

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLOGICAS

CARRERA DE INGENIERA GEOLOGICA



TESIS DE GRADO

“ESTRATIGRAFIA SECUENCIAL DEL CRETÁCICO SUPERIOR (FORMACIONES TORO TORO Y EL MOLINO) EN LOS SINCLINALES DEL RIO CAINE Y TORO TORO, DEPARTAMENTO DE POTOSI”

POSTULANTE: NELSON ROMAN CARVAJAL VELASCO

TUTOR: ING. RAÚL GARCÍA DUARTE

LA PAZ - BOLIVIA

MARZO, 2015

CONTENIDO

Índice General	i
Índice de Figuras	ii
Índice de Tablas	iii
Índice de Cuadros	iv
Índice de Fotos	v
Índice de Anexos	vi

INDICE GENERAL

Pág.

Resumen

CAPITULO I

INTRODUCCION

1

1.1.	Antecedentes	1
1.2.	Identificación del problema	2
1.3.	Justificación	3
1.4.	Problemática de estudio y objetivos	3
1.4.1.	Objetivo General	3
1.4.2.	Objetivos Específicos	3
1.5.	Hipótesis	4
1.6.	Metodología de trabajo	4
1.6.1.	Precedentes a la campaña de campo	4
1.6.2.	Durante a la campaña de campo	5
1.6.3.	Posterior a la campaña de campo	5

CAPITULO II

AREA DE ESTUDIO: ASPECTOS DE COBERTURA ESPACIAL

6

2.1.	Marco Geológico Regional	6
2.2.	Marco Geológico Local	6
2.2.1.	Sinclinal del Río Caine	6
2.2.2.	Sinclinal de Toro Toro	7
2.3.	Delimitación espacial	7
2.3.1.	Ubicación general	7
2.3.2.	Secciones estratigráficas	9

2.3.2.1.	Sección "Puente La Viña" - Sinclinal del Rio Caíne	9
2.3.2.2.	Sección "Quebrada Cuchirawaycko" - Sinclinal de Toro Toro	10

CAPITULO III

MARCO TEORICO: ESTRATIGRAFÍA DEL CRETÁCICO SUPERIOR EN LA CORDILLERA ORIENTAL CENTRAL DE BOLIVIA

3.1.	Estratigrafía	11
3.1.1.	Sistema Cretácico	11
3.1.2.	Estudios anteriores: Síntesis	12
	a) Formación Toro Toro	12
	b) Formación El Molino	13
3.1.3.	Estratigrafía descriptiva y formal	14
	a) Formación Toro Toro	14
	b) Formación El Molino	15
3.1.4.	Cronoestratigrafía y unidades equivalentes	16
	a) Formación Toro Toro	16
	b) Formación El Molino	16

CAPITULO IV

ESTRATIGRAFIA SECUENCIAL

4.1.	Análisis de Facies	19
4.1.1.	Asociación y sucesión de facies	20
4.1.1.1.	Sección Puente La Viña	20
	a) Formación Toro Toro	20
	Sucesión de facies: TT - 1	20
	Colada de basalto	21
	Sucesión de facies: TT - 2	22
	b) Formación El Molino	22
	Sucesión de facies: EM - 1	22
	Sucesión de facies: EM - 3	23
	Sucesión de facies: EM - 4	23

	Sucesión de facies: EM - 5	23
	Sucesión de facies: EM - 8	23
	Sucesión de facies: EM - 10	23
4.1.1.2.	Sección Quebrada Cuchirawaycko	24
a)	Formación Toro Toro	24
	Sucesión de facies: TT - 1	25
	Sucesión de facies: TT - 2	25
b)	Formación El Molino	26
	Sucesión de facies: EM - 1	26
	Sucesión de facies: EM - 2	26
	Sucesión de facies: EM - 3	26
	Sucesión de facies: EM - 4	26
	Sucesión de facies: EM - 5	26
	Sucesión de facies: EM - 6	27
	Sucesión de facies: EM - 7	27
	Sucesión de facies: EM - 8	27
	Sucesión de facies: EM - 9	27
	Sucesión de facies: EM - 10	27
4.2.	Ambientes de depósito	29
4.2.1.	Sección Puente La Viña	31
a)	Formación Toro Toro	31
b)	Formación El Molino	31
4.2.2.	Sección Quebrada Cuchirawaycko	32
a)	Formación Toro Toro	32
b)	Formación El Molino	33
4.3.	Secuencias	34
4.3.1.	Secuencia	34
4.3.1.1.	Tipos de secuencias	34
	Secuencias Tipo	34
	Secuencias Reales	34
4.3.1.2.	Escala de secuencias	35
4.3.1.3.	Orden de magnitud de las secuencias	35
4.3.1.4.	Representaciones de secuencias en una columna estratigráfica	36
4.3.2.	Estudio de las secuencias del Cretácico Superior	36
4.3.3.	División de las secuencias del Cretácico Superior	37

4.3.3.1.	Secuencia de Segundo Orden	37
4.3.3.2.	Secuencias de Tercer Orden	38
a)	Formación Toro Toro	38
a.1)	Primera secuencia de 3° Orden	38
a.2)	Segunda secuencia de 3° Orden	39
a.3)	Tercera secuencia de 3° Orden	39
a.4)	Cuarta secuencia de 3° Orden	40
a.5)	Quinta secuencia de 3° Orden	40
a.6)	Sexta secuencia de 3° Orden	41
a.7)	Séptima secuencia de 3° Orden	41
a.8)	Octava secuencia de 3° Orden	42
b)	Formación El Molino	42
b.1)	Primera secuencia de 3° Orden	43
b.2)	Segunda secuencia de 3° Orden	43
b.3)	Tercera secuencia de 3° Orden	45
b.4)	Cuarta secuencia de 3° Orden	45
b.5)	Quinta secuencia de 3° Orden	46
4.4.	Análisis secuencial	51
4.4.1.	Cortejos sedimentarios en secuencias	51
4.4.2.	Cortejos sedimentarios en la secuencia de 2° Orden del Cretácico Superior	52
4.4.2.1.	Cortejo de bajo nivel (lowstand system tract), LST	52
4.4.2.2.	Cortejo transgresivo (transgressive system tract), TST	54
4.4.3.	Arquitectura general de depósito	55
a)	Formación Toro Toro	55
a.1)	Elemento arquitectural: Sucesión TT - 1	55
a.2)	Elemento Arquitectural: Sucesión TT - 2	56
b)	Formación El Molino	57
b.1)	Elemento Arquitectural: Sucesión EM - 1	57
b.2)	Elemento Arquitectural: Sucesión EM - 3	57
b.3)	Elemento Arquitectural: Sucesiones EM - 8 y EM - 9	58
b.4)	Elemento Arquitectural: Sucesión EM - 10	59
4.5.	Paleogeografía	59
4.6.	Correlación estratigráfica	60

CAPITULO V

ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS Y EVOLUCION DE LA CUENCA

		61
5.1.	Correlación de secuencias	61
5.2.	Modelo de evolución de la cuenca: Cretácico Superior	62
	Conclusiones	64
	Recomendaciones	65
	Bibliografía	66

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa de ubicación general - Situando las dos secciones de estudio	8
Figura 2.	Ambientes de depósitos detríticos (modificado de N. Moulin. 1985)	29
Figura 3.	Ambientes de depósitos carbonatados (modificado de Boudoullec et. al.)	30
Figura 4.	Perfil teórico de una plataforma carbonatada	30
Figura 5.	Pirámide de disposición jerárquica de las secuencias. Catuneanu (2002)	35
Figura 6.	Ejemplo de una secuencia cíclica de 3° Orden en la Formación Toro Toro	40
Figura 7.	Ejemplo de la cuarta secuencia de 4° Orden, Formación El Molino	44
Figura 8.	Ejemplo de una secuencia de 4° Orden, Formación El Molino	45
Figura 9:	Columna generalizada: Formación Toro Toro - Sección Puente La Viña	47
Figura 10.	Columna generalizada: Formación El Molino - Sección Puente La Viña	48
Figura 11:	Columna generalizada: Formación Toro Toro - Sección Quebrada Cuchirawaycko	49
Figura 12:	Columna generalizada: Formación El Molino - Sección Quebrada Cuchirawaycko	50
Figura 13.	Definición de las secuencias de tipo 1 y tipo 2. (Según Vail et al.,1984)	51
Figura 14.	Ubicación de los cortejos LST y TST en el diagrama de Wheler	52
Figura 15.	Inicio del cortejo LST con el depósito de la Formación Toro Toro	53
Figura 16.	Discontinuidad en el cortejo LST, contacto Toro Toro - El Molino	54
Figura 17.	Representación de los cortejos LST Y TST en la secuencia de 2° Orden	55
Figura 18.	Elemento Arquitectural: Sucesión TT - 1	56
Figura 19.	Elemento Arquitectural: Sucesión TT - 2	56
Figura 20.	Elemento Arquitectural: Sucesión EM - 1	57
Figura 21.	Elemento Arquitectural: Sucesión EM - 3	57
Figura 22.	Elemento Arquitectural: Sucesión EM - 8 y EM - 9	58

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Características de sectores y puntos de relevamiento	10
Tabla 2.	Códigos utilizados para facies detríticas (Mial. 2000)	19

Tabla 3.	Códigos utilizados para facies carbonatadas: Miall (1986); código de Wiley (2003)	20
Tabla 4.	Sucesión y asociación de facies Formación Toro Toro - Sección Puente La Viña	22
Tabla 5.	Sucesión y asociación de facies Formación El Molino - Sección Puente La Viña	24
Tabla 6.	Sucesión y asociación de facies Formación Toro Toro - Sección Quebrada Cuchirawaycko.....	25
Tabla 7.	Sucesión y asociación de facies Formación El Molino - Sección Quebrada Cuchirawaycko.....	28
Tabla 8.	Paleoambientes de la Formación Toro Toro - Sección Puente La Viña	31
Tabla 9.	Paleoambientes de la Formación El Molino - Sección Puente La Viña	31
Tabla 10.	Paleoambientes de la Formación Toro Toro - Sección Quebrada Cuchirawaycko	32
Tabla 11.	Paleoambientes de la Formación El Molino - Sección Quebrada Cuchirawaycko	33
Tabla 12.	Orden de magnitud de las secuencias, sintetizado de Vail (1991)	35
Tabla 13.	Correlación de las secuencias de 3° Orden	61

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Segmento de "Cuadro Cronoestratigráfico de Bolivia". Oller, (1996). Ubicación de la estratigrafía del Cretácico Superior en la Cordillera Oriental Central	11
Cuadro 2.	Cronoestratigrafía de diferentes autores para formaciones del Cretácico Superior	17
Cuadro 3.	Representación de las secuencias (elaboración propia)	36
Cuadro 4.	Megasecuencias y secuencias propuestas por Sempere (1986)	37

INDICE DE FOTOS

Foto 1.	Vista panorámica de la sección "Puente La Viña" - Sinclinal del Río Caíne	9
Foto 2.	Vista panorámica de la sección "Quebrada Cuchirawaycko" - Sinclinal de Toro Toro	10
Foto 3.	Colada de basalto en las facies basales de la Formación Toro Toro	21
Foto 4.	Inicio de la secuencia de 2° Orden y contactos de la Formación Toro Toro	39
Foto 5.	Estratos de la quinta secuencia de 3° Orden con una excesiva bioturbación	41
Foto 6.	Límite superior de la octava secuencia de 3° Orden	42
Foto 7.	Límite superior de la segunda secuencia de 3° Orden de la Formación El Molino	44
Foto 8.	Representación de la octava secuencia de 4° Orden - "Quebrada Cuchirawaycko"	46

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Petrografía.
Anexo 2.	Correlación litoestratigráfica.
Anexo 3.	Correlación secuencial.
Anexo 4.	Columna general, sección: "Puente La Viña" - Sinclinal del Río Caíne.
Anexo 5.	Columna general, sección: "Quebrada Cuchirawaycko" - Sinclinal de Toro Toro.
Anexo 6.	Mapa geológico, sección: "Puente La Viña" - Sinclinal del Río Caíne.
Anexo 7.	Mapa geológico, sección: "Quebrada Cuchirawaycko" - Sinclinal de Toro Toro.

Resumen

Numerosos trabajos se hicieron sobre el Cretácico en su conjunto, la mayoría de estos ocasionó discrepancias entre autores, porque utilizaron diferentes metodologías para su interpretación. Asimismo las edades y ordenamiento de sus formaciones fueron variando a lo largo de los estudios que se efectuaban.

En este trabajo a partir de un estudio actual del Cretácico Superior que está representado por las formaciones Toro Toro y El Molino en los sinclinales del Río Caíne y Toro Toro, logramos determinar aspectos que pueden contribuir a la estratigrafía de nuestro país. La metodología utilizada para el estudio fue la estratigrafía secuencial que es revolucionaria y moderna, donde se utilizó cuatro puntos importantes para su interpretación, tales aspectos son los mismos propuestos por *Catuneanu (2002)*, que nos interesaron para una tesis más práctica y detallada, estos aspectos son:

Primero: Sucesión de facies, desde la codificación de litofacies hasta una asociación de facies, encontramos variabilidad de las mismas, donde la Formación Toro Toro está compuesta por dos sucesiones de facies, mientras que la Formación el Molino está integrada a diez sucesiones de facies.

Segundo: Paleoambientes y sistemas de depósito, una vez obtenida la interpretación de las facies se pudo identificar diversos paleoambientes para el Cretácico Superior, desde continentales (Formación Toro Toro) hasta marinos (Formación El Molino).

Tercero: Secuencias, aspecto que íntegramente se basa en la descripción detallada de las secuencias, donde primeramente se determina que el Cretácico Superior corresponde a una secuencia de 2° Orden, puesto que las rocas de este sistema se depositaron en ese intervalo de tiempo (23.1 Ma), además se encontraron secuencias de menor Orden Jerárquico, como las de 3° Orden, que son un aporte significativo para identificar superficies discordantes, de discontinuidad y erosivas. Asimismo se determina que la Formación Toro Toro está dividida en ocho secuencias de 3° Orden, en tanto que la Formación El Molino se divide en cinco Secuencias de 3° Orden, ambas formaciones llegaron a subdividirse hasta secuencias de 5° Orden.

Cuarto: Análisis secuencial; una vez realizadas las interpretaciones de las secuencias, se comprobó que dentro de la secuencia de 2° Orden que comprende al Cretácico Superior, existen dos cortejos sedimentarios con características muy diferentes. El estudio de estos

cortejos: cortejo de bajo nivel (LST) y cortejo transgresivo (TST), contribuyen al armado de elementos arquitecturales para diferentes etapas del depósito de la cuenca. Tales arquitecturas muestran sistemas de abanicos aluviales y cauces entrelazados fluviales (Formación Toro Toro), que por una influencia marina pasan transicionalmente a ambientes de desembocadura, barreras, plataformas internas y externas dentro de una plataforma carbonatada (Formación El Molino).

Finalmente con relación a la evolución de la cuenca, se evidencia que nuestras secciones de estudio se encuentran en el borde SW y zonas proximales de la subcuenca de Sevaruyo que integra a la cuenca Andina o del Grupo Puca, donde el Cretácico Superior se depositó en un esquema evolutivo que se inicia con un dominio continental (Formación Toro Toro) que pasa transicionalmente a una plataforma transgresiva somera (Formación El Molino) en el borde de la cuenca.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1. Antecedentes

La estratigrafía del Cretácico Superior (Formaciones Toro Toro y El Molino) fue atribuida a diversos estudios desde hace varias décadas para diferentes analogías y con muchas discrepancias entre sus autores, de esta manera se tiene los estudios más sobresalientes como antecedentes referidos a nuestro estudio.

Tal es el caso de Alcides d'Orbigny siendo el primero que realizó en nuestro país, un estudio de los sedimentos cretácicos observando el sinclinal de Miraflores. En lo que respecta a la "*Estratigrafía y Paleontología del Grupo Puca en el Sinclinal de Miraflores - Potosí*" (Lohman & Branisa, 1962) dieron un nombre denominativo a las formaciones que en anterior situación (Schlagintweit, 1941) las subdividió en unidades como es el caso de la Formación El Molino que correspondía a la unidad 6 de su trabajo. Más tarde en "*Estratigrafía y paleogeografía del Grupo Puca en Bolivia*" (Russo & Rodrigo, 1965) se utilizó para correlacionar distintas formaciones del Puca expuestas en la parte central y oriental del país, las mismas correlaciones que también utilizó (Reyes, 1972) para su trabajo "*Correlaciones en el Cretácico de la cuenca Andina de Bolivia, Perú y Chile*", siendo de gran aporte para la correlación con las formaciones de otros países y de esta manera plantear una evolución regional.

Las Formaciones del Cretácico Superior corresponden al denominado Grupo Puca Superior (Cherroni, 1977), las mismas denominaciones que son manejadas anteriormente en el "*Estudio Geológico de Toro Toro y sus alrededores*" (Valdivia, 1967) que enumera a las formaciones Toro Toro, El Molino, Santa Lucia y Cayara (en forma secuencial) como Cretácico Superior. Para hacer una contribución a la carta Geológica de Bolivia y un mejor conocimiento de las rocas paleozoicas y mesozoicas de nuestro país se realizó "*El estudio Geológico del Sinclinal del Río Caíne y de la región de Sacabamba*" (Maldonado, 1967).

En lo que corresponde a la estratigrafía secuencial se realiza la aplicación sistemática del análisis secuencial en Bolivia desarrollado por los convenios de UMSA-ORSTOM e YPFB-

ORSTOM en el estudio de *"Estratigrafía, Análisis Secuencial y Palinología de la zona de Ayoma, departamento de Potosí"* (Pérez, 1986) trabajo que aplica aspectos como la sedimentación, ambientes de depósito, facies y análisis secuencial para la Formación El Molino que fue un aporte a la estratigrafía en *"Contribución a la Estratigrafía del Mesozoico en el dominio Andino"* (Sempere, 1986), y a *"Un ejemplo de cuenca carbonatada en un contexto distensivo de retroarco: Paleogeodinámica del Cretácico Terminal en la República de Bolivia (Formación El Molino y Equivalentes)"* (Sempere et al., 1987).

Sobre las evoluciones tectosedimentarias y paleogeografía que serán parte necesaria de este estudio se tienen los siguientes antecedentes: *"Las cuencas de los grupos Puca y Tacurú (Cretácico - Terciario Inferior) de Bolivia"* (Rodrigo & Branisa, 1984) que considera elementos tectónicos, controles sedimentarios y otros aspectos por los que estuvieron relacionados a la *"Evolución tectosedimentaria de Bolivia durante el Cretácico"* (Sempere & Oller, 1989).

Entre los estudios recientes podemos encontrar: *"Magmatismo alcalino Mesozoico en el Sinclinal de Toro Toro"* (Iriarte, 2004) donde menciona que por encima de las rocas paleozoicas se encuentra discordantemente la Formación Toro Toro concordante con la Formación El Molino, ambos del Cretácico Superior haciendo más énfasis sobre el rift mesozoico y finalmente en: *"La Formación Toro Toro: redefinición Litoestratigráfica y pautas de resolución espacial de la cuenca Pre-Maastrichtiana sobre el dominio Andino Central"* (García-Duarte et al. 2006) se realiza el análisis de facies en la quebrada Cuchirawaycko que permitieron establecer tres modelos de sucesiones.

1.2. Identificación del problema

En Bolivia no existen numerosos estudios actuales sobre el Cretácico Superior. Si bien se conoce que el Cretácico en nuestro país es distinguido por su litoestratigrafía bien definida, pero falta un modelo de la evolución de la cuenca del Cretácico Superior a partir del método del análisis secuencial. Asimismo se debe tomar en cuenta que trabajos sobre las regiones Caíne, Toro Toro y sus alrededores solo muestran algunos estudios de manera general o por apartado (formación por formación) además de muchas

discrepancias entre autores referente a la estratigrafía del Cretácico Superior que aflora en mencionadas zonas.

1.3. Justificación

La razón del presente trabajo es el estudio actual de manera específica y detallada (a partir de secciones) sobre la estratigrafía secuencial de la Cordillera Oriental Central de Bolivia, que nos permita proponer la evolución y funcionamiento de la cuenca del Cretácico Superior ya que las rocas de este periodo tienen una litoestratigrafía diferente a las rocas paleozoicas y cenozoicas aflorantes en mencionada región. Entonces lo que se pretende con este estudio es conocer los eventos transcurridos en la cuenca y plantear un modelo de evolución a partir del cumplimiento de nuestros objetivos que serán un aporte al estudio estratigráfico de nuestro país.

1.4. Problemática de estudio y objetivos

1.4.1. Objetivo General

- El objetivo general de la presente tesis es plantear un modelo de evolución para la cuenca del Cretácico Superior en base a un estudio de estratigrafía secuencial en la Cordillera Oriental Central.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar las unidades litoestratigráficas del Cretácico Superior en la región a partir del relevamiento estratigráfico.
- Describir las estructuras sedimentarias presentes en las secciones.
- Identificar litofacies y asociaciones de facies para un posterior análisis de facies.
- Definir los ambientes sedimentarios y los factores que influenciaron en la sedimentación.

- Reconocer secuencias sedimentarias (primer, segundo, tercer, cuarto y quinto orden) que nos ayuden a establecer como fue el depósito de la cuenca.
- Realizar la correlación estratigráfica.
- Aplicar el método de análisis secuencial a los datos de las secciones de relevamiento estratigráfico.
- Determinar el marco evolutivo y paleogeográfico de la cuenca del Cretácico Superior.

1.5. Hipótesis

La estratigrafía del Cretácico Superior está representada por dos formaciones concordantes pero litoestratigráficamente diferentes que la forma compleja; entonces la estratigrafía secuencial nos permitirá contribuir al conocimiento de la estratigrafía del Cretácico lo que se propone correspondería a un esquema evolutivo de plataforma transgresiva en el borde de la cuenca.

1.6. Metodología de trabajo

1.6.1. Precedentes a la campaña de campo

- Recopilación bibliográfica; Revisión de la bibliografía de trabajos anteriores con relación a las formaciones Toro Toro y El Molino.
- Planificación de cronograma de actividades.
- Análisis de mapas (topográficos, fotogeológicos, geológicos, etc.) referidos a la región.

Hojas topográficas:	6439 I	San Vicente
	6439 II	Carasi
	6439 III	San Pedro de Buena Vista
	6439 IV	Toro Toro
	6440 I	La Viña
Cartas Geológicas:	6439	San Pedro (inédita)
	6440	Anzaldo (inédita)

- Elección de secciones o zonas de levantamiento de columnas.

1.6.2. Durante la campaña de campo

- Reconocimiento del área de estudio.(secciones: Puente La Viña - Sinclinal del Río Caíne y la Quebrada Cuchirawaycko - Sinclinal de Toro Toro)
- Levantamiento de dos columnas estratigráficas mediante todos los aspectos de litoestratigrafía.
- Identificación de secuencias sedimentarias reales y facies.
- Efectuar el análisis pre-interpretativo para cada día según se avance en la columna estratigráfica.

1.6.3. Posterior a la campaña de campo

- Con datos obtenidos en campo, elaborar una columna litoestratigráfica, a escala 1: 200 Formación Toro Toro y 1:100 Formación El Molino (por razones de espesor).
- Análisis de asociaciones, sucesiones y paleoambientes para cada sección con su respectiva columna generalizada.
- Realizar el Análisis secuencial a partir de un modelo progresivo.
- Identificar los tipos de cortejos presentes en las secuencias.
- Realizar los modelos arquitecturales para cada sucesión o secuencia.
- Elaboración de mapas estratigráficos y geológicos para cada sección.
- Elaboración gráfica de las correlaciones estratigráficas.
- Interpretación de la evolución sedimentaria y funcionamiento de la cuenca del Cretácico Superior.
- Análisis petrográfico de las muestras recolectadas en campo.

CAPITULO II

AREA DE ESTUDIO: ASPECTOS DE COBERTURA ESPACIAL

2.1. Marco Geológico Regional

La Cordillera Oriental constituye la expresión morfológica más importante de Bolivia y corresponde al denominado Bloque Paleozoico donde afloran rocas correspondientes a todos los sistemas de esta Era y rocas sedimentarias e ígneas del Mesozoico y Cenozoico.

En la parte central de la Cordillera Oriental de Bolivia se encuentran los sinclinales del Río Caíne y Toro Toro (zonas de estudio) que presentan una orientación general N30°W, es por esta razón que existe una amplia variedad de estructuras en las rocas por tratarse de un área de plegamiento. Entre las principales estructuras se distinguen: fallas, pliegues, además las discordancias entre sistemas. Se caracteriza por tener un paisaje ondulado debido al plegamiento regional, donde los ríos se ajustan al control estructural con preponderancia del Río Caíne

El Cretácico Superior está poco difundido en Bolivia y se encuentra como remanente de varios núcleos sinclinales con litologías similares en la cordillera Oriental, Altiplano, Subandino, Escudo brasileño y Serranías chiquitanas. Su principal característica es la coloración marrón rojiza de areniscas (Formación Toro Toro) e intercalación de calizas multicolores y margas verdosas - coloreadas, en algunos casos desarrollaron dip slopes y conspicuos (Formación El Molino), con cierto contenido de fósiles invertebrados y restos de peces. Las rocas del Cretácico Superior distribuidas en los sinclinales a lo largo de la Cordillera Oriental Central, sobreyacen discordantemente en su mayoría a diferentes rocas de edad paleozoica e infrayaciendo en conjunto a rocas de edad paleocena (Formación Santa Lucía).

2.2. Marco Geológico Local

2.2.1. Sinclinal del Río Caíne

Se encuentra en el límite que separa los departamentos de Cochabamba y Potosí. El Sinclinal del Río Caíne está caracterizado por una fuerte asimetría de sus flancos. Su flanco este presenta un ángulo de buzamiento $>70^\circ$, en los estratos del Silúrico y del Cretácico Superior. Al contrario su flanco oeste, se caracteriza por un bajo ángulo de

buzamiento $>25^\circ$, reflejado en los estratos de este sistema; esta exposición se encuentra en cercanías del puente La Viña. Según Iriarte (2004) Una gran falla inversa afecta su flanco oeste y corre precisamente a lo largo del Río Caíne, afectando a los estratos del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico.

2.2.2. Sinclinal de Toro Toro

Situado en el departamento de Potosí, distante a 140 Km al SE de Cochabamba, el Sinclinal de Toro Toro (18°S , 65°W) de orientación NO. Tiene aproximadamente 20 Km de ancho y 40 Km de longitud, con rocas plegadas del Ordovícico-Devónico, Cretácico y Cenozoico. Los estratos del Cenozoico están plegados simétricamente y muestran moderados buzamientos en los extremos. Al NE del sinclinal el Cretácico presenta buzamientos abruptos y bajos en el SO, con fallas paralelas al eje del sinclinal. Geobol (1996). En la quebrada Cuchirawaycko se observa que las rocas del Cretácico superior sobreyacen en discontinuidad a los conglomerados de la Formación Cuchirawaycko de lapso Jurásico s.l. - Cretácico inferior (García-Duarte et.al , 2006).

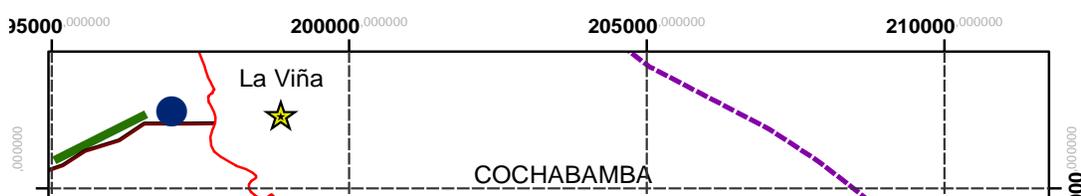
2.3. Delimitación espacial

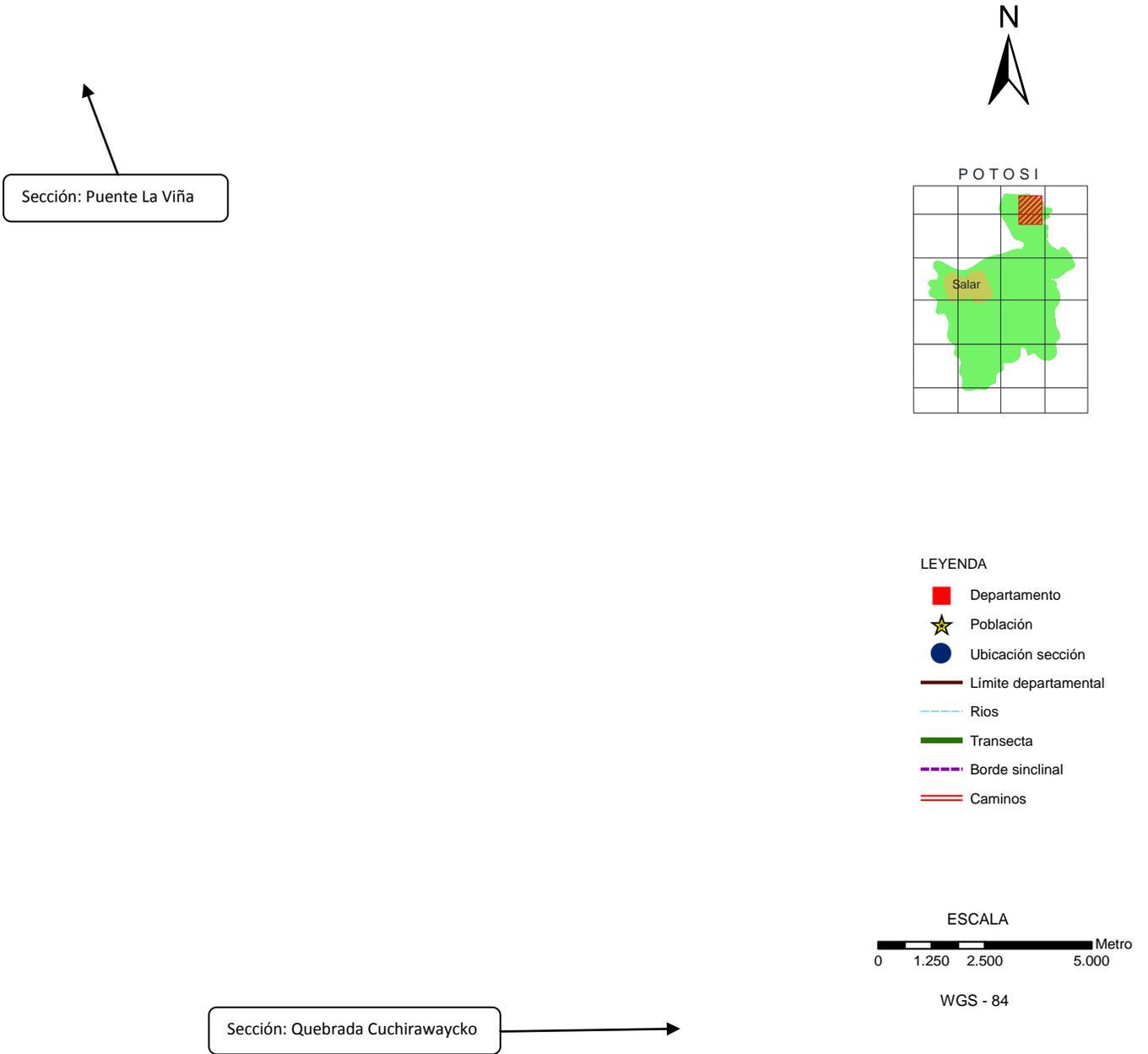
La región cercana a la ciudad de Potosí constituye el lugar clásico para la sedimentación del Cretácico Superior, donde se presenta toda la secuencia conocida. Las formaciones La Puerta, Tarapaya, Miraflores, Aroifilla, Chaunaca, Toro Toro y Molino, conforman el Grupo Potosí (antes Puca), que litológicamente están constituidas por estratos de areniscas, arcillas rojas y calizas, con un espesor total de 2000 m. Son notables los sinclinales cretácicos de Miraflores, Betanzos, Ravelo, Chaunaca y Toro Toro en Potosí; Morochata y del Río Caíne en el límite departamental Cochabamba - Potosí; Camargo, San Lucas, Tarabuco y Calaorko en Chuquisaca.

2.3.1. Ubicación general

Mapa de ubicación (Figura 1) de las secciones estudiadas en los sinclinales del Río Caíne y Toro Toro (Cordillera Oriental central) durante la campaña del 2012-2013.

MAPA DE UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO





Nótese el límite departamental, Cochabamba - Potosí marcado por el Río Caíne y el camino que une a las secciones de estudio: "Puente La Viña" en la población La Viña y "Quebrada Cuchirawaycko" en la población de Toro Toro.

Figura 1. Mapa de ubicación, situando las dos secciones de estudio.

2.3.2. Secciones estratigráficas

El estudio comprende el relevamiento de dos secciones estratigráficas, las cuales fueron seleccionadas en base a la accesibilidad y sin interrupción para su interpretación, cuyas características se encuentran en la Tabla 1.

2.3.2.1. Sección "Puente La Viña" - Sinclinal del Río Caíne

Ubicada cerca del Puente La Viña, la cual está situado al SO y aproximadamente 1 kilómetro de la localidad La Viña, se halla atravesado por el cauce del Río Caíne que a su vez marca el límite departamental de Cochabamba - Potosí (Foto 1). Esta sección fue levantada a lo largo del cauce del Río Caíne en el flanco oeste del sinclinal. Se realizó el levantamiento de 239.06 m de espesor del Cretácico Superior, los límites de la Formación Toro Toro se encuentran bien marcados, pero existe una severa interrupción en las margas del Miembro superior de la Formación El Molino.



Foto 1. *Vista panorámica de la sección "Puente La Viña" - Sinclinal del Río Caíne.*

2.3.2.2. Sección "Quebrada Cuchirawaycko" - Sinclinal de Toro Toro

Esta columna fue levantada en el flanco oeste del sinclinal, dentro la quebrada Cuchirawaycko ubicada en dirección SO-NE que se encuentra en la estancia del mismo nombre situada al sur de la localidad de Toro Toro (Foto 2), en el norte del departamento de Potosí. El espesor del Cretácico Superior en esta sección alcanza los 383.15 m encontrándose en su totalidad las facies clásicas de la Formación Toro Toro, pero con una leve interrupción de afloramiento en las calizas de la Formación El Molino.



Foto 2. Vista panorámica de la sección "Quebrada Cuchirawaycko" - Sinclinal de Toro Toro.

Ubicación Geográfica	Área Morfoestructural	Nombre de la Sección	Coordenadas UTM	Espesor
Sección 1. Localidad La Viña. Prov. Bilbao, Dep. Potosí	Sinclinal del Río Caíne	Puente La Viña	X = 195750 Y = 8010468	239.06 m
Sección 2. Localidad Toro Toro. Prov. Charcas, Dep. Potosí	Sinclinal de Toro Toro	Quebrada Cuchirawaycko	X = 2089800 Y = 7989666	383.15 m

Tabla 1. Características de sectores y puntos de relevamiento.

CAPITULO III

MARCO TEORICO: ESTRATIGRAFÍA DEL CRETÁCICO SUPERIOR EN LA CORDILLERA ORIENTAL CENTRAL DE BOLIVIA

3.1. Estratigrafía

Sobre la estratigrafía de estas secciones y en base a la recopilación bibliográfica se indica los siguientes puntos descriptivos y formales que son necesarios conocer para el estudio.

3.1.1. Sistema Cretácico

"D´Orbigny, A. (1845) el primero que realizó en nuestro país, un estudio de los sedimentos cretácicos al observar el sinclinal de Miraflores. La enorme difusión que tienen estas rocas, llamaron la atención de *Steinmann (1906)* que introdujo el termino de Formación "Puca" en la nomenclatura geológica de nuestro país. En los últimos años, diferentes trabajos geológicos han aportado con datos valiosos sobre la estratigrafía de rocas cretácicas, que hacen en la actualidad más fácil su identificación" *Maldonado (1967)*.

				Cordillera Oriental
Era	Sistema	Serie	Piso	Central
Mesozoico	Cretácico	Superior	<i>Maastrichtiano</i>	<i>El Molino</i>
			<i>Campaniano</i>	Toro Toro
			<i>Santoniano</i>	
			<i>Coniaciano</i>	
			<i>Turoniano</i>	
			<i>Cenomaniano</i>	

Cuadro 1. Segmento de "Cuadro Cronoestratigráfico de Bolivia", Oller, J. (1996). Ubicación de la estratigrafía del Cretácico Superior en la Cordillera Oriental Central.

3.1.2. Estudios anteriores: Síntesis

a) Formación Toro Toro

La Formación Toro Toro fue definida por *Ahlfeld y Branisa (1960)*, indicando que inicia con un conglomerado basal muy grueso que se compone de clastos mal clasificados, siguiendo hacia arriba areniscas macizas con estratificación cruzada frecuente. *Lohmann y Branisa (1962)* intentan dar un concepto más preciso de la Arenisca Toro Toro; con ese nombre comprende un complejo arenoso que en la localidad tipo tiene 290 m de espesor. *Russo & Rodrigo (1965)* indican que su espesor máximo es de 1212 m medido en Sayari donde la Formación Toro Toro tiene características similares a las de la localidad tipo en todos los lugares donde es observada. Para *Maldonado (1967)* en todo el Sinclinal de Toro Toro y en el adyacente (Sinclinal del Río Caíne), la secuencia cretácica está representada por un paso gradual de las areniscas típicas basales, a areniscas calcáreas y de estas a las calizas de la Formación El Molino, por lo que resulta difícil determinar el límite entre la llamada Formación Toro Toro y El Molino.

Esta Formación por la litología llegaría a corresponder a facies proximales de la cuenca, encontrándose al borde de la misma, (*Russo y Rodrigo, 1965*) que constituiría una unidad homotáxica a la Formación Chaunaca y la parte superior de la Formación Aroifilla (pertenecientes al Puca Superior) que para *Lohmann (1970)* correspondería a la última unidad arenosa del Mesozoico donde *Cherroni (1977)* indica un reemplazamiento en su totalidad de las formaciones parte superior de Aroifilla y Chaunaca en la sección de Camargo. Para *Sempere (1986)* se observa una casi-transición entre la Formación Toro Toro y la Formación El Molino donde entre ambas existe una discontinuidad no muy marcada en el que además no necesariamente existe una relación en el axioma grueso = proximal como indican *Russo & Rodrigo (1965)* para la base de esta Formación.

García-Duarte et al. 2006, indica que la Formación Toro Toro tiene un espesor que oscila entre 250 a 330 metros encontrados en discordancia sobre distintas unidades del Paleozoico, donde su límite estaría marcado por la aparición de facies basales de la Formación El Molino en el sinclinal homónimo.

En áreas alrededores a nuestras secciones de trabajo la descripción indica que la Formación Toro Toro está apoyada discordantemente sobre rocas paleozoicas. Inicia con un conglomerado basal con clastos compuestos por fragmentos de rocas paleozoicas. En

la parte superior les siguen areniscas y en la parte final (superior o techo) se observa el primer banco calcáreo de la Formación El Molino. Los espesores de esta formación pueden variar de una zona a otra dependiendo del relieve y la exposición que se observe.

b) Formación El Molino

Corresponde a la unidad N° 6 de Schlagintweit mencionado en el trabajo de *Lohman y Branisa (1962)* que corresponde al segundo horizonte calcáreo de importancia para *Ahlfeld (1960)*. A esta Formación de 320 m la han llamado El Molino, donde la secuencia inicia con un cambio de color y litológico bastante abrupto por encima de la Formación Chaunaca. Esta pasa hacia arriba a una caliza oolítica con intercalaciones margosas verdes, después una alternancia entre caliza y marga y finalmente una serie margosa arcillosa con intercalaciones calcáreas, que para *Russo y Rodrigo (1965)* El Molino superior tiene una abundancia de margas y arcilitas a medida que nos acercamos al borde de la cuenca su contenido va disminuyendo, mientras que en El Molino inferior abundan las calizas, el techo de esta formación está dada por el primer banco de arcillita colorada correspondiente a la Formación Santa Lucia.

Esta Formación constituye la más espesa dentro del Grupo Puca Superior con 1800 metros en la subcuenca de Sevaruyo, *Reyes (1972)*. Una arenisca sacaroide de 2 a 7 metros de espesor ocupa la base de esta Formación, en algunos lugares se observa un gran contenido arenoso *Cherroni (1977)*. Para *Sempere (1987)* la Formación El Molino y sus equivalentes subandinos, Eslabón-Flora y Cajones representan el Cretácico terminal de Bolivia que descansa en discontinuidad sedimentaria sobre la Formación Chaunaca y/o Toro Toro.

De las investigaciones realizadas la Formación El Molino, corresponde al Grupo Puca Superior y cerca a nuestras secciones de trabajo está compuesta por areniscas calcáreas de grano grueso, calizas con intercalación de margas. A su vez está dividida por miembros donde su exposición y espesores varían de un lugar a otro.

3.1.3. Estratigrafía descriptiva y formal

a) Formación Toro Toro

La Formación Toro Toro se indica que "la Formación principia con un conglomerado basal muy grueso que se compone de rodados subangulares y mal clasificados de areniscas y cuarcitas del Paleozoico. Siguiendo arriba areniscas macizas con estratificación cruzada frecuente", de esta manera *Lohmann (1962)* alude que esta Formación es un complejo arenoso que en la localidad tipo tiene 290 metros de espesor integrados de areniscas de grano medio a fino, con una laminación hemicíclica con laminas de 2 mm, formados por granos de cuarzo alternado con limo hematítico.

De igual manera *Russo y Rodrigo (1965)* haciendo comparaciones, mencionan que se apoya sobre el Paleozoico mostrando en su base niveles conglomerádicos seguida de unas areniscas que tienen un entrecruzamiento bien manifestado. Además, de que en varios lugares se han encontrado niveles de yeso de 8 a 10 metros de espesor.

Un estudio posterior con enfoque a una redefinición litoestratigráfica, (*García et al. 2006*) señala que la Formación Toro Toro se halla bien extendida en el sinclinal homónimo con un espesor entre 250-330 metros, sobre distintas unidades paleozoicas, que consiste de distintas areniscas rojizas a violáceas intercaladas con conglomerados polimícticos mátrix-soportados y restringidas arcillitas. A diferencia de *Ahlfeld y Branisa* proponen una renovación de carácter distintivo y de clave litoestratigráfica otorgado al "conglomerado basal", además que la nítida diferenciación de cuerpos estratales hacen más objetivo el reconocimiento de la unidad, de esta manera los mismos autores, una vez realizado el análisis de facies de los depósitos aflorantes en la Quebrada Cuchirawaycko subdividen en tres miembros a la Formación: Miembro 1 (29,7m) areniscas cuarzosas rojizas a claras de grano grueso a muy grueso con conglomerados intercalados en forma de lentes y arcillitas subordinadas; Miembro 2 (165,1m) areniscas bioturbadas cuarzosas rojizas-violáceas y conglomerados, y Miembro 3 (80,7m) areniscas cuarzosas marrón-amarillentas y blanquecinas-amarillentas de grano medio a fino presentes en bancos de estratificación mediana con entrecruzamiento y laminación.

b) Formación El Molino

Schlagintweit (1941) dividió al grupo Puca en 8 unidades, posteriormente *Lohman y Branisa (1962)* designaron a la unidad 6 de este trabajo como la Formación El Molino describiéndola como "La secuencia típica que comienza con un cambio litológico y de color bastante abrupto. Encima de las arcillas predominantemente coloradas del tope de la Formación Chaunaca descansa una arenisca calcárea, color crema-amarillo. Esta pasa hacia arriba a una caliza oolítica con muchas intercalaciones margosas verdes y después se compone de una alternancia entre caliza - marga y finalmente una serie margosa arcillosa con algunas intercalaciones margosas " con un espesor de 392 metros, las rocas calcáreas, alguna de ellas oolíticas permiten diferenciar rápidamente a esta Formación. *Russo y Rodrigo (1965)* definieron dos partes dentro la Formación El Molino: Superior: donde predominan las arcillitas y margas e Inferior: donde abundan las calizas indicando que su espesor varía de un lugar a otro, *Reyes (1972)* en partes centrales de la cuenca como Sevaruyo y Maragua es 1800 metros y 1200 metros respectivamente.

Con el propósito de realizar un observación *Cherroni (1977)* divide a la Formación El Molino en dos miembros con las mismas características de los anteriores autores además atribuyen las siguientes particularidades que constituye la Formación más gruesa dentro del Grupo Puca compuesta de intercalaciones calcáreas ubicadas entre margas multicolores donde las calizas llegan a tener 3 metros de espesor siendo el término medio 0,7 metros estratificadas, oolíticas y algunos niveles contienen algas conocidas como *Pucalithus sp.* *Sempere (1987)* indica que la Formación El Molino está principalmente constituida por margas-fangolitas con calizas y areniscas salvo en su parte inferior con un espesor variado de 100 a 1000 metros.

De esta manera indica que la Formación El Molino en la parte inferior es calcárea, donde predominan las calizas tanto en grosor como en frecuencia, mientras que en la parte superior es margosa - calcáreo, donde predominan las margas abigarradas intercaladas con delgadas capas calcáreas. Esta Formación descansa en discontinuidad sedimentaria sobre la Formación Chaunaca, sobre formaciones mesozoicas antiguas y/o paleozoicas.

3.1.4. Cronoestratigrafía y unidades equivalentes

a) Formación Toro Toro

Según los diferentes estudios la edad de la Formación Toro Toro en base a fósiles hallados en la zona de Toro Toro cerca a las secciones de trabajo existen huellas de dos especies *Spirophyton* y *Cylindrites*, *Lohmann (1962)* es un hecho que facilita el reconocimiento de la Arenisca Toro Toro que está comprendida entre el Turoniano Superior a Senoniano Inferior *Russo & Rodrigo (1965)*, mientras que para *García (2006)* se encuentra en equivalencia lateral con las formaciones Aroifilla y Chaunaca (Turoniano-Campaniano)

Muchos autores han planteado diferentes criterios de correlación con distintas unidades del Cretácico, es así que *Russo & Rodrigo (1965)* realizan las equivalencias (o reemplazamiento en su totalidad) de la Formación Toro Toro de Facies Proximal con parte superior de la Formación Aroifilla y la Formación Chaunaca de Facies Distal, además correlacionadas con la Arenisca Pirgua del norte Argentino y la Formación Cotaucho del Perú. Pero para *Reyes (1972)* los fósiles encontrados están en la Formación Pirgua asimismo el autor piensa que algunas secciones del borde de la cuenca han sido consideradas dentro de la Formación Toro Toro, llegando a ser parte de las facies proximales de la Formación El Molino.

b) Formación El Molino

La edad mencionada por diferentes autores como *Lohman & Branisa (1962)* indican que la Formación El Molino corresponde a una edad Turoniana hasta Senoniana en base de fósiles como el Algae: *Pucalithus sp.* Steinman, en discrepancia a *Russo & Rodrigo (1965)* revelan que la Formación El Molino es muy rica en fósiles como el *Pucapristis branisi*, considerando de una edad entre Campaniano y el Maestrichtiano atribuyendo que los fósiles anteriores encontrados son longevos y por eso la diferencia de edades, mismas edades que son ratificadas por *Sempere (1987)* representando el Cretácico Terminal (Campaniano superior - Maestrichtiano), pero realizando una datación absoluta 60,5 a 73 Ma. La Formación El Molino representa el Cretácico Superior (Maestrichtiano) - Paleógeno (Daniano), según *Suarez & Díaz (2000)*.

Con relación a sus equivalentes la Formación El Molino es similar a la parte inferior del Tacurú, además debe correlacionarse con la Formación Vilquechico expuesta al Sur del

Perú, *Lohman & Branisa (1962)* reafirmada por *Cherroni (1977)*, mientras que la parte inferior se correlaciona con la Formación Ronda del Norte Argentino y la parte superior es correlacionada con la Formación Santa Barbará (en *Russo & Rodrigo 1965*), un trabajo dedicado únicamente a la correlación *Reyes (1973)* indica que los *Pucalithus* son un excelente fósil para la correlación, además de Santa Barbará a la Formación Yacoraite y Lecho, del Norte Argentino, en contraste a la edad (*Rodrigo & Branisa 1984*) revelan que el miembro superior de la Formación El Molino se correlaciona con las formaciones Mealla y Maíz Gordo del Norte Argentino atribuyéndole una edad de Terciario por los mamíferos encontrados en la sección de Tica Tica. *Sempere (1987)* alude a la Formación El Molino como equivalentes subandinos Eslabón-Flora y Cajones representando el Cretácico terminal y correlaciona con las formaciones Lecho, Yacoraite, Tunal y Olmedo del Noroeste Argentino y la Formación Vilquechico del Sureste Peruano.

SISTEMA	SERIE	EDAD (Ma.)	PISO	LOHMANN y BARNISSA (1962)	RUSSO y RODRIGO (1965)	CHERRONI (1977)	SEMPERE (1986)	OLLER (1996)
CRETACICO	CRETACICO SUPERIOR	70.6	MAASTRICHTIANO	EL MOLINO	EL MOLINO	EL MOLINO	EL MOLINO	EL MOLINO
			CAMPANIANO			TORO	TORO	TORO
			SANTONIANO			TORO	TORO	TORO
			CONIACIANO			TORO TORO	TORO	TORO
			TURONIANO					
	93.6	CENOMANIANO	TORO					
	99.6	ALBIANO	TORO					
	CRETACICO INFERIOR	112.0						
		125.0	APTIANO					

Cuadro 2. Cronoestratigrafía de diferentes autores para formaciones del Cretácico Superior.

CAPITULO IV

ESTRATIGRAFIA SECUENCIAL

Según *Catuneanu (2002)* **La estratigrafía secuencial** es el paradigma más reciente y, tal vez, el más revolucionario en geología sedimentaria. Ha renovado los métodos del análisis estratigráfico. A diferencia de otros tipos más convencionales de análisis estratigráficos, tales como la bioestratigrafía, la litoestratigrafía o la magnetoestratigrafía que consisten esencialmente en la colección de datos, la estratigrafía secuencial se construye tomando en cuenta lo siguiente:

- La reconstrucción de los parámetros de controles alógenos al momento de la sedimentación.
- La predicción de las arquitecturas de facies en las zonas todavía no estudiadas.

Como primer aspecto consideraremos la siguiente definición:

Para Posamentier et al. (1988) y Van Wagoner (1995) "La estratigrafía secuencial es el estudio de las relaciones entre las rocas sedimentarias de un conjunto de estratos ligados genéticamente y limitado (este conjunto) por superficies de erosión, de no sedimentación o por sus concordancias correlativas".

La base para realizar el estudio de estratigrafía secuencial en el Cretácico Superior está dada por el análisis de facies, llegando a obtener sucesiones que nos permitan descifrar los ambientes de depósito en un lugar determinado de la cuenca, para una posterior identificación de secuencias que nos servirán como modelos para ejecutar el análisis secuencial, donde se identificaron los cortejos sedimentarios y la arquitectura de depósito, para de esta forma obtener un modelo evolutivo de la cuenca. Estos 4 modelos o pasos mencionados y utilizados para interpretar la estratigrafía secuencial son los mismos propuestos por *Catuneanu (2002)* donde se encuentran puntualizadas a continuación:

4.1. Análisis de Facies

El levantamiento de columnas de las rocas del Cretácico Superior de estas dos secciones permitió la identificación de varias facies, las cuales van desde silicoclásticas (Formación

Toro Toro) hasta carbonatadas (Formación El Molino) que a su vez fueron interpretadas, asociadas y apartadas en respectivas sucesiones cuya codificación se encuentran en las tablas 2 y 3, aludiendo a sus referentes autores (Miall, 2009).

Código	Litofacies	Estructuras sedimentarias
F	Arcillas, limos, margas, arcillas margosas a margas arcillosas	Con grain-flow (composición líticos-cuarzo)
Fl	Arena, limo, lutita	Laminación fina y ripples muy pequeños
Fscm	Arcillas margosas	Masivas a laminadas
Flm	Margas	Masivas a laminadas
Flmsc	Margas arcillosas	Masivas a laminadas
Flmsm	Margas limosas	Masivas a laminadas
Fsc	Arcilla	Laminadas a masivas
Fsm	Limo	Laminadas a masivas
Fcf	arcilla, limo	Ostrácodos (agua dulce)
Fm	Limo, lutita	Masivos, grietas de desecación
Fr	Limo, lutita, arcilla	Raíces muy pequeñas, bioturbación, paleosuelo
Sl	Arena media a muy gruesa, pueden ser conglomerádica	Entrecruzamiento de bajo ángulo
Sp	Arena media a muy gruesa, pueden ser conglomerádica	Entrecruzamiento planar
Sr	Arena muy fina a gruesa	Marcas de ripples a todos los tipos
Sh	Arena media a muy gruesa, pueden ser conglomerádica	Laminación horizontal
Sm	Arena de grano fino a grueso	Masiva
Se	Arenas con rasgos erosivos e intraclastos	Leve entrecruzamiento
Ss	Areniscas	Bioturbación, pisolitas
Sgm	Arenisca conglomerádica	Masiva
Srgm	Arenisca con niveles conglomerádicos dispersos	Con marcas de ripples
Slgm	Arenisca con niveles conglomerádicos dispersos	Con entrecruzamiento de bajo ángulo
Shgm	Arenisca con niveles conglomerádicos dispersos	Laminación horizontal
Spgm	Arenisca con niveles conglomerádicos dispersos	Entrecruzamiento planar
Gms	Grava masiva, mátrix portante, estratificación	Ninguna estratificación
Gm	Grava masiva o levemente estratificada	Estratificación horizontal. Imbricación
Gmm	Grava masiva, mátrix portante	Gradación normal
Gcm	Grava masiva, clastos portante	Ninguna estratificación
Gt	Grava estratificada	Entrecruzamiento en artesana.

Tabla 2. Códigos utilizados para facies detríticas (Mial. 2009).

Código	Litofacies	Estructuras sedimentarias
F	Arcilla, limo, marga	Contienen nódulos de pedernal, lentes
Fm	Lutita	Masiva

Fh	Arcilla, limo, marga	Laminación paralela
Sc	Arenisca calcárea	Contienen nódulos de pedernal, lentes
Sch	Arenisca calcárea	Laminación paralela
Scr	Arenisca calcárea	Laminación ondulítica
M	Mudstone	Contienen nódulos de pedernal, lentes
Mm	Mudstone	Masiva
Mr	Mudstone	Laminación ondulítica
Ms	Mudstone	Contienen nódulos de pedernal, lentes
Mo	Mudstone	Oolítico
Me	Mudstone	Leve entrecruzamiento
Mt	Mudstone	Estratificación en artesa
Mh	Mudstone	Laminación horizontal
Mp	Mudstone	Pisolítica
Mg	Mudstone	granodecreciente
D	Dolomía	Contienen nódulos de pedernal, lentes
Dm	Dolomía	Masiva
Y	Yeso	Masiva

Tabla 3. Códigos utilizados para facies carbonatadas: Miall (1986), y algunas sugerencias propias.

4.1.1. Asociación y sucesión de facies

4.1.1.1 Sección Puente La Viña

En esta sección el Cretácico Superior se encuentra limitado a 239.06 metros de espesor, donde solo la Formación Toro Toro se encuentra en su totalidad.

a) Formación Toro Toro

En esta sección la Formación Toro Toro de 117.20 metros se divide en dos sucesiones de facies a las cuales denominaremos TT- 1 y TT - 2.

- **Sucesión de facies: TT - 1**

Sucesión (46.74 m) que inicia con el depósito de un conglomerado de clastos menores a 7 cm subredondeados de cuarcita y areniscas de aproximadamente 2.72 m de espesor, relacionado a un flujo de detritos (Gms), el vínculo continua hacia arriba a facies fluviales de cauces entrelazados de areno-conglomerádico de gran espesor y rellenos de canal (Se), siguiendo con regímenes de flujo planar y laminación paralela en las areniscas rojizas (Sh), además existe desarrollo de barras arenosas de grano grueso (Sm).

Colada de basalto

La separación de las dos sucesiones en la Formación Toro Toro, de la sección "Puente La Viña", está dada en casualidad por una colada de basalto toleítico de 9 metros de espesor (Anexo 4), que se encuentra paralelo a la estratificación. (Rodrigo & Branisa, 1984) este basalto marca la base de la Formación Toro Toro (Foto 3).

La colada de basalto encontrado en los primeros bancos de conglomerados certifica que la afirmación de Kriz & Cherroni (1965) era verdadera, donde se observan varias coladas de basalto en la Formación Toro Toro, donde, aseguran que este basalto se correlaciona con el "Basalto de Bentanzos" dando una edad aparente de 85.1 M.a por el método *K/Ar* (Sempere, 1989), tomando en cuenta que la Formación Toro Toro es un equivalente de la Formación Aroifilla superior (que se encuentra por encima del basalto de Betanzos) y la Formación Chaunaca.

Las areniscas rojizas de grano grueso, que se encuentran por debajo de este basalto que friccione y broto a la superficie, se encuentran totalmente alteradas. Mientras que en el tope del basalto existe poca alteración de las areniscas rojizas. Los cristales encontrados en el basalto, por un análisis petrográfico se encuentran en el Anexo 1, M 3 y M 4.



Foto 3. Colada de basalto (9 metros) en las facies basales de la Formación Toro Toro.

Sucesión de facies: TT - 2

Sucesión (70.66 m) donde inicia con intercalación de bancos de areniscas con una escasa bioturbación (Ss) y laminación horizontal (Sh). Le siguen intercalaciones de areniscas de grano muy grueso, con lentes conglomerádicos (Sm); por encima de estas se encuentran diversos bancos de areniscas cuarzosas con una severa bioturbación, intercaladas con areniscas masivas y laminación paralela. La principal característica de esta sucesión es la presencia de estructuras de bioturbación causadas por organismos perforadores (*Skolithos*).

Formación	Sucesiones		Asociaciones			
TORO TORO	TT-2	Gms - Ss - Sh - Sm - Se - Sgm	Ss		Sh	
			Sm	Sh	Se	
			Ss		Sm	
			Gms	Sm	Sgm	Sh
			Ss		Sh	
	TT-1	Gms - Se - Sh - Sm - Shgm	Basalto			
			Gms	Se	Shgm	Sh
			Sh		Sm	
			Gms		Se	

Tabla 4. Sucesión y asociación de facies Formación Toro Toro - Sección Puente La Viña.

b) Formación El Molino

Esta Formación de 87.67 m presente en la sección fue dividida en seis sucesiones de facies denominadas EM-1 hasta EM-10, tomando como base las sucesiones identificadas en la sección "Quebrada Cuchirawaycko" (Anexo 5) por ser la columna más completa, está compuesta por dos miembros; donde el Miembro superior se encuentra en rango muy escaso.

- **Sucesión de facies: EM - 1**

Sucesión (36,23 m) donde existe intercalación de areniscas blanquecinas de grano medio y deleznable (Sm) con areniscas calcáreas (Sch), con una predominante laminación paralela (Sh) y escaso leve entrecruzamiento (SI). Algunos bancos de la arenisca calcárea presentan motas rojizas de hasta 3 cm de diámetro, al tope de esta sucesión se encuentran areniscas blanquecinas de grano fino con niveles de yeso (Y).

- **Sucesión de facies: EM - 3**

Sucesión (13.61 m) con predominancia de espesos bancos de caliza con pequeños niveles de arenisca calcárea. Las calizas arenosas blanquecinas (Sc) se encuentran intercaladas con niveles de calciarenita, mientras que por encima le siguen calizas de coloración violácea con entrecruzamiento (Me) en algunos casos masiva (Mm) y predominancia de estructura oolítica (Me y Mo).

- **Sucesión de facies: EM - 4**

Sucesión (22.09 m) con predominancia de calizas blanquecinas y violáceas con intercalación de estructuras de laminación paralela y leve entrecruzamiento (Mh y Me), le siguen bancos de caliza violáceas con niveles blanquecinos de estructuras onduladas y laminadas.

- **Sucesión de facies: EM - 5**

Sucesión (12.17 m) que inicia con una transgresión dejando una pequeña lamina de lutita (Fm), vinculado por encima a bancos de calizas violáceas y verduscas de gran espesor donde predominan estructuras oolíticas y pisolíticas (Mo y Mp). Estas rocas en una imagen en planta son observadas en forma de grandes conspicuos cerca del puente La Viña.

- **Sucesión de facies: EM - 8**

Sucesión (30,72 m) donde inician los pulsos transgresivos con calizas mudstones finas; al inicio de color violáceo con nódulos y laminación paralela (Mh), en algunos casos granodecreciente (Mg), intercaladas con margas verdosas masivas con laminación horizontal de pequeños espesor (Fh). Existe una pequeña presencia de leve entrecruzamiento en las calizas (Me).

- **Sucesión de facies: EM - 10**

Ultima sucesión (12,86 m) de la sección, con predominancia de facies finas, con intercalación de margas rojizas y verdosas, con laminación paralela (Fh), existiendo algunos niveles caliza violácea oscura, de poco espesor, masivas de estructura entrecruzada (Mm y Me). En el contacto con la Formación Santa Lucia se aprecia al último banco de arenisca calcárea con estructura masiva (Sc)

Formación	Sucesiones		Asociaciones					
E L MOLINO	E M-10	Mm - Fh - Me	Mm - Fh - Me					
	E M-8	Mh - Mm - Me - Mg - Fh	Me	Mg	Mm	Mh	Fh	
			Mh	Mm		Fh		
	E M-5	Mm - Mp - Mo - Mr - Fm	Mp	Mm		Mo		
			Fm	Mr		Mm		
	E M-4	Mm - Me - Mh - Mr - Mt - M	Mr	Me	Mh	Mt	Mm	
			Mm		Mh		Mr	
			Mm		M		Mh	
			Mh			Me		
			Mt		Mm		Me	
	E M-3	Sc - Mm - Mo - Me - Mr	Mr			Mo		
			Sc	Mm	Mo	Me		
	E M-1	Sh - Sm - Sl - Se - Sch - Y	Sc		Sm		Y	
			Sch	Sh	Sm	Sl		
			Sch	Sh	Sm	Se		

Tabla 5. Sucesión y asociación de facies Formación El Molino - Sección Puente La Viña.

4.1.1.2 Sección Quebrada Cuchirawaycko

En esta sección de estudio se realizó el levantamiento estratigráfico de 383.15 metros (Anexo 5) del Cretácico Superior, del mismo modo que en la otra sección, la Formación Toro Toro se encuentra en su conjunto, mientras que existe severas interrupciones en la Formación El Molino.

a) Formación Toro Toro

En esta sección la Formación Toro Toro de 189.01 m de espesor está dividida en dos sucesiones denominadas TT - 1 y TT - 2.

- **Sucesión de facies: TT - 1**

Sucesión (37.06 m) que inicia con un conglomerado basal masivo de 45 cm de espesor (Gms), matrix soportado de arenisca gruesa, color rojizo, con clastos subredondeados de

hasta 4 cm de diámetro. Por encima le siguen areniscas de grano grueso masivas y bioturbadas (Ss), con granos de cuarzo, con un nivel conglomerádico de 0.80 m de espesor. El enlace es a facies de areniscas rojizas de grano grueso con niveles conglomerádicos, en algunos casos lenticulares (Se, Sh, Shgm) con leve entrecruzamiento y/o laminación horizontal

- **Sucesión de facies: TT - 2**

Sucesión (155.95 m) de areniscas cuarzosas, de grano medio a grueso de color rojizo, continua en algunos niveles con facies gravosas (Gms), en la mayoría de los estratos existe una severa bioturbación debida al reabajamiento de organismos (Ss) y estratificación grosera y masiva (Sm). En la parte superior de esta sucesión se evidencia una granodrecencia, entrecruzamiento y laminación paralela en las areniscas de grano medio (Se y Sh).

Formación	Sucesiones		Asociaciones				
TORO TORO	TT-2	Ss - Se - Sm - Sh - Sgm	→	Ss	Sm		
			→	Ss	Sh	Se	
			→	Sm	Sh	Ss	
			→	Sgm	Sm		
			→	Ss	Se	Sm	Sh
			→	Ss	Se		
			→	Sm	Se	Sgm	
			→	Ss			
			→	Shgm	Se		
	TT-1	Gms - Ss - Se - Sh - Shgm	→	Se	Sh		
			→	Gms	Ss	Sm	

Tabla 6. Sucesión y asociación de facies Formación Toro Toro - Sección Quebrada Cuchirawaycko.

b) Formación El Molino

En esta sección la Formación El Molino de 194.14 metros, esta atribuida a 10 sucesiones denominadas EM - 1 hasta EM - 10, donde, esta Formación no se halla en su totalidad a consecuencia de la erosión.

- **Sucesión de facies: EM - 1**

Sucesión (30.56 m) que inicia con areniscas calcáreas blanquecinas de grano medio y laminadas (Sc), intercaladas con areniscas blanquecinas, en algunos casos amarillentas y laminadas (Sm); ambas rocas son de grano medio, donde le siguen estructuras de leve entrecruzamiento (Se) y unos estratos de areniscas calcáreas moteadas en el tope.

- **Sucesión de facies: EM - 2**

Sucesión (2.6 m) de corto espesor, donde inicia con la presencia de calizas masivas rosadas-amarillentas (Mm), intercaladas con delgadas laminas de lutita de color gris oscuro (Fm).

- **Sucesión de facies: EM - 3**

Sucesión (27.18 m) que empieza con niveles de areniscas calcáreas masivas (Sc), donde le siguen la presencia de calizas de color violácea con entrecruzamiento (Me) y por encima calizas rosadas con laminación paralela (Mh) Al tope de esta sucesión existe la predominancia de estructuras oolíticas (Mo) y pisolíticas (Mp) presentes en las calizas rosadas con una leve laminación.

- **Sucesión de facies: EM - 4**

Sucesión (4.41 m) de calizas de corto espesor, de color rosado-amarillento, con una predominancia de laminación horizontal (Mh) y ondulítica en algunas calizas (Mr).

- **Sucesión de facies: EM - 5**

Sucesión (13.21 m) de calizas rosadas-amarillentas, donde se encuentran nuevamente predominadas por una intercalación de estructuras oolíticas, pisolíticas y de entrecruzamiento (Mo, Mp y Me). En imagen satelital estas calizas se observan como grandes laminas, con forma de grandes conspicuos en la localidad de Toro Toro.

- **Sucesión de facies: EM - 6**

Sucesión (15.5 m) donde inicia con bancos de calizas amarillentas y deleznales de leve entrecruzamiento (Me), intercaladas con laminación ondulítica (Mr), continuando calizas blanquecinas, con laminación horizontal (Mh). En el tope existe una intercalación de laminas de calizas masivas (Mm) con lutitas y margas (Fm y Fh).

- **Sucesión de facies: EM - 7**

Sucesión (2.20 m) compuesta por arenisca amarillenta de grano medio, no muy consolidada, presenta una estructura de entrecruzamiento (Se). Por encima de esta arena existe una considerable interrupción de la Formación El Molino.

- **Sucesión de facies: EM - 8**

Sucesión (12.96 m) en el cual retornan las litofacies de calizas laminadas blanquecinas y verdosas (Mh), intercaladas con lutitas grisáceas (Fm), hacia el tope la sucesión se hace más fina, comienza la predominancia de margas verdosas (Fh) intercaladas con estratos de caliza amarillenta de grano medio con laminación horizontal y masivos (Mh y Mm).

- **Sucesión de facies: EM - 9**

Es la sucesión de mayor espesor (68.44 m) de la Formación El Molino, con la predominancia de material fino. Inicia con margas rojizas intercaladas con niveles de margas verdosas de 2 a 3 cm con laminación paralela (Fh), la parte central de la sucesión está vinculada a intercalación de margas, con niveles laminados de calizas violáceas y cristalinas, en algunos casos con leve entrecruzamiento y laminación horizontal (Me y Mh). Hacia el tope de esta sucesión predomina reiteradamente la intercalación de margas violáceas y verdosas con laminación horizontal (Fh) y algunos niveles de caliza violáceas-grisáceas masivas y horizontales (Mm y Mh).

- **Sucesión de facies: EM - 10**

Ultima sucesión (16.08 m) que inicia con calizas gris-violáceas, masivas y con laminación horizontal (Mm y Mh), intercaladas con una combinación de margas verdosas y rojizas. Hacia el tope de la sucesión existe margas con laminación horizontal (Fh), de color rojizo-violáceo, intercaladas con niveles de yeso (Y), hasta llegar al contacto con la Formación Santa Lucía.

Formación	Sucesiones	Asociaciones
-----------	------------	--------------

E L MOLINO	E M-10	Mh - Fh - Y	Mh	Fh	Y	
	E M-9	Mm - Mh - Fh - Me	Mm	Mh	Fh	
			Mm	Mh	Fh	
			Mh		Fh	
			Me	Mh	Fh	
			Mm	Mh	Fh	
	E M-8	Mh - Fh - Fm - Mm	Fh	Mh	Mm	
			Mh		Fm	
	E M-7	Se	Se			
	E M-6	Mm - Mh - Me - Fm - Fh	Mm	Mh	Fm	Fh
			Mh	Mm	Mp	Me
	E M-5	Mo - Mp - Me	Mo	Mp	Me	
	E M-4	Mh - Mr	Mh		Mr	
	E M-3	Mm - Me - Mo - Mp - Mh - Sc	Mo		Mp	
			Mm	Me	Mh	Mo
Sc						
E M-2	Mm - Fm	Mm		Fm		
E M-1	Sm - Sc - Sh - Sch - Se	Sh		Sm		
		Sh	Se	Sch	Sm	Sc
		Sm		Sc		

Tabla 7. Sucesión y asociación de facies Formación El Molino - Sección Quebrada Cuchirawaycko.

4.2. Ambientes de depósito

El Cretácico Superior en base a las características litoestratigráficas y la identificación de sucesiones de facies de las dos secciones de relevamiento, presentan una variedad de ambientes. Tanto ambientes de depósitos detrítico - continental (Formación Toro Toro), figura 2, como ambientes de depósitos carbonatados (Formación el Molino), figuras 3 y 4, que la forma compleja. A continuación se presenta una síntesis de los ambientes y subambientes de depósito en los cuales se presume se deposito este Periodo.

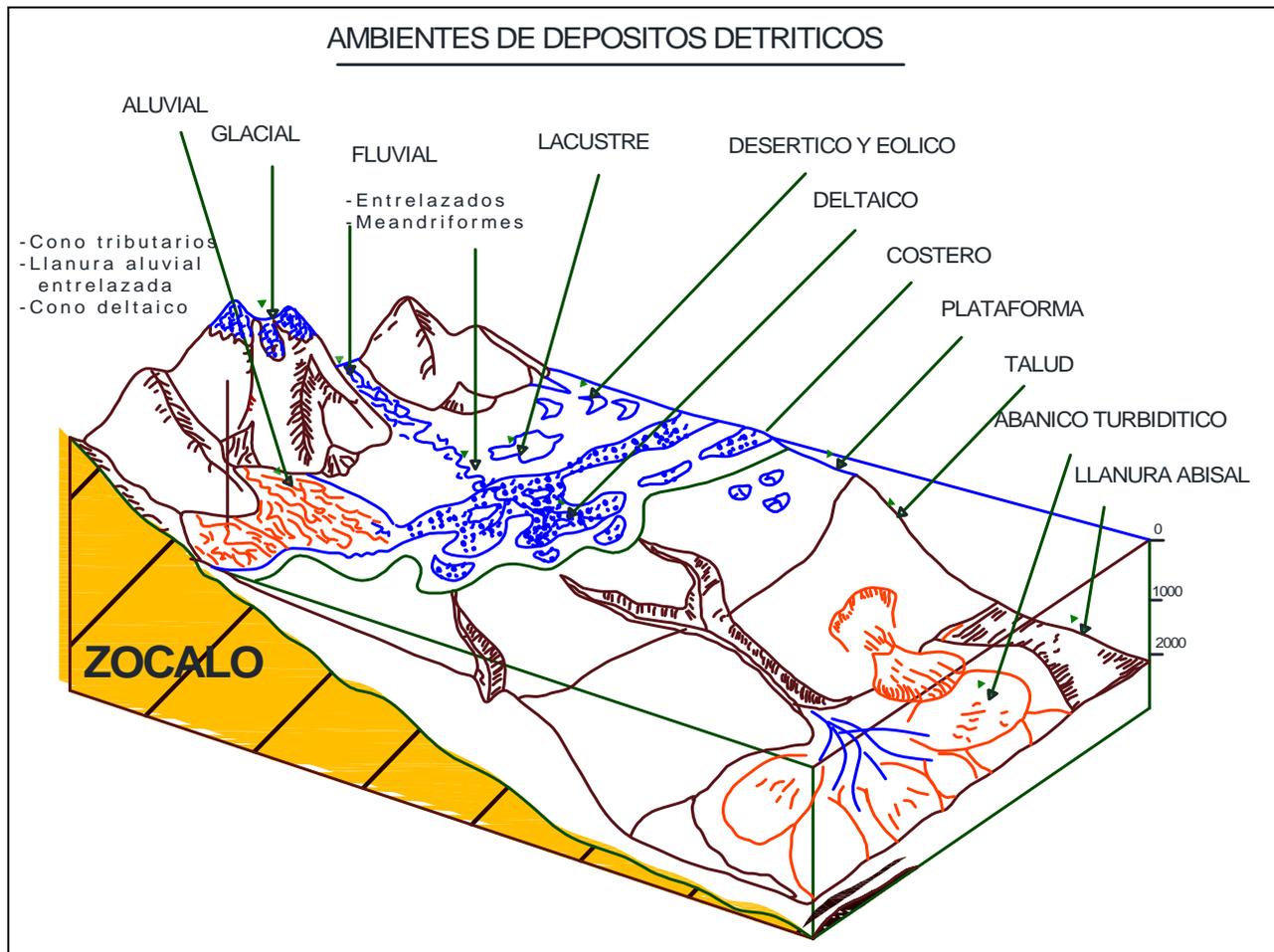
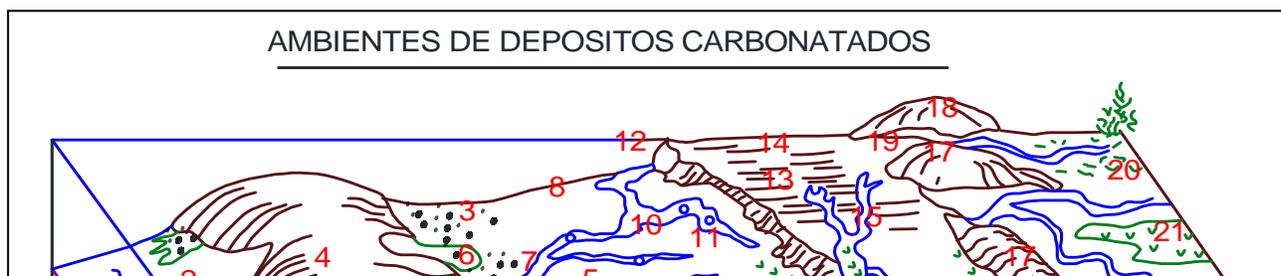


Figura 2. Ambientes de depósitos detríticos (modificado de Moullin, N., 1985).



a) Formación Toro Toro

Formación	Sucesiones	Paleoambientes
TORO TORO	TT - 2	Depósitos arenosos relacionados a medios fluviales de cauces entrelazados con flujos interiores que formaron la laminación. Asimismo se formaron barras masivas limitadas con canales. Sobre este mismo ambiente de barras se manifiesta una enérgica bioturbación ocasionada por el retrabajamiento de organismos perforadores (<i>Skolithos</i>).
	TT - 1	Relacionado a deposito de flujo de detritos aluvial que seleccionó pobremente a estos conglomerados con moderado tamaño de clastos. Le sigue un vinculo a ríos entrelazados de flujos de gravedad donde se desarrollaron barras y corriente de alto régimen con relleno de canales y flujos de estratificación planar.

Tabla 8. *Paleoambientes de la Formación Toro Toro - Sección Puente La Viña.*

b) Formación El Molino

Formación	Sucesiones	Paleoambientes
EL MOLINO	EM-10	Dominio de plataforma interna con depósitos de ambientes intertidales que enlaza a ambientes subtidales.
	EM-8	Depósitos de un ambiente supratidal que engrana con facies intertidales incluso subtidales de plataforma interna
	EM-5	Retorno de ambiente de barrera que depositan calizas oolíticas con régimen del alto flujo, en una plataforma interna.

EL MOLINO	E M-4	Ambiente supratidal de continente pero con el área permanentemente sumergida con alta energía que engrana a ambiente intertidales de plataforma interna.
	E M-3	Depósitos de un ambiente de barrera por la presencia de calizas oolíticas y sin interrupción de facies finas con energía de depósito media a baja sin transporte.
	E M-1	Acumulación de areniscas y areniscas calcáreas en un ambiente de desembocadura y/o playa, con una granodecrecencia por encontrarse en partes proximales de la cuenca.

Tabla 9. *Paleoambientes de la Formación El Molino - Sección Puente La Viña.*

4.2.2. Sección Quebrada Cuchirawaycko

a) Formación Toro Toro

Formación	Sucesiones	Paleoambientes
TORO TORO	T T - 2	Sucesión asociada casi por completo a cauces entrelazados, con facies de barras compuestas y retrabajadas por los organismos, en algunos sectores existe depósitos de flujo gravitatorio con altas descargas en un ambiente fluvial.
	T T - 1	Grava basal asociada a depósitos de flujos de detritos de medios aluviales, con un enlace a facies fluviales de rellenos de canales y cauces entrelazados, desarrollando barras con poco cambio en la dirección de los cauces en un ambiente fluvial.

Tabla 10. *Paleoambientes de la Formación Toro Toro - Sección Quebrada Cuchirawaycko.*

b) Formación El Molino

Formación	Sucesiones	Paleoambientes
EL MOLINO	E M-10	Continúa el dominio del ambiente de plataforma interna subtidal-intertidal debido a que los materiales son más finos.
	E M-9	Inicio de un contexto transgresivo donde el dominio pasa a ser de un ambiente de plataforma externa, donde las facies subtidales margas de gran espesor y laminadas engranan con las facies intertidales.
	E M-8	Facies en un ambiente de plataforma interna (intertidal) que entrecorta a facies de la zona supratidal en el límite del dominio continental.
	E M-7	Sucesión depositada en un ambiente de barrera, fue vinculada a la anterior sucesión.
	E M-6	Facies depositadas en un ambiente supratidal que se vincula a ambientes de plataforma interna subtidal.
	E M-5	Retorno de los depósitos de facies oolíticas y pisolíticas con fragmentos de conchas en ambiente de barrera de alta energía.
	E M-4	Facies de ambientes supratidales que se enlazan a ambientes intertidales.
	E M-3	Ambiente de barrera con entrecruzamiento, de energía moderada con la presencia de calizas oolíticas y pisolíticas.
	E M-2	Ambiente de lagoon condensado, en forma de downlap, que separa a las sucesiones inferior y posterior a esta.
	E M-1	Ambiente de desembocadura cerca al continente, donde se depositaron las areniscas, con un débil desarrollo de facies carbonatadas (areniscas calcáreas) blanquecinas, encontrándose en las partes proximales de la cuenca.

Tabla 11. *Paleoambientes de la Formación El Molino - Sección Quebrada Cuchirawaycko.*

4.3. Secuencias

Para un mayor entendimiento de las secuencias fundamentalmente daremos a conocer conceptos, pautas y ejemplos que valen la pena definir.

4.3.1. Secuencia: Sucesión estratigráfica relativamente concordante de estratos genéticamente relacionados y limitados por discontinuidades y por sus continuidades correlativas (*Mitchum, 1977*).

Las secuencias pueden estar subdivididas en cortejos sedimentarios que son asociaciones de sistemas de depósitos contemporáneos que se interpretan en base al modelo de apilamiento de capas definidos por superficies limitantes.

Las secuencias y los cortejos sedimentarios están delimitados por superficies estratigráficas tales pueden ser concordantes o discordantes donde indican un cambio en el régimen de sedimentación de una y otra parte del límite. Entonces la secuencia corresponde a un ciclo estratigráfico completo de evolución progresiva del régimen de sedimentación, el carácter concordante o discordante de las superficies límites no es importante para delimitar la secuencia.

4.3.1.1. Tipos de secuencias

Secuencias Tipo: Es la sucesión idealizada de facies, o un resumen simplificado de términos obtenido a partir de la observación directa y a través del tratamiento de la información real (*Pérez, 1989*). Esta secuencia permite proponer interpretaciones en términos de ambientes y/o subambientes sedimentarios pasajeros, con buena precisión.

Secuencias Reales: Son las sucesiones evolutivas de facies litológicas y superficies de discontinuidad, tal como se observa en el campo (*Pérez, 1989*). A través de estas secuencias se puede efectuar correlaciones secuenciales (Estratigrafía Secuencial).

4.3.1.2. Escala de secuencias

Estableciendo la observación de las secuencias que existen en las formaciones del Cretácico Superior, se reconocieron secuencias de hasta 2° Orden, que muestran un desarrollo interno, en secuencias de 3° Orden y asimismo hasta llegar a secuencias de 5° Orden, donde el orden jerárquico se encuentra mostrado en la Figura 5:

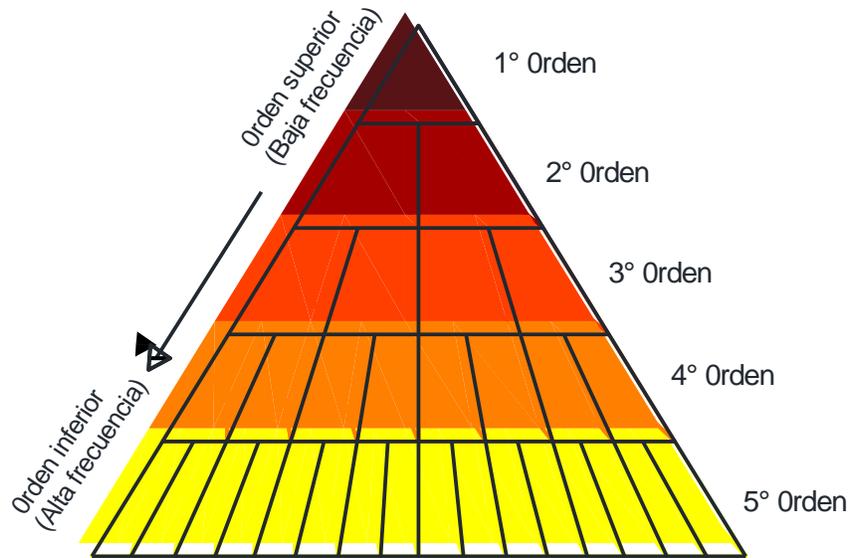


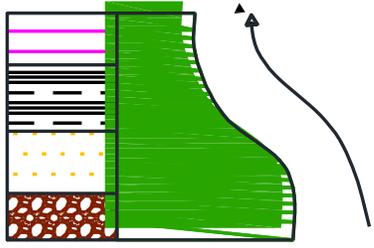
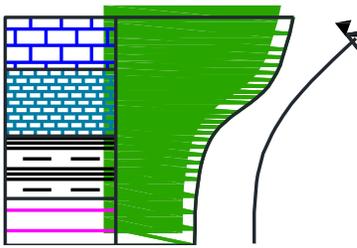
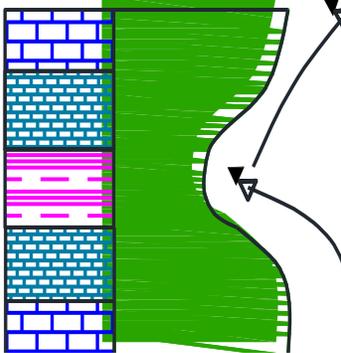
Figura 5. Pirámide de disposición jerárquica de las secuencias. Catuneanu (2002).

4.3.1.3. Orden de magnitud de las secuencias

Orden	Magnitud	Rasgos
1° Orden	> 50 Ma.	Registro sedimentario preservado durante el ciclo de Wilson.
2° Orden	3 - 50 Ma.	Presentan límites de secuencia de mayor grandeza..
3° Orden	0,5 - 3 Ma.	Dimensiones de tiempo y espacio con reconocimiento fácil.
4° Orden	0,08 - 0,5 Ma.	Pueden formar secuencias con límites erosivos parasecuencias.
5° Orden	0,03 - 0,08 Ma.	Representan periodicidades.
6° Orden	0,01 - 0,03 Ma.	Representan periodos de tiempo menor.

Tabla 12. Orden de magnitud de las secuencias, sintetizado de Vail (1991).

4.3.1.4. Representaciones de secuencias en una columna estratigráfica

Secuencia Positiva o granodecreciente	Secuencia Negativa o granocreciente	Secuencia Cíclica
		
El tamaño de grano decrece de base a tope.	El tamaño de grano aumenta de base a tope (aumento de energía en el depósito).	Partiendo de un estado inicial, evolucionan y finalmente vuelven a su estado inicial.
Otros caracteres		
Secuencia estratocreciente	Capas delgadas en la base y capas potentes en el tope.	
Megasecuencia	Corresponde a una secuencia de orden superior que se conforma de varias secuencias de orden inferior.	

Cuadro 3. Representación de las secuencias (elaboración propia).

4.3.2. Estudio de las secuencias del Cretácico Superior

La estratigrafía y otros aspectos geológicos del Cretácico Superior fueron trabajadas en los anteriores capítulos. Lo que se pretende en este capítulo es dar un modelo unánime al estudio de secuencias para las formaciones Toro Toro y El Molino.

Los depósitos del Cretácico se conforman en tres secuencias para *Rodrigo y Branisa (1984)* que son la Puerta, Puca inferior y Puca superior, este último representado por el Cretácico Superior. Mientras que *Sempere (1986)* encierra a este sistema en dos grandes secuencias denominadas P2 y P3. Donde la Formación Toro Toro junto a otras formaciones en su mayoría continentales se encontraría en la Megasecuencia P3 de la cuenca de Potosí, en tanto que la Formación El Molino junto a varias formaciones y equivalentes se ubica en la Megasecuencia P4 que a su vez distingue cuatro secuencias dentro de ella.

Megasecuencia	Secuencia	Cuenca de Potosí
P4	P46	Impora
	P45	Santa Lucia
	P44	EL MOLINO
	P43	
	P42	
	P41	
P3	P32	Coroma Chauaca
	P31	Aroifilla
		TORO TORO

Cuadro 4. Megasecuencias y secuencias propuestas por Sempere (1986).

4.3.3. División de las secuencias del Cretácico Superior

4.3.3.1. Secuencia de Segundo Orden

El Cretácico Superior según nuestra interpretación, se encuentra dentro de la secuencia granodecreciente de segundo Orden, que corresponde a la secuencia de mayor Orden jerárquico y además a toda la evolución de la cuenca durante este Periodo, comprendiendo a las formaciones Toro Toro y El Molino, ya que el intervalo de la edad de las mencionadas formaciones que representan a este Serie abarca alrededor de 23,1 M.a. (Sempere, 1986), tomando en cuenta por lo observado y planteado por Catuneanu (2002) y Vail. (1991) en la Figura 5 y Tabla 12.

Esta secuencia de mayor Orden abarca la totalidad del espesor de las formaciones de este Sistema, es decir que el espesor de cada sección de relevamiento está comprendido dentro de esta secuencia sistematizada en la siguiente tabla.

Sección	Espesor	Secuencia
"Puente la Viña"	239.06 m	2 ° Orden
"Quebrada Cuchirawaycko"	383.15 m	

Tabla 13. Secciones que corresponden a secuencias de 2° Orden.

A partir de la interpretación general de la secuencia de Segundo Orden, vamos a descifrar a las secuencias menores del Cretácico Superior, estudiando las secuencias de las formaciones Toro Toro y El Molino por apartado para una mayor y fácil comprensión.

4.3.3.2. Secuencias de Tercer Orden

Son las secuencias donde se hace el mayor estudio, debido a que se encuentran relacionados con diversos aspectos de las formaciones del Cretácico Superior, además, la cantidad de secuencias de este Orden jerárquico puede variar de una sección a otra.

a) Formación Toro Toro

Esta Formación se encuentra dividida en de la siguiente manera:

- *Sección Puente La Viña*: 6 secuencias de 3° Orden, que a su vez se subdividen en 12 secuencias de 4° Orden y para un mayor detalle en 17 secuencias menores de 5° Orden, presentando sus características en las figura 9.

- *Sección Quebrada Cuchirawaycko*: 8 secuencias de 3° Orden, que a su vez se subdividen en 16 secuencias de 4° Orden y para un mayor detalle en 27 secuencias menores de 5° Orden, presentando sus características en las figura 11.

a.1) Primera secuencia de 3° Orden

Dividida en tres secuencias de 4° Orden y cinco secuencias de 5° Orden.

Registrada en la parte inferior de la secuencia de 2° Orden, constituyendo los primeros depósitos del Cretácico Superior, sus límites se encuentran marcados; en la parte inferior por la discordancia angular con diferentes formaciones del Paleozoico (Foto 4 A), mientras que en la Quebrada Cuchirawaycko por una discontinuidad sobre la Formación Cuchirawaycko (Foto 4 B) y el tope de la secuencia está marcada por areniscas de menor espesor.

La base de esta secuencia está dada por conglomerados polimícticos, pasando a areniscas cuarzosas de grano grueso y con lentes conglomerádicos, donde, en su mayoría están representada por facies de abanicos aluviales relativamente espesos, asociadas con coladas basálticas, como ocurre en la sección Puente La Viña.

Secuencia que representa una oscilación episódica con una pequeña ciclicidad, existentes en la primera, segunda y tercera secuencia de 5° Orden.



A: Sección: "Puente La Viña"- Sinclinal del Rio Caine B: Sección: "Quebrada Cuchirawaycko" - Sinclinal de Toro Toro

Foto 4. Inicio de la secuencia de 2° Orden y contactos de la Formación Toro Toro; A: Contacto con la Formación Santa Rosa y B: Contacto con la Formación Cuchirawaycko.

a.2) Segunda secuencia de 3° Orden

Secuencia que muestra una relación directa con medios fluviales, la base de la misma está marcada por el inicio del reabajamiento de organismos (*skolithos*), dejaron una estructura de bioturbación, mientras que el tope lo marca una pequeña discontinuidad de superficie erosiva.

a.3) Tercera secuencia de 3° Orden

Dividida en dos secuencias de 4° Orden y tres secuencias de 5° Orden.

Secuencia representativa al mostrar una reducida ciclicidad en las secuencias menores (quinta y sexta secuencia de 4° Orden), relacionada directamente a depósitos arenosos gradados y facies fluviales entrelazados de barras simples y masivas. La base está marcada por el depósito de areniscas conglomerádicas sobre una superficie erosiva y socavada por la fuerte energía con la que se depositó este primer banco, en la parte central existen arenas de grano medio vinculándose hacia arriba a facies más gruesas y lenticulares que marcan el tope de esta secuencia.

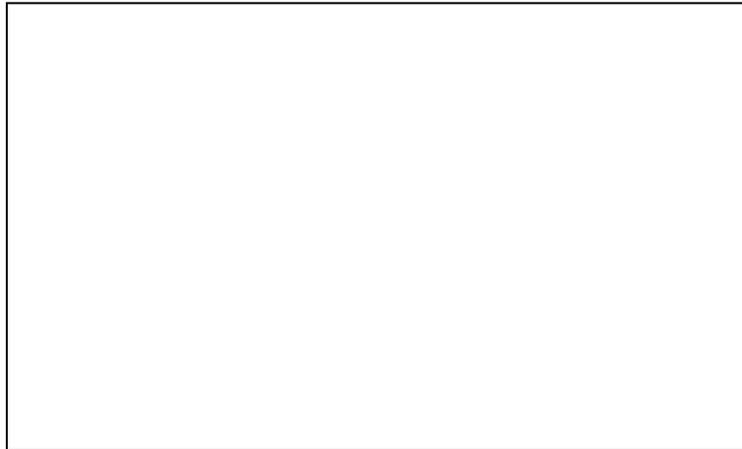


Figura 6. *Ejemplo de una secuencia cíclica de 3° Orden en la Formación Toro Toro.*

a.4) Cuarta secuencia de 3° Orden

Dividida en dos secuencias de 4° Orden y tres secuencias de 5° Orden.

Secuencia con carácter negativo, los límites que marcan esta secuencia son: en la parte inferior superficie con niveles conglomerádicos y estratificación diagonal, mientras que el tope está delimitado por una superficie erosionada acompañada de un paleosuelo. Serie caracterizada por una excesiva bioturbación en las barras de arena con interrumpida ciclicidad.

a.5) Quinta secuencia de 3° Orden

Dividida en dos secuencias de 4° Orden y tres secuencias de 5° Orden.

La base de la secuencia está dada por el depósito de un banco de arenisca cuarzosa de 1.20 m, depositada sobre una superficie erosionada y socavada a consecuencia de la depositación tractiva, en la parte central de esta serie se presenta una estratificación masiva y grosera (representada en la decimo tercera y decimo quinta secuencia de 4° Orden). Existe una oscilación continua en sus depósitos observado en los estratos, con ciclicidad ausente, pero con una excesiva bioturbación (Foto 5). El tope está marcado por una superficie erosiva y/o clastos de mayor dimensión, que dan el inicio de otra secuencia.



Foto 5. Estratos de la quinta secuencia de 3° Orden con una excesiva bioturbación.

a.6) Sexta secuencia de 3° Orden

Es la secuencia más pequeña de este Orden, con una característica de tendencia positiva y granodecreciente, su límite inferior, lo marca la desaparición de la bioturbación, además, de pequeños niveles de conglomerados basales, depositados por altas descargas tractivas y erosivas sobre una superficie que a su vez es socavada, vinculándose hacia el tope, a barras masivas de carácter fluvial con estratificación masiva, su parte superior está limitada por un banco grueso de arenisca.

a.7) Séptima secuencia de 3° Orden

Dividida en dos secuencias de 4° Orden y cuatro secuencias de 5° Orden.

Inicia con un estrato de arenisca de grano grueso de 80 cm, sobre un paleosuelo, le siguen combinación de barras longitudinales, con entrecruzamiento, mientras que en la parte media de la secuencia (decimo novena y vigésima secuencia de 5° Orden) existe una clara granodecrecencia en las areniscas. Esta secuencia, presenta un carácter de oscilación continua sin ciclicidad por el semejanza de espesor en los estratos, marcando su límite superior por barras con entrecruzamiento diagonal.

a.8) Octava secuencia de 3° Orden

Dividida en dos secuencias de 4° Orden y seis secuencias de 5° Orden.

Ultima secuencia de 3° Orden en la Formación Toro Toro, el límite inferior de esta serie esta marcada por la presencia de un banco de arenisca bioturbada, sobre una superficie erosiva, siguiéndole hacia el centro (vigésimo cuarta y vigésimo quinta secuencia de 5° Orden) una serie de barras de con estratificación diagonal, para culminar con arenas bioturbadas. El límite superior de la secuencia se encuentra condicionado por la discontinuidad regional de base plana, que a su vez marca el contacto entre la formaciones Toro Toro y El Molino (Foto 6).



A: Sección: "Puente La Viña" - Sinclinal del Rio Caine B: Sección: "Quebrada Cuchirawaycko" - Sinclinal de Toro Toro

Foto 6. Límite superior de la octava secuencia de 3° Orden que marca los contactos entre las formaciones Toro Toro y El Molino.

b) Formación El Molino

La división en secuencias de la Formación el Molino está distribuida de la siguiente manera:

- *Sección Puente La Viña:* Se encuentra dividida en 4 secuencias de 3° Orden, donde el límite superior de la segunda secuencia de 3° Orden marca el empalme entre los Miembros superior e inferior de esta Formación. A su vez se subdivide en 10 secuencias de 2° Orden y veinticuatro secuencias de 5° Orden, detallado en la figura 10.

- *Sección Quebrada Cuchirawcko*: se encuentra dividida en 5 secuencias de 3° Orden, de igual forma que en la anterior sección el límite superior de la segunda secuencia de 3° Orden marca el contacto entre los Miembros superior e inferior de la Formación El Molino. Subdividida a su diez secuencias de 2° Orden y veintinueve secuencias de 5° Orden, detallado en la figura 12.

b.1) Primera secuencia de 3° Orden

Reconocida en la base de la secuencia de 2° Orden correspondiente a la Formación El Molino. El límite inferior de esta secuencia es la observada discontinuidad que correspondería al contacto de la Formación Toro Toro y La Formación El Molino, donde la base de esta última corresponde al inicio de la transgresión marina, representado por areniscas blanquecinas intercaladas con areniscas calcáreas con leve entrecruzamiento de un ambiente de desembocadura. Es una secuencia con una complejidad secuencial donde existe oscilaciones episódicas y continuas además de una ciclicidad climática por el cambio de color referente a la anterior secuencia. El límite superior de esta secuencia marcada por una superficie erosionada y un cambio brusco de litología.

b.2) Segunda secuencia de 3° Orden

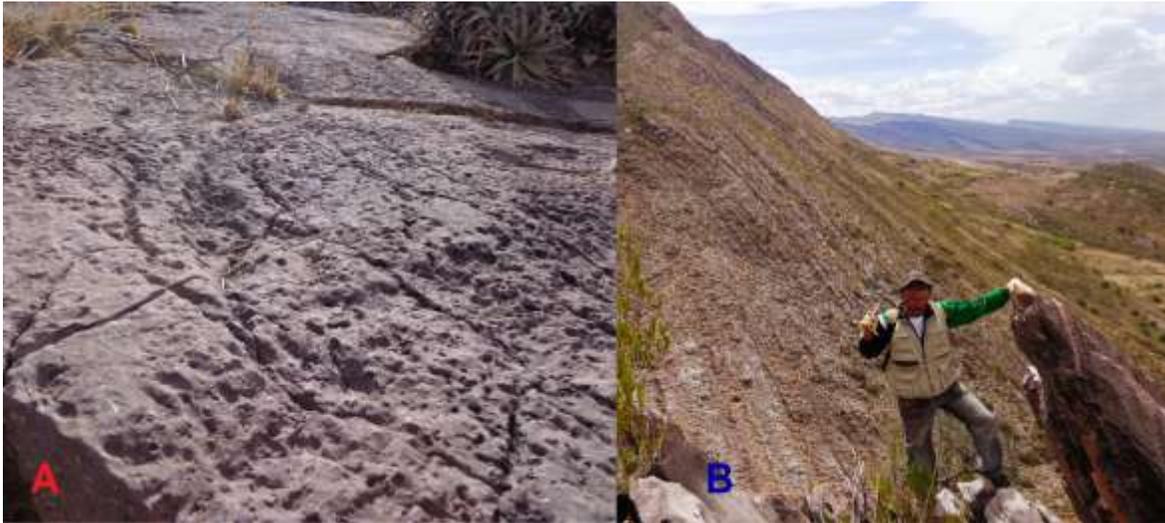
Registrada también en la parte inferior de la segunda secuencia de 2° Orden. Sus límites están marcados por un pequeño lagoon, en la parte inferior, y la parte superior, por una superficie arenosa de barrera (Foto 7 A y B), cuyo contenido secuencial se encierra a rocas puramente calcáreas. En esta secuencia se observan tres secuencias de 4° Orden y nueve secuencias de 5° Orden demostrada en la Sección "Quebrada Cuchirawaycko".

La secuencia presenta en su base un lagoon condensado en forma de downlap, vinculando hacia arriba a oscilaciones episódicas y continuas del mar, donde la energía va en incremento relacionado a un ambiente de barrera, evidenciado en los bancos oolíticos y pisolíticos de caliza, con casi la misma coloración, sugiriendo un clima más seco. Existe un pequeño vínculo con la plataforma interna en ambientes intertidales - supratidales, que deposita estratos de menor espesor a consecuencia de la reducción de energía.

Retorna el incremento de mayor energía, relacionado a un ambiente de barrera con casi las mismas características de fases episódicas y continuas pero de mayor espesor. La nuevamente reducción de espesor estratal y pérdida de oolitos muestran una etapa

asociada a facies supratidales y subtidales de la cuenca, para culminar con un fuerte pulso de regresión, en un ambiente de barrera.

Se observa una escasa manifestación de ciclicidad en toda la secuencia, alcanzando sus máximos espesores en el centro de la misma; de una zona de barrera por el incremento de energía (segunda secuencia de 4° orden) mientras que en las partes inferior y superior a esta secuencia los espesores son reducidos. El límite superior de esta secuencia marca la culminación del miembro inferior de la Formación El Molino (Foto 7 A y B) y la aparición de facies pelíticas.



A: Sección: "Puente La Viña"- Sinclinal del Rio Caíne

B: Sección "Quebrada Cuchirawaycko"- Sinclinal de Toro Toro

A: Vista en planta de calizas oolíticas; B: Últimos estratos de la secuencia. (Nótese que las facies oolíticas de estas secuencias forman los grandes conspicuos vistos en imagen satelital de la Formación El Molino)

Foto 7. Límite superior de la segunda secuencia de 3° Orden de la Formación El Molino.

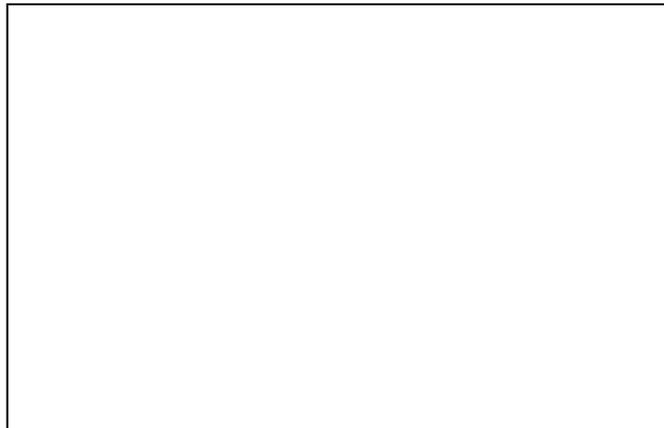


Figura 7. Ejemplo de la cuarta secuencia de 4° Orden, Formación El Molino.

b.3) Tercera secuencia de 3° Orden

Dividida en dos secuencias de 4° Orden y seis secuencias de 5° Orden.

Esta secuencia está limitada en su parte inferior por una discontinuidad, demostrada en una superficie de erosión y la disminución de facies clásticas (calizas) e inicio de una máxima transgresión, observado en las margas verdes intercaladas con niveles pequeños de caliza con diferente granulometría. Esta serie está relacionada directamente por facies de plataforma externa, donde, existe una variación efímera hacia el tope de la secuencia, además de una variación episódica de grandes pulsos transgresivos de larga duración (séptima secuencia de 4° Orden). El límite superior lo marca una discontinuidad climática con la aparición de margas rojizas.

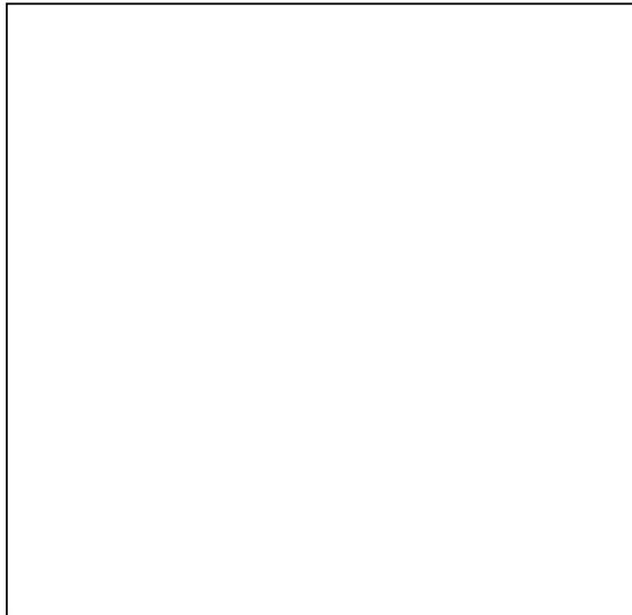


Figura 8. *Ejemplo de una secuencia de 4° Orden, Formación El Molino.*

b.4) Cuarta secuencia de 3° Orden

Dividida en dos secuencias de 4° Orden y ocho secuencias de 5° Orden.

La secuencia descansa sobre una discontinuidad, al parecer climática, por la aparición y dominio de espesas capas de margas rojizas y violáceas, intercaladas con margas verdes y delgados niveles de calizas de diferente granulometría, existe una máxima profundización de la cuenca, evidenciado en la parte central de la secuencia (octava secuencia de 4° Orden, Foto 8), por ser demasiado pelítica, hacia el tope de esta secuencia retornan las facies clásticas y proporción de margas verdosas, que marcan una discontinuidad climática.

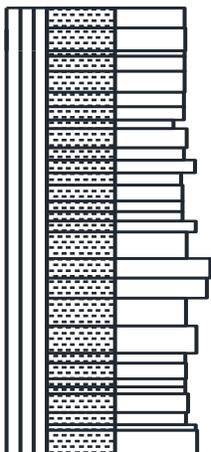
Esta secuencia de mayor espesor esta relacionados a transgresiones de larga duración en ambientes subtidales e intertidales de la plataforma externa.



Foto 8. Representación de la octava secuencia de 4° Orden, sección "Quebrada Cuchirawaycko".

b.5) Quinta secuencia de 3° Orden

Ultima secuencia del Cretácico Superior y por ende de la secuencia de 2° Orden, delimitada en su base por una discontinuidad climática, donde inicia la predominancia y retorno de margas verdosas y aumentan los niveles de calizas oscuras de diferente granulometría, puede estar relacionado a una leve transgresión marina. Estas facies están vinculadas hacia el tope (vigésima secuencia de 5° Orden) a una intercalación de margas verdosas-rojizas con niveles de yeso, hasta llegar al contacto de la Formación Santa lucia que llegaría a ser el límite superior de esta secuencia.



}}

}}

≠

}}

≠

}}

≠

}}

≠

}}

4.4. Análisis secuencial

En este capítulo, proponemos, a partir de la interpretación de los tres capítulos anteriores, un enfoque para un depósito sedimentario, donde, se mostrara la disposición espacial de los mismos, en superficies limitantes, cortejos sedimentarios y arquitectura de la cuenca desarrollados en las secuencias identificadas, en nuestras secciones de estudio y así proponer una evolución de la cuenca del Cretácico Superior.

4.4.1. Cortejos sedimentarios en secuencias

Los cortejos sedimentarios (system tracts) constituyen la división de las secuencias de depósitos (Catuneanu, 2007), dividiéndolas en dos tipos de secuencias en función de la naturaleza de los límites.

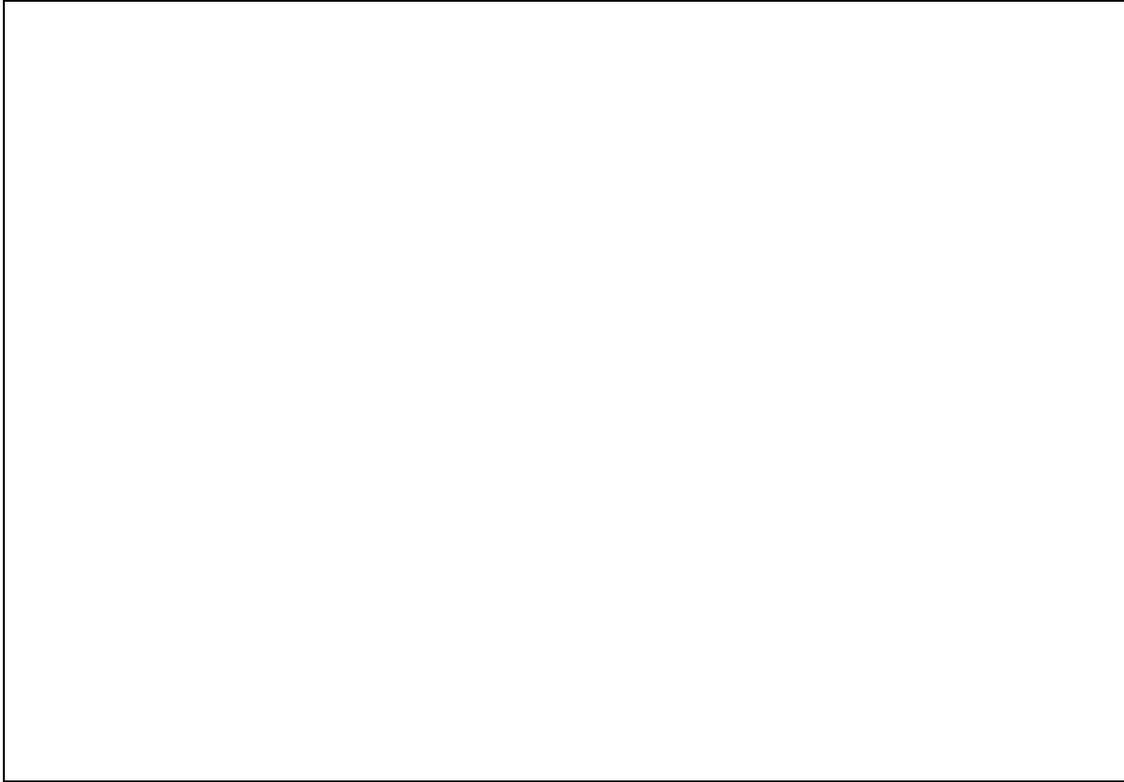


Figura 13. Definición de las secuencias de tipo 1 y tipo 2. (Según Vail et al., 1984).

A su vez se reconocen 4 tipos de cortejos sedimentarios (Catuneanu, 2002):

- El cortejo de bajo nivel (lowstand system tract), LST.
- El cortejo transgresivo (transgressive system tract), TST.
- El cortejo de alto nivel (highstand system tract), HST.
- El cortejo de caída de nivel de base (falling stage system tract), FSST.

4.4.2. Cortejos sedimentarios en la secuencia de 2° Orden del Cretácico Superior

La secuencia de 2° Orden, que abarca al Cretácico Superior, se encuentra dividida en dos cortejos sedimentarios que alcanzan a encerrar a las dos formaciones que representan este sistema. Estos cortejos LST y TST, se siguen de manera yuxtapuesta, se encuentran cerca de un dominio continental pasando a un dominio marino explicado en la siguiente figura.

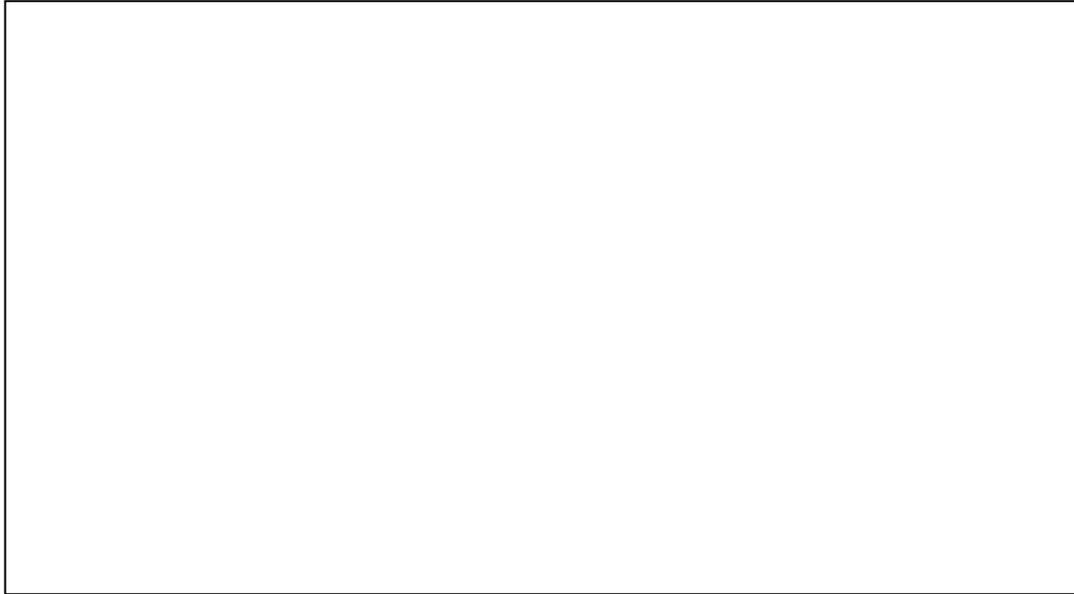


Figura 14. *Ubicación de los cortejos LST y TST en el diagrama de Wheeler. (modificado por Catuneanu, 2002).*

4.4.2.1. Cortejo de bajo nivel (lowstand system tract), LST.

Situado en la parte inferior de la secuencia de segundo orden, se encuentra limitada en la parte inferior por la discordancia angular que existe entre el Paleozoico y el Cretácico Superior. Su límite superior lo marca una superficie de transgresión marina (TS).

El diseño de este cortejo que incluye los sedimentos más gruesos inicia con el rebajamiento del nivel relativo del mar y comienza la descarga de depósitos aluviales (flujo de detritos) de la Formación Toro Toro, que forma un nuevo perfil más plano para luego rellenar los valles incisos y canales.

Continúa el depósito con facies de cauces entrelazados, que se muestran en las estructuras sedimentarias, donde, se desarrollan barras arenosas en el cual se evidencia un descenso de los regímenes de descarga, con algunos niveles conglomerádicos

depositados. Los apilamientos de estas capas se evidencia en la primera sucesión y la primera secuencia de 3° Orden de la Formación Toro Toro.

Permaneciendo en el mismo ambiente fluvial, se desarrolla depósitos arenosos, vinculados a cauces entrelazados, con la formación de barras simples, masivas y longitudinales. Esta sucesión implica una evolución de facies fluviales, que de manera general admite una pulsación oscilante en la descarga (*García et al., 2006*), lo que causa la decreciente cualidad múltiple de canales, relacionado a un ambiente de backshore.



Figura 15. Inicio del cortejo LST con el depósito de la Formación Toro Toro.

Una vez depositada la parte inferior del cortejo LST, correspondiente al depósito de la Formación Toro Toro, existe una fuerte discontinuidad dentro de la misma, es lo que (*Catuneanu, 2002*) llama "whitin-trend facies contact", que son discontinuidades debidas a cambios en el medio de sedimentación, acompañados por cambios correlativos en la energía y aporte sedimentario, durante las transgresiones o las regresiones.

Esta discontinuidad que marca el contacto entre las formaciones Toro Toro y El Molino se debe a que ya existe una influencia marina donde empiezan a depositarse areniscas blanquecinas y areniscas calcáreas, que marcan la base de la Formación El Molino (primera secuencia de 3° Orden - Anexo 4 y 5).



Figura 16. *Discontinuidad en el cortejo LST, contacto Toro Toro - El Molino.*

Posterior al depósito de estas facies de desembocadura, este cortejo se vincula a ambientes marinos someros de la plataforma interna, donde existe la formación de los sedimentos marinos gruesos, las calizas que se enlazan con subambientes supratidales - intertidales, con conexiones de barreras que depositan las calizas oolíticas, con alta energía llevando a su vez fragmentos de conchas.

Este cortejo finaliza con una superficie máxima de regresión (MRS), marcando así el límite del primer Miembro de la Formación El Molino (segunda secuencia de 3° Orden - Anexo 4 y 5). que es suprayacida por los sedimentos del cortejo transgresivo.

4.4.2.2. Cortejo transgresivo (transgressive system tract), TST.

Representa al Miembro superior y las facies pelíticas de la Formación El Molino, abarcando desde la tercera hasta la quinta secuencia de 3° Orden; yace sobre una capa arenosa. Las superficies limitantes de este cortejo son: la superficie máxima de regresión ya mencionada y la discontinuidad climática, que marca el contacto con la Formación Santa Lucia o la denominada superficie máxima de inundación (MFS).

Este cortejo que marca la máxima transgresión del Cretácico, empieza a depositarse cuando la subida del nivel de base sobrepasa la tasa de sedimentación, donde es caracterizada por la granodecrecencia. Intercala a espesas margas verdosas y violáceas con niveles de calizas de diferente granulometría y color. En su interior presenta dos discontinuidades que marcan las coloraciones verdosas y rojizas puntualizadas en las tercera, cuarta y quinta secuencia de 3° Orden de la Formación El Molino detalladas en el capítulo anterior.

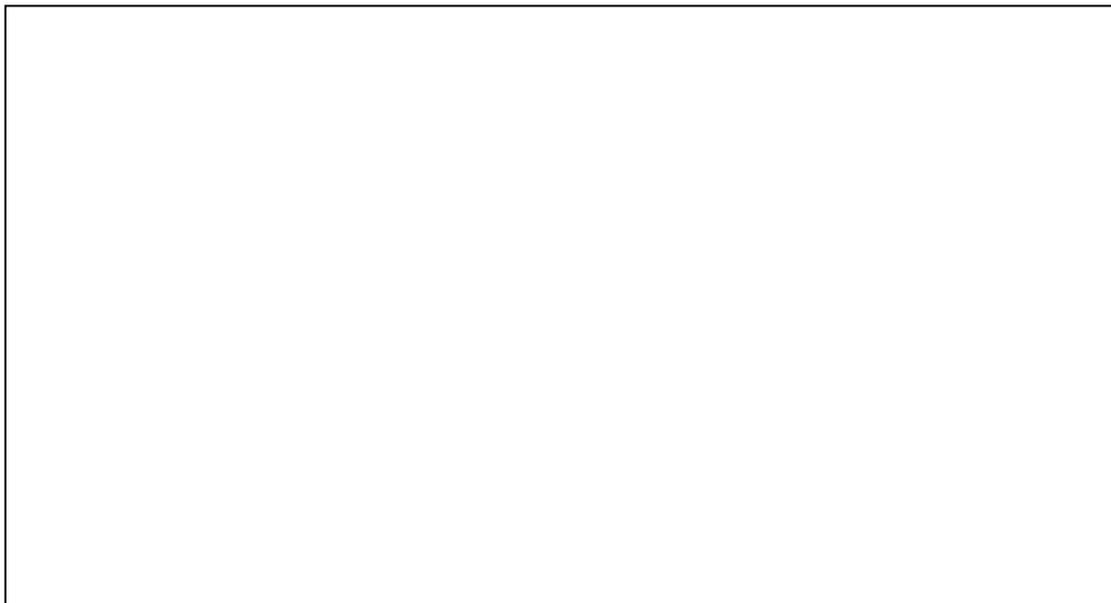


Figura 17. *Representación de los cortejos LST Y TST en la secuencia de 2° Orden.*

4.4.3. Arquitectura general de depósito

Las sucesiones y secuencias identificadas en las secciones de trabajo, fueron agrupadas en elementos arquitecturales, que son definidos por los cortejos sedimentarios. Para una mejor comprensión de estos elementos se tomaron en cuenta los elementos más representativos que se describen e ilustran a continuación:

a) Formación Toro Toro

La Formación Toro Toro está definida por dos elementos arquitecturales, que reflejan los cambios de sedimentación, en un ambiente de tendencia fluvial - continental.

a.1) Elemento arquitectural: Sucesión TT - 1

Corresponde a depósitos fluviales (flujo de detritos), con gravas basales que se componen de clastos de areniscas y cuarcitas subredondeadas y mal clasificadas del Paleozoico; de distribución horizontal restringida, que forman un contorno mas plano en el terreno, con relleno de canales y vinculado a cauces entrelazados, con bajos cambios de dirección, donde se desarrollan barrars arenosas longitudinales y lobuladas, depositándose en las partes proximales de la cuenca.

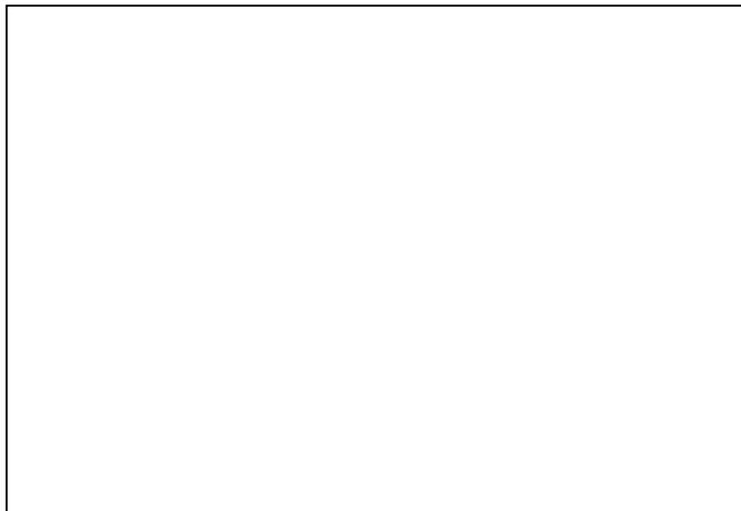


Figura 18. *Elemento arquitectural: Sucesión TT - 1.*

a.2) Elemento Arquitectural: Sucesión TT - 2

El inicio de esta sucesión es marcado por la disminución de la sequedad del clima, en el que desaparecen las facies gruesas de la sucesión TT-1, donde el depósito de las areniscas fluviales y en su mayoría entrecruzadas, son bien desarrolladas en las partes más anchas de la cuenca, mientras que en el borde se encuentran restringidas. La colectividad de esta sucesión se vincula a diferentes tipos de barras, dominados por arena en un desarrollo fluvial.



Figura 19. *Elemento Arquitectural: Sucesión TT - 2.*

b) Formación El Molino

En esta Formación se reflejan una variedad de naturalezas arquitecturales, que pasan de formas transicionales del continente hasta llegar a ambientes de plataforma carbonatada.

b.1) Elemento Arquitectural: Sucesión EM - 1

Asociada también a la primera secuencia de 3° Orden. Inicia con la influencia marina en la cuenca, donde, se depositan los sedimentos que pasan transicionalmente de una



Formación a otra, combinado así facies de areniscas blanquecinas con areniscas calcáreas granodecrecientes, por ser proximales y que marcan la base de la Formación El Molino, en un ambiente de desembocadura.

Figura 20. *Elemento Arquitectural: Sucesión EM - 1.*

b.2) Elemento Arquitectural: Sucesión EM - 3

Corresponde directamente a un ambiente de barrera de alta energía, donde, se depositan los sedimentos más gruesos de la Formación El Molino, correspondientes a calizas oolíticas y bioclásticas de gran espesor, sin intercalación de facies pelíticas, a su vez engranan en algunos eventos con facies supratidales e intertidales, para luego reanudar las pulsadas a un ambiente de barrera. La culminación de esta etapa en la cuenca marca el fin del depósito para el primer Miembro de la Formación El Molino, que también se representa en la segunda secuencia de 3° Orden (Anexo 4 y 5).

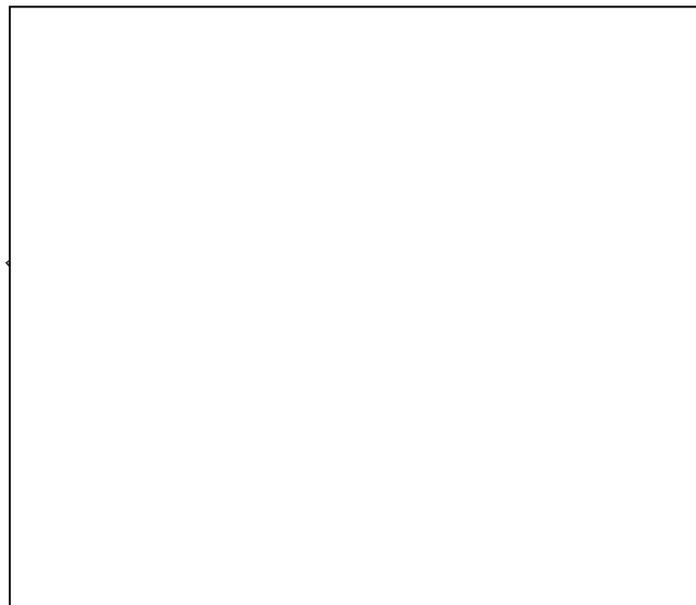


Figura 21. *Elemento Arquitectural: Sucesión EM - 3.*

b.3) Elemento Arquitectural: Sucesiones EM - 8 y EM - 9

Representa la máxima transgresión del Cretácico Superior, la cuenca es sometida a ambientes de plataforma externa, sobreyaciendo en una clara discontinuidad al primer Miembro de la Formación El Molino. Litológicamente está representada por margas verdes, intercaladas con niveles de calizas de color violáceo. Se evidencia otra discontinuidad climática con la aparición de margas rojizas y violáceas, intercaladas con calizas de grano grueso.



Figura 22. *Elemento Arquitectural: Sucesión EM - 8 y EM - 9.*

b.4) Elemento Arquitectural: Sucesión EM - 10

Etapa final de la transgresión en la cuenca, expuesto en la quinta y última secuencia de 3° Orden (Anexo 4 y 5), la proporción de los carbonatos disminuye claramente en ambiente de plataforma interna, aparecen niveles de yeso en las margas multicolores, los aportes sedimentarios equilibran con la subsidencia, se evidencia una regresión. El límite superior

de esta sucesión es marcado por el primer banco arenoso- rojizo de la Formación Santa Lucia.

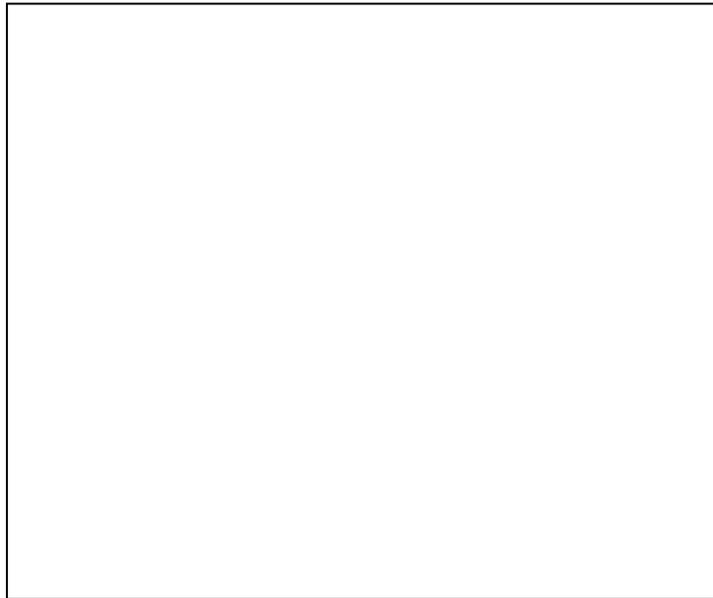


Figura 23. *Elemento Arquitectural: Sucesión EM - 10.*

4.5. Paleogeografía

La zona de estudio pertenece a la Cuenca Andina cuyo relieve se habría formado durante el Jurásico Superior donde se depositó el Grupo Puca, *Russo & Rodrigo (1965)* en el cual habrían existido dos dorsales de rumbo paralelo a la costa, donde se hallan las subcuencas de Sevaruyo y Maragua (donde se encuentran las secciones de trabajo).

La paleogeografía de estas cuencas considera que su evolución estuvo regulada por elementos tectónicos que controlaron la sedimentación, definiendo fases de distensión que permitieron una mayor expansión de las cuencas, fases que estuvieron acompañados de eventos magmáticos. La sedimentación de las cuencas estuvo influenciada por los movimientos sin-sedimentarios y dorsales que las limitan, dando como resultado unas areniscas basales y de borde. *(Rodrigo y Branisa, 1984)*.

La Formación Toro Toro se interpreta como un ambiente continental de poca elevación y escaso relieve, con algunas lagunas de poca profundidad y un dominio de sistemas entrelazados. Mientras tanto la Formación El Molino se caracteriza por haberse depositado en una variedad de ambientes, que van desde desembocadura y barrera

hasta ambientes intertidales, subtidales y supratidales, en un régimen somero, donde, se registra el último pulso transgresivo en la cuenca Andina de Bolivia.

4.6. Correlación estratigráfica

Como parámetro fundamental tenemos la correlación litoestratigráfica (Anexo 2), realizado en las dos secciones de trabajo, para el Cretácico Superior, muestra una variación de SE a NO, es decir, la sección "Quebrada Cuchirawaycko" es más espesa y completa que la sección "Puente La Viña". En ambas secciones la Formación Toro Toro se encuentra en su totalidad y con la interpretación de sus dos sucesiones TT-1 y TT-2.

Para la Formación El Molino el panorama se hace más complejo, donde, se toma como parámetro fundamental a la sección "Quebrada Cuchirawaycko", por ser más representativa y completa, donde se identificó la diez sucesiones del EM-1 al EM-10, mientras que en la sección "Puente La Viña", existe la ausencia de EM-2, EM-6, EM-7 y EM-9 por diversos aspectos (entre ellos presencia de Cuaternario), pero, las sucesiones presentes en las secciones mantienen casi las mismas características entre ambas (Anexo 2).

CAPITULO V

ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS Y EVOLUCION DE LA CUENCA

5.1. Correlación de secuencias

Como medida fundamental para la interpretación de la correlación secuencial se considera nuevamente a la sección "Quebrada Cuchirawaycko", por contener la mayoría de aspectos litoestratigráficos que nos sirven como aportes, para realizar esta correlación.

El Cretácico Superior está comprendido dentro de la secuencia de 2° Orden, según nuestra interpretación, donde, le siguen las secuencias de 3° Orden con las cuales se realizó la correlación secuencial, por haber sido en estas secuencias donde se identificó discordancias, discontinuidades y superficies con valor cuantificativo para la evolución de la cuenca (Anexo 3).

Se observa que existe una variación de secuencias de SE a NO, es decir, al igual que la anterior correlación existe una ausencia de secuencias en las dos formaciones del Cretácico Superior (Tabla 13).

Secuencia	Posición	Formación	Sección	
			Puente la Viña	Quebrada Cuchirawaycko
3° Orden	Quinta	El Molino	12,86 m	16,08 m
	Cuarta		-----	52,03 m
	Tercera		30,72 m	29,37 m
	Segunda		47, 87 m	65,00 m
	Primera		36,23 m	29,00 m
	Octava	Toro Toro	14,13 m	29,55 m
	Séptima		6,91 m	25,95 m
	Sexta		-----	9,85 m
	Quinta		-----	20,88 m
	Cuarta		26,14 m	24,72 m
	Tercera		10,09 m	13,71 m
	Segunda		14, 46 m	10,24 m
	Primera		46,74 m	37,06 m

Tabla 13. Correlación de las secuencias de 3° Orden.

5.2. Modelo de evolución de la cuenca: Cretácico Superior

"El relieve que rigió la sedimentación del Puca en Bolivia habría sido en gran parte consecuencia de los movimientos del Jurásico superior, que han sido intensos en Sudamérica." (Russo & Rodrigo, 1965). El intervalo de edad de las formaciones que

representan al Cretácico Superior y que se encuentran en nuestras secciones de estudio en el borde SO de la parte andina, es de 23,1 M.a. (*Sempere, 1986*).

En el Cretácico existieron dos dorsales en la parte Andina de Bolivia, con un rumbo paralelo a la costa occidental del continente. El Cretácico Superior (formaciones Toro Toro y El Molino) se depositó en la cuenca Andina o del grupo Puca (*Rodrigo y Branisa, 1984*) subdividida en subcuencas de Sevaruyo y Maragua.

Las primeras formaciones en depositarse en la Cuenca Andina durante el Cretácico son: La Puerta, Tarapaya, Miraflores, Arenisca Sucre y la parte inferior de la Formación Aroifilla, que culmina con un complejo efusivo de basalto donde marca el límite del Grupo Puca Inferior y Grupo Puca Superior, este último representado por el Cretácico Superior.

Durante esta etapa las efusiones basálticas acompañan a los fenómenos distensivos, a lo largo de la línea de Betanzos - San Lucas (*Sempere, 1989*). Mientras que en la parte SO de la cuenca Andina de Bolivia, en el borde occidental de la subcuenca de Sevaruyo (zonas de estudio), se inicia el depósito de la Formación Toro Toro (Coniaciano), con la presencia de abanicos aluviales que depositaron conglomerados polimícticos asociadas a coladas basálticas en su base (evidenciado en la primera secuencia de 3° Orden - Formación Toro Toro).

Continúan los depósitos de barras arenosas de diferentes estructuras y bioturbación predominante, asignados a medios fluviales entrelazados por la disminución de fenómenos distensivos. El ascenso energético prosigue, continuando con depósitos de alta descarga que dejan superficies erosivas (límites de algunas secuencias de 3° Orden), mientras que en partes distales de la cuenca se van depositando los equivalentes laterales de la Formación Toro Toro (Formación Chaunaca).

Una influencia marina inicia en las zonas proximales de la cuenca (intervalo Campaniano - Maastrichtiano), donde marca la transición y discontinuidad que marca el contacto del tope de la Formación Toro Toro con la base de la Formación El Molino, donde en esta última se depositan areniscas blanquecinas y calcáreas (granodecrecientes por encontrarse en zonas proximales) de desembocadura, que se vinculan a barreras oolíticas de alta energía, en el norte de Potosí (en el flanco oeste de los sinclinales del Río Caíne y Toro Toro), que depositan calizas oolíticas y bioclásticas de grandes espesores,

que además delimita el primer Miembro de la Formación El Molino (tope de la segunda secuencia de 3° Orden - Formación El Molino).

La transgresión alcanza su máxima desarrollo (base de la tercera secuencia de 3° Orden) donde comienzan a disminuir las facies de calizas con una subsidencia poco diferencial (*Sempere, 1986*), en el que sobre una clara discontinuidad (tercera secuencia de 3° Orden) pasa a un dominio de ambientes intertidales - supratidales, que depositan margas verdosas con niveles de caliza de diferente granulometría. Posteriormente pasan a un dominio de plataforma externa sobre una discontinuidad (cuarta secuencia de 3° Orden) en el que espesas capas de margas rojizas y violáceas reemplazan a las margas verdosas con niveles de calizas negras de ambientes subtidales - intertidales, los aportes sedimentarios equilibran con la subsidencia.

En las últimas fases del Maastrichtiano, culmina el depósito de la Formación El Molino y así con esta finaliza el Periodo Cretácico Superior, porque el mar inicia su retiro definitivo ya que no volvió a invadir la parte Andina del territorio boliviano.

Conclusiones

A partir del estudio e interpretación de los capítulos del presente trabajo se concluye que:

- Se realizó el levantamiento de dos secciones estratigráficas del Cretácico Superior en la parte central de la Cordillera Oriental de Bolivia, sección "Puente La Viña" en sinclinal del Río Caíne y sección "Quebrada Cuchirawaycko" en sinclinal de Toro Toro.
- El Cretácico Superior está representado por las formaciones Toro Toro y El Molino que son concordantes pero litoestratigráficamente diferentes, que la forma compleja.
- La sección "Quebrada Cuchirawaycko" es más espesa y representativa que la sección "Puente La Viña", por lo que se la tomó como guía y modelo para la interpretación general de este estudio.
- El estudio de estratigrafía secuencial nos permite identificar sucesiones, paleoambientes y secuencias para definir características dentro de una Formación.
- La Formación Toro Toro presenta dos sucesiones de facies, mientras que la Formación El Molino presenta 10 sucesiones de facies, mismos que nos ayudaron a interpretar sus sistemas y paleoambientes de depósito.
- Las formaciones de Cretácico Superior se depositaron en un intervalo de 23,1 M.a. lo que la caracteriza como una secuencia de 2º Orden, donde, se reconocieron 8 secuencias de 3º Orden para la Formación Toro Toro y cinco secuencias de 3º Orden para la Formación el Molino, las mismas que están subdivididas hasta secuencias de 5º Orden.
- Con el método de análisis secuencial se pudo determinar que dentro de la secuencia de 2º Orden, que representa al Cretácico Superior, existen dos cortejos sedimentarios LST y TST, que se limitan de acuerdo a características de superficies y discontinuidades.
- El Cretácico Superior en nuestras secciones de estudio, se desarrolló en la parte oeste de subcuenca de Sevaruyo, dentro de la cuenca Andina; que corresponde a un esquema evolutivo, que inicia con dominio continental (Formación Toro Toro) y pasa transicionalmente a una plataforma transgresiva somera (Formación El Molino) en el borde de la cuenca.
- La última transgresión que se dio en la cuenca Andina fue en el Cretácico Superior.

Recomendaciones

Finalizando a esta tesis, se recomienda lo siguiente:

- Para un estudio de Estratigrafía secuencial se deben realizar el levantamiento de más de dos columnas estratigráficas "completas" (para una mejor interpretación), y a partir de estos emplear los cuatro pasos propuestos por *Catuneanu (2002)*, que son: análisis de facies, ambientes de depósito, secuencias y análisis secuencial, para un mejor alcance de la estratigrafía.
- Realizar el estudio de "Estratigrafía secuencial" del Cretácico Superior, en el centro de las cuencas Andina y Subandina, de este modo trabajar con los equivalentes de las formaciones Toro Toro y El Molino, para realizar una correlación (en base a secuencias), y así para plantear, un modelo de evolución de la cuenca a nivel regional durante este Periodo.
- La ejecución de varios tipos de estudios estratigráficos a lo largo de toda Bolivia, en formaciones que sean concordantes pero litoestratigráficamente diferentes, dentro de un mismo Periodo (como es el caso de este trabajo), donde dichos estudios deben emplear el análisis de facies, paleambientes, secuencias y paleogeográfico local, donde, se explique qué eventos ocurrieron, para que exista esas variaciones.
- Realizar más estudios actuales, con una visión petrolera, en la Formación El Molino, donde, aparentemente, las facies más favorables en lo que se relaciona a roca madre-reservorio, están constituidas por calizas ricas en materia orgánica.
- Se deba tomar como una "columna modelo", a la columna de la Formación Toro Toro de este trabajo, ya que se encuentra detallada y en su totalidad, además de realizar más secciones delgadas de las calizas de la Formación El Molino, para un estudio sugestivo en petrografía.

Bibliografía

Ahlfeld, F. y Branisa, L. 1960. "Geología de Bolivia" - (Instituto Boliviano del Petróleo). 245 pág.

Allen, P. y Allen, J. "Basin Analysis - Principles and Applications". Department Earth sciences. Zurich, 549 pág.

Bouroullec, J. 1979. "Estude sequentielle du toit de la serie evaporitique du Lias Inferieur dans un puit du bassin aquitain (Auch 1) France Ouest". Editions Technip.

Catuneanu, O. 2002. "Principles of Sequence Stratigraphy". Department of Earth and Atmospheric Sciences. University of Alberta. Canadá, 375 pág.

Cherroni, C. 1977. "El Sistema Cretácico, en la parte Boliviana de la Cuenca Cretácica Andina". Rev. Técnica. YPF. Vol.VI, pág. 5 - 46.

D´Orbigny, A. 1845. "Estudios sobre la geología de Bolivia". Ministerio de Colonización y Agricultura. Sección estadística y estudios geográficos. 262 pág. La Paz 1907.

García-Duarte, R., Rojas, T. y Ayala, N., 2006. "La Formación Toro Toro: Redefinición Litoestratigráfica y pautas de resolución espacial de la cuenca Pre-Maastrichtiana sobre el dominio Andino Central". Memorias XVII Congreso Geológico de Bolivia, pág. 21-25.

Iriarte, I. 2004. "Magmatismo alcalino Mesozoico en el Sinclinal de Toro Toro". Tesis de grado inédita 105 pág. UMSA.

Lohmann, H. y Branisa, L. 1962. "Estratigrafía y Paleontología del Grupo Puca en el Sinclinal de Miraflores, Potosí" petro. Bolivia., 4(2), pág. 9-16. La Paz.

Maldonado, M. 1967. "Estudio geológico del Sinclinal del Río Caíne y de la región de Sacabamba". Tesis de grado inédita. 96 pág. UMSA.

Marocco, R. 2009. "Introducción a la Estratigrafía Secuencial". UNMSM/IRD. 49 pág.

Miall, A. 1986. "Analysis of fluvial Deposits". Springer - Verlag. Berlin Heidelberg. 582 pág.

Miall, A. 2009. "The Geology of Stratigraphic sequences". Department of Geology. University of Toronto, Canadá. 522 pág.

Mitchum, R., Jr., Vail, R. y Thompson, S. 1977. "Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 2, - The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis". American Association of Petroleum Geologists Memoir 2(6), pág. 53–62.

Moullin, N. 1985. "Introducción a la Sedimentología". Curso de Geología. Mission ORSTOM au Perou. 98 pág.

Oller, J. 1996. "Cuadro cronoestratigráfico de Bolivia". Publicación especial YPF, Santa Cruz - Bolivia.

Pérez, M. 1986. "Estratigrafía, análisis secuencial y palinología de la zona de Ayoma, departamento de Potosí". Tesis de grado inédita. 98 pág. UMSA.

Posamentier, H. y Van Wagoner, J. 1988. "An overview of the fundamentals of sequence and key definitions" SEPM Special Publication, pág 39-45.

Reyes, F.C. 1972. "Correlaciones en el Cretácico de la cuenca Andina de Bolivia, Perú y Chile" Rev. Técnica. YPF. pág.101-104. La Paz.

Rodrigo, L. y Branisa, L. 1984. "Las cuencas de los grupos Puca y Tacurú (Cretácico - Terciario inferior) de Bolivia" Inédito. 88 pág. La Paz.

Russo, A. y Rodrigo, L., 1965. "Estratigrafía y Paleogeografía del Grupo Puca en Bolivia". Instituto Boliviano del Petróleo. Vol. 5. pág. 5 - 51.

Sarg, J. 1988. "Carbonate sequence stratigraphy". SEPM Special Publication, pág 155-181.

Schlagintweit, O. 1941 "Correlación de las calizas Miraflores en Bolivia con el horizonte calcáreo dolomítico del norte argentino" - Notas Museo de la plata VI geología n° 14: 337-354 pág., 9 fig.

Sempere, T. 1986. "Contribución a la Estratigrafía del Mesozoico Boliviano en el dominio Andino. ORSTOM en Bolivia". Inf. N°1. 34 pág.

Sempere, T., Oller, J., Cherroni y Pérez, M. 1987. "Un ejemplo de cuenca carbonatada en un contexto distensivo de Retroarco: Paleogeodinámica del Cretácico Terminal en la República de Bolivia (Formación El Molino y equivalentes)". ORSTOM-BOLIVIA. 39 pág.

Sempere, T., Oller, J. 1989. "Evolución Tectosedimentaria de Bolivia durante el Cretácico" Revista Técnica de YPF, pág. 183-200.

Sempere, T. 1996. "Cuadros estratigráficos de Bolivia, propuestas nuevas". Revista Técnica de YPF. Vol. 11 (2-3), pág. 15 - 17.

Steinmann, G. 1906. "Die Entstehung der Kupfererz lagarstatter von Corocoro and Ver Wandter Vorkommnisse in Bolivia". Fegtschift 70 Geb. pág. 335-368.

Suarez, R. y Díaz, M. 2000. "Léxico Estratigráfico de Bolivia". Revista Técnica. YPF. 227 pág.

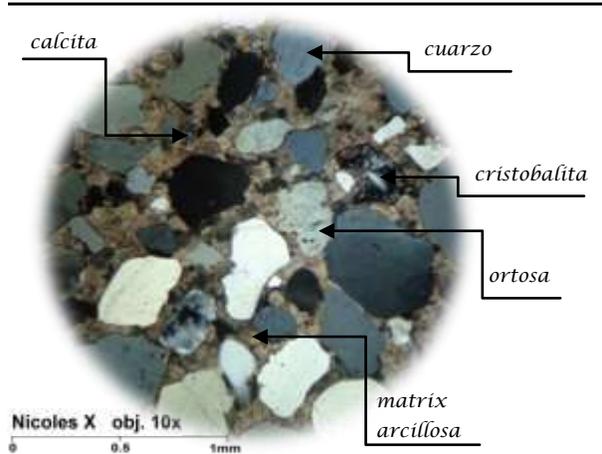
Vail, R., Hardenbol, J. y Todd, G. 1984. "Jurassic unconformities, chronostratigraphy and sea-level changes from seismic stratigraphy and biostratigraphy". American Association of Petroleum Geologists Memoir (36), pág. 129–144.

Vail, R., Audemard, F., Bowman, S. y Eisner, P. 1991. "The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology" Berlin, pág. 617–659.

Van Wagoner, J. y Bertram, G. 1995. "Sequence stratigraphy of foreland basin deposits: American Association of Petroleum Geologists" Memoir 64, 487 pág.

Valdivia, M. 1967. "Estudio geológico regional de Toro Toro y sus alrededores". Tesis de grado inédita. 90 pág. UMSA.

ANEXO 1



Mineral	Dimensión	Porcentaje
Cuarzo	0.01 mm a 0.9 mm	50 %
Ortosa	0.01 mm a 0.5 mm	7 %
Líticos	0.03 mm a 0.9 mm	15 %
Arcilla, calcita y mátrix	Espacio entre granos 0.02 mm	28 %
Total		100 %

Sección: Puente La Viña

M - 1

Lugar: Sinclinal del Río Caíne

Formación: Toro Toro **Distancia:** 28,96 m

Nombre de la roca: Arenisca cuarzosa

Estudio macroscópico: Presenta una textura afanítica con granocrecencia, es de color rojiza, muy deleznable de grano medio que no presentan orientación, en superficie está muy meteorizada.

Estudio microscópico: Luce una textura clástica, granosostenida por los granos de cuarzo, que son predominantes y de forma anhedral. Existen cristales escasos de cristobalita envueltos junto al cuarzo en una escasa mátrix de arcilla y calcita.

Sección: Puente La Viña

M - 2

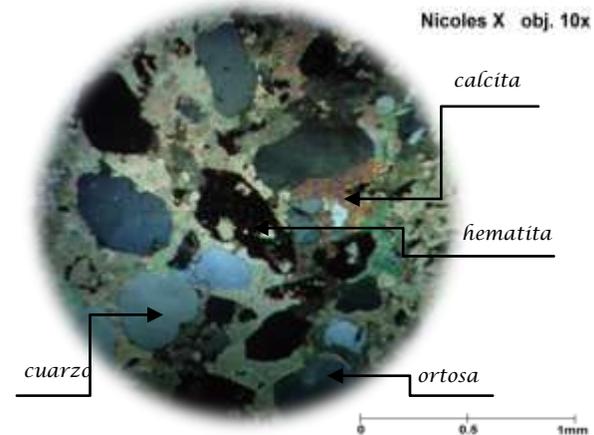
Lugar: Sinclinal del Río Caíne

Formación: Toro Toro **Distancia:** 39,00 m

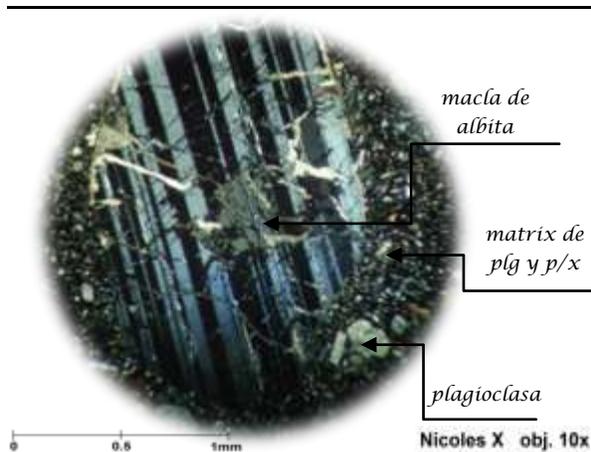
Nombre de la roca: Arenisca

Estudio macroscópico: Roca de color rojizo, muy deleznable y meteorizada en superficie, de grano medio y textura afanítica con algunos cristales de cuarzo de mayor tamaño que el resto.

Estudio microscópico: Presenta una textura clástica y granosostenida por los granos de cuarzo, que son predominantes y alterados. Al igual que en la anterior muestra, existen cristales escasos de cristobalita, envueltos en una mátrix de arcilla. Se encuentra una alteración de la casiterita, hematita y piroxenos ocasionado por la colada que brotó y friccionó justo en el contacto de estratos.



Mineral	Dimensión	Porcentaje
Cuarzo	0.01 mm a 0.7 mm	38 %
Ortosa	0.01 mm a 0.4 mm	8 %
Hematita	En forma de matrix	15 %
Líticos	0.03 mm a 0.07 mm	2 %
Calcita	0.02 mm a 1.0 mm	12 %
Mátrix	entre granos 0.18 mm	25 %
Total		100 %



Mineral	Dimensión	Porcentaje
Plagioclasas	0.1 mm a 1.3 mm	35 %
Pigeonita	0.2 mm a 1 mm	10 %
Augita	0.8 mm a 0.05 mm	18 %
Hiperstena	0.2 mm a 0.9 mm	8 %
Diopsida	0.03 mm a 0.5 mm	3 %
Olivino	0.1 mm a 0.5 mm	1 %
Mátrix (considerando que es plg/px)	< 0.01 mm	25 %
Total		100 %

Sección: Puente La Viña

M - 3

Lugar: Sinclinal del Río Caíne

Formación: Toro Toro **Distancia:** 39,20 m

Nombre de la roca: Basalto (inferior)

Estudio macroscópico: Muestra de textura porfídica, color gris oscuro con fenocristales de plagioclasa, que llegan al 10 %. En el afloramiento se encuentra en forma de colada.

Estudio microscópico: Presenta más de una textura, predomina la holocrystalina por el tamaño de sus fenocristales de plagioclasa (anortita y labradorita- albíta) y máficos (augita zonada, pigeonita e hiperstena) y la textura ofítica por el acomodamiento de su pasta, además, de textura intergranular (diopsida y olivino). La mayoría de estos cristales se encuentran alterados a serpentina. La forma de los cristales es euhedral a subhedral.

Sección: Puente La Viña

M - 4

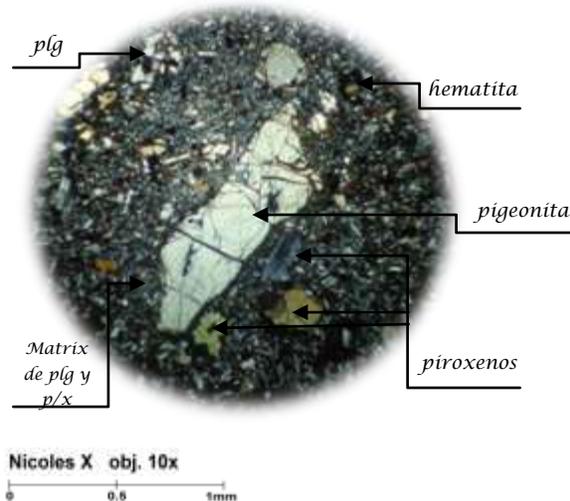
Lugar: Sinclinal del Río Caíne

Formación: Toro Toro **Distancia:** 46,50 m

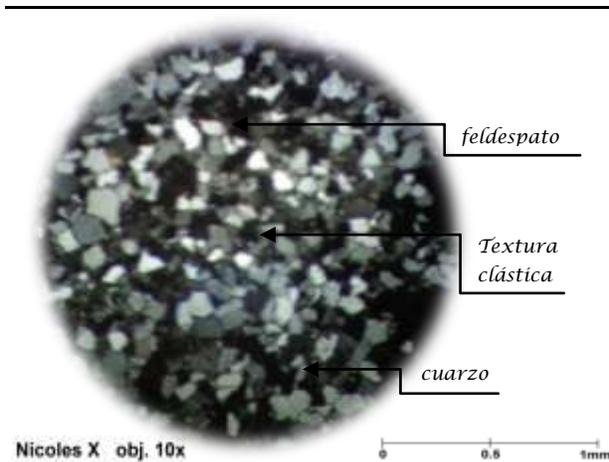
Nombre de la roca: Basalto (superior)

Estudio macroscópico: Muestra de color gris oscuro con textura porfídica, tomada de la parte superior de la colada, a diferencia de la anterior muestra se encuentra más alterada.

Estudio microscópico: Semejante cristalización a la anterior muestra, pero con fuerte alteración de hematita y serpentina, cristales que ya son de menor dimensión como piroxenos (pigeonita preponderante) de forma subhedral y solo presenta una textura holocrystalina a ofítica aglutinados en una pasta de plagioclasa y máficos (hematita y biotita) en algunos casos existe maclación.



Mineral	Dimensión	Porcentaje
Plagioclasas	0,04 mm a 0.6 mm	25 %
Pigeonita	0.1 mm a 1.0 mm	15 %
piroxenos	0.08 mm a 0.8 mm	20 %
Olivino	Menor a 0.02 mm	3 %
Hematita	0.02 mm a 0.4 mm	15 %
Biotita	0.05 mm a 0.08 mm	5 %
Mátrix	Menor a 0.01 mm	22 %
Total		100 %



Mineral	Dimensión	Porcentaje
Cuarzo	0.08 mm a 0.5 mm	85 %
Feldespato	0.02 mm a 0.04 mm	3 %
Calcita	Menor a 0.01 mm	1 %
Mátrix silicea	Menor a 0.01 mm	11 %
Total		100 %

orientación.

Sección: Puente La Viña

M - 5

Lugar: Sinclinal del Río Caíne

Formación: Toro Toro - **Distancia:** 147,05 m

Nombre de la roca: Arenita de cuarzo.

Estudio macroscópico: Muestra de color blanquecino, de grano medio deleznable, con algunos cristales de cuarzo anhedral. En superficie se encuentra meteorizada.

Estudio microscópico: Su única textura es la clástica que forman el cuarzo y feldespato, este último en menor proporción; son subhedrales-anhedrales formando un mosaico. En algunos sectores de la mátrix se puede observar la presencia de calcita pero en pequeñas cantidades. Los cristales son de cuarzo subredondeados sin clasificación ni

Sección: Puente La Viña

M - 6

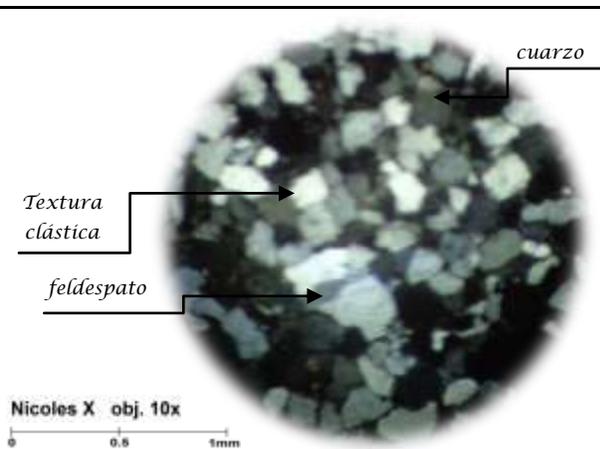
Lugar: Sinclinal del Río Caíne

Formación: El Molino **Distancia:** 156,57 m

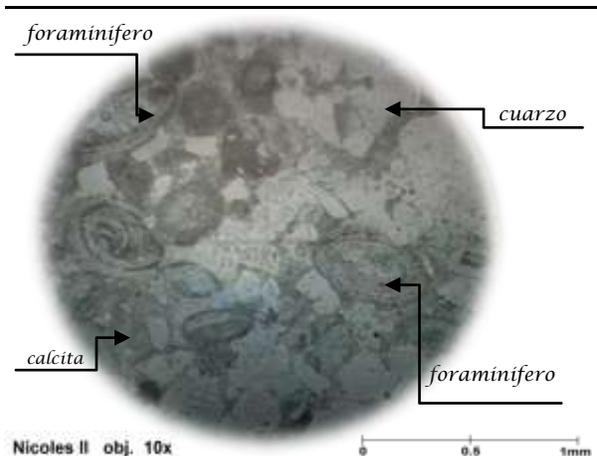
Nombre de la roca: Arenisca cuarzosa

Estudio macroscópico: Muestra masiva de color blanquecino, de grano fino, deleznable y meteorizada.

Estudio microscópico: Textura clástica, los granos se encuentran en mayor dimensión que la anterior muestra. Su mátrix es silicea con pequeña cantidad de calcita y arcilla, mientras que los granos son en su totalidad de cuarzo subredondeado, formando un mosaico con escaso feldespato.



Mineral	Dimensión	Porcentaje
Cuarzo	0.1 mm a 0.8 mm	90 %
Feldespato	0.02mm a 0.04 mm	2 %
Calcita y arcilla	Menor a 0.01 mm	1 %
Mátrix silicea	Menor a 0.01 mm	7 %
Total		100 %



Componentes	Dimensión	Porcentaje
Cuarzo	0.08 mm a 0.3 mm	30 %
Calcita	En forma de matrix microcristalina	45 %
Foraminíferos y orbitoides	0.2 mm a 0.6 mm	25 %
Total		100 %

preferencial y se encuentran muy desgastados.

Sección: Puente La Viña **M - 8**

Lugar: Sinclinal del Río Caíne

Formación: El Molino **Distancia:** 171,35 m

Nombre de la roca: Caliza arenosa

Estudio macroscópico: Muestra de color violáceo claro con niveles blanquecinos de grano fino a medio, presenta una estructura de entrecruzamiento.

Estudio microscópico: Granos de cuarzo detrítico subredondeados, envueltos por una pasta de calcita que llena los intersticios entre los granos diseminados a través de toda la sección. La textura es packstone micrítico por la forma de la calcita, con foraminíferos sin dirección preferencial, en algunos sectores existe una abundancia de restos de conchas de composición de calcita atravesada por una vetilla de la misma composición.

Sección: Puente La Viña

M - 7

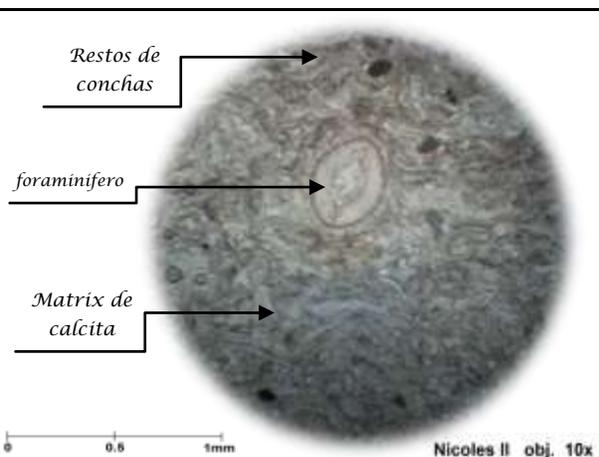
Lugar: Sinclinal del Río Caíne

Formación: El Molino **Distancia:** 164,50 m

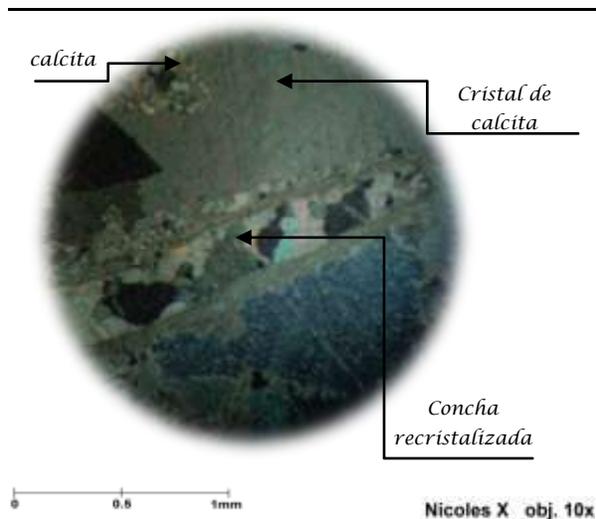
Nombre de la roca: Arenisca calcárea

Estudio macroscópico: Muestra de color violáceo con niveles violáceo claro, presenta grano medio a fino en forma de granodecrecencia de base a tope con estructura bandeada.

Estudio microscópico: Sección que contiene cuarzo anhedral sin selección, con textura deformada, contiene conchas de foraminíferos y orbitoides de color castaño oscuro recristalizados en calcita. Los componentes se encuentran aglutinados en una mátrix de calcita cristalina con una textura grainstone; los foraminíferos no tienen una dirección



Componentes	Dimensión	Porcentaje
Cuarzo	Menor a 0.0 mm a 0.15 mm	15 %
Calcita	En forma de matrix microcristalina	40 %
Foraminífero	0.2 mm a 0.7 mm	10 %
Restos de conchas	0.1 mm a 0.5 mm	35 %
Total		100 %



Componentes	Dimensión	Porcentaje
micrita	En forma de matriz micrita	30 %
Calcita cristales	0.05 mm a 1.5 mm	20 %
Conchas de orthoconchas recristalizadas de calcita	0.8 mm a 5,0 mm	50 %
Total		100 %

Sección: Puente La Viña

M - 9

Lugar: Sinclinal del Río Caíne

Formación: El Molino **Distancia:** 171,97 m

Nombre de la roca: Caliza cristalina

Estudio macroscópico: Muestra de caliza de color marrón claro - amarillento con brillo y estructura cristalina, presenta restos de conchas y granos de calcita que le dan el brillo. Esta muestra se encuentra muy bien conservada en el afloramiento.

Estudio microscópico: Caliza de cefalópodos nautiloideo y fragmentos de conchas orthoconchas, recristalizados y rellenos por calcita de grano fino en su totalidad. La matriz de calcita en forma de micrita que aglutina a los fenocristales de calcita subhedral.

Sección: Puente La Viña

M - 10

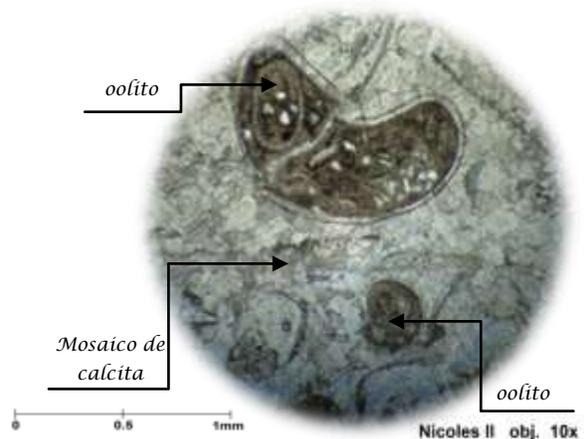
Lugar: Sinclinal del Río Caíne

Formación: El Molino **Distancia:** 203,87 m

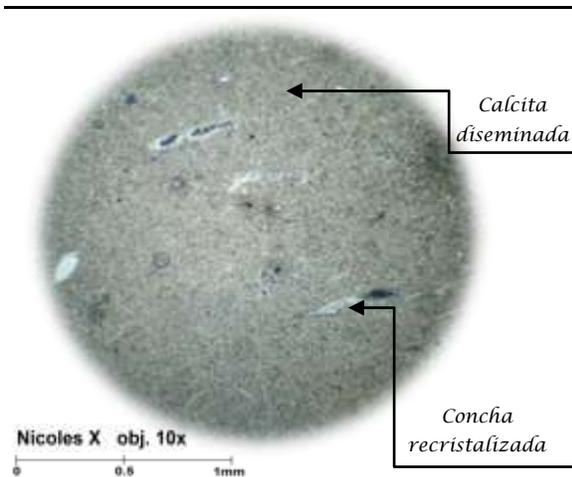
Nombre de la roca: Caliza oolítica (orgánica)

Estudio macroscópico: Muestra de color violácea oscuro, de brillo sedoso con estructura pisolítica, se observan los oolitos y restos de conchas a simple vista.

Estudio microscópico: Sección de oolitos marrones oscuros, con estructura concéntrica y fragmentos de conchas desgastados y recristalizados por calcita, algunos de los fragmentos son de oolitos fracturados. Todos estos componentes se encuentran cementados por micrita y cristales de calcita (en forma de mosaico) de pequeña dimensión.



Componentes	Dimensión	Porcentaje
micrita	mátrix	10 %
Calcita cristales	0.05 mm a 0.7 mm	35 %
Conchas de calcita	0.2 mm a 1.2 mm	30 %
Oolitos	0.3 mm a 1.1 mm	25%
Total		100%



Componentes	Dimensión	Porcentaje
Cuarzo	< a 0.01 mm a 0.1 mm	3 %
Calcita micrita	Mátrix micrita < a 0.01 mm	87 %
Conchas de moluscos recristalizados por calcita	< a 0.1 mm a 0.8 mm	10 %
Total		100 %

Sección: Puente La Viña

M - 11

Lugar: Sinclinal del Río Caíne

Formación: El Molino **Distancia:** 233,45 m

Nombre de la roca: Marga microcoquina

Estudio macroscópico: Muestra de color amarillo oscuro con niveles bandeados de marrón claro, presenta una textura afanítica, con restos de conchas recristalizadas a calcita.

Estudio microscópico: Fragmentos de cuarzo anhedral, esparcidos por toda la sección, conjuntamente existen restos de conchas blanquecinas de pequeños moluscos, que se encuentran recristalizadas por calcita diseminada de grano fino cementados por la calcita micrítica.

Sección: Quebrada Cuchirawaycko **M - 12**

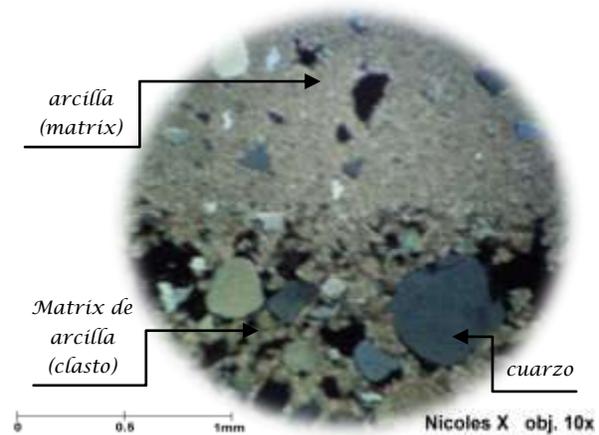
Lugar: Sinclinal de Toro Toro

Formación: Toro Toro **Distancia:** 0,45 m

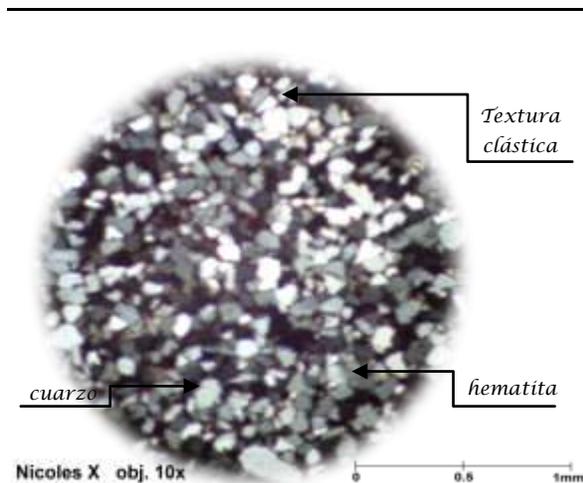
Nombre de la roca: Conglomerado polimíctico

Estudio macroscópico: Muestra de color rojizo con clastos subredondeados de arenisca, cuarcita y caliza. El diámetro de algunos clastos es mayor a 15 cm de diámetro, es mátrix-soportado de areniscas de grano grueso.

Estudio microscópico: Presencia de cristales de cuarzo anhedral, con una subtextura clástica; algunos cristales de feldespato en forma radial y líticos encerrados en una mátrix de arcilla, calcita y cuarzo diseminado. En algunos sectores se encuentran esparcimientos de cuarzo y feldespato encerrados en una mátrix de calcita.



Mineral	Dimensión	Porcentaje
Cuarzo	0.01 mm a 0,7 mm	50%
Feldespato	0.01 mm a 0,6 mm	7 %
Líticos	0.03 mm a 0.07 mm	1 %
Hematita	Sin forma	1%
Arcilla y calcita como mátrix	Espacio entre granos 0.6 mm	41%
Total		100 %



Mineral	Dimensión	Porcentaje
Cuarzo	0.01 mm a 0.4 mm	75 %
Ortosa	0.01 mm a 0.05 mm	5 %
Hematita	En forma irregular	12 %
Microclina	0.03 mm a 0.09 mm	3 %
Calcita	0.02 mm a 0.05mm	1 %
Mátrix	Espacio entre granos 0.02 mm arcilla	5 %
Total		100 %

Sección: Quebrada Cuchirawaycko **M - 14**

Lugar: Sinclinal de Toro Toro

Formación: El Molino **Distancia:** 200,01 m

Nombre de la roca: Arenisca cuarzosa

Estudio macroscópico: Muestra de color blanquecino de textura moteada con motas de color rojizas. Arenisca de grano medio, deleznable y masivo. En el afloramiento se encuentra meteorizado.

Estudio microscópico: Presenta una textura clástica - granosostenida, con cristales anhedrales de cuarzo predominante y menor cantidad de feldespato, en algunos casos en forma radial, además de líticos envueltos en una mátrix de calcita, que esta relleno los intersticios entre los granos y los líticos.

Sección: Quebrada Cuchirawaycko **M - 13**

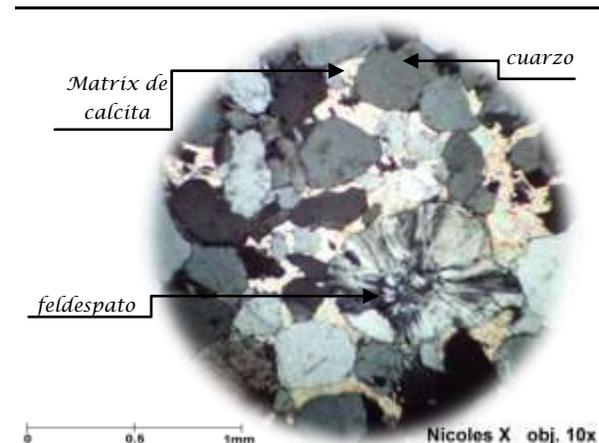
Lugar: Sinclinal de Toro Toro

Formación: Toro Toro **Distancia:** 97,93 m

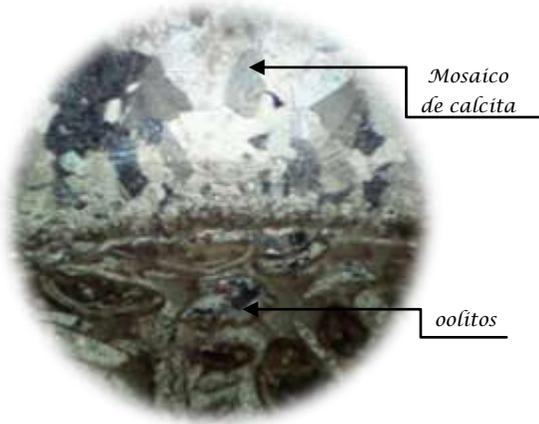
Nombre de la roca: Arenisca cuarzosa

Estudio macroscópico: Arenisca de color rojizo a violáceo, de grano grueso a medio, deleznable, presenta una textura granular con estructuras de laminación paralela y bioturbación.

Estudio microscópico: Sección con textura clástica tipo cuarzo detrítico en abundancia, pequeñas cantidades de feldespato y hematita por la alteración. La mátrix encierra a los granos de cuarzo y feldespato que se encuentran muy compactados. Los granos de cuarzo anhedral, detrítico y sin selección predomina en esta sección, el feldespato esta en menor cantidad (ortosa y microclina), existe unos pequeños cristales que al parecer son de calcita.



Mineral	Dimensión	Porcentaje
Cuarzo	0.06 mm a 0.1 mm	75 %
Feldespato	0.02 mm a 1.5 mm	10 %
Líticos	0.01 mm a 0.05 mm	3 %
Mátrix de Calcita	Espacio entre poros de 0.08mm	12 %
Total		100 %



Nicoles X obj. 10x

Componentes	Dimensión	Porcentaje	
Calcita	Micrita	En forma de matriz micrita	20 %
	cristales	< 0.0.1 mm a 0.8 mm	25 %
Conchas recristalizadas por calcita	0.9 mm a 13 mm	20 %	
Oolitos	0.1 mm a 0.8 mm	35 %	
Total		100 %	

Sección: Quebrada Cuchirawaycko **M - 15**

Lugar: Sinclinal de Toro Toro

Formación: El Molino **Distancia:** 229,77 m

Nombre de la roca: Caliza oolítica (esparítica)

Estudio macroscópico: Muestra de color violáceo oscuro con brillo sedoso de estructura pisolítica, se observan a simple vista los oolitos marrones y los fragmentos de conchas, de diferente tamaño.

Estudio microscópico: Se trata de una caliza muy oolítica, envuelta en una matriz de calcita y conchas conservadas pero recristalizadas por calcita. Algunos centros de los oolitos también están recristalizados por calcita microcristalina y cristalina. Estos componentes están cementados por una matrix de calcita, de grano fino de tamaño variable.

Sección: Quebrada Cuchirawaycko **M - 16**

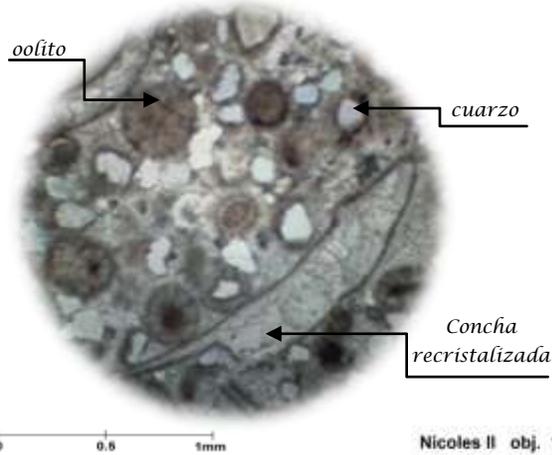
Lugar: Sinclinal de Toro Toro

Formación: El Molino **Distancia:** 244,41 m

Nombre de la roca: Caliza oolítica cuarzosa

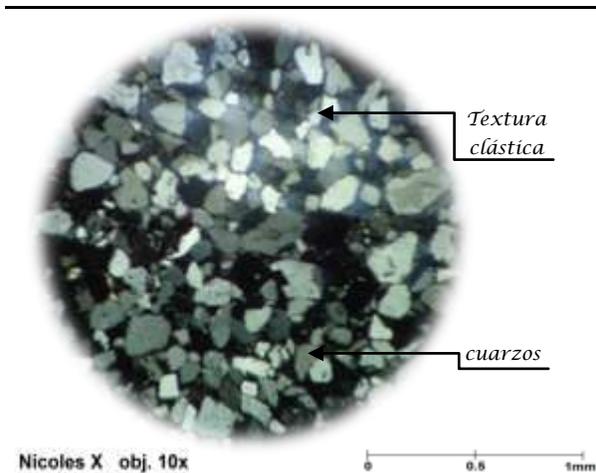
Estudio macroscópico: Muestra con estructura pisolítica de color violáceo claro con niveles oscuros. Los restos de conchas y oolitos se observan a simple vista.

Estudio microscópico: Textura no clásica por la presencia de cuarzo moderado, que se encuentra en forma anhedral, envueltos por calcita de grano medio a fino, a su vez, se encuentran junto a oolitos y restos de conchas recristalizadas por calcita. La matriz también de calcita de grano fino a microcristalina que envuelve a todos estos componentes.



Nicoles II obj. 10x

Componentes	Dimensión	Porcentaje	
Cuarzo	0.04 mm a 0.65 mm	15 %	
Calcita	Micrita	mátrix	10 %
	cristales	Menor a 0.0.1 mm	10 %
Conchas recristalizadas por calcita	0.9 mm a 13 mm	40 %	
Oolitos	0.1 mm a 0.6 mm	25 %	
Total		100 %	



Mineral	Dimensión	Porcentaje
Cuarzo	Menor a 0.01 mm a 0.08 mm	85 %
Feldespato	0.02 mm a 0.04 mm	3 %
Plagioclasas	0.02 mm a 0.12 mm	5 %
Líticos	0.01 mm a 0.15 mm	2 %
Mátrix de Calcita	Rellena espacio ende poros	5 %
Total		100 %

Sección: Quebrada Cuchirawaycko **M - 17**

Lugar: Sinclinal de Toro Toro

Formación: El Molino **Distancia:** 265,71 m

Nombre de la roca: Arenisca cuarzosa

Estudio macroscópico: Muestra de color amarillento, de textura masiva de grano medio, con algunos líticos esparcidos, es bastante deleznable y meteorizada en el afloramiento.

Estudio microscópico: Sección con textura clástica compuesta por granos de cuarzo, plagioclasa y feldespato, no presentan orientación preferencial, los intersticios están rellenos con calcita. Toda la muestra se encuentra granosostenida con escasas de mátrix, mientras que los cristales de cuarzo son anhedral, sin selección que forma un mosaico. Los cristales de plagioclasas son de menor dimensión, en algunos casos zonadas y macladas, mientras que los feldespatos son de forma anhedral.

Sección: Quebrada Cuchirawaycko **M - 18**

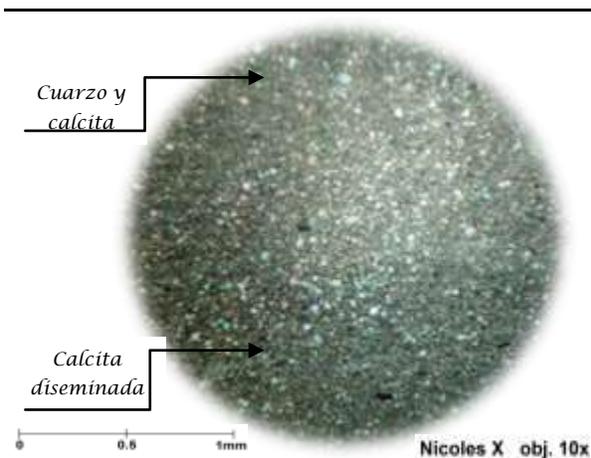
Lugar: Sinclinal de Toro Toro

Formación: El Molino **Distancia:** 362,51 m

Nombre de la roca: Marga microcoquina

Estudio macroscópico: Muestra de color gris con niveles bandeados de gris oscuro, presenta una textura afanítica con pequeñas conchas recristalizadas a calcita.

Estudio microscópico: Esta sección contiene pequeños cristales subhedrales de calcita, aglutinados en una mátrix de calcita micrítica o microcristalina, a su vez se encuentran fragmentos de conchas recristalizadas por calcita de grano fino, presenta pequeños granos de cuarzo anhedral esparcidos por toda la sección.



Mineral	Dimensión	Porcentaje
Cuarzo	0.01 mm a 0.05 mm	7 %
Calcita	0.01 mm a 0.04 mm	40 %
Conchas recristalizadas	0.01 mm a 0.1 mm	3 %
Mátrix de Calcita	Rellena espacio ende poros	50 %
Total		100 %