CONCLUSIONES	54
5.2. RECOMENDACIONES.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de las rocas sedimentarias clásticas según la escala propuesta por J. A. Udden y C. K. Wentworth.....	10
Tabla 2. Valores correspondiente a cada tipo de roca realizada tomando en cuenta la clasificación de Pettijohn 1975.....	17
Tabla 3. Cuadro climatológico de Cajamarca 2016.....	30
Tabla 4. Cuadro de variables.	32
Tabla 5. Categorías de conteo aplicadas en el análisis petrográfico.....	46
Tabla 6. Contenido porcentual de cuarzo feldespato y líticos.	47
Tabla 7. Cálculos modales para los diagramas triangulares QtFL y QmFLt de Dickinson et al. (1983) según las categorías de granos presentes en las areniscas de la Formación Farrat.....	48
Tabla 8. Contenido porcentual de cuarzo total, feldespatos y líticos, cuarzo monocristalino feldespatos y líticos totales.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Rasgos de los estratos y medidas de la estratificación. Para un estrato concreto se marcan: el techo, el muro, el espesor. Los posibles ordenamientos internos y la medida de su posición espacial (dirección y buzamiento) (Vera, 1994).....	5
Figura 2. Ejemplo de columna estratigráfica (Vera, 1994).....	8
Figura 3: Símbolos para las estructuras sedimentarias comunes para su uso en un registro gráfico. Tomado, traducido y modificado de (Tucker, 2003).....	9
Figura 4 . Clasificación de las areniscas según Pettijohn (1975) tomado y traducido de (Nichols, 2009).....	17
Figura 5. Campos composicionales de los distintos tipos de procedencia de arenas en diagramas triangulares QtFL (cuarzo total-Feldespatos-Fragmentos de roca lábiles) y QmFLt (cuarzo monocristalino-Feldespatos-Total de granos lábiles). Modificado de Dickinson et al. (1983). Tomado de Arribas (2010).....	24
Figura 6. Cobertura vegetal en el centro poblado Shaullo compuesta por eucaliptos y pinos, ubicadas al flanco izquierdo de afloramiento	30
Figura 7. Contacto entre la formación Carhuaz y la base de la Formación Farrat.	34
Figura 8. Fotografías de areniscas blancas y limoarenitas de la Formación Farrat.	34
Figura 9. Segmentos donde se levantaron columnas estratigráficas y toma de muestras.....	35
Figura 10. Vista panorámica de la base de la Formación Farrat (segmento 1) 35	
Figura 11. Vista panorámica de la parte media de la Formación Farrat (segmento 2)	36

Figura 12. Roca con estructura sedimentaria, tipo laminación paralela.	36
Figura 13. Vista panorámica de la parte techo de la Formación Farrat (segmento 3).....	37
Figura 14. Estratos con estructura sedimentaria, tipo estratificación sesgada.	37
Figura 15. Grafico que muestra la columna estratigráfica de la Formación Farrat y fotografías de los segmentos.....	38
Figura 16. Fotomicrografías 1 a 2. 1) Granos de cuarzo monocristalino de bordes recristalizados, con extinción recta y contactos concavo-convexos, en el centro de la fotografía se observa un grano lítico conformado por una matriz de arcillas y finos granos de cuarzo. 2) Nótese dos granos de cuarzo policristalino con contactos suturados entre los bordes de las unidades cristalinas.....	39
Figura 17. Fotomicrografías 3 y 4. 3) fotomicrografía con mayor acercamiento microscópico de un fragmento lítico donde se observa que está constituido por pequeños granos de cuarzo y rodeados por arcillas. 4) Misma vista de la fotomicrografía 3 en nicoles cruzados.....	39
Figura 18. Fotomicrografías 1 a 2. 1) Granos subredondeados de cuarzo monocristalino y líticos volcánicos (alterados a cuarzo-arcillas) de bordes recristalizados. Nótese algunos contactos suturados y cóncavo-convexos, además minerales opacos diseminados, También se observan granos de cuarzo policristalino. 2) Se observan flakes de micas (muscovita) dispuestas paralelas a la estratificación.....	40
Figura 19. Fotomicrografías 3 a 4. 3) Nótese formación de algunos contactos suturados o contactos sinuosos o irregulares que se forman cuando la disolución por presión es más intensa, ver círculo blanco. 4) Misma vista de la fotomicrografía 3 en nicoles cruzados.....	41

- Figura 20. Fotomicrografías 1 a 2. 1) Granos subredondeados de cuarzo monocristalino, líticos volcánicos (alterados a cuarzo y arcillas); También se observa algunos detritos de zircón y rutilo. Nótese contactos suturados y concavos-convexos, además minerales opacos diseminados. 2) algunos anfíboles de bordes recristalizados, cuyos intersticios es rellenado por micas y arcillas. 41
- Figura 21. Fotomicrografías 1 a 2. 1) Granos subredondeados de cuarzo monocristalino, líticos volcánicos (alterados a cuarzo y arcillas), y en menor cantidad cuarzo policristalino, también algunos granos de zircón y diseminaciones de minerales opacos. 2) Nótese contactos suturados y concavos-convexos..... 42
- Figura 22. Fotomicrografías 3 a 4. 3) También se observó escasos granos redondeados de rutilo y zircón. 4) Misma vista de la fotomicrografía 3 en nicoles cruzados..... 43
- Figura 23. Fotomicrografías 1 a 2. 1) Granos subredondeados de cuarzo monocristalino de bordes recristalizados, También menor cantidad de granos de líticos alterados a cuarzo y arcillas. 2) Micas y arcillas e impregnados de óxidos de hierro. 43
- Figura 24. Fotomicrografías 1 a 2. 1) Granos subredondeados de cuarzo monocristalino, y líticos (alterados a cuarzo y arcillas) de bordes recristalizados. Nótese contactos suturados y concavos-convexos, además minerales opacos diseminados. 2) También se observa en menor cantidad granos de cuarzo policristalino y escasos flakes de micas blancas (muscovita). 44
- Figura 25. Fotomicrografías 3 y 4) Se observa algunas venillas sinuosas tipo estilolita paralelas (a la estraificación) de óxidos de hierro según minerales opacos. Nótese algunos flakes de muscovita..... 45

Figura 26. Fotomicrografías 1 y 2. 1) Granos subredondeados de cuarzo monocristalino y policristalino de bordes recristalizados, cuarzos policristalinos que presentan contactos rectos entre los bordes de sus cristales individuales 2). También se observó menor cantidad de granos de líticos volcánicos alterados a cuarzo y arcillas, y algunas diseminaciones de minerales opacos. 45

Figura 27. Clasificación de las areniscas de la Formación Farrat en el triangulo de Pettijohn 1975. 47

Figura 28. Resultados de las muestras sobre la procedencia de las areniscas de la Formación Farrat segun los triangulos de discriminación tectonica de Dickinson et al. (1983)..... 49

RESUMEN

La presente tesis contiene información acerca de las características estratigráficas y petromineralógicas de un afloramiento rocoso de la Formación Farrat, ubicado al suroeste de la ciudad de Cajamarca en los centros poblados de Shaullo Chico y Huayrapongo.

Esta Formación presenta areniscas cuarzosas de grano fino a medio, la geometría de los estratos es generalmente laminar, pero presenta algunos niveles con estratos que presentan laminación sesgada y estratificación sesgada. Según los resultados del análisis petrográfico estas areniscas están compuestas por más del 90 % de cuarzo.

En cuanto a la procedencia de las areniscas, la ausencia de feldespatos y alto contenido de cuarzo indican que las áreas de aporte sedimentario son lejanas y que los sedimentos han sufrido múltiple reciclaje (depositación) en ambientes con clima húmedo y bajo relieve. Por otra parte, los resultados obtenidos plotados en los triángulos de Dickinson et al. 1983, indican que posiblemente la fuente de los sedimento sería ambiente tectónicos conocido como Cratón interior y las áreas de acumulación corresponderían a amplias cuencas de tipo intracratónicas y ante país (foreland).

Palabras Claves: Formación Farrat, Estratigrafía, Petrografía, Clasificación de areniscas, Procedencia, Cratón interior, Bloque continental.

ABSTRACT

This thesis contains information about the stratigraphic and petromineralogical characteristics of a rocky outcrop of the Farrat Formation located southwest of the city of Cajamarca in the populated centers of Shaullo Chico and Huayrapongo.

This formation presents quartz sandstones of fine to medium grain size, the geometry of the strata is generally laminar, but presents some levels with biased lamination and biased stratification. According to the results of the petrographic analysis these sandstones are composed of more than 90% of quartz.

As to the origin of the sandstones, the absence of feldspars and high quartz content indicate that areas of sediment supply are far and sediments have undergone multiple recycling (deposition) in environments with humid climate and low relief conditions. In addition, the results obtained plotted in the triangles of Dickinson et al. 1983, indicate that possibly the source of the sediment would be tectonic environment known as Craton interior and the areas of accumulation would correspond to wide basins of intracratonic type and foreland basins.

Key words: Farrat Formation, Stratigraphy, Petrography, Classification of sandstones, Provenance, Cratón interior, Continental block.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La Formación Farrat representa el nivel superior de la secuencia clástica del Cretáceo inferior en el Perú, consta de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, debido a su alto contenido de cuarzo y alto grado de madurez (lo que indica múltiples depositaciones y grandes distancias de transporte), se piensa que posiblemente provendrían de un bloque continental de bajo relieve conocido como cratón interior.

Para analizar la procedencia se debe tener en cuenta que la procedencia sedimentaria (ambiente de formación de la roca madre, tipo de roca y estabilidad de los minerales constituyentes), el tipo de cuenca sedimentaria, la naturaleza de los procesos sedimentarios dentro de la cuenca y el tipo de vías de transporte que vinculan la procedencia a la cuenca influyen en la composición de las areniscas; por lo tanto los tipos de estructuras detríticas y la composición de las areniscas proporcionan información sobre la composición y la tectónica de la procedencia; así como también de la cuenca de depositación. Uno de los métodos para determinar la procedencias de las areniscas es el estudio petrográficos de la composición modal mediante los diagramas de discriminación tectónica QmFL y QFL de Dickinson et al.1983

Para realizar esta investigación se genera la siguiente interrogante, ¿Cuáles son las características petromineralógicas de las areniscas de la Formación Farrat, en la zona de Baños del Inca y Llacanora - Cajamarca?

Se plantea que La Formación Farrat varía desde areniscas con feldespatos y líticos en la base, areniscas cuarzosas en la parte central y con incremento de matriz y limos en el techo, con intercalaciones de granos medio a grueso y fino dependiendo de las condiciones en que se depositaron en un ambiente

regresivo. La posible procedencia de los sedimentos que conforman las areniscas de esta Formación podría ser un Cratón.

Según Boggs (2009) las areniscas derivadas de Cratones son típicamente arenas cuarzosas que contienen cantidades mínimas de feldespatos, lo que refleja depositación múltiple y quizá intensa erosión y las largas distancias de transporte en cratones de bajo relieve.

Existen múltiples herramientas para analizar la posible procedencia de los sedimentos sin embargo la principal y la más aceptada en la actualidad es el estudio de la mineralogía de las partículas detríticas en las rocas sedimentarias siliciclásticas mediante secciones delgadas, la cual proporciona la primera evidencia para la litología de la roca madre en el área fuente.

Esta investigación tiene por objetivos realizar el levantamiento de la columna estratigráfica (litología y estructuras sedimentarias), Clasificar las areniscas de la Formación Farrat según el diagrama triangular de Pettijohn 1975, Y Analizar la procedencia de los sedimentos utilizando los diagramas QFL y QmFLt de discriminación tectónica de áreas de aporte según Dickinson et al. (1983).

En cuanto a los capítulos de esta tesis. El segundo capítulo presenta algunos antecedentes teóricos que presentan relación con el área de investigación y otros relacionados al tema, las bases teóricas necesarias en cuanto a estratigrafía, petrografía y análisis de procedencia. El tercer capítulo contiene la ubicación de la investigación, metodología, los procedimientos realizados y la presentación de resultados. En el cuarto se analiza y se discute los resultados, se contrasta la hipótesis, determinado así la veracidad de ella. En el quinto y último capítulo, se presenta las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

Osae, S; Asiedu, D; Yakubo, B; Koeberl, C; Dampare, S. (2006). Provenance and tectonic setting of Late Proterozoic Buem sandstones of southeastern Ghana: Evidence from geochemistry and detrital modes. Donde se documenta la procedencia y ambiente tectónico de las areniscas de la unidad estructural proterozoico Buem, sureste de Ghana, por medio de un estudio petrográfico, así como de los componentes principales (incluyendo elementos de tierras raras).

Díaz, Y; Suastegui, M; Jenchen, U. (2012). Petrografía y procedencia del miembro arenoso Galeana (Formación Taraises, Valanginiano - Hauteriviano temprano), Sierra Madre Oriental, NE México. Donde se documenta por medio de un riguroso análisis petrográfico y un conteo de puntos en 58 muestras de areniscas del miembro arenoso Galeana (Formación Taraises; Cretácico Temprano), la composición y ubicación de las áreas fuentes que propiciaron su origen.

Heno (2012). Estratigrafía y petrografía de las areniscas de la secuencia Quebrada la Naranjala – municipio de Fredonia miembro inferior de la Formación Amagá. Donde se realizó la reconstrucción de los ambientes depositacionales, diagénesis y área fuente de los componentes que caracterizan la secuencia.

Lalnunmawia y Lalhlimpuii (2014). Classification and provenance studies of the sandstones exposed along Durtlang road section, Aizawl, Mizoram. Donde se realizó la clasificación y estudios de procedencia de las areniscas expuestas a lo largo de la carretera Durtlang, Aizawl, Mizoram.

Benavides (1956). Estudio geológico de la región Cajamarca. Donde describe las secuencias estratigráficas de rocas sedimentarias.

Rivera (1980). Boletín N° 31, Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba, editado por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). En el cual se detalla la geomorfología, estratigrafía, geología estructural e hidrología a escala de la Carta Nacional 1: 100,000.

Lagos, A; Sánchez, J; Quispe, Z; Palacios, O. (2007). Aportes al análisis de cuencas sedimentarias en los alrededores de las localidades de los Baños del Inca, Cruz Blanca, Otuzco, distrito de Cajamarca. Donde se detalla la estratigrafía de las rocas del cretáceo y el comportamiento de la Cuenca Occidental, en el proceso de relleno sedimentario desde el Berriasiano-Valanginiano (Cretácico Inferior) hasta el Santoniano - Campaniano (Cretácico Superior).

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Estratigrafía

El termino estratigrafía, del latín stratum y del griego graphia, alude etimológicamente a la ciencia que trata de la descripción de las rocas estratificadas (Vera, 1994).

Es la descripción de todos los cuerpos rocosos que forman la corteza terrestre y de su organización en unidades distintas, útiles y cartografiables. Las unidades están basadas en sus características o cualidades a fin de establecer su distribución y relación en el espacio y su sucesión en el tiempo, y para interpretar la historia geológica (Reguant y Ortiz, 2001)

2.2.1.1. Estrato

Campbell, citado por Vera (1994) definió estrato como un nivel de roca o sedimento más o menos distinguible de forma visual o física, separado de los niveles superior e inferior por superficies denominadas superficies de estratificación.

2.2.1.2. Estratificación

Es la disposición en estratos de los sedimentos, rocas sedimentarias y algunas rocas metamórficas. El termino estratificación se refiere tanto al aspecto geométrico (dispositivo en capas sucesivas). Como al genético (intervalos sucesivos de sedimentación) (Vera, 1994).

2.2.1.3. Laminación

Corrales, citado por Vera (1994) define laminación como la disposición sucesiva de láminas dentro de un estrato. La laminación ha sido frecuentemente considerada como una estructura de ordenamiento interno dentro de los estratos, distinguiéndose dos tipos fundamentales: laminación paralela y laminación cruzada, aunque existen otros tipos minoritarios (ondulada, contorsionada, etc.). En consecuencia, se puede diferenciar tres tipos simples de estratos: el primero sin laminación interna, el segundo con laminación paralela y el tercero con laminación cruzada.

2.2.1.4. Medida de la estratificación

Los estratos se depositan generalmente subhorizontales pero se presentan en la naturaleza con posiciones geométricas muy diversas, debido a las deformaciones posteriores. Para expresar la posición espacial de un estrato o de una superficie de estratificación se recurren a dos medidas: la dirección y el buzamiento (Vera, 1994).

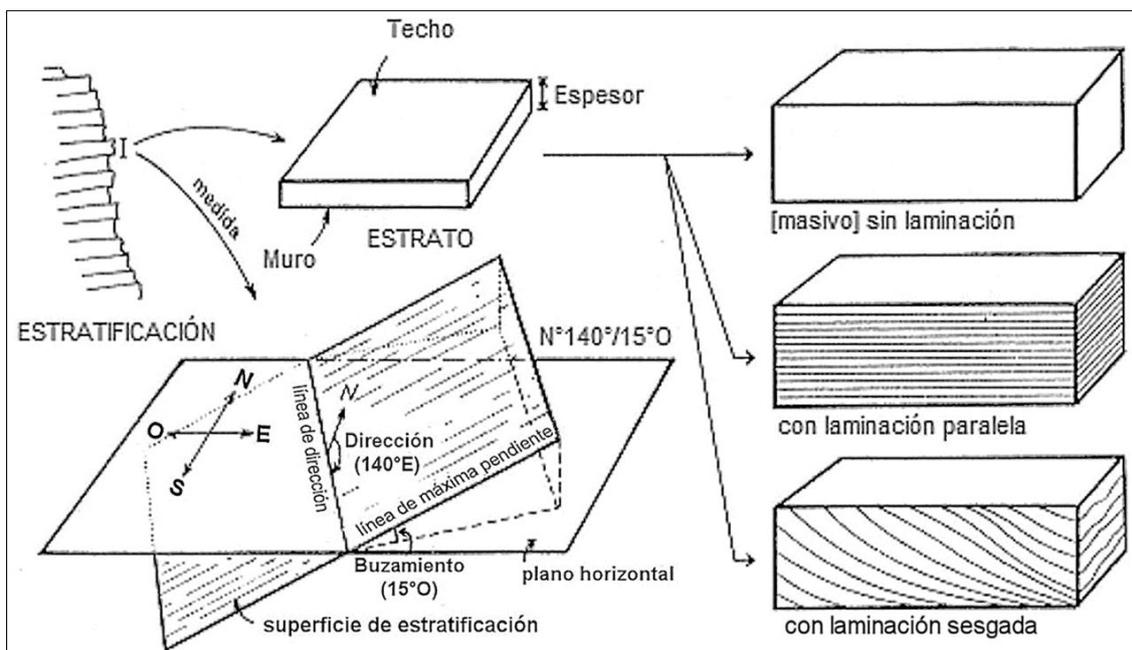


Figura 1: Rasgos de los estratos y medidas de la estratificación. Para un estrato concreto se marcan: el techo, el muro, el espesor. Los posibles ordenamientos internos y la medida de su posición espacial (dirección y buzamiento) (Vera, 1994).

2.2.1.5. Formación

Unidad formal primaria de la clasificación litoestratigráfica. Las Formaciones son las únicas unidades litoestratigráficas formales con las que la litología de una sucesión debe quedar completamente subdividida. El contraste de litología entre Formaciones, exigido para justificar su establecimiento, varía con la complejidad de la geología de una región y con el detalle requerido para la cartografía geológica y para poder deducir su historia geológica. No justifica ni es útil la creación de una formación que no pueda dibujarse a la escala de los mapas realizados en una determinada región. El espesor de las Formaciones puede oscilar entre menos de uno a varios miles de metros (Reguant y Ortiz, 2001).

2.2.2. El Tiempo en Geología

La unidad básica de medida del tiempo geológico es el millón de años (Ma).

2.2.2.1. Edades relativas

a. Superposición de estratos

El principio de Superposición de estratos, permite en su aplicación más elemental, la ordenación de los estratos, o conjuntos de estratos, consecutivos de manera que el más bajo es el más antiguo. Una sección estratigráfica local es justamente una representación gráfica de los materiales que afloran en una región, colocados en el mismo orden en que tuvo lugar su depósito. La ordenación temporal se hace según tiempo relativo, ya que en ningún caso se tiene cifras numéricas de la valoración del tiempo (Vera, 1994).

b. Ordenación temporal con los fósiles

El principio de la sucesión faunística o de la correlación de Smith estableció un interesante criterio de ordenación temporal (tiempo relativo) de amplia escala mediante los fósiles. El fenómeno de la evolución biológica es un proceso no repetible, ya que cada especie ha vivido en el pasado durante un intervalo de tiempo concreto y nunca vuelve a aparecer. A partir de la distribución de las diferentes especies de fósiles en el registro estratigráfico delimitan unidades (volúmenes de estratos) con características propias (unidades bioestratigrafías) que representan intervalos de tiempos sucesivos, reconocibles en otras secciones estratigráficas (Vera, 1994).

2.2.2.2. Unidades formales definidas por su edad

a. Unidades cronoestratigráficas

Se llama unidad cronoestratigráfica a cada uno de los volúmenes de materiales estratificados diferenciados por su edad. Las unidades cronoestratigráficas están delimitadas por cronohorizontes u horizontes cronoestratigráficos, que son superficies estratigráficas de carácter isócrono, que constituyen la base de la correlación estratigráfica (Vera, 1994).

b. Unidades geocronológicas y geocronométricas

Con el nombre de unidad geocronológica se denomina a cada una de las unidades de tiempo geológico correspondiente a las unidades cronoestratigráficas, mientras que con el nombre de unidad geocronométrica (o simplemente cronométrica) se designa a cada unidad estratigráfica establecida por divisiones de tiempo y expresada en años (o sus múltiplos). La ordenación temporal de todas las unidades geocronológicas, desde la más antigua a la más moderna, constituye la escala geocronológica universal de referencia. La expresión numérica de la duración de cada una de estas unidades, expresada en años o sus múltiplos (normalmente millones de años) constituyen las unidades geocronométricas (Vera, 1994).

2.2.3. Columna estratigráfica

Es la sucesión cronológica de todas las unidades estratigráficas presentes en una región, ordenadas de más antigua a más moderna, esto es, en el orden en el que ocurrió su depósito (Vera, 1994).

2.2.3.1. Representación grafica

Existen múltiples tipos de representaciones gráficas para las columnas estratigráficas, que difieren entre sí en la manera de presentar los resultados y en el grado de detalle de los mismos. En todos los casos la parte principal de la sección estratigráfica la constituye una columna litoestratigráficas o columna litológica en la que se expresan, a escala, los espesores relativos de cada una de las unidades litoestratigráficas presentes en la misma y las litologías de cada una de ellas (Vera, 1994).

2.2.3.2. Elección de escala

Las escalas más usuales de levantamiento de columnas estratigráficas son 1:500 y 1:1.000, en las que se pueden diferenciar los bancos de hasta un metro de espesor. En estas columnas estratigráficas se reduce el grado de información, pero se facilita la observación y delimitación de las unidades litoestratigráfica a nivel de formación (y miembros). Como escala de mayor detalle para una sección estratigráfica local se considera la escala 1:100, en la que pueden ser diferenciados con facilidad estratos o paquetes de estratos de menos de un metro (Vera, 1994).

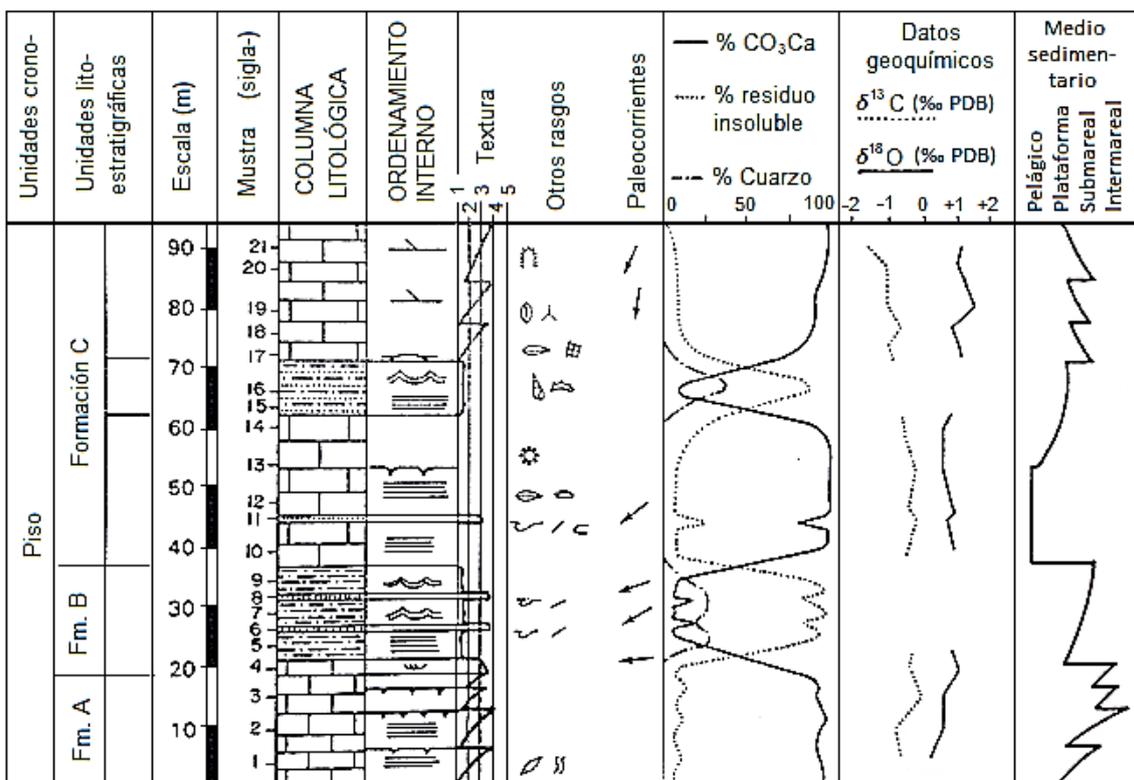


Figura 2. Ejemplo de columna estratigráfica (Vera, 1994).

2.2.3.3. Estructuras sedimentarias

Las estructuras sedimentarias y contactos entre los estratos se pueden graficar en una columna por medio de símbolos. Las estructuras sedimentarias ocurren en las superficies superior e inferior de los estratos, así como dentro de ellos. Si los límites de estratos son (a) planos, (b) irregular, o (c) gradacional; cada uno se puede representar en la columna de la litología por una línea recta, ondulada irregular o discontinua, respectivamente (Tucker, 2003).

ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS			
	Moldes cónicos		Estratificación sesgada en espina de pescado
	Marcas de arrastre o impacto		Estratificación sesgada de bajo ángulo
	Estructuras de carga		Estratificación flaser
	Ondulaciones simétricas		Estratificación lenticular
	Ondulaciones asimétricas		Laminación ondulada
	Laminación paralela		Imbricación
	Laminación sesgada		Nódulos
	Laminación sesgada planar		Contacto planar
	Estratificación sesgada en surco		Contacto irregular

Figura 3: Símbolos para las estructuras sedimentarias comunes para su uso en un registro gráfico. Tomado, traducido y modificado de (Tucker, 2003).

2.2.4. Petrografía

Es un campo de la petrología que se ocupa de la descripción y clasificación de las rocas mediante la observación microscópica de secciones o láminas delgadas derivadas de las rocas en estudio, en un microscopio petrográfico, clasificándolas según su textura y composición mineralógica. Este tipo de análisis revela una serie de características y/o propiedades evaluables en los cristales y la relación que existen entre ellos, lo que va a ayudar a determinar la composición de la roca centrándose principalmente en la naturaleza y origen de la misma (petrografía, servicio geológico mexicano. Disponible en <http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/rocas/petrografía>)

2.2.5. Rocas sedimentarias clásticas

Las rocas clásticas se clasifican en primer lugar en función del tamaño de grano de los clastos y dentro de cada grupo, en función de la composición de estos y/o de la proporción entre clastos y matriz y/o cemento (matriz son productos muy finos procedentes de las mismas rocas que los clastos, cemento es el material procedente de la precipitación química de sustancias disueltas), excepto en las

lutitas en que el tamaño de grano es tan fino que no se diferencian clastos de material intersticial (Franco y Gonzalo, 2000).

Tabla 1. Clasificación de las rocas sedimentarias clásticas según la escala propuesta por J. A. Udden y C. K. Wentworth.

Diámetro límite (en milímetros de la clase)	Denominación de la clase	Denominación de la roca según su granulometría	
256	bloque		
64	bloque pequeño		rudita
4	canto		conglomerado
2	canto pequeño		brecha
1	arena muy gruesa		
0,5 (1/2)	arena gruesa		arenita
0,25 (1/4)	arena		arenisca
0,125 (1/8)	arena fina		arena
0,0625 (1/16)	arena muy fina		
0,0312 (1/32)	limo grueso		
0,0156 (1/64)	limo medio	limolita	argilita
0,0078 (1/128)	limo fino		lutita
0,0039 (1/256)	limo muy fino		pelita
	arcilla	arcillita	

Tomado de Adams et al. (s.f.)

2.2.5.1. Areniscas

Las areniscas están compuestas principalmente por: fragmentos de roca, granos de cuarzo, granos de feldespato, matriz y cemento. La matriz consiste de minerales de arcilla y limo, y en la mayoría de los casos estos materiales de grano fino se depositan junto con los granos de arena (Tucker, 2003).

2.2.5.2. Principales componentes de las areniscas

a. Cuarzo

El cuarzo es la especie mineral más común encontrada como grano en areniscas y limolitas. Como mineral primario es el principal constituyente de las rocas

graníticas, ocurre en algunas rocas de composición intermedia y está ausente de las rocas ígneas básicas. Las rocas metamórficas como el gneis formado de material granítico y muchas rocas metasedimentarias de grano grueso contienen alta proporción de cuarzo. El cuarzo también ocurre en venas, precipitado de fluidos calientes asociados con procesos ígneos y metamórficos. Los granos de cuarzo son resistentes a la descomposición química, pueden ser rotos o erosionados durante el transporte, estos se mantienen intactos durante largas distancias y largos períodos de transporte (Nichols, 2009).

b. Feldespatos

Muchas rocas ígneas contienen feldespatos como componente principal. El feldespato es por lo tanto muy común y es liberado en grandes cantidades cuando granitos, andesitas, gabros así como esquistos y gneises se descomponen. Sin embargo, El feldespato es susceptible a la alteración química durante el interperismo y siendo más suave que el cuarzo, tiende a ser erosionado y roto durante el transporte. Los feldespatos sólo se encuentran comúnmente en circunstancias en que la meteorización química de la roca madre no ha sido demasiado intensa y la vía de transporte hasta el lugar de deposición es relativamente corto. Los feldespatos potásicos son más comunes como granos detríticos que las variedades ricas de sodio y de calcio, ya que son químicamente más estables cuando se someten a la intemperie (Nichols, 2009).

c. Mica

Los dos minerales de mica comunes, biotita y moscovita, son relativamente abundantes como granos detríticos en areniscas, pese a que la moscovita es más resistente a la erosión. Estos son derivados de rocas ígneas de composición granítica a intermedia, de esquistos y de gneises donde se han formado como minerales metamórficos. La forma laminar de los granos de mica los hace característicos en la muestra de mano y bajo el microscopio (Nichols, 2009).

d. Otros minerales

Otros minerales rara vez se encuentran en grandes cantidades en la arenisca. La mayoría de los minerales comunes de silicatos en rocas ígneas (por ejemplo olivino, piroxenos y anfíboles) son destruidos con demasiada facilidad por la meteorización química. Los óxidos de hierro son relativamente abundantes.

Localmente pueden ocurrir concentraciones de un mineral en particular cuando hay una fuente cercana. (Nichols, 2009).

e. Fragmentos líticos

La descomposición de granos preexistentes de roca ígnea, metamórfica y sedimentaria resulta en fragmentos de arena de tamaño medio a fino. La determinación de la litología de estos fragmentos de roca usualmente requieren análisis petrográfico en secciones delgadas para determinar la mineralogía y la fábrica. Los granos de rocas ígneas así como de basaltos y riolitas son susceptibles a la alteración química en la superficie de la tierra y comúnmente solo se encuentran en arenas formadas cerca de la fuente del material volcánico. Fragmentos de esquistos y rocas metamórficas pelíticas pueden ser reconocidas bajo el microscopio por la fuerte fábrica alineada que estas litologías poseen. Las micas presentan más claramente esta fábrica, pero los cristales de cuarzo en una roca metamórfica pueden presentar solo un fuerte alineamiento. Rocas formadas por el metamorfismo de litologías ricas en cuarzo descomponen relativamente granos resistentes que pueden ser incorporados en una arenisca (Nichols, 2009).

Fragmentos líticos de rocas sedimentarias se generan cuando los estratos preexistentes están levantados, meteorizados y erosionados. Los granos de arena pueden estar retrabajados en estos procesos y granos individuales de arena pueden pasar por varios ciclos de erosión y depositación (Nichols, 2009).

f. Fragmentos biogénicos

Pequeños fragmentos de carbonato de calcio se encuentran areniscas, son comúnmente conchas de moluscos rotas y otros organismos que tienen partes duras calcáreas. Estos fragmentos biogénicos son comunes en areniscas depositadas en ambientes marinos superficiales donde estos organismos son más abundantes. Madera, semillas y otras partes de plantas terrestres pueden ser preservados en areniscas depositadas en ambientes continentales y marinos (Nichols, 2009).

g. Minerales autógenos

Minerales que crecen como cristales en ambientes depositacionales son llamados minerales autógenos. Estos minerales son distintos de todos los

minerales detríticos que se formaron en procesos ígneos y metamórficos y que posteriormente fueron retrabajados en el ámbito sedimentario (Nichols, 2009).

h. Matriz

EL material de grano fino que se encuentra entre los granos de arena se conoce como matriz. En arenas y areniscas la matriz es típicamente limos y material del tamaño de arcillas, y puede llenar parcial o totalmente los espacios entre los granos. Es preciso distinguir entre la matriz, que es material depositado junto con los granos, y el cemento, que es precipitación química después de la depositación (Nichols, 2009).

2.2.5.3. Clasificación de las areniscas

a. Areniscas cuarzosas o cuarzoarenitas

Las cuarzoarenitas están compuestas más de 90 – 95 % de granos de silicio (cuarzo, chert, fragmentos de roca cuarzosa). Son generalmente de color blanquecino o gris claro, pero pueden teñirse de color rojo, rosa, amarillo o marrón por óxidos de hierro. Las areniscas cuarzosas habitualmente se encuentran en asociación con conjuntos de rocas depositadas en ambientes cratónicos estables tal como eólico, playa, y ambientes de plataforma. Por lo tanto suelen estar intercaladas con carbonatos de aguas poco profundas y, en algunos casos, areniscas feldespáticas (Boggs, 2009).

Composición.- Los granos de silicio en estas areniscas varían a partir de 90% a más de 99%. El cuarzo es el componente principal; sin embargo, un pequeño porcentaje de chert, clastos de metacuarcitas, o clastos de areniscas y limonitas silíceas pueden estar incluidas. La mayoría del cuarzo en areniscas cuarzosas es monocristalino. Granos policristalinos comúnmente representan menos del 10% (generalmente alrededor del dos por ciento) del marco de granos. Los feldespatos componen cantidades mínimas hasta tanto como 5% del marco de constituyentes en muchas areniscas cuarzosas. Chert y fragmentos de roca silícea, tanto como clastos de metacuarcita y clastos de areniscas y limonitas, ocurren en algunas cuarzoarenitas en cantidades que rara vez superan el 1%. Fragmentos de roca inestable son muy raros. Micas, comúnmente moscovita, ocurren en cantidades que generalmente no exceden de aproximadamente 0.5%. Minerales pesados son comunes en la mayoría de areniscas cuarzosas,

pero generalmente constituyen no más de aproximadamente 0.5% del total del marco de granos (Boggs, 2009).

Cemento.- La mayoría de cuarzoarenitas están bien sementadas con cemento de sílice, carbonato, o hematita. El cuarzo parece ser por lejos el cemento más común y esta típicamente presente como sobrecrecimiento sintaxial en núcleos de cuarzoes detriticos (Boggs 2009). La calcita es el cemento de carbonato más común en areniscas cuarzosas, pero también pueden ocurrir la dolomita y con menor frecuencia la siderita (Boggs, 2009).

Matriz.- Las cuarzoarenitas generalmente contienen cantidades muy reducidas de matriz; la pequeña cantidad de matriz presente en varias cuarzoarenitas esta probablemente mejor explicado como el producto de la diagénesis. La matriz consiste principalmente de cuarzo, feldespatos, micas de tamaño fino, y minerales de arcilla, la cual posiblemente se forma diagenéticamente por alteración de feldespatos detriticos y fragmentos de roca (Boggs, 2009).

b. Areniscas feldespáticas

Las areniscas feldespáticas contienen menos del 90% de granos de cuarzo, más feldespato que fragmentos de roca inestable, y menor cantidad de otros minerales así como micas y minerales pesados. Pueden contener tan solo 10% de granos de feldespato, pero muchas areniscas feldespáticas muestran mayor enriquecimiento de feldespato. De hecho, valores raros de feldespato superior al 80% han sido reportados (Crook, citado por Boggs, 2009).

Generalmente ocurren en ambientes cratónico o plataforma estable, donde son asociadas con conglomerados, cuarzoarenitas o litarenitas de agua superficial, rocas carbonatadas, y evaporitas (Boggs, 2009).

Composición.- El cuarzo es la partícula constituyente dominante en muchas areniscas feldespáticas y generalmente representan alrededor del 50 - 60% del marco de granos. El cuarzo tiende a ser menos abundante en areniscas feldespáticas ricas en plagioclasas que en areniscas feldespáticas ricas en feldespato potásico. Mucho cuarzo es monocristalino. Granos de cuarzo policristalino representan menos del 6 o 7% del marco de constituyentes. El contenido total de feldespatos de areniscas feldespáticas puede variar desde

solo 10 % a más de 75% del porcentaje de granos; el rango más común esta entre 20 a 40% (Boggs, 2009).

Cemento.- Cemento de carbonatos parece ser el más común en areniscas feldespáticas y van desde trazas a más de 20% de los constituyentes totales. El cemento de carbonato es generalmente calcita, pero puede incluir dolomita. Otros cementos, que generalmente se encuentran en menor cantidad, pueden incluir sílice (sobrecrecimiento de cuarzo), feldespatos autógenos (sobrecrecimiento), hematita, baritina, pirita, y minerales de arcilla (Boggs, 2009).

Matriz.- El contenido de matriz de las areniscas feldespáticas puede variar desde trazas a más del 15% del total de constituyentes. Muchas de estas areniscas contienen muy poca matriz y tienen correspondientemente cantidades más altas de cemento, generalmente cemento de carbonato. La matriz en muchas areniscas feldespáticas parece consistir principalmente de sericita caolinita, típicamente manchada con hematita. Esto es probablemente derivado de la alteración de biotitas u otros minerales de hierro (Boggs, 2009).

c. Areniscas líticas

Las areniscas líticas son un grupo muy diverso de rocas que son caracterizadas generalmente por alto contenido de fragmentos de rocas inestables. Cualquier arenisca que contiene menos del 90% de cuarzo (Además de sílex y cuarcita) y fragmentos de rocas inestables por encima de feldespatos es una arenisca lítica (Boggs, 2009).

Composición.- Las areniscas que se clasifican como areniscas líticas pueden tener composiciones muy variables. El contenido de granos de cuarzo de areniscas líticas puede variar desde menos del 1% a más del 70 %, y ningún rango particular de valores de cuarzo parece típico. Datos disponibles sugieren que el porcentaje de cuarzo policristalino es mucho mayor (hasta aproximadamente 10%) que en cualquiera de las areniscas feldespáticas o areniscas cuarzosas. El contenido de feldespatos puede variar desde menos de 1% a más del 25% de los granos. Las plagioclasas predominan sobre los feldespatos potásicos en muchas areniscas líticas. Los fragmentos de rocas volcánicas son especialmente comunes en areniscas líticas derivados de escenarios de arco magmático. Granito y otros fragmentos de rocas ígneas

plutónicas son reportados en areniscas líticas, pero generalmente en muy pocas cantidades. Fragmentos de rocas metamórficas comunes incluyen pizarra, filita, y el esquisto (Boggs, 2009).

Cemento y matriz.- Algunas areniscas líticas contienen cemento no visible, mientras que otros contienen cementos en cantidades que van a más de 30 por ciento de los componentes totales. Los carbonatos parecen ser el cemento más común y puede incluir calcita, dolomita, y siderita. Cemento de sílice (sobrecrecimiento de cuarzo) es moderadamente abundante en algunas areniscas líticas. Otros cementos comunes son clorita, minerales pesados, oxidos de hierro, y pirita (Boggs 2009). El contenido de matriz en areniscas líticas varía desde cantidades de trazas hasta tanto como 40%, aunque el mayor contenido de matriz es menos del 20% (Boggs, 2009).

d. Grauvaca

Son típicamente mezclas de fragmentos de roca, granos de cuarzo y feldespato con una matriz de arcilla y limos. Las grauvacas son en su mayoría rocas duras, de color claro a gris oscuro con abundante matriz. Los feldespatos y los granos de líticas son comunes y a menudo claramente identificables con una lente de mano. Aunque las grauvacas no son ambientalmente restringidas, muchas fueron depositadas por corrientes de turbidez en cuencas de aguas relativamente profundas y por lo tanto muestran estructuras sedimentarias típicas de turbiditas (Boggs, 2009).

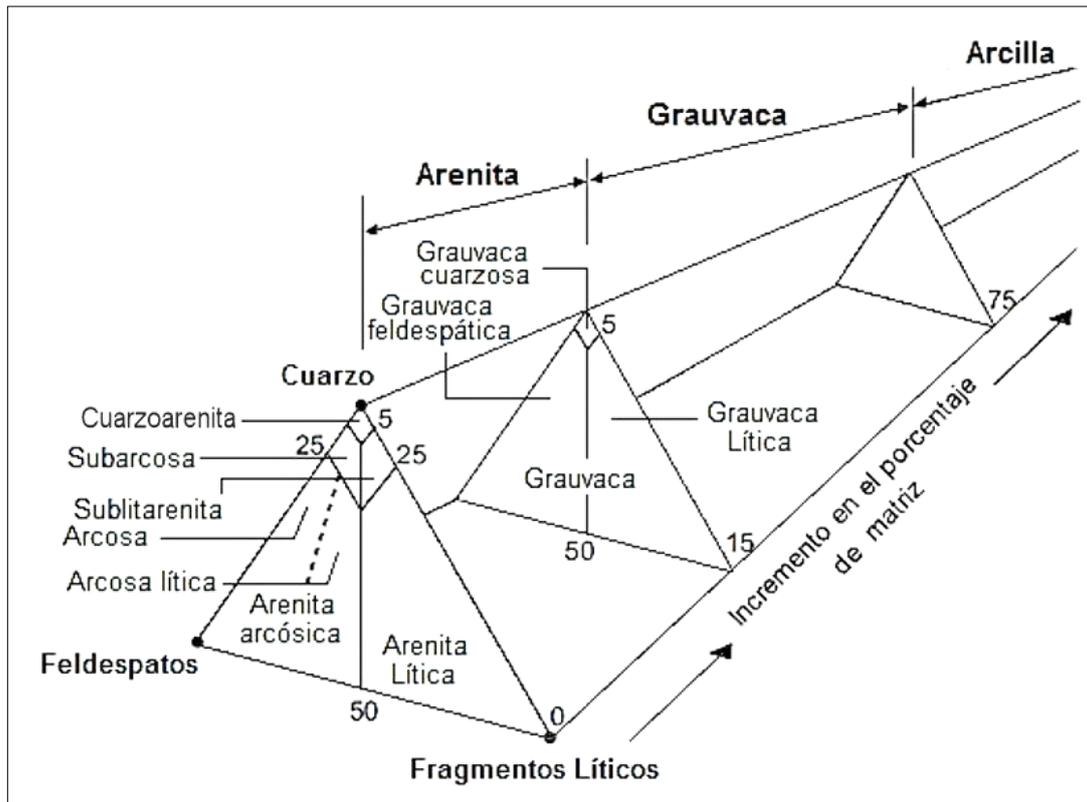


Figura 4 . Clasificación de las areniscas según Pettijohn (1975) tomado y traducido de (Nichols, 2009).

Tabla 2. Valores correspondiente a cada tipo de roca realizada tomando en cuenta la clasificación de Pettijohn 1975.

Familia	Tipo de roca	Cuarzo (%)	Feldespatos (%)	Fragmentos de roca (%)	Matriz (%)
ARENITAS	Cuarzoarenita	$C > 90$	$0 < F < 5$	$0 < Fr < 5$	
	Subarcosa	$50 < C < 95$	$5 < F < 25$	$0 < Fr < 25$	
	Sublitarenita	$50 < C < 95$	$0 < F < 25$	$5 < Fr < 25$	Matriz
	Arcosa	$0 < C < 75$	$25 < F < 100$	$0 < Fr < 50$	< 15
	Litarenita	$0 < C < 75$	$0 < F < 50$	$25 < Fr < 100$	
GRAUVACAS	Cuarzograuvaca	$C > 90$	$0 < F < 5$	$0 < Fr < 5$	$15 <$
	Grauvaca feldespática	$0 < C < 95$	$25 < F < 100$	$0 < Fr < 50$	Matriz
	Grauvaca lítica	$0 < C < 95$	$0 < F < 50$	$5 < Fr < 100$	< 75

2.2.6. Análisis de procedencia

Se entiende por procedencia de un depósito detrítico al origen o la fuente de la que procede ese depósito, incluyendo todos los factores que han contribuido a su formación.

La naturaleza del área fuente es el factor principal que define las características texturales y composicionales del sedimento detrítico. Otros factores, como el relieve, el clima y el tipo de transporte sufrido hasta su depósito en la cuenca de sedimentación, modulan la señal principal de la litología del área fuente sobre el sedimento

Este tipo de análisis se realiza mediante el estudio detallado de la composición de las rocas sedimentarias de donde se obtiene la máxima información sobre la historia del depósito (Arribas, 2010)

2.2.6.1. La composición de los depósitos clásticos

Arribas (2010) considera tres tipos de composición: La composición química, la composición mineralógica y la composición petrográfica.

a. La composición química

Es la distribución de los elementos sobre la roca total. Se formula con el porcentaje de los elementos mayores, menores y trazas expresados en sus correspondientes óxidos. Metodológicamente es fácil de obtener mediante técnicas analíticas, más o menos sofisticadas (absorción atómica, fluorescencia de rayos X, plasma, etc.), siguiendo protocolos analíticos estandarizados (Arribas, 2010)

b. La composición mineralógica

Hace referencia a la distribución (porcentaje) de la totalidad de fases minerales que contiene una roca. Se usan técnicas prácticamente rutinarias en cualquier laboratorio de investigación, como la difracción de rayos X. Su empleo se generaliza para la caracterización de depósitos detríticos de grano muy fino (lutitas) (Arribas, 2010)

c. La composición petrográfica

Reúne la información textural y mineralógica de los distintos elementos que integran la roca. La unidad de análisis en depósitos clásticos no es el elemento

químico, ni el mineral, sino el clasto (o grano en areniscas) o las fases cementantes (textura y mineral cementante). La composición petrográfica es, por tanto, la distribución (porcentaje) de los distintos clastos y fases minerales cementantes. El análisis de las texturas y la composición se realiza mediante el microscopio petrográfico óptico (Arribas, 2010)

La mineralogía detrítica en las rocas sedimentarias siliciclásticas proporciona la primera evidencia para la litología de la roca madre en el área fuente. La mineralogía también nos proporciona evidencia útil para interpretar el ambiente tectónico debido a que la litología de la roca fuente está ligada fundamentalmente al ambiente tectónico. También puede proporcionar visión limitada de las condiciones climáticas, sobre la base de la suposición de que la madurez mineralógica de los sedimentos se determina en parte por la destrucción selectiva de minerales en los sitios de la intemperie. Intemperie en condiciones muy frías o muy secas, presumiblemente, permite la conservación de los minerales inestables, mientras que una intensa erosión en condiciones cálidas y húmedas no lo hace. Por lo tanto, los minerales detríticos proporcionan algunas pistas sobre el clima (Boggs, 2009).

2.2.6.2. Factores que afectan la composición de la mineralogía detrítica

Boggs (2009) no dice que la composición de la roca generadora es sin duda el control de primer orden en la composición de los sedimentos, pero la composición original puede ser severamente modificada por varios factores como el clima, relieve, transporte de sedimentos, ambiente de depositación y la Diagénesis.

Johnson citado por Boggs (2009), indica que los procesos de erosión de sedimentos, transporte, depositación, y enterramiento están íntimamente relacionados entre sí, lo que crea una compleja red de mecanismos de retroalimentación que controlan la composición de los sedimentos.

a. Efectos del clima y relieve

Clima (precipitación, temperatura) y relieve (diferencias de elevación, ángulo de pendiente) ejercen controles directos sobre la intensidad y la duración de la meteorización. Climas cálidos y húmedos aumentan la intensidad de la erosión y propician, en un período determinado de tiempo, mayor destrucción de minerales de la roca madre. Además, es comúnmente aceptado que bajo relieve

y pendientes suaves favorecen la meteorización química porque la duración de la meteorización es más larga. Por otro lado, alto relieve y pendientes pronunciadas favorecen la erosión y la rápida eliminación de minerales del ambiente de meteorización antes de ser seriamente alterados por procesos de meteorización (Boggs, 2009).

b. Estabilidad de los minerales constituyentes

Goldich citado por boggs (2009) reconoce que los minerales constituyentes de rocas comunes tienen diferentes estabildades con respecto a los procesos de meteorización química. Minerales que cristalizan a altas temperaturas (por ejemplo, olivino, piroxenos, anfíboles, plagioclasa de calcio) son menos estables en condiciones de meteorización química que los minerales que cristalizan a bajas temperaturas (plagioclasas de sodio, feldespato potásico, mica, cuarzo). Así, los procesos de meteorización química actúan para destruir selectivamente los minerales menos estables, que predispone nuestra capacidad para interpretar la procedencia correctamente de los ensambles de minerales sobrevivientes en los sedimentos.

c. Efectos del transporte de sedimentos

El Transporte de sedimentos es el vínculo crucial entre la fuente y áreas depositacionales, siendo el proceso de abrasión mecánica el que principalmente actúa sobre los sedimentos, este proceso recoge el desgaste físico mediante el roce y los impactos entre clastos. Los componentes de menor dureza y más frágiles disminuirán su tamaño aumentando su superficie de ataque químico. La presencia de planos de debilidad (uniones intercristalinas, planos de exfoliación) favorecen estos procesos. La redondez de los clastos se va modificando, pudiéndose utilizar como medida cualitativa del grado de la abrasión mecánica (Arribas, 2010).

El transporte afecta a la composición de los sedimentos en una variedad de formas, dependiendo de la modalidad. El transporte de sedimentos por el flujo de corriente fluvial es un proceso selectivo. Las partículas se separaron en una carga de suspensión y una carga de fondo, y dentro de la carga de fondo, las gravas tienden a ser separados de la arena. Así, estos procesos dan lugar a la clasificación de partículas por tamaño, forma y densidad. El transporte de sedimentos en las olas, particularmente en la zona litoral, puede ser incluso más

eficaz que el flujo de corriente fluvial en selección selectiva de sedimentos porque el trabajo prolongado por olas proporciona una mayor oportunidad para la clasificación que el movimiento unidireccional de corrientes fluviales (Boggs, 2009).

d. Efectos del ambiente de depositación

Dependiendo del ambiente de depositación, los sedimentos pueden o no sufrir modificación adicional dentro del ambiente. Los sedimentos depositados rápidamente por procesos fluviales o flujos de masa en abanicos aluviales, por ejemplo pueden cambiar muy poco antes del enterramiento. Por el contrario, sedimentos en la zona litoral pueden experimentar cambios significativos en el entorno de la playa antes de la depositación final, esto podría borrar diferencias compositivas iniciales en arenas, hacia la alta madurez composicional (cuarzo areneros) y con eficacia quitando gran parte de la composición evidencia de procedencia. Por otra parte, en condiciones en que varias corrientes transportan sedimentos de diversa composición a una plataforma, estos sedimentos pueden llegar a ser mezclados por procesos de transporte litoral o las mareas de tormenta. Dicha mezcla crea depósitos con composiciones que son muy difíciles de vincular una sola área fuente (Boggs, 2009).

e. Efectos de la diagénesis

Los sedimentos están sujetos a condiciones geoquímicas cambiantes en el entorno de enterramiento que puede producir profundas modificaciones postdepositacionales en la composición. Granos metaestables pueden destruirse completamente por disolución, o puede ser sustituidos por otro mineral (por ejemplo, el reemplazo de cuarzo por calcita) o alterados a otro mineral (por ejemplo, la alteración de feldespatos a minerales de arcilla o micas). Esto puede resultar en la destrucción selectiva de los componentes menos estables y por lo tanto pérdidas significativas en la información de procedencia. El hecho de que los feldespatos y minerales pesados pueden estar ausentes o escasos en una arenisca, por ejemplo, no significa necesariamente que estaban ausentes o escasos en las rocas de origen. En la práctica, es posible que se tienda a olvidar este principio, pero lo hacemos a nuestro propio riesgo (Boggs, 2009).

2.2.6.3. Interpretación del ambiente tectónico

Según Boggs (2009) la base para la interpretación tectónica es la suposición de que la mineralogía y geoquímica detrítica reflejan no sólo la litología de la roca fuente, sino también en general los ambientes de placas tectónicas. Los ambientes de placas tectónicas abarcan dos aspectos:

Los terrenos de procedencia principal (bloques cratónicos, sistemas de arco volcánico, cinturones de colisión).

Los tipos de límites de placas (márgenes continentales pasivos o seccionados, los márgenes continentales activos u orogénicos, márgenes de falla transformantes).

Presumiblemente, para este autor cada gran ambiente de placas tectónicas genera suites distintivas de rocas madre. La erosión de estas rocas fuente suministra sedimentos a una variedad de cuencas de sedimentación ubicadas en diferentes posiciones con respecto a los límites de placas, por ejemplo cuencas de antepaís, cuencas retroarco, cuencas de antearco, intraarco. La composición modal de cuarzo, feldespatos y fragmentos de rocas depositadas en estas cuencas, y, posiblemente, la geoquímica de los sedimentos, así, son supuestamente reflectores precisos de terrenos de procedencias que varían con el ambiente de las placas tectónicas.

2.2.6.4. Tipos de procedencia

Dickinson y Suczek (1979) agruparon las procedencias y derivación de suites de areniscas dentro de tres grupos generales: (1) bloque continental, para el cual las fuentes de sedimentos están en escudos y plataformas o en bloques de basamento fallados; (2) arco magmático, para el cual las fuentes están contenidas en arcos de orógenos activos de arcos de islas o márgenes continentales activas. (3) orógeno reciclado, para el cual las fuentes son secuencias estratigráficas deformadas y levantadas en zonas de subducción y a lo largo de orógenos de colisión y dentro de cinturones de promontorios empujados por pliegues. Cada uno de estos ambientes de procedencia incluye grupos distintivos de rocas madres que arrojan sedimentos en cuencas asociadas.

Dickinson et al. citado por Boggs (2009) analizaron las arenas de turbiditas recogidas de una amplia variedad de sitios en el fondo del océano para examinar la relación entre la composición de la roca arenisca con los ambientes de placas conocidas. La posición geográfica de las muestras les permitió establecer relaciones con los márgenes continentales específicos o cadenas de islas oceánicas. Concluyeron que las arenas derivadas de márgenes continentales dislocados tienen el más alto contenido de cuarzo y el más bajo porcentaje de fragmentos líticos. El contenido de plagioclasas es generalmente más bajo que en las arenas de márgenes activos o las derivadas de las cadenas de islas oceánicas. Las arenas de los márgenes continentales activos u orogénicos son consistentemente menos cuarzosas que las de los márgenes dislocados pero contienen más cuarzo que las derivadas de las cadenas de islas. Las arenas derivadas de las cadenas de islas oceánicas de intraplaca carecen generalmente de cuarzo, contienen plagioclasas pero muy poco o nada de feldespatos potásicos, y contienen fragmentos líticos abundantes que son casi exclusivamente clastos volcánicos.

Los campos composicionales característicos de diferentes procedencias se muestran en diagramas triangulares: QtFL, con énfasis en la madurez; QmFLt, con énfasis en la roca fuente Dickinson y Suczek 1979, Dickinson et al. 1983). La clasificación de Dickinson et al. (1983) hace referencia directamente a la procedencia, es decir, clasifica los depósitos detríticos, en los distintos ambientes geotectónicos en los que se generan, en función de sus petrofacies.

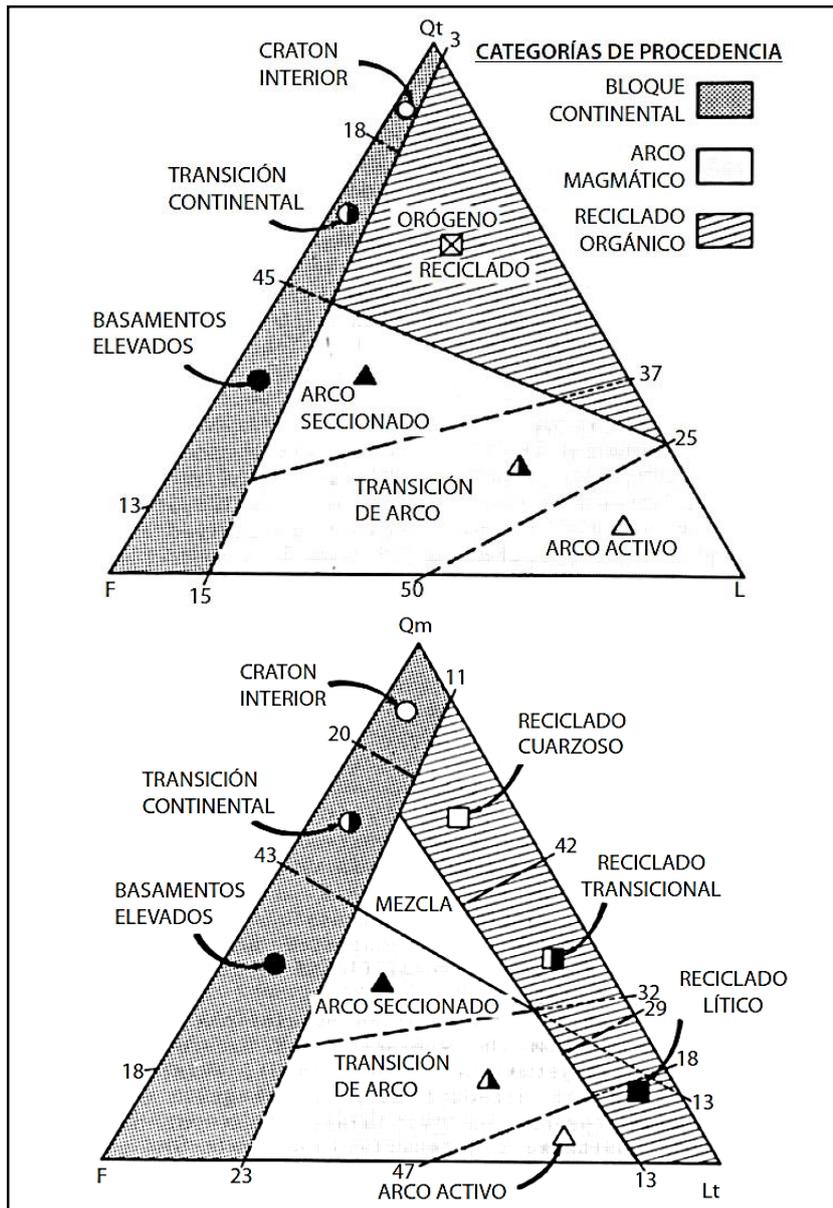


Figura 5. Campos composicionales de los distintos tipos de procedencia de arenas en diagramas triangulares QtFL (cuarzo total-Feldespatos-Fragmentos de roca lábiles) y QmFLt (cuarzo monocristalino-Feldespatos-Total de granos lábiles). Modificado de Dickinson et al. (1983) (Arribas, 2010).

En el diagrama de QFL (figura 5), Para procedencias de bloques continentales, una tendencia de disminución de la estabilidad o madurez aleja del polo Q hacia el polo F para cratón interior, transicional, y suites de basamento levantado en ese orden (Dickinson y Suczek, 1979).

Si bien la diagnosis de la procedencia de Dickinson puede en ocasiones ser muy generalista y obvia, puede aportar una visión sobre ambientes geotectónicos en depósitos arenosos muy antiguos, sin olvidar la importancia del análisis de la

evolución de la composición en registros arenosos que contemplen cambios paleotectónicos. Como siempre, los diagramas triangulares ofrecen un campo de análisis espacial y temporal de la evolución de la composición de los depósitos detríticos (Arribas, 2010)

a. Procedencias de bloque continental

En esta categoría se incluyen grandes escudos y plataformas, así como bloques de basamento localmente levantados. Procedencias de grandes escudos, o de cratón interior, están compuestas predominantemente por rocas de basamento que consisten en gran parte de rocas ígneas plutónicas félsicas y metamórficas. Asociados a sucesiones de plataforma pueden incluir abundantes rocas sedimentarias. Arenas derivadas de cratones interiores son generalmente arenas cuarzosas con menor cantidad de feldespatos, lo que refleja múltiple reciclaje y quizá intensa meteorización y largas distancias de transporte en cratones de bajo relieve. Por lo tanto procedencias de cratón interior producen en gran medida areniscas cuarzosas, aunque algunas areniscas líticas podrían derivar de áreas positivas localizadas marginalmente a bloques continentales. Los sedimentos derivados de cratones son depositados en cuencas locales dentro del cratón, en cuencas de antepaís, o a lo largo de márgenes continentales dislocados en plataforma, pendiente, o ambientes de aguas profundas.

Los bloques de basamento levantados generalmente consisten de rocas graníticas y gneises. El alto relieve en estos bloques facilita una rápida erosión, que genera relativamente areniscas feldespáticas gruesas y arcosas. Algunos bloques pueden tener una cobertura inicial de rocas sedimentarias o metamórficas que pueden producir areniscas líticas. Sedimentos de bloques de basamento levantados son por lo común depositados sin mucho transporte en cuencas interiores cercanas (Boggs, 2009).

b. Ambientes de arco magmático

Los arcos magmáticos consisten en tierras volcánicas altas situadas a lo largo de los arcos de islas activos o en algunos márgenes continentales. Algunos arcos magmáticos, como el arco de Japón, pueden no tener una cubierta volcánica continua y pueden estar asociados con rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Los arcos magmáticos a lo largo de los márgenes continentales

que resultan profundamente erosionados o seccionados también exponen rocas plutónicas profundas.

Arcos jóvenes no seccionados tienden a tener una cubierta de rocas volcánica casi continua. Por lo tanto en gran medida los detritos volcanoclásticos se desprenden de los arcos no seccionados (Dickinson y Suczek citados por Boggs ,2009).

Estos detritos se componen principalmente de feldespato, plagioclasa y fragmentos líticos volcánicos, muchos de los cuales contienen fenocristales de plagioclasas. Si el cuarzo está presente, es cuarzo volcánico. Por lo tanto, las areniscas derivados de arcos magmáticos no seccionados son casi exclusivamente areniscas líticas volcánicas. Los sedimentos se pueden depositar en las cuencas retroarco, cuencas de antearco y cuencas de intraarco. Los arcos seccionados que exponen rocas plutónicas profundas arrojan una mezcla de detritos volcánico y plutónico y bajo algunas condiciones pueden incluso arrojar detritos metamórficos o sedimentarios. Por lo tanto, el feldespato potásico y cuarzo plutónico pueden estar presentes en estos detritos junto con el material volcanoclástico. Las areniscas derivadas de arcos seccionados son por lo tanto menos ricos en líticos volcánicos que los de los arcos no seccionada (Boggs, 2009).

c. Ambientes de orógenos reciclados

Los orógenos reciclados son regiones de fuente creados por plegamiento o fallamiento de terrenos sedimentario o metasedimentarios, permitiendo detritos de estas rocas para ser depositados en cuencas asociadas. Muchos orógenos reciclados se formaron por la colisión de terrenos que fueron una vez bloques continentales separados. Los Orógenos de colisión están compuestos generalmente de mantos y capas de corrimiento de rocas sedimentarias y metamórficas, o incluso variedades ofiolíticas; por lo tanto, suites complejas de sedimentos pueden ser derivados de estos orógenos (Boggs, 2009).

Dickinson y Suczek citados por Boggs (2009) sugieren que las areniscas típicas están compuestas de material sedimentario depositado, tienen contenido intermedio de cuarzo, y una gran cantidad de fragmentos líticos sedimentarios y metasedimentarios. Areniscas menos típicas derivadas de orógenos de colisión son cuarzoarenitas, areniscas feldespáticas, y areniscas ricas en chert.

Sedimentos que se desprenden de orógenos de colisión pueden ser eliminados en las cuencas de antepaís o pueden ser transportados longitudinalmente a las cuencas oceánicas adyacentes

2.2.6.5. Tipologías de cuarzo en función del tamaño de grano

En función del tamaño de grano, se observa una disminución progresiva del porcentaje de cuarzos policristalinos en favor de las variedades monocristalinas a medida que disminuye el tamaño de grano de las arenas. Esto es debido a la rotura de los granos por las uniones intercristalinas, pasando de $Q_p > 3$ a $Q_p 2-3$ y, finalmente, a cuarzos monocristalinos (Tortosa, 1988).

A medida que disminuye el tamaño de grano, decrece el porcentaje relativo de los granos de cuarzo policristalinos en favor de las tipologías monocristalinas. Los contenidos en cuarzos policristalinos son superiores en arenas derivadas de áreas con bajo grado metamórfico a los de arenas procedentes de zonas plutónicas y metamórficas de medio y alto grado (Tortosa, 1988).

2.2.6.6. Influencia de la litología del área fuente en el contenido de las diferentes tipologías de cuarzo

Por lo que respecta a la influencia de la litología del área fuente en el contenido de las diferentes tipologías de cuarzo, en arenas generadas a partir de áreas plutónicas y gnéisicas predominan las tipologías monocristalinas, mientras que en arenas procedentes de áreas pizarroso-esquistosas las tipologías policristalinas constituyen la mayor parte de la población total de granos de cuarzo (Tortosa, 1988).

Por otro lado, en arenas plutónicas y metamórficas de alto grado, los granos de cuarzo policristalinos están constituidos predominantemente por pocos cristales (no más de cinco por grano), siendo los contactos entre ellos frecuentemente rectos. Por el contrario, en el caso de arenas derivadas de áreas metamórficas de bajo grado predominan los granos de cuarzo policristalinos con más de cinco unidades por grano, siendo las unidades cristalinas de tamaño fino a muy fino. Los contactos intercristalinos son, en su mayoría, suturados (Tortosa, 1988).

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Petrofacie. Conjunto de distintas unidades detríticas que presentan una similitud composicional consistente, debida principalmente a una misma área fuente y a la participación de procesos sedimentarios equivalentes (Arribas, 2010).

Cuarzo monocristalino. Si los granos de cuarzo son cristales simples (Adams et al. s.f.).

Policristalino. Si los granos de cuarzo constan de numerosos cristales con orientación diferente (Adams et al. s.f.).

Cemeneto sintaxial de cuarzo. Cemento que está en continuidad óptica con los granos detríticos sobre los que nuclea (Atlas de Petrología Sedimentaria. Disponible en http://webs.ucm.es/info/petrosed/rd/cem/ejemplos_csi.html).

Suites. Un grupo de minerales, rocas, fósiles que ocurren juntos y propios de una área fuente o un período (Boggs, 2009).

Procedencia. Se entiende por procedencia (en inglés provenance) de un depósito detrítico (y sedimentario en general) el origen o la fuente de la que procede ese depósito, incluyendo todos los factores que han contribuido a su formación. En Petrología Sedimentaria este concepto tiene unas connotaciones íntimamente relacionadas con la composición de los depósitos sedimentarios. (Arribas, 2010).

Cratón. Corteza continental estable de gran extensión, compuesto de roca basal cristalina antigua. (Enciclopedia británica. Disponible en <https://www.britannica.com/science/craton>)

Orógenos reciclados. Término utilizado para definir a áreas fuentes formadas por complejos de subducción o cinturones de pliegues y cabalgaduras (Boggs, 2009).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Geográfica

El área de investigación se encuentra ubicada al SE de la ciudad de Cajamarca, pertenece al cuadrángulo de San Marcos (15g), delimitada por las coordenadas del sistema de Unidad Técnica de Medida (UTM.) datum WGS-84, y está contenida dentro de los siguientes puntos: Latitud, 9204000 y Longitud 781000 con Latitud 9206500 y longitud 784500 (ver anexo 1).

3.1.2. Política

El área de investigación se encuentra ubicada en los centros poblados de Shaullo Chico y Huayrapongo que pertenecen a los Distritos de Baños del Inca y Llacanora respectivamente, y están dentro de la Provincia de Cajamarca y Región Cajamarca.

3.1.3. Accesibilidad

Para poder acceder a los afloramientos rocosos de esta Formación en el área de investigación, se toma a la carretera asfaltada Cajamarca–Baños del Inca con un promedio de 6Km, una vez en este lugar hay dos posibilidades de acceso la primera es Baños del Inca–Shaullo aproximadamente 1.8km, o también se puede acceder mediante la carretera asfaltada Baños del Inca–Llacanora aproximadamente 5km. Teniendo que recorrer aproximadamente un tiempo de 20 minutos en vehículo.

3.1.4. Clima

El área de investigación se encuentra aproximadamente entre los 2600 – 2900 m.s.n.m. pertenece a la Región Quechua, el clima es templado, seco y soleado en el día y frío en la noche. Su temperatura media anual es de 15,8°C tiene un invierno suave y un verano caluroso y lluvioso en febrero. La temperatura media

anual fluctúa entre los 21°C y 6°C. La estación de lluvias intensas ocurre de diciembre a marzo. La estación seca que corresponde al otoño y el invierno en el hemisferio sur, bastante templado durante el día y refrigerado en las noches, se presenta entre los meses de mayo a septiembre (tomado de <http://wiki.sumaqa.com/es/Cajamarca#Clima>)

Tabla 3. Cuadro climatológico de Cajamarca 2016

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
Precipitación (mm)	74,40	86,91	107,41	51,47	5,03	0,60	1,43	0,70	21,78	54,80	14,40	56,15
Tem. del aire Máx. °C	19,24	18,79	18,89	18,56	18,59	17,32	17,26	18,13	18,20	18,52	18,50	17,75
Tem. del aire Mín. °C	10,26	11,75	10,45	9,71	7,73	6,38	5,12	6,45	7,63	8,41	6,37	9,57
Tem. del aire Med. °C	14,75	15,27	14,67	14,13	13,16	11,85	11,19	12,29	12,92	13,46	12,43	13,66
Hum. Rel. Máx. (%)	91,21	92,78	93,96	94,50	91,53	85,99	84,14	81,74	84,79	86,85	77,73	91,13
Hum. Rel. Mín. (%)	52,37	59,95	57,54	57,00	49,37	44,88	40,27	40,22	43,58	44,70	34,51	52,99
Hum. Rel. Med. (%)	71,79	76,36	75,75	75,75	70,45	65,43	62,20	60,98	64,19	65,77	56,12	72,06
Direc. Viento (grados)	161,62	151,46	156,91	159,29	175,86	163,13	175,97	153,74	160,29	171,16	177,90	169,17
Vel. Viento (Nudos)	1,51	1,31	1,26	1,26	1,40	1,60	1,71	1,89	1,61	1,60	1,74	1,48
Presión atm. (mb)	12,80	12,81	12,82	12,82	12,82	12,83	12,83	12,82	12,82	12,79	12,79	12,79

(SENAMHI, 2016)

3.1.5. Vegetación

La vegetación consiste en plantas silvestres, árboles y arbustos, eucaliptos, pinos, entre otros. El uso de la tierra se desarrolla una agricultura temporal (en época de lluvia), en donde se suelen sembrar maíz, papa, legumbres, principales en la alimentación de la población, entre otros, se encuentran también el sembrío de alfalfa y forraje, esenciales en la alimentación del ganado, etc.



Figura 6. Cobertura vegetal en el centro poblado Shaullo compuesta por eucaliptos y pinos, ubicadas al flanco izquierdo de afloramiento

3.2. PROCEDIMIENTOS

3.2.1. Metodología

3.2.1.1. Etapa preliminar al trabajo de campo

Consiste en recopilar toda la información necesaria previa al trabajo de campo mediante libros, boletines informativos, revistas informativas, trabajos de investigación relacionados al tema, etc.

En la actualidad existe abundante información geográfica que se puede utilizar para realizar aspectos básicos como determinar la ubicación exacta del área de investigación, ubicar los principales accesos (carreteras, caminos de herradura y trochas carrozables), identificar la topografía y ríos, quebradas y afloramientos rocosos, centros poblados cercanos que pueden ser muy útiles en el caso de cualquier incidente que pueda ocurrir en el trabajo de campo.

Para el presente trabajo de investigación se utilizó información cartográfica obtenida de: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (geología); a través de su portal en internet GEOCATMIN, Global Mapper (topografía básica), SAS.Planet: (imágenes satelitales de alta resolución).

3.2.1.2. Etapa de campo

El procedimiento consistió en la delimitación de la Formación Farrat, el levantamiento de secciones estratigráficas y estructuras sedimentarias, conjuntamente con la toma de muestras (areniscas) con su respectiva codificación.

En el proceso se realizó algunas observaciones y anotaciones puntuales tales como: ubicación, elevación, azimut, buzamiento, tipo de roca (descripción macroscópica), y algún otro dato que se considere necesario para el tema de investigación.

3.2.1.3. Etapa de gabinete

Para la elaboración de la columna estratigráfica se utilizó el programa Strater 4, Para clasificar las areniscas y determinar su procedencia se realizaron secciones delgadas de 7 muestras que posteriormente fueron analizadas en un microscopio petrográfico marca Meiji Techno modelo ML9430. Las fotografías de las secciones delgadas se tomaron con una cámara marca Nikon modelo Coolpix S4100. El análisis petrográfico cuantitativo se elaboró por medio de un conteo de 500 granos libres de cemento por lámina delgada. Para plotear los resultados

obtenidos del conteo modal de granos se utilizó el programa AutoCAD 2016. Finalmente para la elaboración de los planos (plano de ubicación, topográfico y geológico) se utilizó el programa ArcMap 10.2.2

3.2.2. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Las variables dependientes son Estratigrafía y Tipos de sedimentos depositados (Petrografía), Las características de estas variables están relacionadas con las Condiciones de depositación y las Fuentes de procedencia de los sedimentos.

Tabla 4. Cuadro de variables.

Variables	Definición conceptual
VARIABLES DEPENDIENTES	
Estratigrafía	Es la sucesión cronológica de todas las unidades estratigráficas presentes en una región, ordenadas de más antigua a más moderna
Tipos de sedimentos depositados (Petrografía).	Conjunto de sedimentos clasificados según su composición mineralógica
VARIABLES INDEPENDIENTES	
Condiciones de depositación	Condiciones espaciotemporales en las que tuvo lugar la depositación.
Fuente de procedencia	Área fuente de la que derivan determinados sedimentos.

3.2.3. Técnicas

3.2.3.1. Elaboración de secciones delgadas y estudio petrográfico

Esta etapa del procedimiento se realizó con ayuda de un equipo de profesionales que cuentan con el equipo necesario para la realización de las secciones o láminas delgadas, y la experiencia necesaria para la identificación de minerales bajo un microscopio petrográfico.

3.2.4. Instrumentos y equipos

Se utilizaron los siguientes instrumentos y equipos:

GPS Navegador: Utilizado para la ubicación geográfica, configurado en el sistema UTM. WGS-84 Zona 17 Sur.

Brújula tipo Brunton: Para medir la orientación y buzamiento de los estratos.

Planos: Se utilizaron planos topográfico y geológico.

Wincha: Para medir el espesor de los estratos

Lupa 20X: Para obtener visión más amplia de la composición de la roca.

Libreta de Campo: Utilizada para anotar la información de campo.

Colores y lápices; Utilizados para anotar en la libreta y realizar cartografiado.

Picota: para romper la roca y obtener muestras de mano.

Comba y cincel: para extraer las muestras.

Bolsas para muestras: para el transporte de las muestras.

Precintos de seguridad: para asegurar las bolsas que contienen las muestras.

Etiquetas de identificación de muestras: utilizadas en la codificación de muestras.

Cámara fotográfica digital: Utilizado para capturar y almacenar fotografías.

Máquina para cortar las muestras: para realizar las secciones delgadas.

Microscopio petrográfico: para realizar el estudio petrográfico.

Software: ArcGIS 10.1, para la elaboración de mapas de ubicación, geológico y topográfico; Strater 4 para la elaboración de la columna estratigráfica; Word 2013 y Excel 2013 para la elaboración del informe, tablas y cuadros estadísticos.

3.3. GEOLOGÍA LOCAL

3.3.1. Formación Farrat

Consta de areniscas cuarzosas blanquecinas de grano medio a grueso, tiene un grosor promedio de 500 m. En algunos lugares se observa estratificación sesgada. La Formación Farrat suprayace a la Formación Carhuaz y subyace a la Formación Inca.

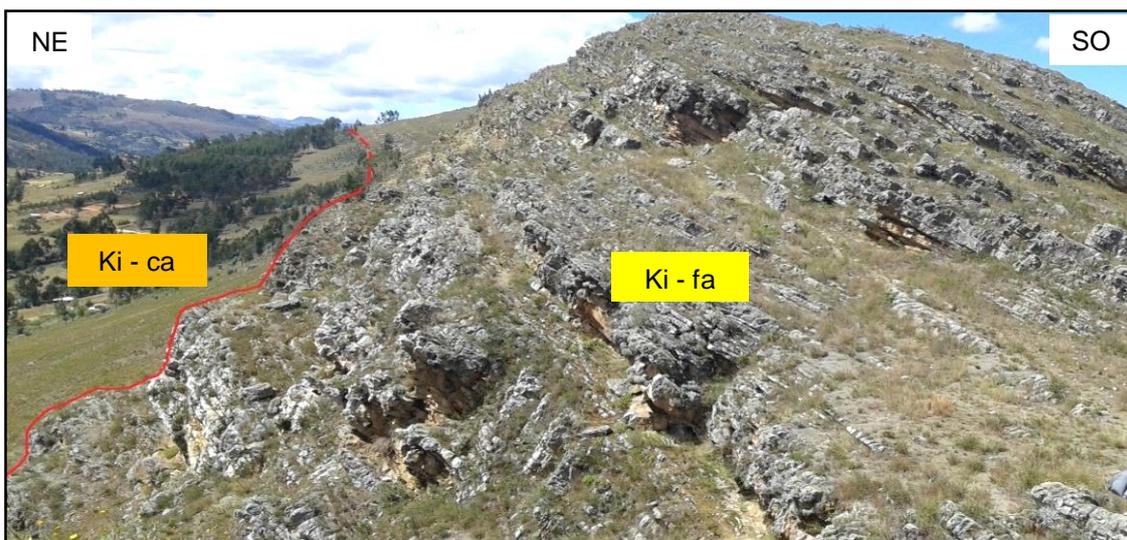


Figura 7. Contacto entre la formación Carhuaz y la base de la Formación Farrat.

3.4. PETROLOGÍA

La Formación Farrat de la zona consta en su mayoría de areniscas blanquecinas con variaciones en el tamaño de su granulometría (medio a grueso), y con pequeñas cantidades de areniscas limosas y limoarenitas encontradas en algunos niveles y con espesores no mayores a 6 metros.



Figura 8. Fotografías de areniscas blancas y areniscas limosas de la Formación Farrat.

3.5. MARCO ESTRATIGRÁFICO

El levantamiento de la columna estratigráfica se realizó en tres segmentos, en cada uno se levantó la columna litológica e identificó las características texturales y estructuras sedimentarias más representativas.

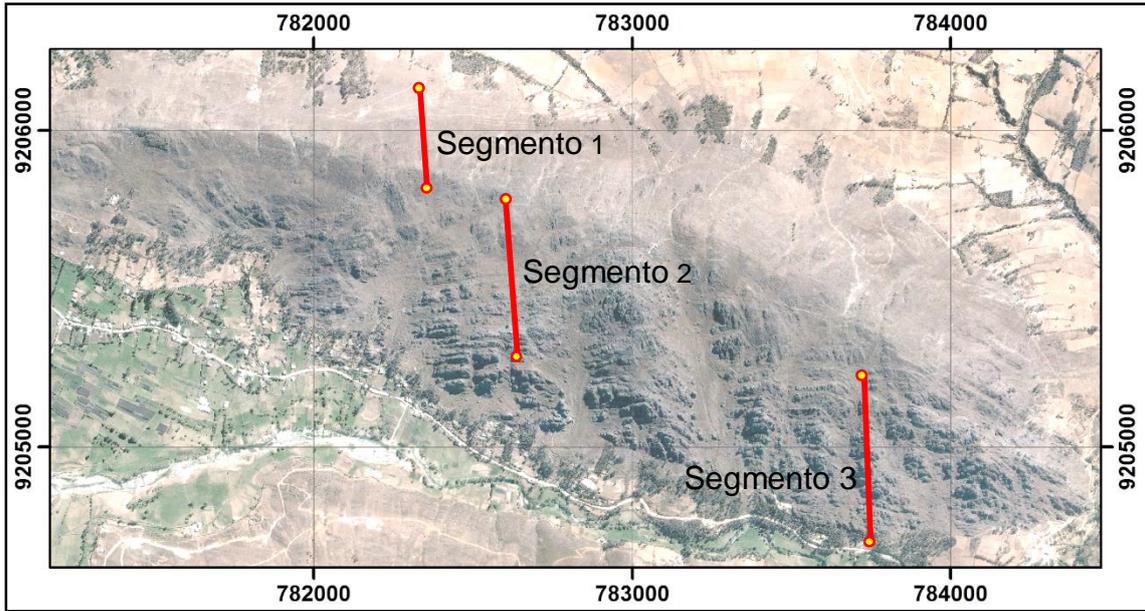


Figura 9. Segmentos donde se levantaron columnas estratigráficas y toma de muestras.

3.5.1. Segmento 1

La columna litológica del segmento 1 tiene un espesor de 116.5m y consiste en areniscas blanquecinas de grano medio, el ordenamiento interno de los estratos en su mayoría es estratificación laminar con algunos estratos con laminación sesgada.



Figura 10. Vista panorámica de la base de la Formación Farrat (segmento 1)

3.5.2. Segmento 2

La columna litológica del segmento 2 tiene un espesor de 197.8m (desde los 116,5m hasta los 314.3m sobre el segmento 1) y consiste en areniscas blanquecinas de grano medio, el ordenamiento interno de los estratos en su mayoría es estratificación laminar, con algunos estratos con laminación sesgada.



Figura 11. Vista panorámica de la parte media de la Formación Farrat (segmento 2)



Figura 12. Roca con estructura sedimentaria, tipo laminación paralela.

3.5.3. Segmento 3

La columna litológica del segmento 3 tiene un espesor de 142.7m (desde los 314.3m hasta los 457m sobre el segmento 2) y consiste en areniscas blanquecinas de grano medio, el ordenamiento interno de los estratos en su

mayoría es estratificación laminar, algunos niveles con laminación sesgada y estratificación sesgada.



Figura 13. Vista panorámica de la parte techo de la Formación Farrat (segmento 3)



Figura 14. Estratos con estructura sedimentaria, tipo estratificación sesgada.

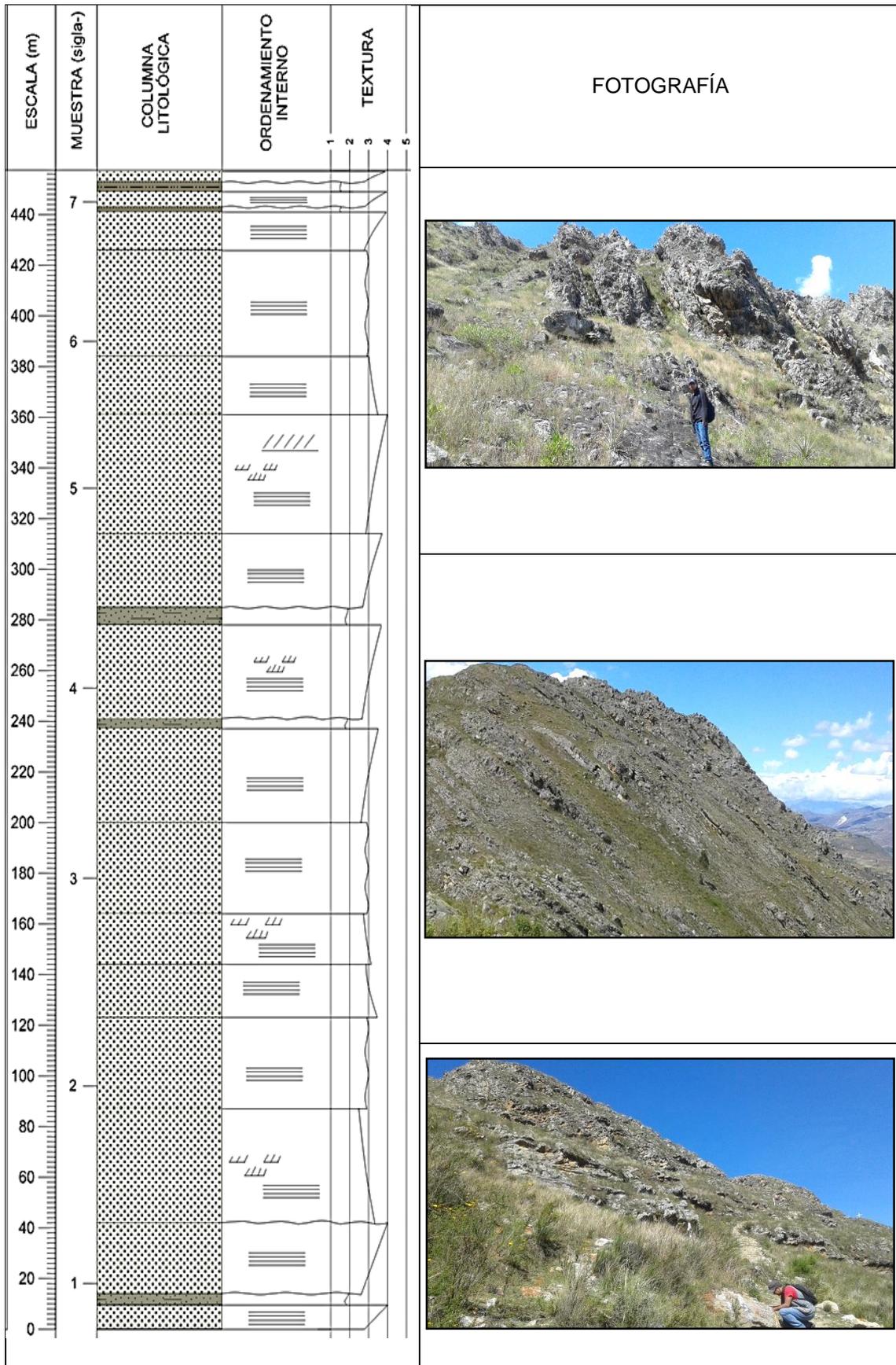


Figura 15. Grafico que muestra la columna estratigráfica de la Formación Farrat y fotografías de los segmentos.

3.6. MARCO PETROGRÁFICO

3.6.1. Muestra N° 1

Roca constituida esencialmente por granos de cuarzo monocristalino de tamaño medio (0.25 – 0.5 mm), algunos granos de cuarzo policristalino con más de 5 unidades por grano, siendo las unidades cristalinas de tamaño muy fino (0.125 – 0.062 mm), los granos monocristalinos presentan contactos cóncavo-convexos, fragmentos líticos (matriz de arcilla con finos granos de cuarzo), y finalmente trazas de minerales opacos y zircón.

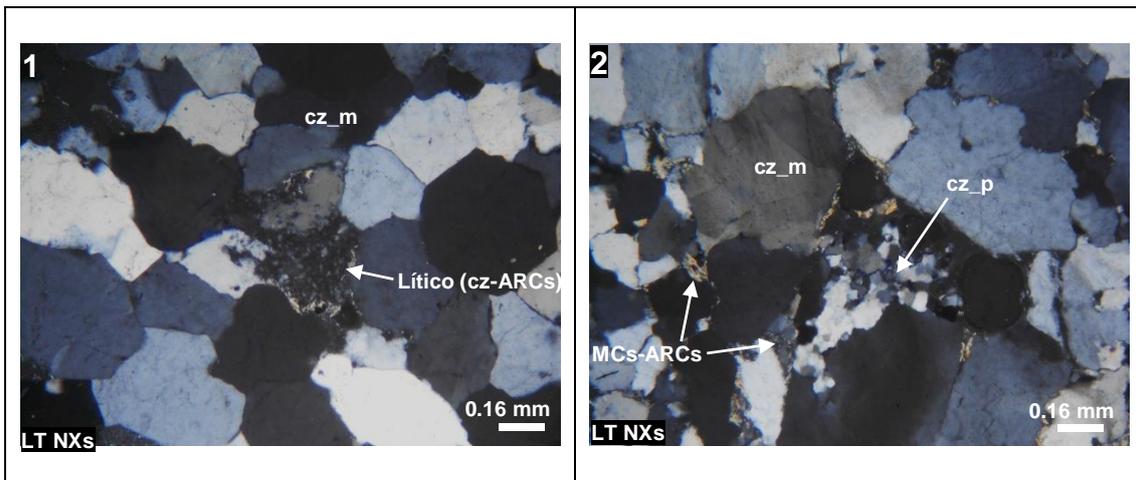


Figura 16. Fotomicrografías 1 a 2. 1) Granos de cuarzo monocristalino de bordes recrystalizados, con extinción recta y contactos concavo-convexos, en el centro de la fotografía se observa un grano lítico conformado por una matriz de arcillas y finos granos de cuarzo. 2) Nótese dos granos de cuarzo policristalino con contactos suturados entre los bordes de las unidades cristalinas.

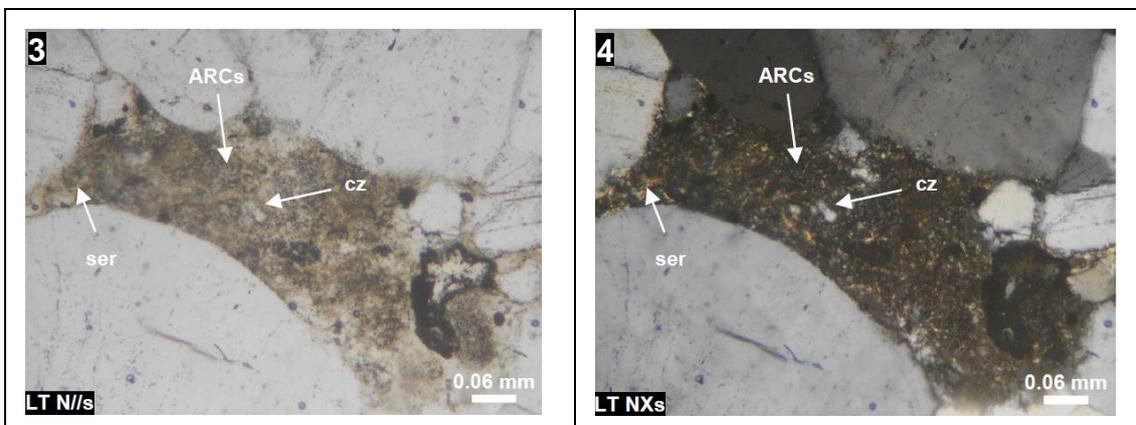


Figura 17. Fotomicrografías 3 y 4. 3) fotomicrografía con mayor acercamiento microscópico de un fragmento lítico donde se observa que está constituido por

pequeños granos de cuarzo y rodeados por arcillas. 4) Misma vista de la fotomicrografía 3 en nicoles cruzados.

3.6.2. Muestra N° 2

Roca constituida esencialmente por granos de cuarzo monocristalino de tamaño fino (0.12 – 0.25 mm), algunos granos de cuarzo policristalino con más de 5 unidades por grano, siendo las unidades cristalinas de tamaño muy fino (0.125 – 0.062 mm), los granos monocristalinos presentan contactos cóncavo-convexos, algunos granos están cementados por sobrecrecimiento sintaxial de cuarzo, también se puede apreciar líticos constituidos por cuarzo y arcillas, algunas muscovitas paralelas a la estratificación y finalmente trazas de minerales opacos y zircón.

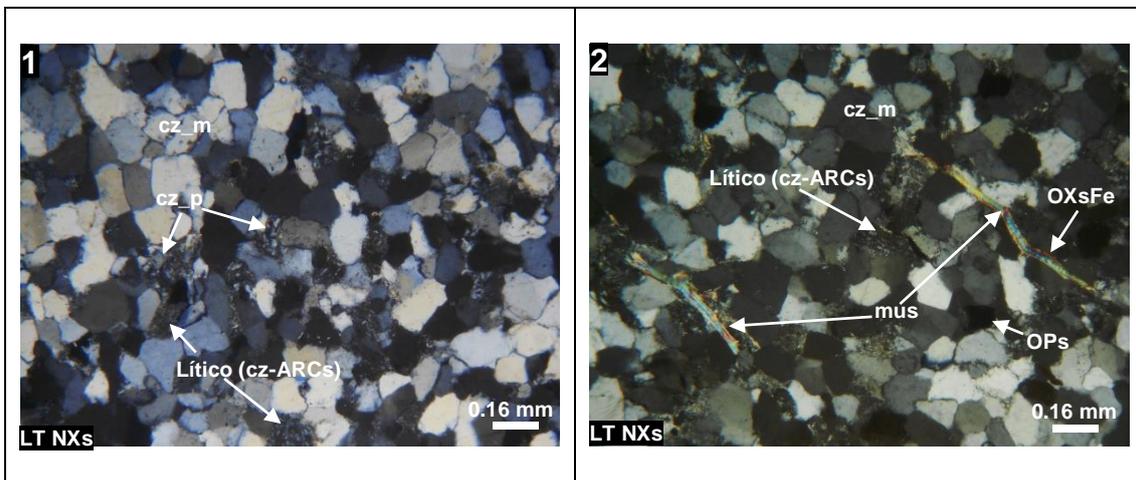


Figura 18. Fotomicrografías 1 a 2. 1) Granos subredondeados de cuarzo monocristalino y líticos volcánicos (alterados a cuarzo-arcillas) de bordes recrystalizados. Nótese algunos contactos suturados y cóncavo-convexos, además minerales opacos diseminados, También se observan granos de cuarzo policristalino. 2) Se observan flakes de micas (muscovita) dispuestas paralelas a la estratificación.

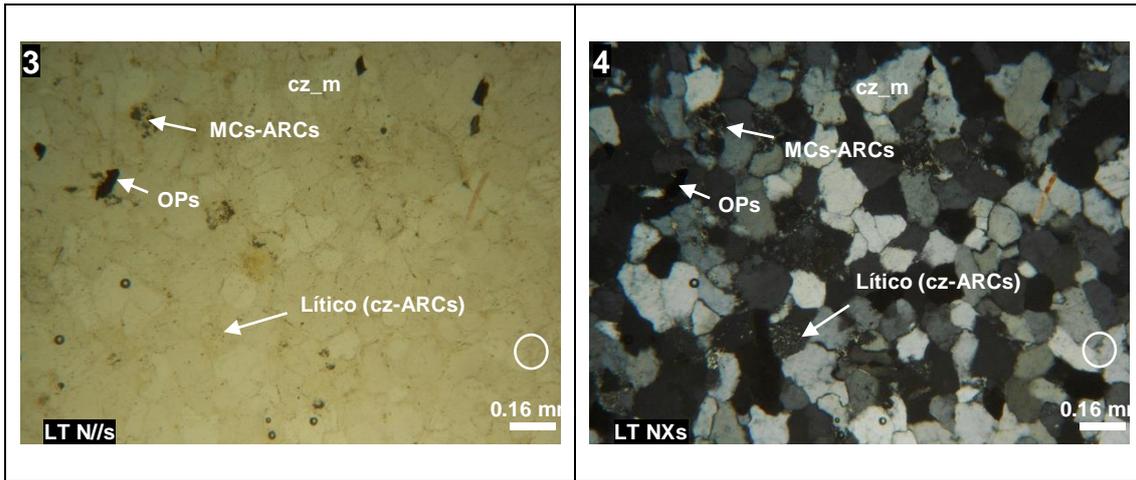


Figura 19. Fotomicrografías 3 a 4. 3) Nótese formación de algunos contactos suturados o contactos sinuosos o irregulares que se forman cuando la disolución por presión es más intensa, ver círculo blanco. 4) Misma vista de la fotomicrografía 3 en nicoles cruzados.

3.6.3. Muestra N° 3

Roca constituida esencialmente por granos de cuarzo monocristalino de tamaño fino (0.12 – 0.25 mm), algunos granos de cuarzo policristalino con más de 3 unidades por grano, siendo las unidades cristalinas de tamaño muy fino (0.125 – 0.062 mm); los granos monocristalinos presentan contactos cóncavo-convexos, algunos granos están cementados por sobrecrecimiento sintaxial de cuarzo, líticos constituidos por cuarzo y arcillas, escasos anfíboles y muscovitas, también trazas de minerales opacos, zircón y rutilo.

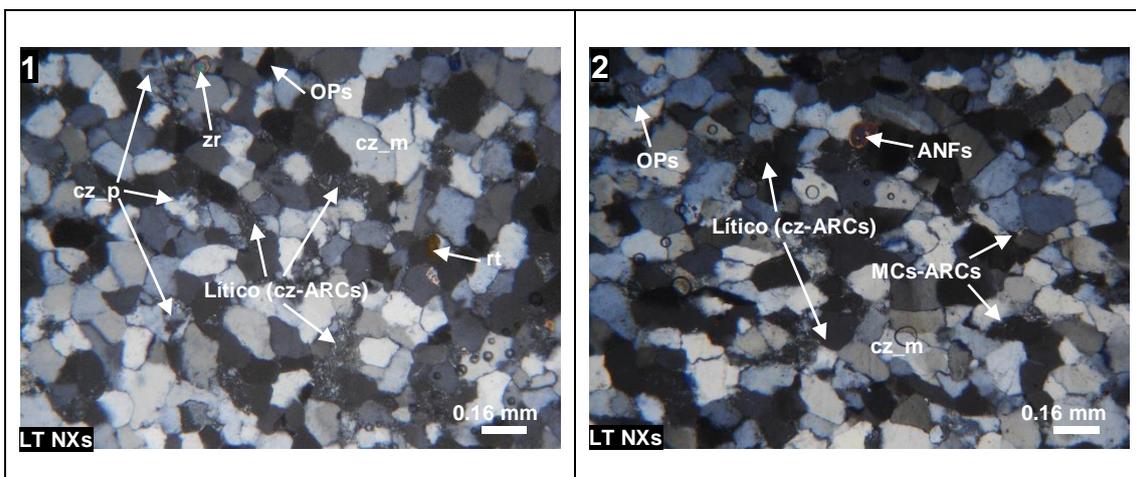


Figura 20. Fotomicrografías 1 a 2. 1) Granos subredondeados de cuarzo monocristalino, líticos volcánicos (alterados a cuarzo y arcillas); También se observa algunos detritos

de zircón y rutilo. Nótese contactos suturados y concavos-convexos, además minerales opacos diseminados. 2) algunos anfíboles de bordes recrystalizados, cuyos intersticios es rellenado por micas y arcillas.

3.6.4. Muestra N° 4

Roca constituida esencialmente por granos de cuarzo monocristalino de tamaño fino a medio (0.12 – 0.30 mm), algunos granos de cuarzo policristalino con más de 3 unidades por grano, siendo las unidades cristalinas de tamaño muy fino (0.125 – 0.062 mm), líticos constituidos por cuarzo y arcillas, escasos anfíboles y muscovitas; cementados con algo de arcillas y micas blancas. También trazas de minerales opacos, zircón y rutilo.

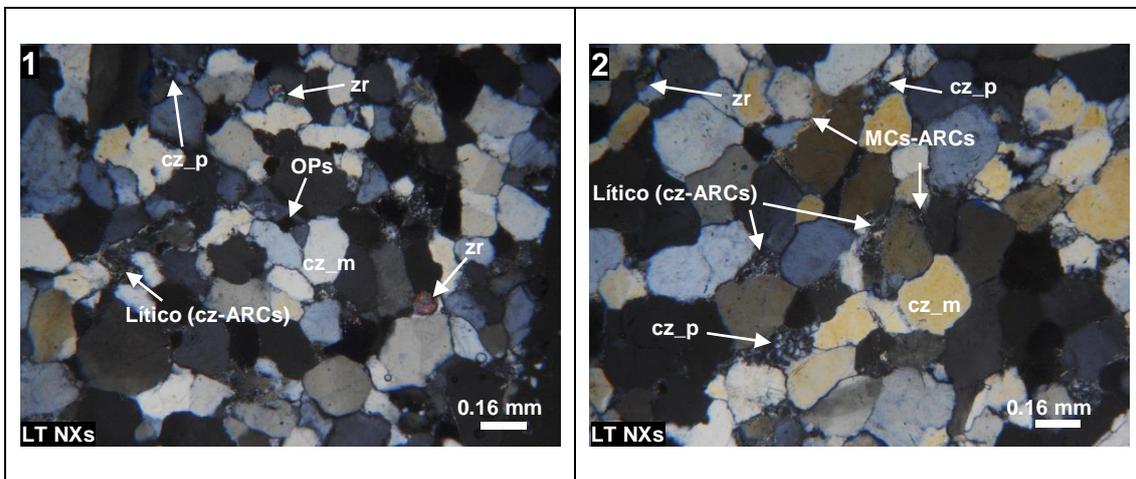


Figura 21. Fotomicrografías 1 a 2. 1) Granos subredondeados de cuarzo monocristalino, líticos volcánicos (alterados a cuarzo y arcillas), y en menor cantidad cuarzo policristalino, también algunos granos de zircón y diseminaciones de minerales opacos. 2) Nótese contactos suturados y concavos-convexos

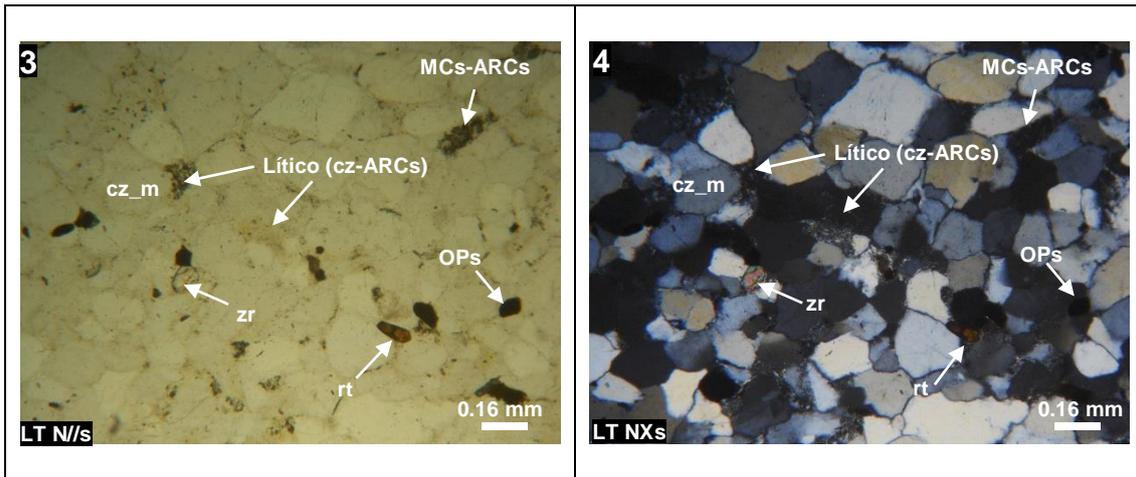


Figura 22. Fotomicrografías 3 a 4. 3) También se observó escasos granos redondeados de rutilo y zircón. 4) Misma vista de la fotomicrografía 3 en nicoles cruzados.

3.6.5. Muestra N° 5

Roca constituida esencialmente por granos de cuarzo monocristalino de tamaño fino a medio (0.12 – 0.4 mm), algunos granos de cuarzo policristalino con más de 5 unidades por grano, siendo las unidades cristalinas de tamaño muy fino (0.125 – 0.062 mm), localmente puede verse incrementando hasta en un 12%, de micas y arcillas pero en promedio es <5%. También granos de líticos constituidos por cuarzo y arcillas, trazas de minerales opacos y zircón.

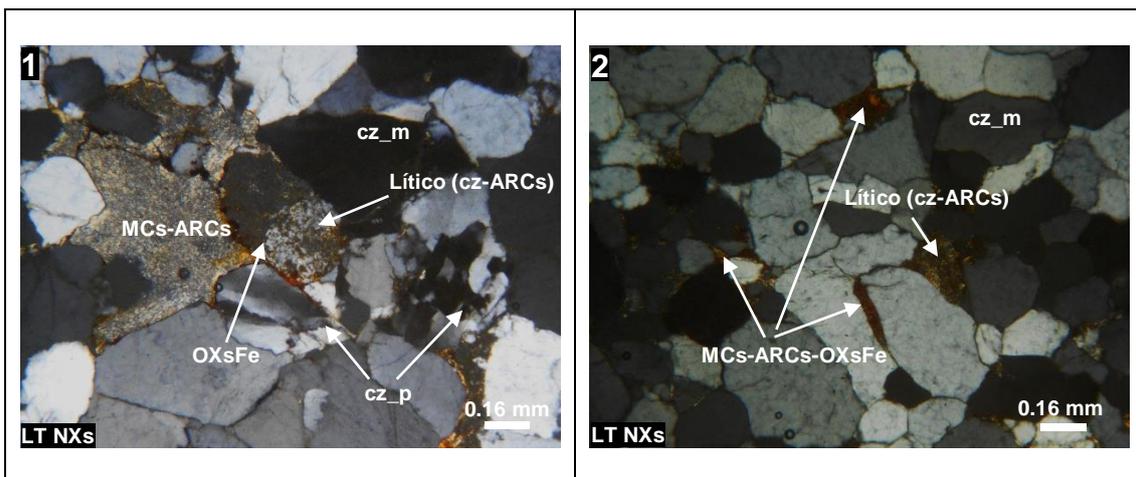


Figura 23. Fotomicrografías 1 a 2. 1) Granos subredondeados de cuarzo monocristalino de bordes recrystalizados, También menor cantidad de granos de líticos alterados a cuarzo y arcillas. 2) Micas y arcillas e impregnados de óxidos de hierro.

3.6.6. Muestra N° 6

Roca constituida esencialmente por granos de cuarzo monocristalino de tamaño fino (0.12 – 0.25 mm), algunos granos de cuarzo policristalino con más de 3 unidades por grano, siendo las unidades cristalinas de tamaño muy fino (0.125 – 0.062 mm), se observa incremento de Líticos constituidos por cuarzo y arcillas, escasos anfíboles y muscovitas, también trazas de minerales opacos, zircón y rutilo.

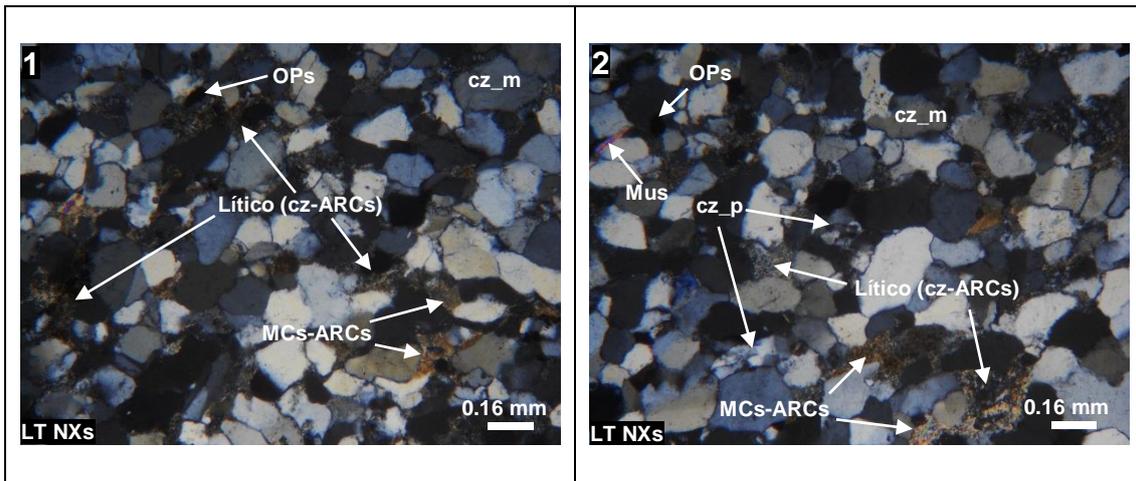


Figura 24. Fotomicrografías 1 a 2. 1) Granos subredondeados de cuarzo monocristalino, y líticos (alterados a cuarzo y arcillas) de bordes recrystalizados. Nótese contactos suturados y concavos-convexos, además minerales opacos diseminados. 2) También se observa en menor cantidad granos de cuarzo policristalino y escasas micas blancas (muscovita).

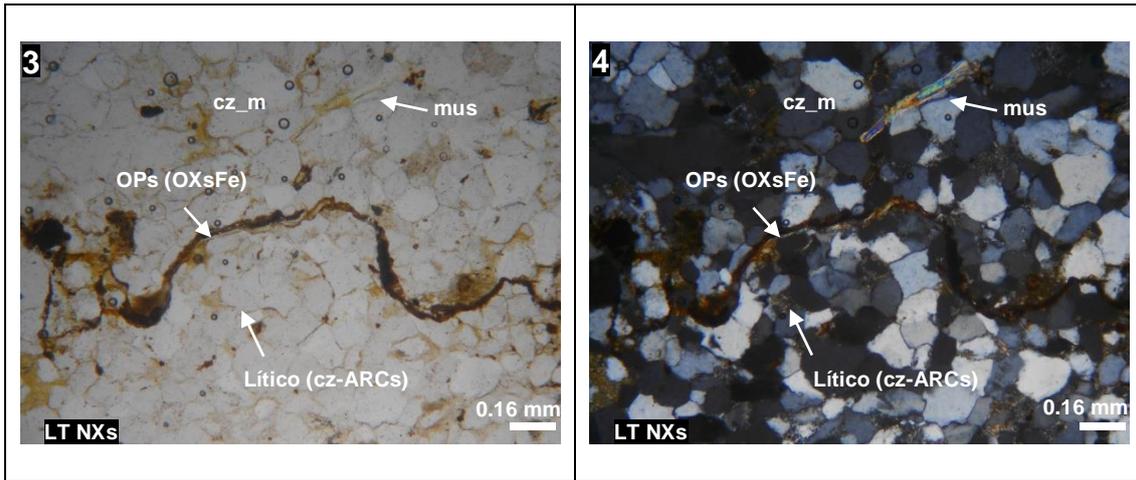


Figura 25. Fotomicrografías 3 y 4) Se observa algunas venillas sinuosas tipo estilolita paralelas a la estratificación de óxidos de hierro según minerales opacos. Nótese algunas muscovitas.

3.6.7. Muestra N° 7

Roca constituida esencialmente por granos de cuarzo monocristalino de tamaño medio (0.25 – 0.5 mm algunos granos de cuarzo policristalino con más de 5 unidades por grano, siendo las unidades cristalinas de tamaño muy fino (0.125 – 0.062 mm), también líticos constituidos por cuarzo y arcillas y trazas de minerales opacos.

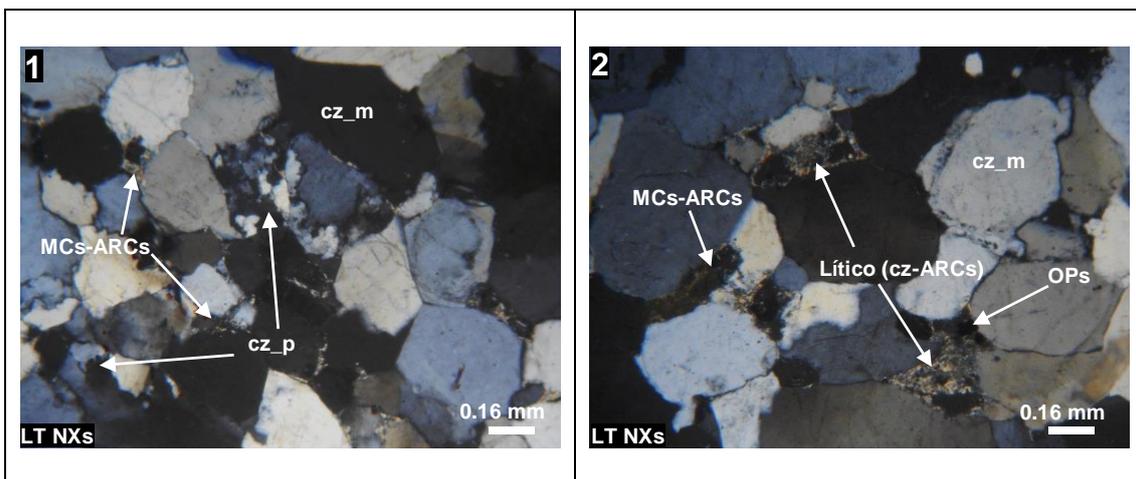


Figura 26. Fotomicrografías 1 y 2. 1) Granos subredondeados de cuarzo monocristalino y policristalino de bordes recrystalizados, cuarzopolicristalinos que presentan contactos rectos entre los bordes de sus cristales individuales 2). También se observó menor cantidad de granos de líticos volcánicos alterados a cuarzo y arcillas, y algunas diseminaciones de minerales opacos.

3.7. ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

3.7.1. Columna estratigráfica

Se realizó el levantamiento de una columna estratigráfica de 457 metros de espesor. Esta incluye de base a techo una secuencia de areniscas cuarzosas con variación de grano fino a medio, algunos niveles de areniscas limosas y limo areniscas. La geometría de los estratos es generalmente tabular con laminación paralela, pero en algunos niveles de la secuencia se encuentran estratos con laminación sesgada y estratificación sesgada (ver anexo 4).

3.7.2 Clasificación de las areniscas y análisis de procedencia

En total, se reconocieron y establecieron 7 categorías petrográficas para el conteo de los granos de las cuales 5 corresponden a granos y dos a cemento (ver tabla 5).

Tabla 5. Categorías de conteo aplicadas en el análisis petrográfico.

Abrev.	Nombre	Descripción
Qm	Cuarzo monocristalino	Granos de cuarzo o cristales simples con caras limpias
L	Líticos	Fragmentos con texturas porfíricas, con cristales suturados y equidimensionales embebidos en una matriz microcristalina (arcillas.)
Qp	Cuarzo policristalino	Generalmente de más de tres individuos
Ops (mineral denso)	Minerales opacos	Aquellos minerales que no transmiten luz cuando se examinan en lámina delgada. De formas subangulares. Ocurren diseminados, en intersticios de cuarzo.
zr (mineral denso)	Zircón	Granos redondeados
rt (mineral denso)	Rutilo	De formas subangulares.
Mus	Muscovita	De formas escamosas (flakes) paralelas a la estratificación.
MCS-ARCS	Micas y arcillas	Fragmentos finogranulares (micas blancas y arcilla), agregados criptocristalinos, ocurren intersticialmente, a veces laminados. En nicols paralelos se identifican por sus colores oscuros o pardos
C	Cemento sintaxial de cuarzo	Producto de sobrecrecimiento del cuarzo detrítico.

3.7.2.1 Clasificación las areniscas

Para las areniscas de la Formación Farrat se analizaron en total 7 secciones delgadas distribuidas sobre la secuencia, los resultados en el contenido promedio de cuarzo (Q), feldespatos (F), y fragmentos líticos se ordenaron en una tabla (ver tabla 6). Y la clasificación se realizó según el diagrama triangular de Pettijohn (1975). Dónde: $Q+F+L = 100\%$. (Cuarzo + feldespatos + líticos = 100%).

Tabla 6. Contenido porcentual de cuarzo feldespato y líticos.

N° Muestra	QFL (%)			Clasificación
	Q	F	L	
M-1	94.31	0	5.69	Sublitarenita
M-2	94.66	0	5.34	Sublitarenita
M-3	93.81	0	6.19	Sublitarenita
M-4	95.88	0	4.12	Cuarzoarenita
M-5	95.79	0	4.21	Cuarzoarenita
M-6	92.75	0	7.25	Sublitarenita
M-7	95.92	0	4.08	Cuarzoarenita

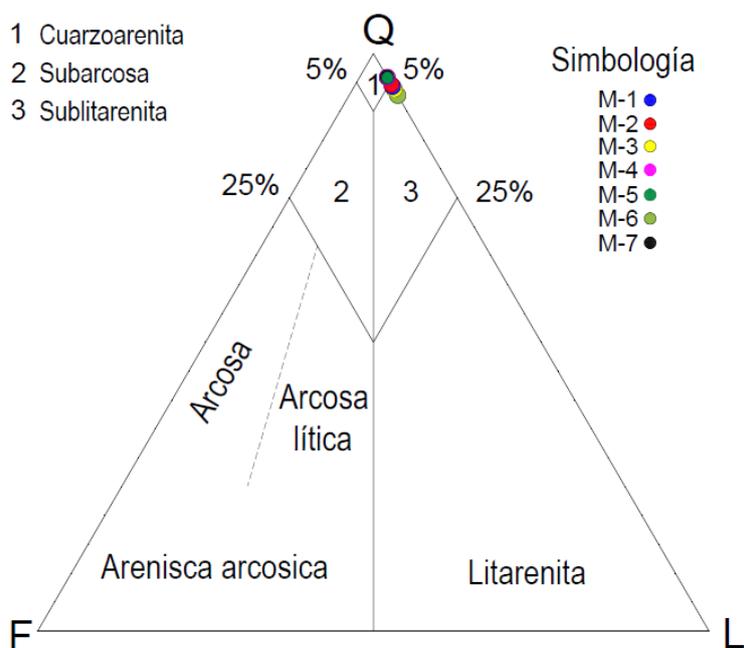


Figura 27. Clasificación de las areniscas de la Formación Farrat en el triángulo de Pettijohn 1975.

3.7.2.2 Procedencia

Se realizó análisis petrográfico de 7 muestras tomadas de diferentes niveles sobre la secuencia estratigráfica. La composición modal se obtuvo mediante un recuento de 500 granos por muestra. Para la determinación de procedencia se utilizaron los diagramas triangulares QtFL y QmFLt de acuerdo a lo establecido por Dickinson et al. (1983). Los cálculos modales se realizaron según las categorías de granos presentes en las areniscas, (ver tabla 7).

Tabla 7. Cálculos modales para los diagramas triangulares QtFL y QmFLt de Dickinson et al. (1983) según las categorías de granos presentes en las areniscas de la Formación Farrat.

Abrev.	Nombre	Descripción
Qt	Cuarzo total	% Qt = Qm + Qp
Qm	Cuarzo monocristalino	% Qm
F	Feldespatos	% F
L	Líticos	%L
Lt	Líticos totales	%Lt = L + Qp

Tabla 8. Contenido porcentual de cuarzo total, feldespatos y líticos, cuarzo monocristalino feldespatos y líticos totales

Muestra	QtFL (%)			QmFLt (%)		
	Qt	F	L	Qm	F	Lt
M-1	94.31	0.00	5.69	90.00	0.00	10.00
M-2	94.66	0.00	5.34	92.48	0.00	7.52
M-3	93.81	0.00	6.19	90.53	0.00	9.47
M-4	95.88	0.00	4.12	90.85	0.00	9.15
M-5	95.79	0.00	4.21	90.39	0.00	9.61
M-6	92.75	0.00	7.25	88.29	0.00	11.71
M-7	95.92	0.00	4.08	88.89	0.00	11.11

Con los resultados en contenido de cuarzo, feldespatos y fragmentos líticos, se plotearon los triángulos de Dickinson et al. 1983 con el fin de determinar las áreas

fuentes de las areniscas. Los resultados obtenidos indican la procedencia de la categoría de orógenos reciclados cercano al límite de la categoría bloque continental hacia cratón interior, (ver figura 28).

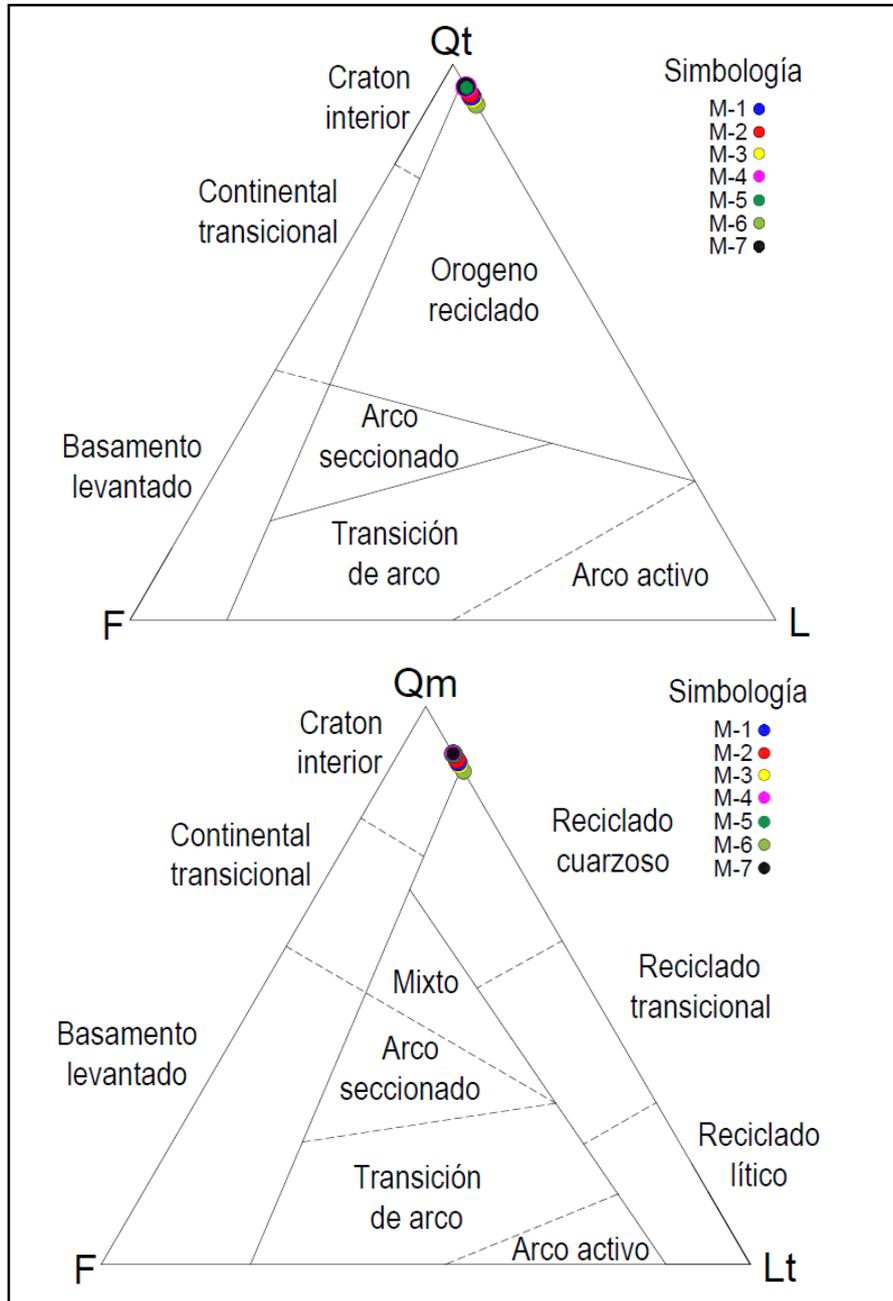


Figura 28. Resultados de las muestras sobre la procedencia de las areniscas de la Formación Farrat según los triángulos de discriminación tectónica de Dickinson et al. (1983).

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.1. Análisis de la clasificación de las areniscas

Según los resultados estadísticos obtenidos del conteo de granos en las secciones delgadas de cada una de las muestras analizadas se obtuvo que las muestras M1, M2, M3 y M6 contienen más del 5% de fragmentos líticos (L), más del 90% de cuarzo (Q) y no se observa presencia de feldespatos (F); por lo tanto al llevar los datos al triángulo de clasificación de areniscas según Pettijohn 1975 se obtiene que el nombre para estas areniscas es Sublitarenitas. Y las muestras M4, M5, M7 contienen menos del 5% de fragmentos líticos (L), más del 90% de cuarzo (Q) y no se observa presencia de feldespatos (F); por lo tanto en el triángulo de Pettijohn 1975 se clasifican como Cuarzoarenitas.

4.1.2. Análisis de la procedencia

El análisis petrográfico mostró que para las areniscas de la Formación Farrat el contenido promedio de granos de cuarzo total (Qt), granos de feldespatos (F) y granos de fragmentos líticos (L) (ver tabla 7) es: 94.7% Qt, 0% F, 5.3% L y el contenido de granos de cuarzo monocristalino, granos de feldespatos y granos de líticos totales es en promedio 90.2% Qm, 0% F y, 9.8% Lt. Al plotear estos datos en los triángulos de procedencia tectónica de Dickinson et al. (1983) se obtiene como resultado arenas con gran madurez y de múltiple reciclaje (deposición) según el triángulo QtFL y área de procedencia tectónica pertenecientes cratón interior según el triángulo QmFLt.

El contenido en tipos de cuarzo en promedio es Qm 96 % y Qp 4%, para las rocas en donde el cuarzo monocristalino presenta grano fino, se observan granos de cuarzopolicristalinos con 3 a más unidades cristalinas ($Q_p > 3$), pero predominan los granos con unidades cristalinas mayor a 5 unidades ($Q_p > 5$),

mientras que en las rocas donde el cuarzo monocristalino presenta grano medio, los granos de cuarzo policristalino presentan más de 5 unidades cristalinas ($Q_p > 5$).

Los fragmentos líticos representan en promedio el 5.3% de la roca, no se evidencia presencia de feldespatos. Finalmente, el cemento está presente en menos del 2% de la roca, compuesto por cuarzo sintaxial (cuarzo de intercrecimiento que se origina en los bordes de los granos) y arcillas.

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La columna estratigráfica de esta Formación se caracteriza por mantener uniformidad en la composición de toda la secuencia, presenta areniscas cuarzosas blanquecinas y fragmentos líticos constituidos por cuarzo y arcillas, la geometría de los estratos es generalmente laminar pero en algunos niveles de la secuencia presenta estratos con laminación sesgada y también estratificación sesgada.

Litológicamente está compuesta por sublitarenitas y cuarzoarenitas de grano fino a medio, son mineralógica y texturalmente maduras; y están bien clasificadas. El redondeamiento de los granos es difícil de evaluar ya que la compactación y la cementación ocultan la forma de los granos originales, los contactos intergranulares son generalmente cóncavo-convexos y en ciertas partes contactos suturados posiblemente debido a la disolución por presión como producto de la compactación.

En cuanto a la procedencia de las areniscas, el hecho de que no exista granos de feldespato visibles en las secciones delgadas, no indica que estos no estén presentes en la roca, es posible que hayan sufrido intensa meteorización en el proceso de transporte o alteración a micas y arcillas en el proceso diagenético, sumado a los cambios que sufrieron los sedimentos por la compactación complica la interpretación de la procedencia de estas areniscas; sin embargo la ausencia de granos de feldespatos y alto contenido de cuarzo indicaría que las áreas de aporte sedimentario son lejanas y que los sedimentos han sufrido múltiple reciclaje (depositación) en un ambiente con clima húmedo y bajo relieve.

Los resultados en cuanto a la composición modal de las diferentes muestras analizadas y ploteadas en los triángulos de Dickinson et al. 1983 nos dan una idea de la posible área de procedencia tectónica de las areniscas de la Formación Farrat. En los resultados ploteados en el triángulo QmFLt (ver Figura 28) se observa que los puntos se encuentran en el campo de Cratón Interior cercano al campo de orógeno reciclado cuarzoso. Si analizamos la procedencia para el campo de cratón interior, Dickinson (1985) expone que las principales áreas fuentes son escudos y plataformas, para este autor áreas de procedencias de grandes escudos, o de cratón interior, están compuestas predominantemente por rocas de basamento que consisten en gran parte de rocas ígneas plutónicas félsicas y metamórficas y producen sedimentos cuyas áreas de acumulación corresponderían a amplias cuencas de tipo antepaís (foreland) e intracratónicas.

Si analizamos los cuarzos policristalinos observamos la presencia de granos policristalinos $Qp > 3$ (cuarzo policristalino con más 3 unidades cristalinas) en arenas de grano fino mientras que para arenas de grano medio los granos policristalinos son generalmente $Qp > 5$, esto indicaría disminución progresiva del porcentaje de cuarzos policristalinos $Qp > 5$ a medida que disminuye el tamaño de grano de las arenas. Pero en general en todas las muestras la mayoría de cuarzos policristalino son granos con más de 5 unidades cristalinas ($Qp > 5$), para Tortosa et al. (1988) esta característica de los granos policristalinos pertenecen a arenas procedentes de áreas de bajo grado metamórfico.

4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Si bien al iniciar el estudio mencionamos que la Formación Farrat varía desde areniscas con feldespatos y líticos en la base, areniscas cuarzosas en la parte central y con incremento de matriz y limos en el techo; según los resultados obtenido se observa que en la base, en la parte media y en el techo de la Formación hay ausencia de feldespatos, las areniscas en la base corresponden al grupo de las sublitarenitas que se caracterizan por tener más del 5% de fragmentos líticos, las areniscas de la parte media y el techo son cuarzoarenitas. En algunos niveles de la secuencia hay pequeñas intercalaciones de areniscas limosas y limo areniscas que no superan espesores de 6m, las areniscas de toda la secuencia no presentan matriz, en cuanto al cemento se mantiene con un

porcentaje de no más del 2% representado por una delgada película de arcillas y sobrecrecimiento sintaxial de cuarzo como producto de la compactación.

La procedencia de las areniscas de la Formación Farrat correspondería a un ambiente tectónico conocido como cratón interior, esta afirmación es corroborada con el estudio petrográfico de 7 muestras tomadas en diferentes niveles de la secuencia, cuyos resultados ploteados en los triángulos de Dickinson et al. 1983 se muestran en el campo de orógeno reciclado para el triángulo QtFL (ver figura 28) esto indica arenas de alta madurez y múltiple reciclaje (depositación), mientras que para el triángulo QmFLt (ver figura 28) el cual indica la procedencia de las areniscas, los resultados se muestran en el campo de cratón interior.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La columna estratigráfica presenta una secuencia de areniscas cuarzosas (sublitarenitas y cuarzoarenitas) con variación de grano fino a medio, algunos niveles de areniscas limosas y limo areniscas. La geometría de los estratos es generalmente tabular con laminación paralela y en algunos niveles con laminación sesgada y estratificación sesgada.

Según el diagrama triangular de Pettijohn (1975) las areniscas de la Formación Farrat se encuentran en el grupo de las sublitarenitas en la base y cuarzoarenitas en la parte media y techo de la secuencia.

La procedencia de las areniscas según el diagrama QmFLt de Dickinson et al. (1983), es un ambiente tectónico conocido como cratón interior cuyas áreas de acumulación corresponderían a amplias cuencas de tipo antepaís (foreland) (e intracratónicas).

Según el diagrama QtFL Dickinson et al. (1983) las arenas sufrieron múltiple reciclaje (depositación) en ambientes con clima húmedo y bajo relieve.

5.2. RECOMENDACIONES

Realizar análisis de Catodoluminiscencia de Color en cuarzo, debido a que constituye una valiosa herramienta para establecer el origen del material cuarzoso, el cual por su resistencia a la meteorización es uno de los minerales más abundantes dentro de las rocas sedimentarias.

Realizar un estudio de minerales densos (circón, rutilo, etc.) debido a que La asociación de estos minerales densos permite diagnosticar algunas áreas fuentes específicas.

Realizar investigación en todo el Grupo Goyllarisquizga, principalmente en donde la secuencia está completa, así caracterizar y jerarquizar las secuencias depositacionales en función de la composición de los depósitos arenosos, para contribuir al conocimiento de la evolución tectónica de la cuenca.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, A; Mackenzie, W; Guilford C. s.f. Atlas de rocas sedimentarias. University of Manchester. 104 p.
- Benavides (1956). Estudio geológico de la región Cajamarca. Boggs, Jr. 2009. Petrology of sedimentary rocks 2 ed. Cambridge University Press, 612 p.
- Arribas, J. 2010. Análisis de la procedencia en depósitos arenosos. In Sedimentología del proceso físico de la cuenca sedimentaria, (2000, Alfredo Arche). Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid. p. 397-441.
- Díaz, Y; Suastegui, M; Jenchen, U. (2012). Petrografía y procedencia del miembro arenoso Galeana (Formación Taraises, Valanginiano – Hauteriviano temprano), Sierra Madre Oriental, NE México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 64,3, 2012, p. 335-352.
- Dickinson, W; Suczek, C. 1979. Plate Tectonics and Sandstone Compositions. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin. V. 63, N° 12. P. 2164-2182.
- Franco M; Gonzalo J. 2000. Taller de Petrología: Enseñanza de la Petrología con el Microscopio Petrográfico (En línea). Consultado 07 set. 2015. Disponible en <http://www.raco.cat/index.php/ect/article/viewFile/88652/132726>.
- Henaó (2012). Estratigrafía y petrografía de las areniscas de la secuencia Quebrada la Naranjala – municipio de Fredonia miembro inferior de la Formación Amagá. Tesis para optar el título de Geólogo. Universidad EAFIT, Departamento de Geología, Medellín. 62 p.

- Lagos, A; Sánchez, J; Quispe, Z; Palacios, O. (2007). Aportes al análisis de cuencas sedimentarias en los alrededores de las localidades de los Baños del Inca, Cruz Blanca, Otuzco, distrito de Cajamarca.
- Lalnunmawia y Lahlimpuii (2014). Classification and provenance studies of the sandstones exposed along Durtlang road section, Aizawl, Mizoram. Department of Geology, Mizoram University, Aizawl 796004, India. Science Vision 14(3), p. 158-167.
- Nichols, G. 2009. Sedimentology and Stratigraphy 2 ed. Garsington Road, Oxford, OX4 2DQ, UK, 432 p.
- Petrografía - servicio geológico mexicano (en línea). Consultado 07 set. 2015. Disponible en <http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/rocas/petrografia>.
- Reguan, S; Ortiz, S. 2001. Guía Estratigráfica Internacional versión abreviada. Revista de la Sociedad Geológica de España.14 (3-4):271-293.
- Rivera (1980). Boletín N° 31, Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba, editado por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
- Tortosa, A; Palomares, M; Arribas, J. 1988. Tipologías de cuarzo como indicadores de la procedencia en areniscas: excepciones al método de Basu et al. (1975). Departamento de Petrología y Geoquímica, U.C.M. 28040 Madrid. Estudios geol., 44: 385-390.
- Tucker, M. 2003. Sedimentary Rocks in the Field. 3 ed. University of Durham,UK. 249 p.
- Vera, J. 1994. Estratigrafía: Principios y Métodos. Editorial Rueda, S, L., Madrid. 806 p.