



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“Estudio estratigráfico a partir de eventos menores sedimentarios de la
Arenisca U de la Zona norte del Campo Sacha ”

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERIA EN GEOLOGIA


Presentado por

ANA CAROLINA ZAMBRANO GERALD

GUAYAQUIL - ECUADOR

2015

TRIBUNAL DE GRADO



Dra. Elizabeth Peña Crespo
DECANA DE LA FACULTAD
PRESIDENTA



Ing. Edison Navarrete Cuesta
DIRECTOR DE TESIS



Msc. Glenda Loayza Toro
VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente a la autora de este documento; y el patrimonio intelectual de

la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Art. 12 Reglamento de Graduación de la ESPOL)

ANA CAROLINA ZAMBRANO G.

Ana Carolina Zambrano Gerald.

RESUMEN

La secuencia estratigráfica es el más reciente y revolucionario paradigma en el campo de la Geología sedimentaria, los conceptos que encierra esta disciplina han resultado un cambio fundamental en el pensamiento geológico, en particular los métodos de facies y el análisis estratigráfico. Esto conlleva a más robustas interpretaciones y consecuentemente progreso científico (Catuneanu Q, 2006).

Este trabajo de tesis consiste en la descripción e interpretación de facies, y en la creación de ambientes sedimentarios de los eventos menores de la Arenisca U del sector norte del campo Sacha.

El tipo de estudio que se realiza es descriptivo ya que se usa información existente para interpretar la litología de la Arenisca U; es transversal porque se lo realiza en un tiempo determinado con un cierto número de pozos y es prospectivo ya que los resultados obtenidos servirán para un mejor entendimiento y comprensión del desarrollo de la arenisca U en el norte del campo Sacha.

El trabajo se inicia con la interpretación a detalle de la litología que tiene la arenisca U mediante el uso de los registros de pozos. A cada litología se

asigna un valor numérico en función del grado de energía de depositación y la profundidad del nivel del mar.

Estos valores son interpretados como curvas en las columnas de cada pozo, y con las cuales se observan zonas de correlación por la similitud de las curvas.

Luego se determina y se ubica de manera concisa los horizontes de topes y bases en las columnas estratigráficas de los pozos del campo Sacha y se realiza la correlación de los ciclos sedimentarios menores. Mediante estas correlaciones se crean mapas de facies, mapas paleo-geográficos y cortes estructurales, los cuales servirán para observar los cambios laterales de facies que pueden delimitar zonas de mejor desarrollo de la arena.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ÍNDICE GENERAL	III
INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES	3
1.1. Descripción del problema	3
1.2. Formulación del problema.....	5
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo principal.....	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
1.4. Justificación.....	7
2. ANTECEDENTES.....	8
2.1. Marco teórico	8
2.1.1. Marco Geológico Regional	8
2.1.2. Marco Geológico Local	13
2.1.2.1. Ubicación Geográfica.....	13
2.2. Evolución Geodinámica de la Cuenca Oriente	16
2.2.1. Sistema Subandino	17
2.2.2. Corredor Sacha-Shushufindi	18
2.2.3. Sistema Capiron-Tiputini	23
2.3. Campo sachá.....	27
2.3.1. Breve reseña histórica	27
2.3.2. Evolución de la Estructura Sacha	29
2.3.3. Características litológicas de la Arenisca U	32
2.3.4. Ambiente sedimentario de la Arenisca U	34
2.3.5. Estuarios	38

2.3.6.	Estratigrafía secuencial del Cretácico de la Arenisca U	41
2.4.	Modelo de facies	43
2.4.1.	Facies	43
2.4.2.	Análisis de facies	44
2.4.3.	Sucesión de facies	45
2.4.4.	Modelo de facies	46
2.4.5.	Principales usos de un modelo de facies	47
2.4.6.	Alostratigrafía	48
2.4.7.	Discontinuidades	51
2.4.8.	Contactos estratigráficos	53
2.5.	Eustatismo, cambios relativos del nivel del mar y profundidad del agua. .	56
2.5.1.	Fluctuaciones del nivel base	59
2.5.2.	Cambios cíclicos del nivel del mar	61
2.5.3.	Superficies Máximas de Regresión	65
2.5.4.	Superficies Máximas de Inundación.	66
2.6.	Cortejos Sedimentarios.	69
2.6.1.	Cortejo de bajo nivel.	71
2.6.2.	Cortejo Transgresivo.	73
2.6.3.	Cortejo de Alto Nivel.	77
2.6.4.	Cortejo de Nivel Base.	79
2.6.5.	Cortejo Regresivo.	83
3.	METODOLOGIA	85
3.1.	Universo y muestra	85
3.1.1.	Universo	85
3.1.2.	Muestra	86
3.2.	Uso de los registros de pozos	90
3.2.1.	Potencial Espontáneo	90
3.2.2.	Potencial Resistivo	91
3.2.3.	Potencial Gamma Ray	91
3.2.4.	Potencial de Densidad	92

3.2.5.	Potencial Capiler	93
3.3.	Uso de los registros de pozos	93
3.3.1.	Estratos marcadores	93
3.3.2.	Coincidencia de patrones.....	94
3.3.3.	Técnicas de corte	95
3.4.	Correlación estratigráfica en base a los registros de pozos	95
3.5.	Procesamiento de la secuencia de facies	96
3.5.1.	Uso de Media móvil para suavización de curvas	98
3.5.2.	Uso de la Serie de Fourier para suavización de curvas	102
3.6.	Procesamiento de la secuencia de facies	118
3.6.1.	Litologías encontradas en los registros de pozos	118
3.6.2.	Nivel de energía (ENRG) de las litologías descritas	125
3.6.3.	Ordenamientos de las litologías descritas en secuencias de facies... ..	126
3.6.4.	Descripción de facies sedimentarias a partir de los registros de pozos	134
4.	RESULTADOS	140
4.1.	Determinación de los ciclos sedimentarios que conforman la Arenisca U.....	140
4.2.	Descripción de eventos en caso ejemplo Pozo Sacha – 007 y Pozo Sacha - 161.....	141
4.3.	Curva modelo representativa de los ciclos transgresivos y regresivos de la arenisca U.....	145
4.4.	Interpretación de mapas paleogeográficos por ciclos o eventos menores sedimentarios.....	146
4.5.	Correlación de los cortes estructurales: A1-B1, A2-B2, A3-B3, y A4-B4.	152
	CONCLUSIONES	157
	RECOMENDACIONES	160
	BIBLIOGRAFÍA	196

ABREVIATURAS

Bppd: Barriles de petróleo por día

BUI: Base U Inferior

ENRG: Energía

Fm.: Formación

FSC: Facies Sísmica Central

FSST: Caída del nivel de base

HST: Highstand System Track

LST: Lowstand System Track

Ma. : Millones de años

MMBIs: Millones de barriles

MMBN: Petróleo a condiciones estándar

NEE-SWW: Este del Noreste- Oeste del Suroeste

NNE-SSO: Nor-Noreste-Sur Suroeste

NNE-SSW: Nor Noreste – Sur Suroeste

NO: Nor-Oeste

N-S: Norte-Sur

POES: Petróleo Original en Sitio

RST: Regressive System Track

RST-UI: Regressive System Track – U Inferior

RST-US: Regressive System Track – U Superior

SO: Suroeste

Trend ITT: Tendencia Ishpingo, Tambococha, Tiputini.

TST: Transgressive System Track

TST-UI: Transgressive System Track – U Inferior

TST-US: Transgressive System Track – U Superior

TUI: Tope U Inferior

TUS: Tope U Superior

WDPT: Profundidad de Agua

SIMBOLOGIA

SIN: Función Seno

COS: Función Coseno

us/ft: Microsegundo/pies

g/cm³: Gramos/Centímetros cúbicos

Ohm-m: Ohmio-metros

GLOSARIO

Transgresión.- Es un evento geológico por el cual el mar ocupa un terreno continental, desplazándose la línea de costa tierra adentro.

Regresión.- Es el proceso geológico opuesto a la transgresión, cuando el nivel del mar desciende relativamente, exponiéndose terrenos antes sumergidos.

Arenisca.- Es una roca sedimentaria de tipo detrítico de color variable con clastos de tamaño de arena con espacios intersticiales entre sus granos.

Lutita.- Es una roca sedimentaria detrítica de textura pelítica es decir integrada por detritos clásticos del tamaño de arcillas y limos.

Caliza.- Es una roca sedimentaria compuesta mayormente por carbonato de calcio. También puede tener trazas de otros minerales como magnesio, arcillas, hematita, siderita.

Barra.- Es una formación de tierra en un cuerpo de agua. Las barras tienden a ser largas y lineales y es muy usual su desarrollo aguas poco profundas como ríos y mares.

Canal.- Es la incisión que produce un río sobre una superficie sobre la cual el agua corre con mayor velocidad y deposita sedimentos clásticos en el punto más bajo del lecho.

Facies.- Es un conjunto de rocas sedimentarias o metamórficas con características determinadas propias sean litológicas o paleontológicas que ayudan a reconocer el ambiente sedimentario en el cual se formaron.

Serie de Fourier.- Es una serie infinita que converge en una función periódica. Constituye una herramienta para analizar funciones periódicas a través de la descomposición de dicha función en una suma infinita de funciones sinusoidales seno y coseno.

Desviación estándar.- Es una medida de dispersión para variables de razón o variables cuantitativas.

Varianza.- Es la suma de las desviaciones estándar elevadas al cuadrado y dividido para el número de observaciones que se tenga. Esta medida nos permite identificar la diferencia promedio que hay entre cada uno de los valores respecto a su punto central o media aritmética.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Mapa de ubicación de la Cuenca Oriente en los Andes Centrales y Septentrionales.....	9
Figura 2.2 Mapa y sección estructural de la Cuenca Oriente con sus tres corredores.....	12
Figura 2.3 Columna tectono-estratigráfica y eventos geodinámicos que controlaron el desarrollo de la Cuenca Oriente y de sus sistemas petrolíferos.....	13
Figura 2.4 Ubicación geográfica del Campo Sacha.....	15
Figura 2.5 Sistema Subandino en donde se distinguen las dos facies sísmicas FSS-1 y FSS2.....	18
Figura 2.6 Registro del pozo Sacha Profundo (pre-Aptense).....	19
Figura 2.7 Estructura Sacha - Shushufindi (facies sísmicas del pre-Aptense).....	23
Figura 2.8 Estructura Sacha - Shushufindi (facies sísmicas del pre-Aptense).....	27
Figura 2.9 Mapa Estructural en Profundidad, Tope “U” Superior.....	31
Figura 2.10 Columna estratigráfica de la Arenisca U Superior y la Arenisca U Inferior.....	34
Figura 2.11 Estuario y Plataforma dominado por mareas, intervalo Napo U.....	36

Figura 2.12 Estuario y Plataforma dominado por mareas, intervalo Napo U.....	37
Figura 2.13 Plataforma dominado por mareas, intervalo Napo U.....	37
Figura 2.14 Esquema ilustrando tres sub-ambientes depositacionales de un Estuario junto a sus columnas estratigráficas.....	38
Figura 2.15 Esquema paleo-geográfico (modificado de White 1995) del Ciclo Sedimentario III.....	42
Figura 2.16 Representación de una inconformidad angular.....	54
Figura 2.17 Representación de una disconformidad angular.....	54
Figura 2.18 Representación de una paraconformidad angular.....	55
Figura 2.19 Representación de una no conformidad angular.....	56
Figura 2.20 Influencia de la acumulación sedimentaria en la fluctuación del nivel de base.....	60
Figura 2.21 Esquema de Transgresión y Regresión.....	69
Figura 2.22 Definición de las secuencias de tipo 1 y tipo 2.....	70
Figura 2.23 Ambientes sedimentarios y sedimentación del cortejo de bajo nivel	73
Figura 2.24 Ambientes sedimentarios y sedimentación en el cortejo sedimentario transgresivo.....	75

Figura 2.25 Ambientes sedimentarios y sedimentación en el cortejo sedimentario transgresivo.....	77
Figura 2.26 Ambientes sedimentarios y sedimentación en el cortejo sedimentario transgresivo.....	80
Figura 2.27 Cortejo de caída del nivel de base (FSST) al momento del paroxismo de la regresión forzada.	82
Figura 2.28 Diagrama de Wheeler mostrando la organización deposicional durante un ciclo completo regresión-transgresión, en un sistema sedimentario sílico-clástico.....	84
Figura 3.1 Modificación de un pico.....	100
Figura 3.2 Modificación de un pico con porcentaje de varianza expresada.....	100
Figura 3.3 Media móvil a 6 y 12 iteraciones.....	101
Figura 3.4 Media móvil a 23 y 50 iteraciones.....	101
Figura 3.5 Serie de Fourier.....	103
Figura 3.6 Complemente de $-\pi$ a 0 de Ciclo Puro	105
Figura 3.7 Complemente de $-\pi$ a 0 de Medio Ciclo Puro Invertido.....	106
Figura 3.8 Ciclo Puro.....	107
Figura 3.9 Medio Ciclo Ficticio Invertido	108
Figura 3.10 Ciclo Puro	109
Figura 3.11 Medio Ciclo Ficticio Invertido	110
Figura 3.12 Ingreso de variables en FORTRAN 95.....	111

Figura 3.13 Elección del método matemático.....	112
Figura 3.14 Gráfico de la Variable ENRG.....	113
Figura 3.15 Gráfico de la Variable WDPT.....	113
Figura 3.16 Secuencias sedimentarias para barras y canales.....	128
Figura 3.17 Diferentes tipos de limolita dependiendo de las facies.....	131
Figura 3.18 Diferentes tipos de arenisca.	132
Figura 3.19 Cuadro de litología de facies usando la variable Profundidad de agua (WDPT).....	133
Figura 3.20 Interpretación de las facies en la arenisca U en el pozo Sacha-123.....	136
Figura 3.21 Interpretación de las facies en la arenisca U en el pozo Sacha-341D.	138
Figura 4.1 Columna tipo señalando los ciclos sedimentarios de la arenisca U en el Campo Sacha	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Mecanismos del cambio del nivel del mar	58
Tabla II. Pozos utilizados para el estudio ubicados al norte del Campo Sacha	86
Tabla III. Profundidad TVD del Tope U superior – Pozo 007.....	114
Tabla IV. Propiedades petrofísicas utilizadas para el reconocimiento de calizas	120
Tabla V. Propiedades petrofísicas utilizadas para el reconocimiento de lutitas	121
Tabla VI. Propiedades petrofísicas utilizadas para el reconocimiento de areniscas.....	123
Tabla VII. Facies sedimentarias descritas en función de la cantidad de energía descrita en los registros de pozo	126
Tabla VIII. Interpretación de facies con valores numéricos de facies de Energía y Profundidad de Agua del pozo Sacha – 123	137
Tabla IX. Interpretación de facies con valores numéricos de facies de Energía y Profundidad de Agua del pozo Sacha – 341D	139

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo consta de cuatro capítulos:

En el capítulo I se describe el problema, la realidad en la que se encuentra el tema a tratarse, se definen los objetivos generales y específicos y se describe la justificación del porqué y para qué se está realizando este trabajo.

El capítulo II contiene el marco teórico general de la Cuenca Oriente, donde se describe su marco geológico regional y local, su evolución geodinámica. Breve reseña histórica del campo Sacha, las características petrofísicas que caracterizan a los reservorios del campo Sacha y en específico el reservorio de la Arenisca U. Los ambientes sedimentarios en el que se depositó la arenisca U. Facies sedimentarias, y Eustatismo, cambios del nivel del mar.

El capítulo III contiene la metodología en que se procesaron los datos o la información para generar las curvas suavizadas de las facies que se observan en los pozos. El uso de los registros eléctricos y descripción de cada uno de ellos. Descripción del método que se usó para la suavización de las curvas de facies.

Descripción de la litología encontrada en los registros de los pozos.

El capítulo IV contiene los resultados final del trabajo como la generación de los mapas de facies correspondiente a cada uno de los eventos sedimentarios menores de la arenisca U del campo Sacha del sector Norte.

También se encuentra la interpretación e información obtenida a través de los mapas y correlaciones de los cortes estructurales trazados en el norte del campo Sacha.

Posteriormente se dejan anotados las recomendaciones, conclusiones, bibliografía y anexos citados en este trabajo.

CAPITULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. Descripción del problema

Uno de los principales objetivos en una empresa petrolera se centra en la búsqueda de arenas de una buena porosidad en sus campos petrolíferos; por lo que se busca seguir y darle un sentido a la continuidad de las arenas o facies que presenten un mayor porcentaje de porosidad y así realizar un modelo geológico adecuado.

Sin embargo se pueden cometer errores al correlacionarse arenas de diferentes eventos o ambientes, y que en los registros de pozos daten con características similares de densidad, porosidad o contenido de arcilla.

El aporte sedimentario varía dependiendo de la ubicación en la cuenca, en un sector se pueden tener zonas con mayor espesor de una litología y por otro lado haya zonas con menor espesor.

Se ha demostrado que existe en la cuenca Oriente una mayor continuidad lateral en los niveles de grano fino y baja energía, que en los niveles de arenas gruesas.

Características petrofísicas como porosidad, saturación de fluidos y presiones de la arenisca U se ha descrito detalladamente por la información litológica obtenida de los pozos del campo Sacha, pero características como discontinuidades de las unidades que conforman este reservorio y los cambios laterales de facies no es una parte tan descrita o estudiada para este campo.

Una secuencia litológica en una columna estratigráfica posee más información que la simple interpretación de facies.

El orden de sucesión de las facies en una columna estratigráfica no es el mismo para todos los pozos.

Estas facies se pueden ordenar de la siguiente manera:

Por orden de profundidad bajo el nivel del mar, por orden de energía de ambiente de sedimentación o por la distancia a la costa.

Luego se reemplaza cada facie por su número de orden en la serie correspondiente a uno de los criterios de clasificación mencionados anteriormente, obteniéndose así una secuencia de valores numérico que representan la variación de las variables representadas por este criterio.

Esta serie numérica puede procesarse para darle una forma más sencilla, de manera que resalte eventos de sedimentación y cuyas curvas procesadas se puedan correlacionar entre pozos aun si no poseen las mismas litologías por sus diferentes ubicaciones en la paleografía.

1.2. Formulación del problema

¿De qué manera influyen los ciclos sedimentarios menores al correlacionarse con las litologías descritas en los registros de los pozos de la arenisca U en el campo Sacha?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo principal

Realizar un modelo estratigráfico de la arenisca U mediante la correlación de secuencias y ciclos sedimentarios menores entre los pozos del campo Sacha.

1.3.2. Objetivos específicos

Obtención de interpretaciones litológicas de los registros eléctricos (GR, Neutrón, Rt y micros).

Suavizar las curvas de las secuencias usando diferentes artificios matemáticos como aproximación de Fourier, media móvil, y demás.

Obtener una mejor correlación de los ciclos sedimentarios menores de la arenisca U.

Correlacionar entre secuencias de diferente litología para realizar mapas de facies por ciclos.

Corregir las facies sedimentarias interpretadas de la litología para mejorar las correlaciones.

Entender la geometría del cuerpo para poder determinar zonas de mejor desarrollo de arenas.

1.4. Justificación

Este trabajo servirá para la reconstrucción de la evolución paleogeográfica de la arenisca U, por medio de la elaboración de mapas de facies, tomando en cuenta variables como: subsidencia, cambios de nivel del mar, línea de costa y aporte detrítico que controlaron su sedimentación.

A través de la correlación de facies por ciclos sedimentarios menores se predecirá y delimitará extensiones laterales del reservorio U en los bordes del campo Sacha y también reestructurar el sistema de mantenimiento de presión por inyección de agua. También servirá para ubicar nuevos pozos de avanzada.

CAPÍTULO 2

2. ANTECEDENTES

2.1. Marco teórico

2.1.1. Marco Geológico Regional

La Cuenca Oriente ecuatoriana representa una de las cuencas Subandinas más complejas y atractivas tanto desde el punto de vista científico como económico. Posee alrededor de 30 mil millones de barriles de petróleo, así como la presencia de afloramientos relativamente buenos en su margen occidental.

Al presente, la Cuenca Oriente está en una posición de cuenca de ante país de transarco de los Andes ecuatorianos. Se ubica en una zona estructuralmente muy compleja, al norte de la charnela entre los Andes Centrales y Andes Septentrionales como se aprecia en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Mapa de ubicación de la Cuenca Oriente en los Andes Centrales y Septentrionales. (Datos SRTM, resolución 90 m).

Fuente: Libro "La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo", 2014

Esta posición hace que esta región esté sometida a cambios de esfuerzos importantes, y por lo tanto, puede ser responsable de la fuerte actividad sísmica y volcánica que la caracteriza. La geodinámica de los Andes Centrales y Septentrionales está directamente ligada a la subducción de la placa oceánica Nazca por debajo del continente sudamericano. Al frente de la costa ecuatoriana, la estructura de la placa de Nazca está caracterizada por la presencia de la Dorsal Asísmica de Carnegie, que se encuentra en proceso de subducción por debajo de los Andes ecuatorianos.

La morfología de la Cuenca Oriente se caracteriza por relieves relativamente importantes en relación con otras cuencas de ante-país andinas. Entre los relieves Subandinos del Levantamiento Napo, al NO, y de la Cordillera del Cutucú, al SO, desemboca el megacono aluvial del Pastaza que se desarrolla actualmente hacia la cuenca Marañón del Perú. Este cono es considerado como uno de los abanicos aluviales continentales más grandes del mundo [6], el cual registra claramente la historia reciente de la Cuenca Oriente.

La Cuenca Oriente se desarrolla como resultado de esfuerzos transpesivos presentes a partir del Cretácico terminal, los que provocan la emersión de la Cordillera Real y la formación de la cuenca de antepaís de transarco propiamente dicha. La deformación y estructuración de sus campos petrolíferos resultan de la inversión tectónica de antiguas fallas normales ligadas a un sistema de grieta de edad triásico y/o jurásico inferior. Estas fallas, actualmente inversas y de fuerte buzamiento, están orientadas principalmente N-S o NNE-SSO, y limitan tres corredores estructurales petrolíferos (Figura 2.2), con características propias como son: el Sistema Subandino (Play occidental), el Corredor Sacha-Shushufindi (Play Central), y el Sistema Capirón - Tiputini (Play Oriental). [2]

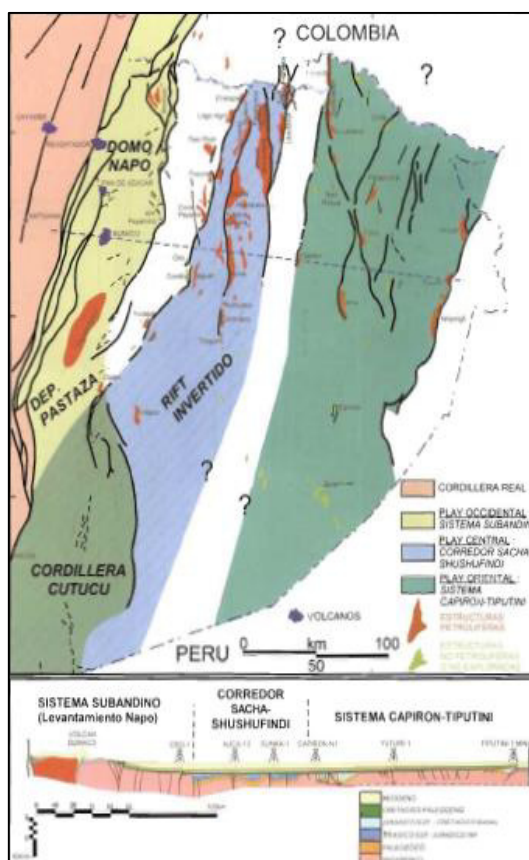


Figura 2.2 Mapa y sección estructural de la Cuenca Oriente con sus tres corredores estructurales-petrolíferos.

Fuente: Libro "La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo", 2004

Asimismo, el análisis detallado de las estructuras petrolíferas y no petrolíferas ha permitido identificar tres etapas de inversión tectónica, presentes a partir del Turoniano, luego de la deposición de la caliza A. Con la inversión tectónica comienza su desarrollo la totalidad de estructuras petrolíferas de la cuenca (Figura 2.3).

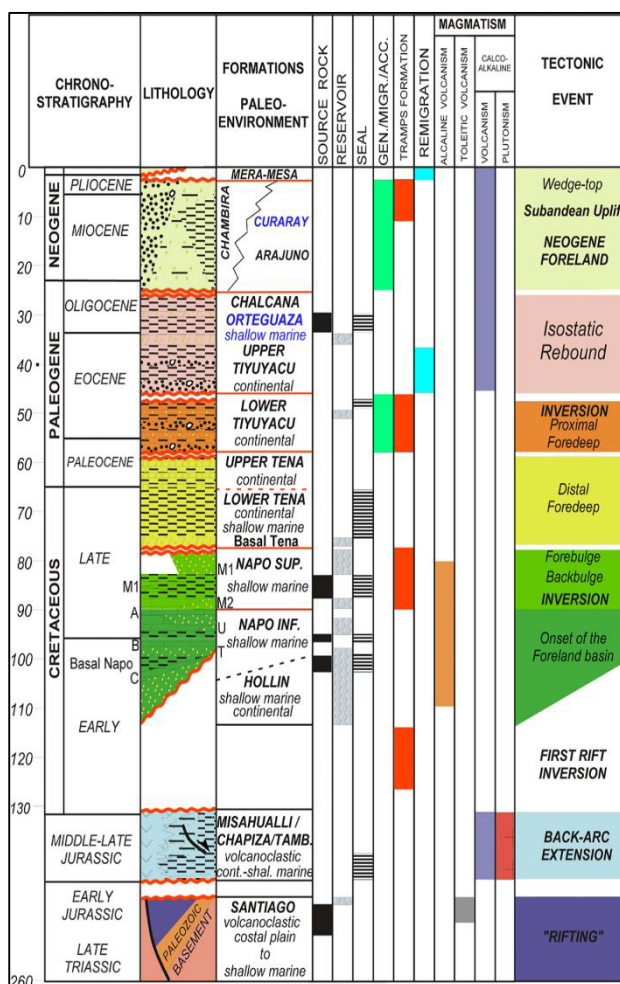


Figura 2.3 Columna tectono-estratigráfica y eventos geodinámicos que controlaron el desarrollo de la Cuenca Oriente y de sus sistemas petrolíferos.

Fuente: Libro "La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo", modificado por Baby 2004 y Barragán 2005

2.1.2. Marco Geológico Local

2.1.2.1. Ubicación Geográfica.

El campo Sacha se ubica en el centro norte de la Cuenca Oriente, al norte de los campos Culebra-Yulebra-Anaconda, al sur del campo Eno-Ron, al este de los campos MDC-Paka Norte y al oeste del Bloque PBHI (Paraíso, Biguno, Huachito e Intracampos).

El campo petrolero de Sacha está ubicado al Nororiente de la Región Amazónica, aproximadamente a 112 millas (180 km), en línea recta desde Quito, en dirección Sur-Este, en coordenadas aproximadas $76^{\circ}46'00''$ W a $76^{\circ}54'00''$ W (Longitud) y $0^{\circ}10'00''$ S a $0^{\circ}26'00''$ S (Latitud).

Se encuentra delimitado al Norte por las estructuras Palo Rojo, Eno, Ron, y Vista; al Sur por los campos Culebra-Yulebra, al Este por los Campos Shushufindi-Aguarico y al Oeste por los campos Pucuna, Paraíso y Huachito (Figura 2.4).



Figura 2.4 Ubicación geográfica del Campo Sacha.

Fuente: Libro "La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo", 2004

Geológicamente el campo Sacha está situado al Oeste del eje axial de la Cuenca Sedimentaria Cretácica Sub- Andina de la región Amazónica del Ecuador, conectada al Sur con la Cuenca Marañón y al Norte con la Cuenca Putumayo, la cual está ubicada al Este del Cinturón Andino; el campo Sacha tiene 31,5 km de longitud, un ancho que varía; al norte 4 km; 8,5 km al centro y 6 km al sur.

Estructuralmente constituye un anticlinal asimétrico fallado al Oeste, se encuentra en el lado levantado de una falla de crecimiento no continua de dirección preferencial Nor-Este a Sur-Oeste, con su eje principal en dirección Nor-Este a Sur-Oeste, cierra contra la pendiente regional de la cuenca. Esta falla geológica posiblemente se reactivó en más de una ocasión y también controló la depositación de los sedimentos, llega máximo hasta la zona de la caliza M-2, con un salto de falla a nivel de la Formación Hollín de mínimo diez pies (10') y máximo treinta y cinco pies (35') al Norte, en el centro del campo diez pies (10') y al Sur entre veinte pies (20') y treinta y cinco pies (35').

Hasta ahora no se sabe con certeza cuál es el rol que desempeña la falla en este campo, ya sea impermeabilizando o facilitando el ingreso de agua.

El campo Sacha tiene un área de 41.000 acres bajo un cierre estructural de 200 pies es decir de bajo relieve, que es característico para los campos del Oriente ecuatoriano.

2.2. Evolución Geodinámica de la Cuenca Oriente

2.2.1. Sistema Subandino

En este dominio se definen dos facies sísmicas: FFS-1 (Facies Sísmica Sub-Andina 1), que representa al basamento granítico y/o metamórfico, y FSS-2 (Facies Sísmica Sub Andina 2), que corresponde a la Formación Misahuallí. Esta última ha sido descrita en afloramientos ubicados a lo largo de este dominio tectónico y por descripciones litológicas de pozos que han atravesado esta formación (Campos Bermejo y Pungarayacu).

Como se observa en la sección sísmica de la siguiente Figura 2.5, no se notan reflectores sísmicos claros que caracterizan esta formación, su presencia debajo de la sección cretácica se confirma por los datos de perforación. Se asume que esta formación descansa directamente sobre el basamento pre-cámbrico, a pesar de no observarse un reflector claro y continuo que indique este posible contacto.

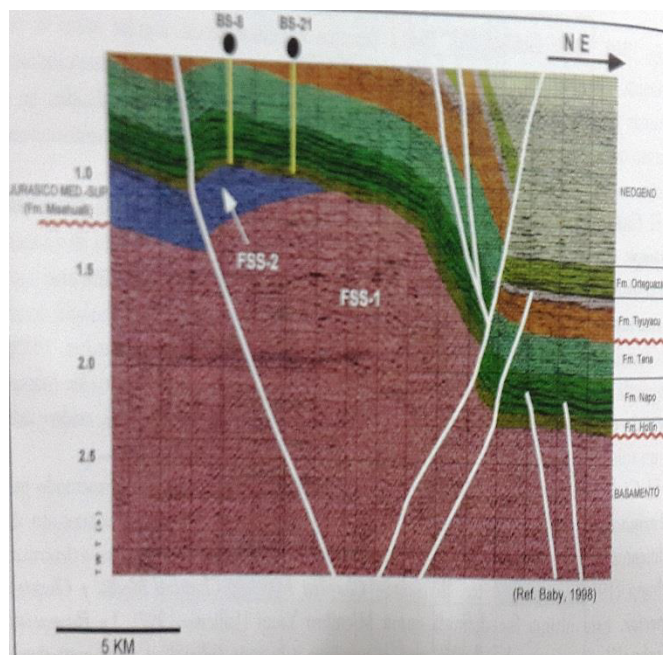


Figura 2.5 Sistema Subandino en donde se distinguen las dos facies sísmicas FSS-1 y FSS2.

Fuente: Libro "La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo", 2014

2.2.2. Corredor Sacha-Shushufindi

Para la calibración de las facies sísmicas en el corredor Sacha-Shushufindi, se usó información litológica de los pozos Sacha Profundo-1 y Shushufindi A-39 (Figura 2.6), los mismos que atravesaron parcialmente las formaciones pre-Aptense, 5.925 pies y 2.710 pies de pre-Aptense respectivamente.

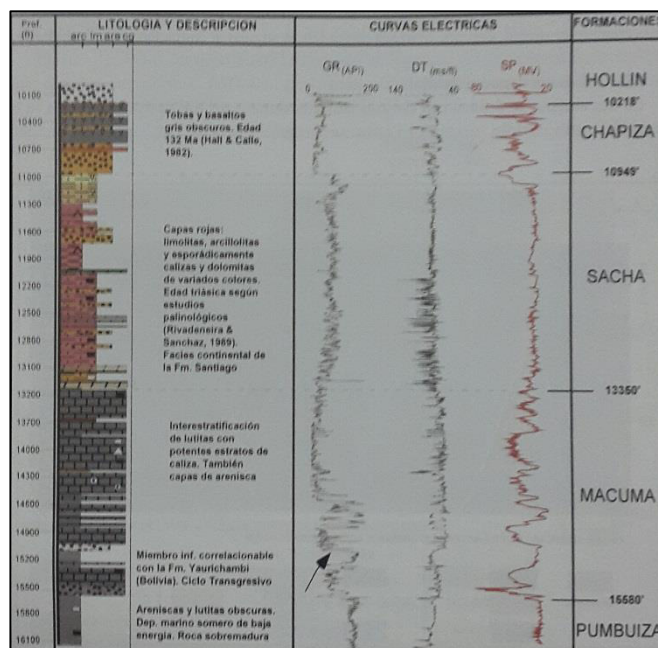


Figura 2.6 Registro del pozo Sacha Profundo (pre-Aptense).

Fuente: Libro "La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo", 2014

El análisis de la sección sísmica de la figura 7 permitió dividir al pre-Aptense en seis facies sísmicas (FSC) diferenciales por el marcado contraste de las reflexiones y por la presencia de fuertes reflectores que las separan (discontinuidades regionales).

FSC-1 (Facies Sísmica Central-1: pre Cámbrico) constituye el basamento cristalino y metamórfico relacionado al escudo Guayanes. En la sección

analizada (Figura 2.7), y al igual que en otras, muestra una respuesta difusa y caótica.

FSC-2 (Facies Sísmica Central-2): presenta dificultades en la equivalencia, pudiendo corresponder a la parte inferior de la Formación Pumbuiza, pero es más probable que se trate de una formación más antigua (de edad anterior al Silúrico Tardío). La respuesta sísmica es muy clara, con reflectores muy continuos lateralmente.

FSC-3 (Facies Sísmica Central-3): corresponde a la Formación Pumbuiza (Silúrico-Devónico) propiamente dicha, presentando un contacto bien marcado con la Formación Macuma (Carbonífero-Pérmico), observado en varias secciones sísmicas del corredor. Este contacto representa una superficie de erosión regional que separa a estas dos formaciones, la misma que produce cambios laterales muy fuertes de espesor.

FSC-4 (Facies Sísmica Central-4): se caracteriza por tener reflectores sísmicos muy claros y continuos, de buena continuidad lateral y configuración paralela, que

corresponden a la Fm. Macuma. Estos reflectores son característicos de secuencias carbonatadas y pueden ser considerados como buenos horizontes sísmicos marcadores.

FSC-5 (Facies Sísmica Central-5): representa la Formación Sacha definida por Rivadeneira & Sánchez (1989) en el pozo Sacha Profundo (Figura 2.6), sobre la base de resultados de los estudios palinológicos que dan una edad Triásica a las capas rojas localizadas inmediatamente sobre los sedimentos de la Formación Macuma. Esta formación podría constituir un equivalente lateral continental de la Formación Santiago, definida más al sur en la Cordillera de Cutucu (Tschopp, 1953). Esta conservada en grabens o semi-grabens. Los reflectores de esta formación son difusos. Su reflector basal, que marca el contacto con la FSC-4, es claro pero no tiene muy buena continuidad lateral. Este contacto corresponde posiblemente a una superficie de erosión de carácter regional. Aunque no se ha comprobado la presencia de la Formación Santiago en los pozos perforados hasta la actualidad en la Cuenca

Oriente, por sus características litológicas ya descritas en los afloramientos de la Cordillera de Cutucu, esta debe presentar reflexiones sísmicas fuertes y con gran continuidad lateral, formando una subfacies con características de reflexión bastante parecidas a las facies sísmicas que representan la Formación Macuma (Rivadeneira & Sánchez, 1989).

FSC-6 (Facies Sísmica Central-6): representa a la Formación Chapiza integrada por depósitos volcano-sedimentarios (equivalente de la Formación Misahuallí del Sistema Subandino), con basaltos en su parte superior datados en 132 Ma. En el pozo Sacha Profundo (Hall & Calle, 1982; cf. Figura 2.6). Esta, en la sección analizada (Figura 2.7), presenta reflectores sísmicos más claros que en la FSC-5, y parece sellar el anticlinal “Sacha Profundo” que afecta las formaciones sedimentarias subyacentes. La sección sísmica muestra que este anticlinal resulta de una primera inversión tectónica de la falla normal del borde oeste del graben Sacha-Shushufindi. Hacia el techo FSC 5-6, se presenta un truncamiento erosional con una marcada discordancia angular con la Fm. Hollín.

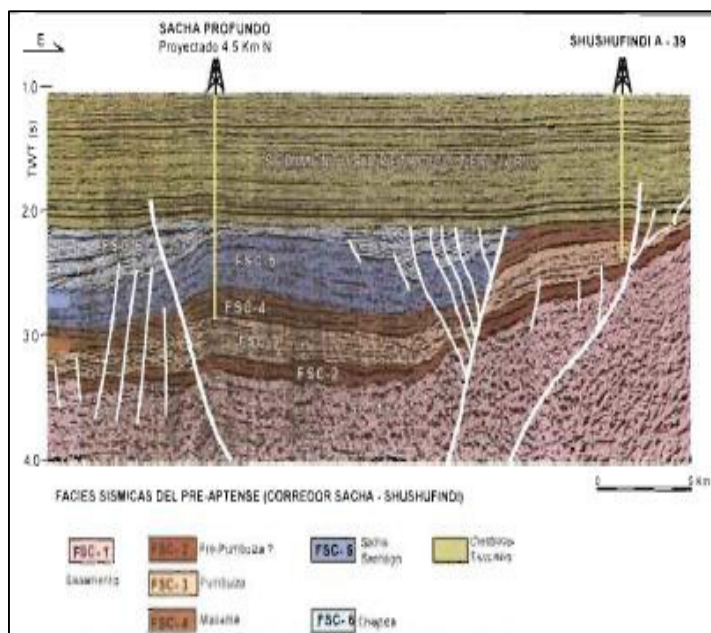


Figura 2.7 Estructura Sacha - Shushufindi (facies sísmicas del pre-Aptense).

Fuente: Libro "La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo", 2004

2.2.3. Sistema Capiron-Tiputini

En este sistema, se definen con claridad las facies sísmicas pre-Aptense presentes en el "trend" ITT, pero también presentes en estructuras como Panacocha. Por la poca información obtenida de los pozos presentes en estas estructuras, no se ha podido correlacionar de manera precisa estas facies sísmicas con las formaciones pre-Aptense ya descritas.

En la sección sísmica de la figura 2.8, se distinguen varias facies sísmicas, las cuales se ha tratado de correlacionar con las unidades anteriormente definidas en el Corredor Sacha-Shushufindi, tomando como referencia el tipo de reflexión sísmica que presentan.

FSO-1 (Facies Sísmica Oriental-1), al igual que FSC-1 en el Corredor Sacha-Shushufindi, corresponde al basamento cristalino y metamórfico.

FSO-2 (Facies Sísmica Oriental-2), no difiere mucho de lo observado en el Corredor Sacha-Shushufindi. En secciones sísmicas analizadas, FSO-2 presenta reflectores muy claros y continuos, paralelos entre si y concordantes al basamento. Por la claridad y el contraste de estos, podría tratarse de Formación Macuma.

FSO-3 (Facies Sísmica Oriental-3), en este sistema aún es muy incierta, de acuerdo a las consideraciones tectono-sedimentarias que se mencionan más adelante. Parece corresponder a sedimentos depositados después de un periodo de erosión, como

lo muestra la sección sísmica de Tambococha. Se nota una fuerte incisión en los depósitos representados por FSO-2 (paleovalle en la Formación Macuma), sellada por sedimentos del FSO-3 que podrían pertenecer ya al relleno del semi-graben de Tambococha.

Encima de FSO-3, los depósitos del relleno del semi-graben muestran varias facies sísmicas que cambian lateralmente.

FSO-4.1 (Facies Sísmica Oriental-4.1) en la parte occidental del semigraben, está separada de FSO-3 por dos claros y continuos reflectores paralelos entre sí.

Hacia el tope, muestra truncamientos por debajo de la superficie erosional de la base del Cretácico. Hacia el Este, contra la falla del semi-graben, FSO-4.2 (Facies Sísmica Oriental-4.2) está representada por una respuesta sísmica muy caótica que corresponde probablemente a un facies proximal de escarpe de falla (brechas y conglomerados), ya descrito en los núcleos de los pozos Tiputini M-1 y Ishpingo-1.

FSO-4.3 (Facies Sísmica Oriental-4.3), tanto en secciones sísmicas como en su litología, está representada por reflectores claros y continuos que corresponden a los depósitos marinos carbonáticos de aguas someras, evidenciados en el pozo Tambococha-1 y datado del Jurásico Medio-Valanginiano (Labogeo, 1996).

FSO-4.1, FSO-4.2, y FSO-4.3 representan una gran parte del relleno sedimentario del semi-graben de Tambococha, que muestra un medio de depositación marino de aguas someras nunca descrito más al Oeste. Razón por la cual, denominaremos a este relleno sedimentario Formación Tambococha. Esta podría estar presente en todo el “trend” ITT. Por edad es el equivalente lateral de los sedimentos continentales de la Formación Chapiza.

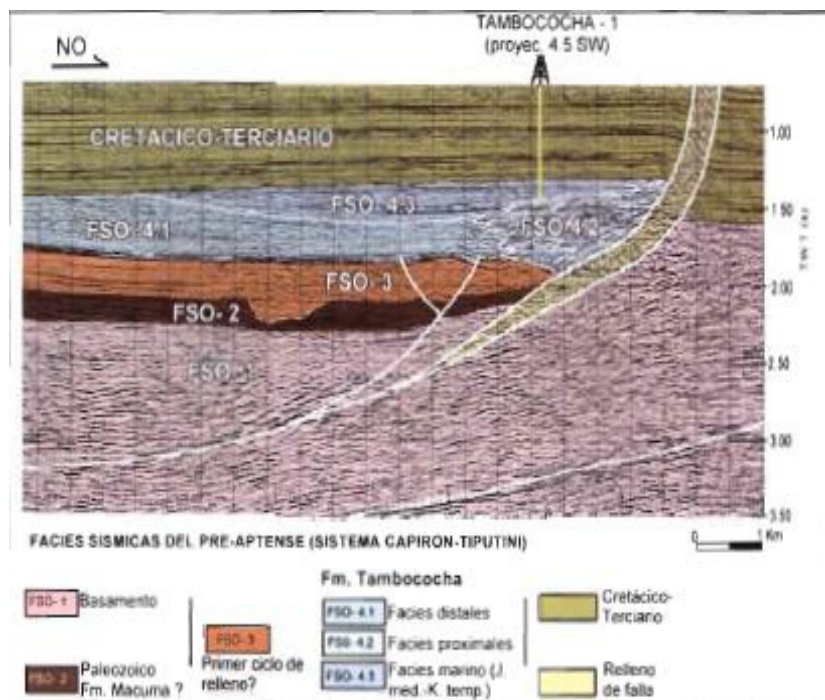


Figura 2.8 Estructura Sacha - Shushufindi (facies sísmicas del pre-Aptense).

Fuente: Libro "La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo", 2004

2.3. Campo sachá

2.3.1. Breve reseña histórica

La estructura del campo Sacha fue probada en el pozo exploratorio Sacha 1, el cual se perforó con una torre helitransportable a partir del 21 de enero de 1969 por la compañía Texaco - Gulf. Este alcanzó los 10 160' de profundidad y produjo 1.328 bppd de 30° API, provenientes del yacimiento Hollín.

El campo fue puesto en producción el 6 de julio de 1972, a una tasa promedio diaria para ese mes de 29.269 bppd, incrementándose hasta un promedio de 117.591 bppd en noviembre de ese mismo año, que es la producción máxima registrada en la vida del campo [4].

Las reservas de petróleo probadas en Sacha se encuentran localizadas en cuatro yacimientos principales: Hollín, T inferior, U inferior y Basal Tena. El volumen total de petróleo originalmente en sitio (POES) de todo el campo es de 3.501 MMBN de petróleo, siendo las reservas probadas de 1.205 MMBN, lo que presenta un factor de recobro del 34,4% del POES. El 54,9 % de estas reservas se encuentra localizado en la formación Hollín, el 24,3 % en la arena U inferior, el 19,5 % en la arena T inferior y el 1,3 % en la formación Basal Tena.

Operaciones Rio Napo CEM ha llevado a cabo una campaña de perforación intensiva, incluyendo la perforación de pozos de avanzada, mediante la cual se ha extendido los límites de los yacimientos,

ocasionando el incremento de oportunidades de nuevas reservas. Un estudio en progreso de actualización de los Modelos Estáticos y Dinámicos de los yacimientos del campo ha señalado un incremento del 67% del POES, creando expectativas de incremento de reservas por encima de los 200 MMBIs de petróleo.

2.3.2. Evolución de la Estructura Sacha

Sacha se localiza en el flanco occidental del corredor Sacha-Shushufindi. Es un anticlinal de dirección NNE-SSO cortado en su flanco oeste por una falla inversa con un ligero buzamiento al este. Tiene un ancho de 4 km al norte y alrededor de 7 km al centro y sur, y una longitud aproximada de 33 km. Presenta un cierre vertical máximo de alrededor de 240 pies (240') a la base caliza A y un área de 51.166 acres referida al tope Hollín Superior.

Bajo la estructura Sacha de edad cretácica se desarrolló el anticlinal "Sacha Profundo", de posible edad Jurásico inferior-tardío a medio, que plegó los depósitos Paleozoicos y Triásico-Jurásicos de la

Formación Sacha (Santiago), el mismo que fue probado con el pozo Sacha Profundo sin resultados positivos.

La estructura Sacha, al igual que Shushufindi, se formó en la primera etapa de inversión tectónica o sea entre el Turoniano Tardío y el Maastrichtiano.

La falla principal es segmentada por lo menos en tres secciones definidas por fallas laterales transpresivas dextrales de dirección NEE-SWW. El fallamiento inverso principal de dirección NNE-SSO no se presenta como una sola falla continua, hay ciertos lugares que se observan solo flexuras en lugar de las fallas.

La falla que segmenta el campo tiene direcciones preferenciales NNE-SSW, se origina en el basamento, la cual posiblemente fue reactivada en más de una ocasión durante la depositación de los sedimentos, estos segmentos de falla llegan hasta la caliza M2.

Se observan saltos de falla de 10 a 60 pies al Norte, a nivel de la Formación Hollín, 150 pies en el centro-sur del campo. Figura 2.9.

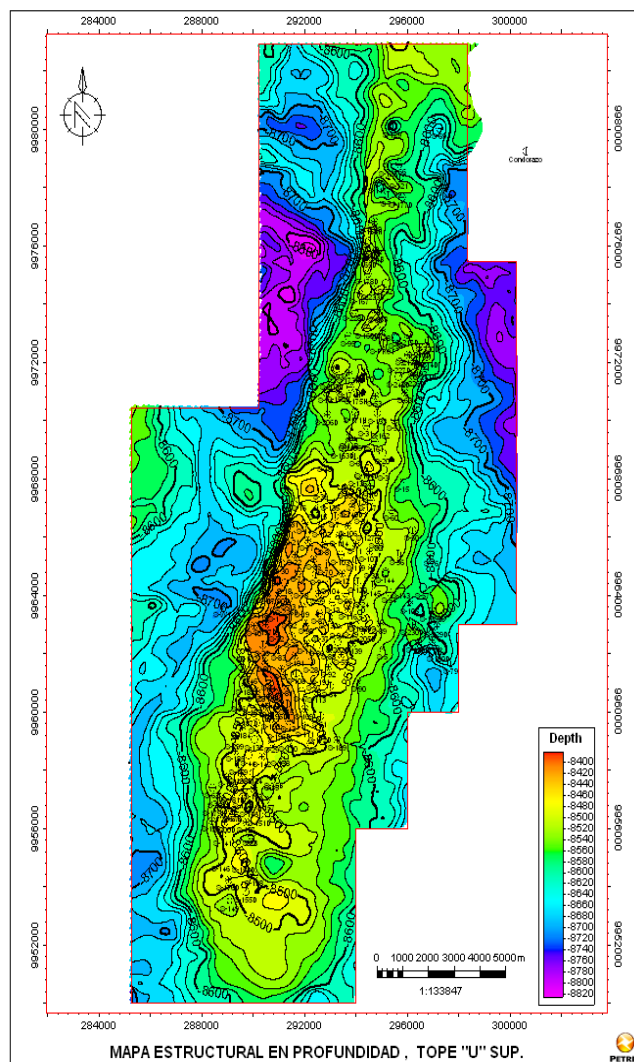


Figura 2.9 Mapa Estructural en Profundidad, Tope "U" Superior.

Fuente: Cortesía de Río Napo CEM, 2014

2.3.3. Características litológicas de la Arenisca U

Arenisca cuarzosa, con feldespatos y fragmentos líticos en menor proporción. Entre los minerales accesorios están circón, moscovita y glauconita. La matriz predominante es caolinítica y cemento silíceo. La porosidad en su mayoría es intergranular con un porcentaje promedio del 17% y ocasionalmente es intragranular con disolución.

La Arenisca U Inferior es de mayor desarrollo, se encuentra más limpia y continua a lo largo del campo mientras que la Arenisca U Superior no presenta tal continuidad. La Arenisca U Superior tiene intercalaciones de lutitas, calizas y limolitas arcillosas y no es tan desarrollada como la Arenisca U Inferior. El espesor total de la Arenisca U varía de 22 a 86 pies a través del campo. Estas áreas tienen las acumulaciones más gruesas de barras y canales de arena de marea.

La Arenisca "U" Superior.- está constituida por una arenisca cuarzosa, blanca, translúcida, transparente, grano fino a muy fino, ocasionalmente grano fino a medio, matriz calcárea, cemento silicio e inclusiones de glauconita y pirita.

La Arenisca "U" Inferior.- está constituida por una arenisca cuarzosa, marrón, café clara, friable, grano fino a muy fino, ocasionalmente grano medio, selección regular, cemento silicio, buena saturación de hidrocarburos, fluorescencia amarillo-blanquecino, corte lento, residuo café claro.

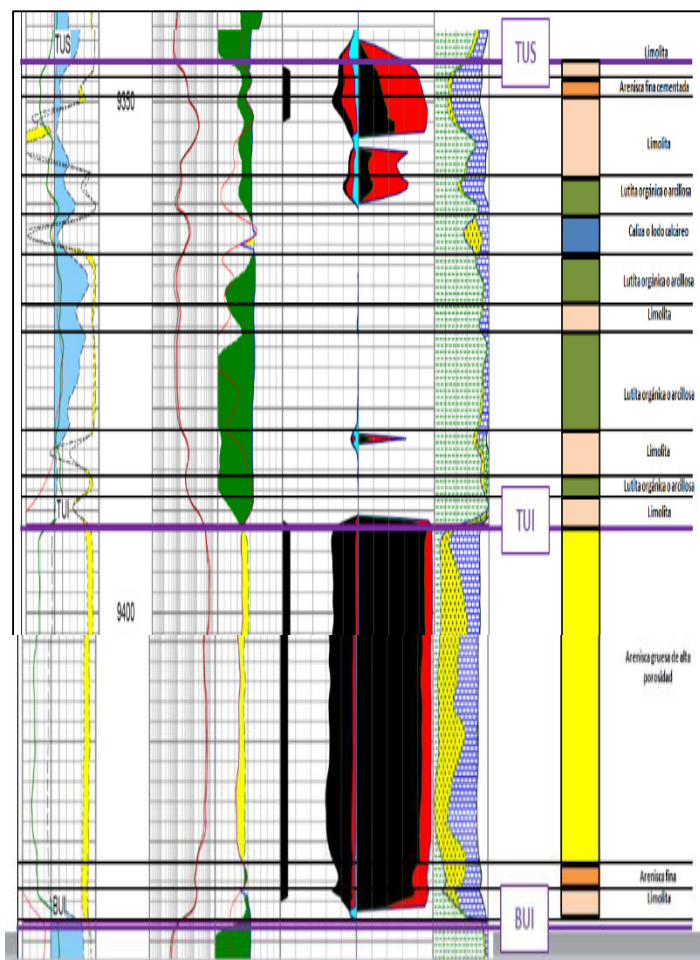


Figura 2.10 Columna estratigráfica de la Arenisca U Superior y la Arenisca U Inferior.

Fuente: Cortesía Río Napo CEM, 2014

2.3.4. Ambiente sedimentario de la Arenisca U

Tanto para Hollín superior como para las areniscas T y U se ha definido un ambiente estuarino dominado por mareas (Shanmugan, 1998).

Los yacimientos de la Arenisca U son trampas estratigráficas de ambiente estuarino dominado por mareas con un control tectónico de la sedimentación, los cuerpos de arena coinciden con los mayores espesores totales del intervalo entre las calizas A y B, lo que permite hasta cierto punto predecir la distribución del espesor de arena a partir de la diferencia entre los mapas de esos marcadores obtenidos a partir de datos sísmicos.

El estuario dominado por la marea en el área del campo Sacha estuvo más activo durante la depositación de la Arenisca U. Después de una caída en el nivel del mar, el estuario pasó gradualmente sobre la plataforma en esta área como depósito de estuario y plataforma como se indicó por las interpretaciones de núcleo, estas secuencias de arena y lutita representan una amalgama de varios depósitos apilados. Las arenas son más gruesas en la parte central del campo lo que indica la proximidad de la fuente del sedimento.

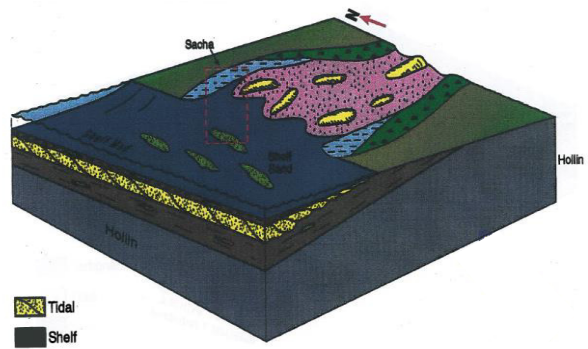


Figura 2.12 Estuario dominado por mareas intervalo Napo U.

Fuente: Cortesía Río Napo CEM, 2014

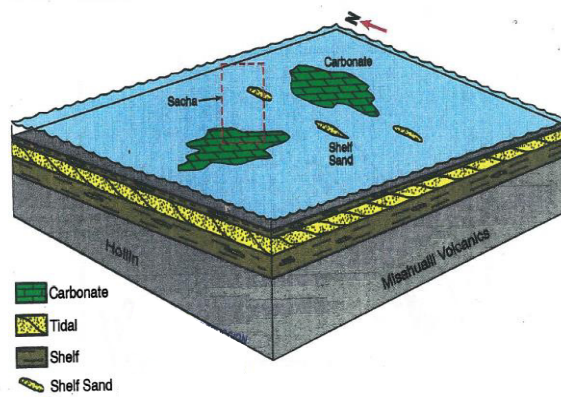


Figura 2.13 Plataforma dominado por mareas, intervalo Napo U.

Fuente: Cortesía Río Napo CEM, 2014

2.3.5. Estuarios

Se piensa generalmente que un estuario es un valle de río ahogado o un cuerpo de agua con una salinidad menor a la del mar.

Pero de las definiciones más usadas se tiene “un estuario es un cuerpo de agua costero semi-encerrado el cual tiene acceso libre al océano y dentro del cual el agua salada del mar se mezcla con el agua fresca de los ríos del continente” (Pritchard, 1967).

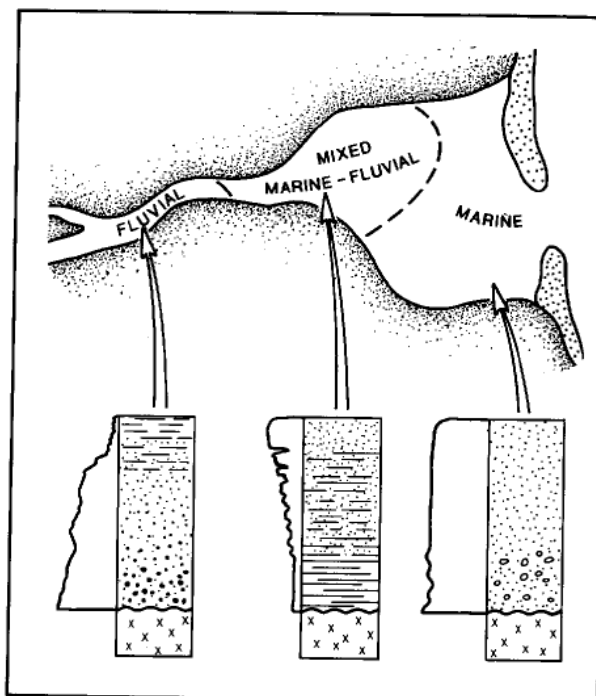


Figura 2.14 Esquema ilustrando tres sub-ambientes depositacionales de un Estuario junto a sus columnas estratigráficas. [7]

2.3.5.1. Tipos de estuarios

(Chang, 2009), ha considerado el desarrollo morfológico como parte de una secuencia evolutiva, que es determinada por la influencia de la intensidad del río, el oleaje y las mareas.

Estuarios dominados por oleaje: las olas tienen un efecto importante en la desembocadura, donde el sedimento erosionado de la línea de costa es transportado a lo largo de la playa formando una barra. Esto estrecha la desembocadura, y se formará hasta que las corrientes de marea, que aumentan gradualmente con la disminución de la sección transversal, lleguen a un equilibrio de modo que la erosión del sedimento de la punta de la barra sea tan rápida como lo es en su depósito debido a la deriva litoral.

Estuarios dominados por marea: Se forman como resultado de corrientes de marea importantes respecto al efecto del oleaje. La boca generalmente tiene bancos de arena que son alineados con el flujo de la corriente y alrededor de los cuales circula el

sedimento. En la cabeza del estuario la influencia de la marea disminuye y el flujo de río se vuelve dominante. Estos estuarios suelen ocurrir en zonas de condiciones macromareales e hipersíncronas.

Características físicas de un estuario dominado por mareas.

Se distingue por la alta energía de las mareas comparada a la energía de las olas.

Cerca de la desembocadura la energía total es alta debido a las mareas mientras la energía de las olas es moderada.

Dentro del estuario la energía de las olas es reducida sobre los bancos de arena producidos por la marea.

La energía total se incrementa al máximo donde la diferencia entre los efectos de constricción producida por la entrada en forma de túnel y los efectos de disipación de los sedimentos en suspensión es mayor.

Más cerca al continente la energía total cae al mínimo debido a la fricción generada por los sedimentos en suspensión alejados de la influencia de la marea.

A energía total se eleva nuevamente en la zona influenciada por las corrientes del río. Mezclada, mientras que cerca de la boca, donde las corrientes de marea pueden ser lo suficientemente fuertes, se pueden presentar condiciones de estuario bien mezclado.

2.3.6. Estratigrafía secuencial del Cretácico de la Arenisca U.

2.3.6.1. Ciclo sedimentario III (Cenomaniano medio – Turoniano inferior)

Se genera nuevamente una caída del nivel del mar donde se erosiona el tope de las calizas y lutitas U. Posterior a esto se deposita la Arenisca U principal de manera similar a la Arenisca T. Esta representa un rellenos de valles incisos depositados durante el inicio de la subida del nivel del mar (LTS). Estos valles incisos erosionados comienzan a transformarse en

estuarios dominados por mareas los cuales son rellenados en retrogradación. Posterior a esto se comienza a depositar la Arenisca U Superior como continuación de este evento transgresivo (TST) compuesta generalmente de arenisca glauconíticas a calcáreas y lutitas de ambiente marino somero. Finalmente se deposita la caliza A al tope de este evento transgresivo.

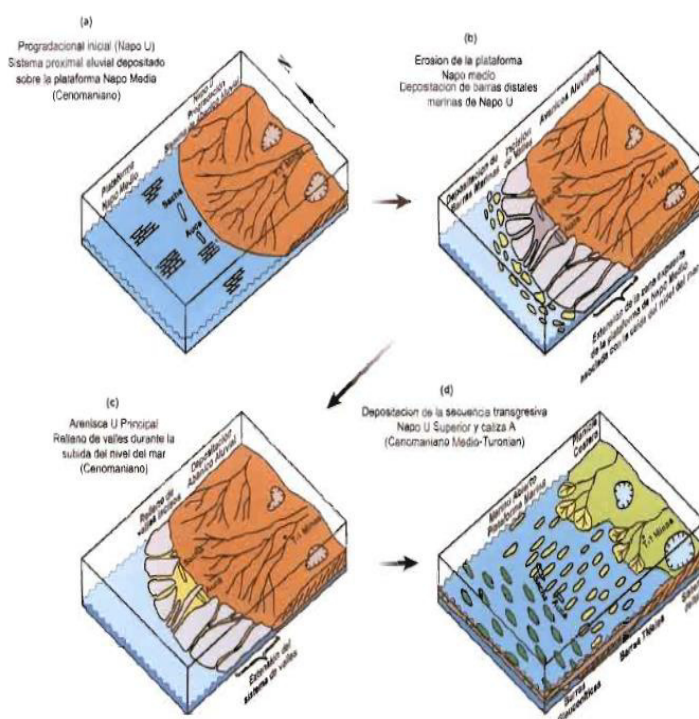


Figura 2.15 Esquema paleo-geográfico (modificado de White 1995) del Ciclo Sedimentario III. [2]

2.4. Modelo de facies

2.4.1. Facies

El término facies tiene diferentes argumentos y se ha usado de diferentes formas desde 1838.

Aquí algunas definiciones para el término Facies.

“El aspecto, apariencia, y características de una unidad de roca, usualmente reflejan las condiciones de su origen; como por ejemplo la diferenciación de una unidad de unidades adyacentes o asociadas” (Bates & Jackson, 1987).

“Facies es una particular combinación de litología, atributos estructurales y texturales que definen características diferentes de otros cuerpos de rocas” (Walker, 1992).

Las facies están controladas por procesos sedimentarios que operan en áreas particulares de los ambientes deposicionales. Además, la observación de las facies nos ayuda con la interpretación de procesos sin-deposicionales.

2.4.2. Análisis de facies

El estudio de las facies es un método sedimentológico fundamental de los cuerpos caracterizados por rocas con atributos relativos físico, biológico y litología única para todos los depósitos adyacentes. Este método es comúnmente aplicado para describir los sedimentos y/ o rocas sedimentarias observadas en núcleos, o ambientes modernos. El estudio de facies es un importante parámetro para cualquier estudio de secuencia estratigráfica, el cual proporciona pistas sustanciales para las reconstrucciones paleogeográficas y paleoambientales, así como también para la definición de superficies de secuencias estratigráficas.

El estudio de facies es una parte integral de la sedimentología y la secuencia estratigráfica, lo que explicaría su parcial aporte entre estas disciplinas. En el contexto de secuencia estratigráfica, el estudio de las facies es muy relevante para el estudio de los cambios cíclicos en los procesos que forman sistemas deposicionales individuales en respuesta a cambios de nivel base.

2.4.3. Sucesión de facies

En una sucesión ya está implicado que ciertas propiedades de facies cambian progresivamente en una determinada dirección sea ésta vertical o lateral. Características como la proporción de arena, la cantidad de bioturbación o el tamaño del grano pueden estar incluidos en estas propiedades de facies. La relación entre sistemas depositacionales en el espacio y las sucesiones estratigráficas resultantes a través del tiempo fueron mencionadas por (Middleton, 1973).

De acuerdo a estas leyes, en una sucesión vertical, una transición gradacional de una facie a otra, indicaría que las dos facies representan ambientes que estuvieron alguna vez adyacentes lateralmente. Si por otro lado, los contactos entre facies o asociaciones de facies son irregulares o erosionales, no hay forma de saber si dos facies adyacentemente verticales representan ambientes que estuvieron alguna vez lateralmente adyacentes; aunque sí podrían representar cambios significativos en el

ambiente de sedimentación y en el comienzo de nuevos ciclos sedimentarios.

Con el tiempo se ha vuelto aparente que ciertas sucesiones de facies ocurren repetidamente en un registro geológico (como un registro de pozo), en todas las edades y en muchas configuraciones geológicas diferentes. Si estas sucesiones son combinadas con sucesiones observadas en ciertos modernos sistemas depositacionales, se puede concluir sobre los sistemas que las formaron. Así como sucesiones verticales son correlacionadas lateralmente, se pueden realizar modelos tridimensionales del sistema de depositación, es decir, un modelo de facies.

2.4.4. Modelo de facies

Un modelo de facies presume predicativamente en la morfología y evolución de un ambiente deposicional, infiriendo perfiles verticales “standard” y cambios de facies laterales. Dada la variabilidad natural de procesos alocíclicos y auto cíclicos, una aplicación

dogmática de esta idealización introduce un potencial error en la interpretación.

2.4.5. Principales usos de un modelo de facies

- Funcionar como una norma para comparación de propósitos.
- Mediante una norma o modelo norma se puede decir si un ejemplo hipotético presenta características inusuales. Si el ejemplo difiere con la norma, es posible identificar como lo hace exactamente y realizar preguntas del por qué se presentan diferentes espesores o aparecimientos de flujos detríticos en vez de solo flujos turbidíticos.
- Funcionar como una guía para futuras observaciones.
- Si el modelo es el resumen de todas las características importantes del sistema, se entiende que una información similar puede encontrarse en un ejemplo a describirse.
- Funcionar como un predictor.

- Se podrían realizar predicciones, por ejemplo en un abanico aluvial submarino de una línea sísmica o de un afloramiento, se conocería si este abanico pertenecerá a un ambiente marino profundo en vez de un ambiente deltaico.
- Funcionar como una base para la interpretación ambiental.

2.4.6. Alostratigrafía

La Aloestratigrafía es una disciplina estratigráfica que estudia la relación entre la litoestratigrafía y la secuencia estratigráfica.

La Comisión Norte Americana en Nomenclatura Estratigráfica (NACSN) introdujo unidades aloestratigráficas en el Código Estratigráfico Norteamericano (1983) para nombrar unidades discontinuas-limitantes. Así una unidad aloestratigráfica es un cuerpo de roca que sirve de mapa, definida e identificada en la base de sus discontinuidades limitantes.

Las unidades aloestratigráficas, en orden de rango decreciente, son allogroup, alloformation, y allomember. La unidad fundamental es la alloformation (NACSN, 1983, Art. 58). Las discontinuidades limitantes que definen a la aloestratigrafía enfocada están representadas por cualquier mapeo de contacto litológico, con o sin un hiato estratigráfico asociado con éste. En este contexto, todas las superficies litoestratigráficas y secuencias estratigráficas que están asociadas con un contraste litológico pueden ser usadas por estudios aloestratigráficos.

La aloestratigrafía proporciona los significados para tomar la litoestratigrafía a un nivel más alto de interpretación genética de historias paleodepositacionales, porque del uso de superficies significante-tiempo, su trampa (pitfall) descansa con la vague definición 'discontinuidades'. La NACSN deliberadamente dejó la definición de 'discontinuidad' a los geólogos practicantes que desean definir así o usar unidades aloestratigraficas, así el actual significado de dichas unidades es largamente erróneo.

Porque la (litológica) 'discontinuidad' es un término mucho menos específico, incluyendo inconformidades y conformidades, 'unidades inconformidad-limitadas' recaerían en un caso especial de unidades alostratigráficas.

Estas discontinuidades limitantes incluyen: discordancias, superficies tipo "ravinement" y superficies de inundación.

Una secuencia estratigráfica representa una manera muy valiosa de interpretar unidades alostratigráficas en el contexto de cambios cíclicos de acomodación y acumulación.

La superficie de Ravinement.

Es una superficie de abrasión por las olas, situada en la parte superior del frente de playa y que se elabora durante la transgresión de la línea de costa. Esta erosión puede sustraer hasta 10 o 20 metros de substrato dependiendo del régimen de las olas (Marocco, 2008).

La superficie de ravinement, durante el movimiento de retrogradación de las facies, es recubierta por los depósitos transgresivos del frente de playa o shoreface: es lo que se llama el onlap costero.

2.4.7. Discontinuidades

Debido a que la información del subsuelo puede ser usada para encontrar continuidades o cambios laterales de facies, es necesario poder reconocer las siguientes discontinuidades: superficies de máxima inundación (MFS), superficies de transgresión marina o superficies regresivas de erosión.

Estas discontinuidades pueden ser erosionales y no erosionales.

Las discontinuidades erosionales incluyen disconformidades angulares y finas superficies que pueden tener un relieve totalmente erosionado de unas pocas decenas de metros pero extenderse en un área mayor a 25.000 km². Estos relieves erosionales pueden ser vistos en registros de pozos mediante cuidadosas correlaciones.

Las discontinuidades no erosiónales comúnmente ocurren en el tope de sucesiones de facies carbonatadas y arenosas grano crecientes de clastos terrígenos. Esta discontinuidad se da por cambios en las condiciones depositacionales y puede estar relacionado a eventos de subsidencia, aporte sedimentario y cambios eustáticos del nivel del mar.

Secciones condensadas

Estos intervalos estratigráficos representan periodos de tasas de sedimentación muy bajas en un ambiente depositacional marino como resultado de una gran transgresión y comúnmente identifican superficies de máxima inundación.

Las secciones condensadas en rocas clásticas son formadas por el resultado de la interrupción del aporte clástico. En sucesiones de carbonatos, los ambientes de los cuales provenían los sedimentos ya están inundados. En el caso de secciones condensadas de lutitas, estas pueden presentarse con alto contenido de materia orgánica o pizarras con depósitos pelágicos.

Muchas de estas secciones condensadas son sobrepuestas por superficies depositacionales conocidas como clinofomas; las cuales pueden ser reconocidas en secciones sísmicas, secciones de registros de pozos y en grandes afloramientos. Las clinofomas se desarrollan al aumentar la profundidad de la transgresión seguido por el restablecimiento de la progradación lateral de las capas sedimentarias.

2.4.8. Contactos estratigráficos

Inconformidad: hiato sedimentario significativo \pm erosión.

Se presenta una ruptura o hiato importante en el registro geológico. Normalmente implica que hubo un levantamiento y una erosión de los estratos previamente formados. Es una relación entre estratos rocosos en contacto, que se caracterizan por la falta de continuidad en la sedimentación. Corresponden a un periodo de no depositación o de erosión.

Inconformidad angular: hiato sedimentario, erosión e inclinación.

Una inconformidad entre dos grupos de rocas la que los estratos no son paralelos o en el cual, los estratos inferiores tiene una inclinación diferente a los estratos superiores.

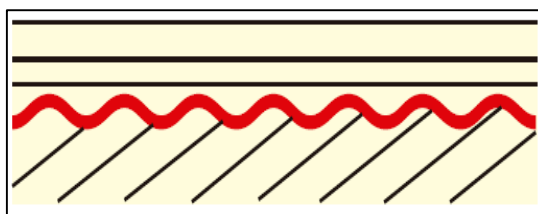


Figura 2.16 Representación de una inconformidad angular. [1]

Disconformidad: hiato sedimentario + erosión.

Es una inconformidad donde los estratos arriba y debajo de estas son prácticamente paralelos lo que indica un intervalo de erosión usualmente marcado por una superficie de un relieve irregular.

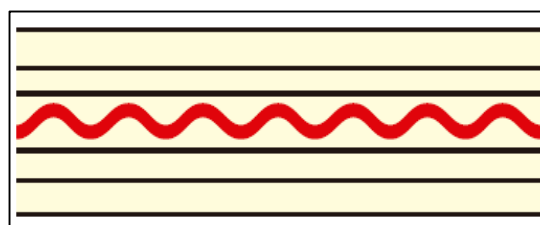


Figura 2.17 Representación de una disconformidad angular. [1]

Paraconformidad: hiato sedimentario \pm erosión (no identificable).

Es una inconformidad un poco incierta en la que la superficie de erosión es difícil de identificar y donde los estratos superior e inferior son paralelos.

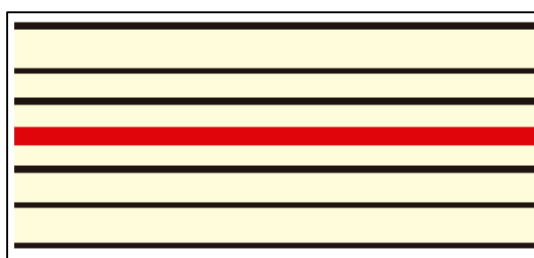


Figura 2.18 Representación de una paraconformidad angular. [1]

No conformidad: tope de rocas de basamento.

Una inconformidad desarrollada entre rocas sedimentarias y rocas ígneas o metamórficas más antiguas las cuales han sido expuestas a la erosión antes de que los sedimentos más jóvenes las cubrieran.

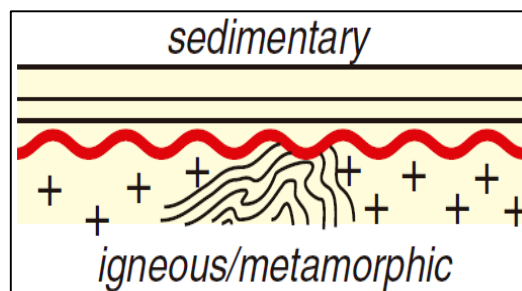


Figura 2.19 Representación de una no conformidad angular.” [1]

Diastema: pequeño hiato depositacional \pm erosión.

Una relativamente corta interrupción en la sedimentación. Es el equivalente a una paraconformidad a pequeña escala.

Conformidad: sin hiato sedimentario.

Es una relación sin perturbar de estratos sedimentarios adyacentes que han sido depositados ordenadamente en una secuencia.

2.5. Eustatismo, cambios relativos del nivel del mar y profundidad del agua.

Eustatismo se refiere a cambios en todo el mundo en el nivel del mar absoluto, medidos usando un sistema de referencia independiente del sistema deposicional. [Best practices in

sequence stratigraphy for explorationists and reservoir engineers].

Cambios en el volumen de agua en el océano provocados por el hielo terrestre y en menor proporción por el agua que se encuentra en los acuíferos.

Cambios producidos en las cuencas oceánicas, esto es producido por el incremento o disminución de volumen debido a los fondos oceánicos en expansión (dorsales centro-oceánicas).

Los controles locales de la profundidad del agua pueden ser tectónicos y sedimentológicos. Movimientos tectónicos del fondo marino pueden amplificar anular o revertir los cambios eustáticos. La sedimentación da como resultado en agradación del fondo marino y reducción de la profundidad del agua.

**Tabla I. Mecanismos del cambio del nivel del mar.
Revelle (1990).**

MECANISMO	ESCALA DE TIEMPO (AÑOS)	ORDEN DE MAGNITUD (METROS)
Cambio de volúmenes en estero oceánico		
Somero (0 – 500 m)	0,1 – 100	0 – 1 m
Profunda (500 – 4.000 m)	10 – 10.000	0,01 – 10 m
Acreción y desgaste glacial		
Glaciares en montañas	10 – 100	0,1 – 1 m
Capa de hielo en Groenlandia	100 – 100.000	0,1– 10 m
Capa de hielo en la antártica este	1.000-100.000	10 – 100
Capa de hielo en la antártica oeste	100- 100.000	m 1 – 10 m
Agua líquida en el continente		
Acuíferos subterráneos	100 – 100.000	0,1– 10 m
Lagos y reservorios	100– 100.000	0,01 – 0,1 m
Deformación de la corteza		
Formación y subducción de la litosfera	100.000 – 10 ⁸	1 – 100 m
Rebote isostático glacial	100 – 10.000	0,1 – 10 m
Colisión continental	100.000 – 10 ⁸	10 – 100 m
Epirogénia continental y marina	100.000 – 10 ⁸ 10.000 – 10 ⁸	10 – 100 m 1 – 100 m

2.5.1. Fluctuaciones del nivel base

El concepto de espacio disponible para la sedimentación, concepto definido por Jervy (1988), es uno de los conceptos de base de la estratigrafía secuencial. Este espacio se crea o se destruye con las fluctuaciones del nivel de base. Hay que tomar en cuenta que el espacio disponible se reduce gradualmente debido a la acumulación sedimentaria. La Figura 2.20 muestra la influencia de la acumulación sedimentaria y de la fluctuación del nivel de base sobre el espacio disponible para la sedimentación. A la diferencia del espacio disponible que depende, en parte, de la sedimentación, las fluctuaciones del nivel de base, son completamente independientes de la acumulación sedimentaria.

Estas fluctuaciones reflejan modificaciones de numerosos factores de control:

- Externos (eustatismo, tectónica, clima).
- Diagenéticos (compactación de los sedimentos).

- Ambientales (energía de las olas, corrientes marinas).

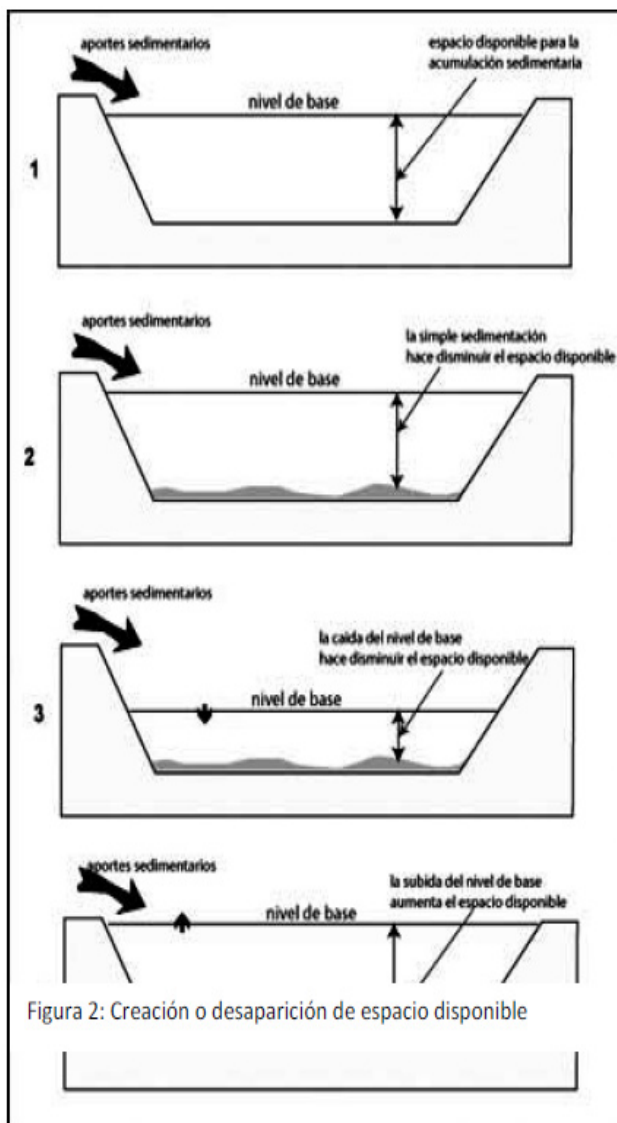


Figura 2.20 Influencia de la acumulación sedimentaria en la fluctuación del nivel de base. [4]

2.5.2. Cambios cíclicos del nivel del mar

Se han definido cinco órdenes de ciclos de cambios de nivel del mar con un rango de periodicidad que va de cientos a millones de años.

La definición de ciclo es algo subjetiva ya que algunos de estos ciclos no tiene realmente una periodicidad definida.

2.5.2.1. Ciclo de primer orden

Ciclos de Primer Orden, definidos por (Vail, Mitchum, & Tompson, 1977), incluyen los dos periodos extendidos de transgresión máxima marina en el Fanerozoico, el último Cámbrico para el Missisipiano y el Cretácico, y un periodo de máxima regresión en el Pensilvano para el Jurásico. Una mirada a los mapas geológicos de Norte América confirma lo importante de estos cambios. El campo Canadiense está limitado por rocas Cretácicas descansando inconfortablemente en el Cámbrico u Ordovícico a la secuencia Devoniano sobre áreas a lo largo del cratón, desde la región del Great Lakes, pasando los

Prairies dentro de la región Beaufort-Mackenzie y la Plataforma Ártica. Rocas del Pensilvano a edad del Jurásico están largamente confinadas a las cuencas intracratónicas y las campanas móviles limitando el interior cratónico.

2.5.2.2. Ciclo de segundo y tercer orden

El periodo de tiempo de ciclos invasión continentales corresponden aproximadamente a los tiempos de vida de cuencas sedimentarias, tal como las cuencas marginales continentales o márgenes pasivas involucradas dentro de las cuencas complementarias.

Los procesos de formación de cuencas están relacionados con procesos envolventes que operan irregularmente con velocidades variables o cambiantes. La evolución de tales cuencas pueden ser comprimidas en fases controladas tectónicamente, por ejemplo dos o tres fases de extensión o la transición de una extensión a un régimen compresional (cuencas complementarias). Como resultado, los índices de subsidencia gradualmente cambian con el tiempo, y las curvas de

subsistencia-tiempo muestran transiciones de formas cóncavas a formas convexas- hacia arriba generando levantamientos eustáticos y caídas en el nivel del mar.

Pensar que estos procesos tectónicos operan en una escala regional, pueden producir mayores ciclos de facies transgresivas-regresivas globalmente.

Los ciclos de segundo orden (secuencias "Sloss") típicamente duran 10 veces más de M.a. y son superpuestas en los ciclos invasorios continentales de primer orden. Estos podrían ser superpuestos en turnos por ciclos de más altos órdenes.

Ciclos de segundo orden afectan áreas a lo ancho de los estantes continentales, mareas epicontinentales y otras cuencas tanto como las tierras bajas continentales por flujo (onlap costero) y emergence (regresión). Las costas migran tierra a tierras altas y del lado del mar sobre largas distancias en el orden de 50 a 200 km.

2.5.2.3. Ciclo de tercer orden

Comúnmente, son descritos ciclos secuenciales de frecuencia intermedia (0,5 o 1 a 5 M.a) son considerados por algunos autores como los ciclos básicos estratigráficos en la historia de la Tierra. Este tipo de secuencia ha sido observada del Proterozoico al Presente. Este periodo de tiempo puede ser aproximadamente resuelto por bioestratigrafía.

Todavía hay problemas sin resolver con estos ciclos incluyendo su origen y correlación de continente a continente. Para crear las largas amplitudes de los cambios del nivel del mar, responsables en parte de estos ciclos, ambos procesos geodinámicos operativos, tales como el magmatismo y diapirismo, la masa transfiere de los continentes a los océanos, isostáticos significantes en respuesta a la corteza de carga.

2.5.2.4. Ciclo de cuarto orden

Un ciclo de cuarto orden puede ser referenciado para eventos estratigráficos correspondiente a los cambios muy rápidos del nivel de marea relativamente durante el avance glacial y el retiro de este. Esto debería tener

duraciones en el orden de 104 a 106 años. Esto es sugestivo por los gráficos de los cambios del nivel del mar en el tope durante los últimos millones de años.

Cambios de esta rapidez podrían dejar marcas estratigráficas permanentes, porque ellos son comparables en el ritmo de ajuste de la corteza isostática visco-elástico y los ritmos de sedimentación. Secuencias del Pleistoceno pueden ser relatados para tales ciclos que están desarrolladas extensamente, pero estas son sedimentos superficiales y su largo término de preservación potencial está discutido.

2.5.3. Superficies Máximas de Regresión

Superficies máximas regresivas definidas en patrones de estratos son mapeados en el tope de las progradaciones de sucesiones marinas. Estas son sistemas o secuencias limitantes. Estas superficies están cercas a líneas de tiempo en una sección deposicional, como aquí está solamente en un punto de tiempo cuando los cambios a nivel costero cambian de regresiva a transgresiva a lo largo de un trayecto particular.

Una tasa baja diacrónica puede ser registrada, como sea, en relación a las tasas de sedimentos transportados, como es el caso de dos conformidades correlativas. Las superficies de máximas regresión tipo A puede ser más diacrónica, como variaciones en subsidencia y tasas de sedimentación.

Las superficies máximas de regresión definidas en los cambios batimétricos son mucho más diacrónicas que depende de las variaciones del offshore en sedimentación y tasas de subsidencia. Como se indica en el modelo, las superficies marcan los picos más superficiales se forman con sucesiones regresivas.

2.5.4. Superficies Máximas de Inundación.

Las superficies máximas de inundación son a menudo inferidas en los cambios batimétricos. Estos dos contextos para diferentes atributos temporales, definen diferentes superficies que son temporalmente del tipo A y B.

Las superficies máximas de regresión definidas en los patrones de los estratos tipo A son secuencias

limitantes. Estos dependen en el intercambio entre las tasas de sedimentación y el incremento de los niveles base en la orilla (shoreline), y esto no se encuentra afectada por variaciones fuera de la orilla (offshore) en la tasa de sedimentación y subsidencia (Catuneanu, 1998b). Estas superficies están cercanas a las líneas de tiempo en la sección de deposicional de inmersión, como está un solo punto en tiempo se hacen cambios en el shoreline de transgresivo a regresivo a través de ese trayecto particular.

Una baja tasa diacrónica podría ser registrada en relación a las tasas del transporte sedimentario, como es el caso de todos los otros eventos significantes de secuencia de superficies estratigráficas. Las superficies máximas de inundación tipo A podrían ser más diacrónicas, como las variaciones en la subsidencia y las tasas de sedimentación (Gill & Cobban, 1973).

Las superficies máximas de inundación definidas en los cambios batimétricos (tipo B) son mucho más diacrónicas y dependen de las variaciones del

offshore en tasas de sedimentación y subsidencia. En el contexto del modelado continental estas superficies, marcan la profundidad del agua de forma regresiva. Como lo anotado por Naish y Kamp (1997), y también por Tim Naish (1998), la superficie que indica la máxima profundidad de agua (tipo B) a menudo ocurre con los sistemas altos.

Dependiendo de las circunstancias, la formación de las superficies de agua más profunda podría extenderse en los sistemas de estacione caídas. Esta superficie está litológicamente indeterminada, y puede ser solo identificada por estudios independientes de foraminíferos bentónicos o la huella fósil de la paleobatimetría.

Superficies de máximo de inundación tipo B son independientes de los patrones de estratos. Tipos A y B de superficies unidas en el shoreline, y así ellos pueden ser descritos por el mismo grado de diacronismo. Así tipos A y B de superficie de máximo de inundación divergen en una dirección offshore, la identificación de las estimaciones de profundidades

del agua para biofacies foraminíferas bentónicas en un comportamiento que esta independiente de los grados de sedimentos y patrones de los estratos.

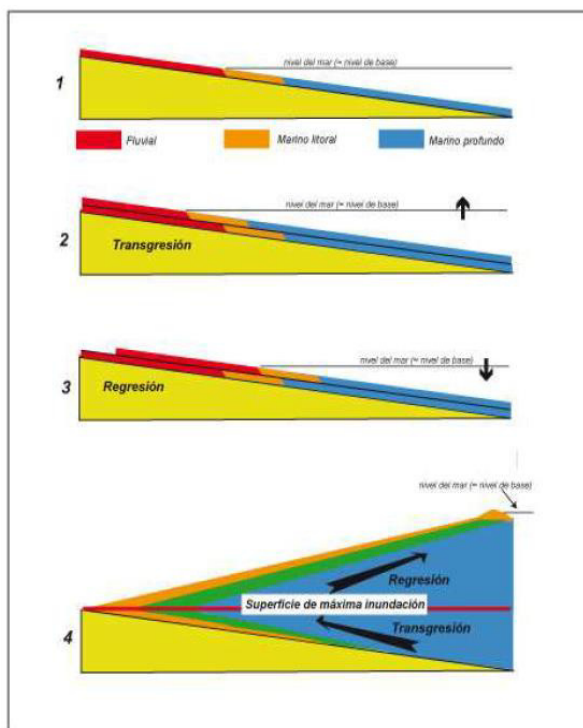


Figura 2.21 Esquema de Transgresión y Regresión. [4]

2.6. Cortejos Sedimentarios.

[1] Los cortejos sedimentarios (systems tracts) constituyen las divisiones de las secuencias de depósitos. La figura 2.22 muestra que existen dos principales tipos de secuencias en función de la naturaleza de los límites.

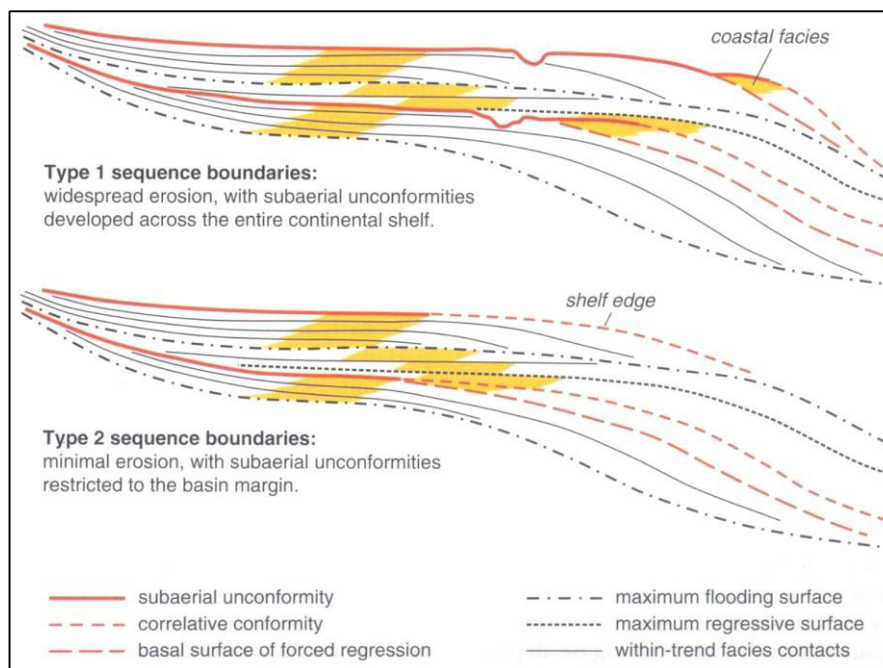


Figura 2.22 Definición de las secuencias de tipo 1 y tipo 2. [1]

Las secuencias tipo 1 son aquellas cuyos límites son superficies subaéreas que se extienden y afectan con fuerte erosión (excavación de valles) el conjunto de la plataforma continental. Cuando termina la regresión la línea de costa se encuentra al límite talud/plataforma continental.

En las secuencias tipo 2, sólo parte de la plataforma ha sido abandonada por el mar, la erosión de las partes emergidas es limitada.

Se reconocen cuatro cortejos sedimentarios:

El cortejo de bajo nivel (lowstand systems tracts).

El cortejo transgresivo (transgressive systems tracts).

El cortejo de alto nivel (highstand systems tracts).

El cortejo de caída del nivel de base (Falling stage systems tracts).

Ciertos autores agregan un quinto cortejo, el cortejo regresivo, que es la suma del cortejo de alto nivel, del cortejo de caída de nivel y del cortejo de bajo nivel. Se usa este cortejo regresivo cuando los datos de campo y de subsuelo no permiten diferenciar los diferentes cortejos agradantes y progradantes.

2.6.1. Cortejo de bajo nivel.

[1] El cortejo de bajo nivel incluye los sedimentos más gruesos de las partes marinas y no marinas de las series, es decir la parte inferior de las series granodecipientes en ambiente continental, y la parte superior de la serie granocreciente en ambiente marino somero.

Los depósitos del cortejo de bajo nivel consisten en sedimentos no-marino (relleno de valles incisos,

canales) y en depósitos marinos y costeros. El patrón de acumulación es progradante y, en el tope agradante cuando la tasa de sedimentación equilibra la subida del nivel de base.

Por debajo de la zona de mayor actividad de las olas en período de buen tiempo, la extensión de las facies de plataforma puede ser limitada debido a la proximidad potencial de la línea de costa con el borde de la plataforma al final de la regresión forzada. En este caso, se pasa directamente de las facies infratidales a las de talud (esencialmente flujos de gravedad).

El LST está limitado en su tope por la superficie de máxima regresión (MRS) suprayacente por los sedimentos del cortejo transgresivo. En las partes distales profundas del sistema, el abanico sedimentario profundo está alimentado por flujos de gravedad de baja densidad procedentes de la desestabilización de parte de los sedimentos del prisma progradante de frente de playa (o de frente de

delta en el caso de una desembocadura).

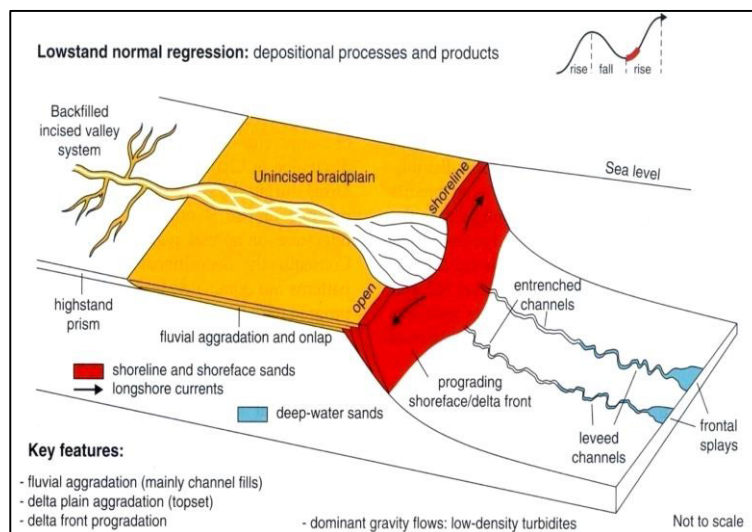


Figura 2.23 Ambientes sedimentarios y sedimentación del cortejo de bajo nivel. [1]

2.6.2. Cortejo Transgresivo.

[1] El cortejo transgresivo comienza a depositarse cuando la velocidad de subida del nivel de base sobrepasa la tasa de sedimentación. Así que, en su base, este cortejo tiene como límite la superficie de máximo de regresión (MRS) y, en su tope, la superficie de máximo de inundación (MFS).

El cortejo transgresivo se identifica por su patrón de acumulación retrogradante (es decir granodecreciente) tanto en las series marinas como

en las continentales. La parte marina del cortejo transgresivo se desarrolla en primer lugar en las zonas de poca profundidad, cerca de la línea de costa.

Son los depósitos que se acumulan en onlap en la zona de shoreface. Más hacia el offshore se encuentran las series condensadas correlativas de los depósitos del shoreface, los depósitos gravitacionales y los sedimentos pelágicos.

La parte costera del cortejo transgresivo está compuesto por depósitos de playa, facies estuarinas y sistemas de islas barreras. La constitución y la preservación de las facies estuarinas depende de varios factores: la tasa de subida del nivel de base, de la profundidad de la erosión fluvial durante la etapa de caída del nivel de base, del régimen de los vientos, de la erosión de las olas, de la gradiente topográfica de la línea de costa. La agradación costera se favorece de una fuerte tasa de subida del nivel de base, de poca ravinement y de una baja gradiente topográfica (lo que se da en una costa plana y abierta). En cambio, una fuerte gradiente topográfica induce una erosión

costera en relación con una fuerte energía fluvial y un ravinement por las olas. Una fuerte gradiente topográfica no será favorable al emplazamiento de un estuario.

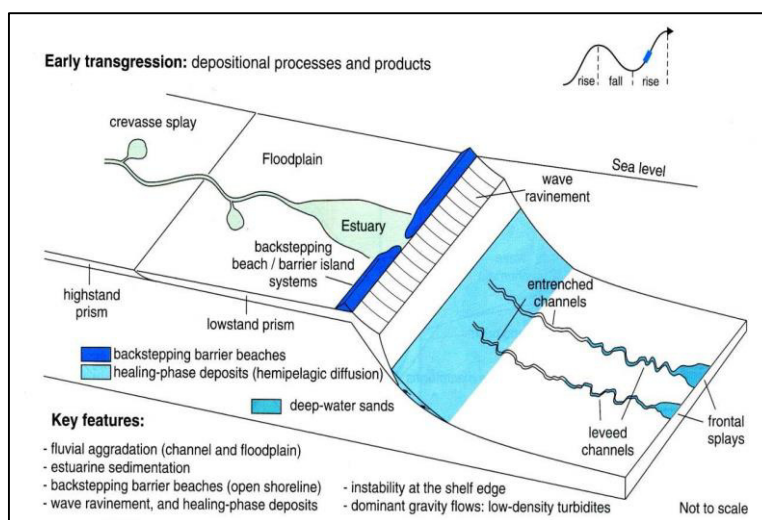


Figura 2.24 Ambientes sedimentarios y sedimentación en el cortejo sedimentario transgresivo. [1]

La parte fluvial del cortejo transgresivo muestra influencias tidales (la línea de costa migra hacia el continente). Muestra también una organización vertical granodecreciente debida a la disminución gradual de la gradiente topográfica y de la energía fluvial por la agudación costera.

La Figura 2.24 muestra el funcionamiento de los ambientes sedimentarios durante el comienzo de la transgresión. La tasa elevada de subida del nivel de base provoca la retrogradación de las facies en la plataforma donde los sedimentos fluviales anteriores se encuentran atrapados por los sistemas fluviales, costeros o de aguas someras de la etapa transgresiva. Los procesos de ravinement por las olas erosionan los sedimentos deltaicos y de playa abierta de la etapa anterior de regresión normal, lo que sigue proporcionando arenas para los flujos turbidíticos de aguas profundas. Estos flujos turbidíticos son de baja densidad, idénticos a los de la etapa anterior de cortejo de bajo nivel. En la figura 2.25 se ven los ambientes sedimentarios durante el final de la transgresión.

La mayor parte de los sedimentos terrígenos está atrapada en el prisma sedimentario transgresivo que va de los ambientes fluviales a los de mar somero (fluvial, estuarino, deltáico, costa abierta y sedimentos de playa distal <lower shoreface>). Otra parte de las arenas llega a la plataforma continental donde

constituye macroformas generadas por las olas de tormenta y las corrientes de marea. Si el nivel de base tiene una subida rápida durante la transgresión, se produce una inestabilidad hidráulica en el borde de la plataforma continental, generando flujos de lodo en el mar profundo. El tope del conjunto de los sedimentos transgresivos está limitado por la superficie de máxima inundación.

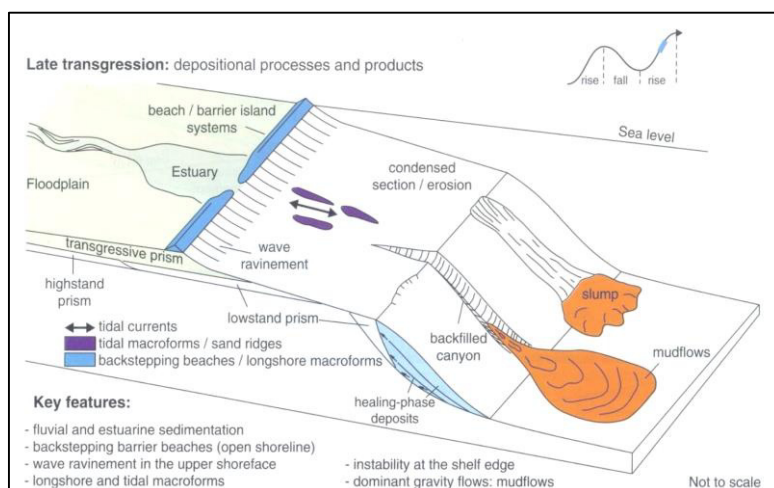


Figura 2.25 Ambientes sedimentarios y sedimentación en el cortejo sedimentario transgresivo. [1]

2.6.3. Cortejo de Alto Nivel.

El cortejo de alto nivel tiene como límites, en su base la superficie de máximo de inundación y al tope una superficie compuesta que incluye la discontinuidad

subaérea, la superficie regresiva de erosión marina y la superficie basal de regresión forzada. Figura 2.26

Este cortejo, Figura 2.24 representa la etapa tardía de la subida del nivel de base, cuando la tasa de subida del nivel es inferior a la tasa de sedimentación, ocasionando una regresión normal de la línea de costa. En la parte continental del sistema, se produce agradación fluvial con una tasa más importante en la proximidad de la línea de costa provocando una disminución correlativa de la pendiente topográfica. Por esta razón, la parte no marina del cortejo de alto nivel registra una disminución de la energía fluvial y, por consiguiente, una organización granodecreciente de las acumulaciones sedimentarias.

En su parte marina, el cortejo de alto nivel se caracteriza por una organización granocreciente en relación con la migración de las facies hacia la cuenca. Las facies son de regresión normal con un patrón levemente progradante y/o agradante, según las variaciones diferenciales de las tasas de sedimentación y de creación de espacio.

En ambiente sílico-clástico, el HST comprende deltas con geometrías en topsets. Cuando la plataforma marina presenta condiciones para fabricar carbonatos, el HST es una plataforma carbonatada. La parte profunda de la cuenca (plataforma y talud) recibe esencialmente una sedimentación de grano fino pelágica o hemipelágica.

Los sedimentos continentales y los de mar somero en la etapa de alto nivel de base tienen poca probabilidad de conservarse debido a la erosión subaérea y marina de la etapa siguiente de caída del nivel de base.

2.6.4. Cortejo de Nivel Base.

[1] El cortejo de caída del nivel de base está compuesto por todos los sedimentos que se acumulan en la parte marina de la cuenca durante la caída del nivel de base. En el mismo tiempo, la parte emergida del sistema está sometida a la erosión subaérea, formándose la discontinuidad subaérea. Los depósitos de mar somero muestran un patrón progradante y un offlapping característicos de este tipo de cortejo. Estos

sedimentos de mar somero son los equivalentes cronológicos de los abanicos de mar profundo.

El cortejo teórico de caída del nivel de base muestra el offlapping de los lóbulos de depósitos de frente de playa (shoreface), de las macroformas de plataforma marina, de los abanicos profundos, de los cuerpos sedimentarios del frente deltaico (Figura 2.24). En la realidad, todos estos depósitos no coexisten forzosamente. El tipo de sedimentos de FSST que se depositan en un tiempo dado depende de la posición del nivel de base respecto al borde de la plataforma.

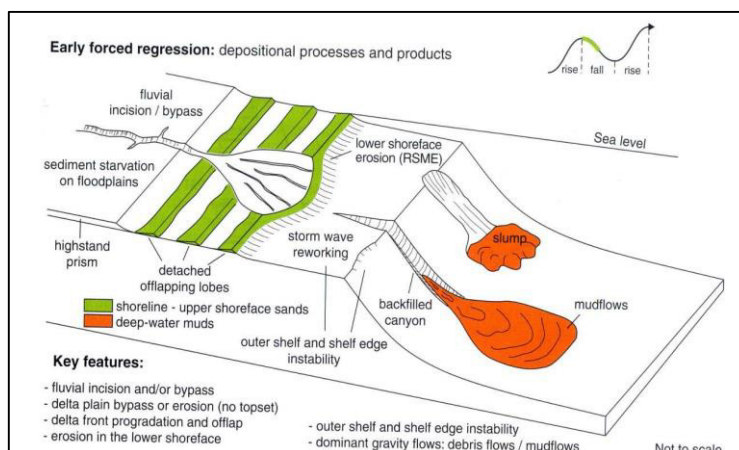


Figura 2.26 Ambientes sedimentarios y sedimentación en el cortejo sedimentario transgresivo. [1]

Si el nivel de base se encuentra por encima del borde del talud los depósitos del FSST se organizan en offlap y consisten en lóbulos de frente de playa (de shoreface), en macroformas de plataforma continental y en abanicos de talud y de cuenca. En este caso, los límites del FSST son superficies compuestas: al tope discontinuidad subaérea, concordancia correlativa, parte de las más jóvenes de la superficie regresiva de erosión marina; en la base, superficie basal de regresión forzada, las partes más antiguas de la superficie regresiva de erosión marina.

La mayoría de las arenas se entrapan en los lóbulos deltaicos en offlap. Los sedimentos finos tienden a acumularse en las aguas profundas bajo forma de turbiditas de muy baja densidad (mudflows).

Si el nivel de base cae por debajo del borde del talud se constituye un delta de borde de plataforma con geometrías en offlap que prograda más allá del borde del talud y va a cubrir en downlap los abanicos submarinos. Al tope este sistema está limitado por la discontinuidad subaérea y su concordancia

correlativa; en la base el límite es la superficie basal de regresión forzada. Tal situación se da cuando la regresión forzada está en su fase paroxismal (Figura 2.24). La mayor parte de los sedimentos va hacia los abanicos de mar profundo que almacenan gran cantidad de arenas bajo forma de turbiditas arenosas de alta densidad.

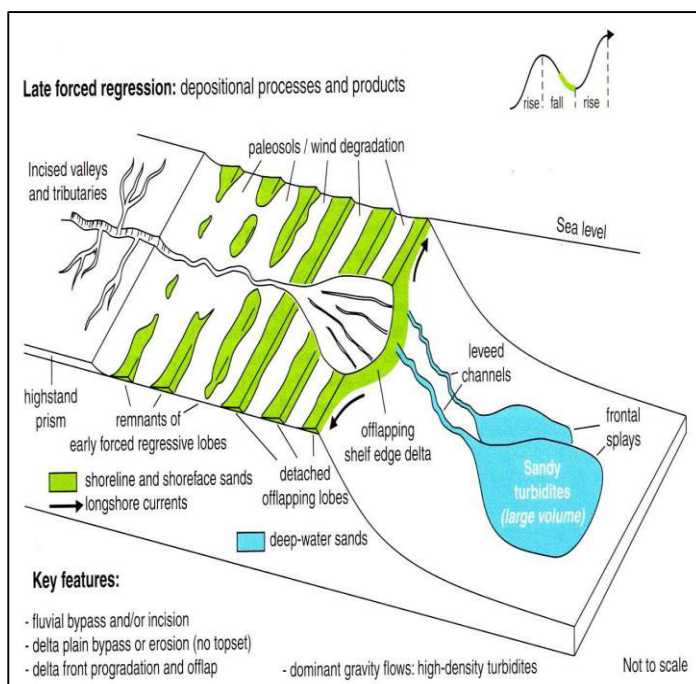


Figura 2.27 Cortejo de caída del nivel de base (FSST) al momento del paroxismo de la regresión forzada. [1]

2.6.5. Cortejo Regresivo.

[1] El cortejo regresivo es un cuerpo sedimentario constituido por los cortejos de Alto nivel (HST), de Caída del nivel de base (FSST) y de Bajo nivel (LST). El cortejo regresivo se usa cuando hay imposibilidad de diferenciar los diferentes cortejos regresivos en los documentos de subsuelo. El RST está limitado, en su base, por la superficie de máximo de inundación y, al tope, por la superficie de máximo de regresión; el RST se caracteriza por un patrón de acumulación progradante, tanto en sus partes continentales como marinas.

La figura 2.26 resume lo que vimos hasta ahora. Representa bajo forma de un diagrama de Wheeler la organización de los depósitos durante un ciclo regresivo- transgresivo en el caso de una sedimentación detrítica. Aparecen los cortejos con las superficies que los limitan, los patrones de acumulación (progradante, retrogradante, agradante). La figura 2.26 muestra también la organización

granulométrica de los cuerpos sedimentarios, en la plataforma y en la cuenca.

Vale notar que durante la sedimentación del cortejo de bajo nivel (LST), es decir durante la etapa de regresión normal, hay una diferencia de evolución granulométrica entre la plataforma (granocreciente) y la zona de talud/cuenca (granodecreciente): los materiales gruesos y arenosos se quedan atrapados en los depósitos agradantes fluviales y costeros; llegando a los abanicos profundos turbiditas lodosas de baja densidad.

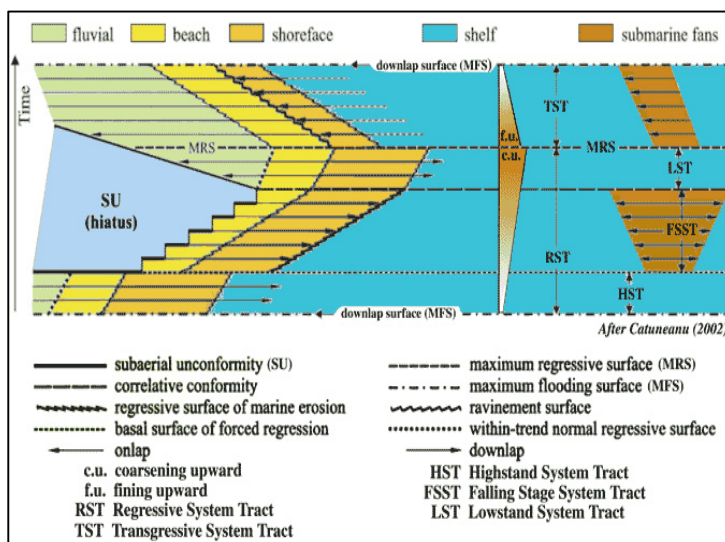


Figura 2.28 Diagrama de Wheeler mostrando la organización deposicional durante un ciclo completo regresión-transgresión, en un sistema sedimentario sílico-clástico. [1]

CAPITULO 3

3. METODOLOGIA

3.1. Universo y muestra

3.1.1. Universo

El campo Sacha está constituido por un total de 333 pozos perforados que atraviesan a la arenisca U, tanto del miembro superior como inferior. Estos pozos corresponderían al universo de este estudio, al igual

que las diferentes facies que conforman al reservorio Arenisca U.

3.1.2. Muestra

La muestra estudiada para el sector norte del Campo corresponde a un total de 82 pozos de los cuales se utiliza la información de registros de pozo.

Criterios de inclusión.- Se seleccionó esta zona para obtener actualmente un conocimiento del comportamiento y desarrollo de la arenisca U, puesto que según la información proporcionada por los registros eléctricos es una zona donde no consta de grandes espesores de arena.

Tabla II. Pozos utilizados para el estudio ubicados al norte del Campo Sacha

POZO	X(metros)	Y(metros)	KB	MD(pies)	TVD(pies)
SAC-001p	295.071	9972.687	938	8.618	9.556
SAC-003	295.091,52	9968.341,65	964,5	8.591	9.556
SAC-006	293.967,66	9968.829,46	904,4	8.598	9.502
SAC-007	293.193	9966.747	915	8.571	9.486
SAC-010	294.593	9967.797	897	8.604	9.501
SAC-014	292.006	9966.497	914	8.543	9.457

POZO	X(metros)	Y(metros)	KB	MD(pies)	TVD(pies)
SAC-015	295.800,79	9967.953,8	889,3	8.624	9.513
SAC-016	291.792	9967.316	914	8.552	9.466
SAC020	295.047,13	9968.918,52	886,7	8.590	9.477
SAC-031	294.404,47	9969.851,29	916,2	8.576	9.492
SAC-034	294.254	9966.826	905	8.570	9.475
SAC-035	293.586	9967.729	916	8.572	9.488
SAC-039	292.638	9967.693	924	8.564	9.488
SAC-048	292.789	9968.636	913	8.596	9.509
SAC-050	296.200	9966.277	891	8.633	9.524
SAC-051	295.504,75	9970.046,85	920,4	8.607	9.528
SAC-053	294.754,25	9970.880,36	922,5	8.612	9.534
SAC-058	295.577	9972.882	915,7	8.668	9.584
SAC-060	295.393	9966.960	899	8.609	9.508
SAC-063	295.904	9970.999	917	8.639	9.556
SAC-093	293.247,26	9971.807,67	928,8	8.600	9.529
SAC-094	292.842,35	9970.991,24	913,9	8.606	9.520
SAC-095	293.706,03	9972.925,55	934	8.622	9.556
SAC-102	292.668	9966.383	910	8.562	9.472
SAC-106	293.702	9966.412	906	8.572	9.478
SAC-115	292.514	9967.004	913	8.569	9.482
SAC-126	294.154	9967.507	900	8.612	9.512
SAC-127	294.400	9966.263	904	8.591	9.495
SAC-131	291.413	9966.739	919	8.621	9.540

POZO	X(metros)	Y(metros)	KB	MD(pies)	TVD(pies)
SAC-133	294.839	9970.289	920,2	8.604	9.525
SAC-135	293.026	9967.302	920	8.570	9.490
SAC-136	294.090	9968.146	906	8.591	9.497
SAC-138	295.020	9973.118	925	8.629	9.554
SAC-140d	293.829	9967.057	919	8.559	9.478
SAC-147d	294.585	9967.289	918	8.584	9.502
SAC-148	293.736	9969.434	904	8.616	9.520
SAC-148s	293.864,81	9969.370,61	904,2	8.611	9.515
SAC-152d	293.356,4	9971.028,88	924	8.593	9.517
SAC-160d	294.435,28	9973.187,43	933	8.589	9.522
SAC-161	294.737	9969.309	912	8.606	9.518
SAC-162	294.968	9969.795	911	8.608	9.519
SAC-163d	293.596,28	9969.215,91	917	8.591	9.508
SAC-164d	294.464,39	9968.389,02	918,5	8.542	9.460
SAC-170	294.345	9971.726	931.5	8.618	9.549
SAC-171h	293.808	9969.621	918	8.597	9.515
SAC-173h	293.161	9971.090	930,3	8.595	9.525
SAC-174h	293.982	9971.426	946	8.590	9.536
SAC-175h	294.290	9971.556	944,6	8.581	9.525
SAC-192	296.410	9971.926	927	8.645	9.572
SAC-203d	293.068	9971.461,4	923,9	8.610	9.534
SAC-206d	292.902,75	9970.224,75	924	8.573	9.497
SAC-210d	296.480,58	9972.555,54	927,6	8.632	9.560

POZO	X(metros)	Y(metros)	KB	MD(pies)	TVD(pies)
SAC-213d	296.033,22	9972.283,11	928,1	8.616	9.544
SAC-214d	296.768,14	9972.231,16	927,7	8.648	9.576
SAC-217d	296.022	9972.946	926	8.629	9.555
SAC-218d	295.183,09	9973.486,39	924,1	8.618	9.542
SAC-226d	296.236,16	9971.565,12	927	8.621	9.548
SAC-227d	295.699,62	9972.045,98	925	8.611	9.536
SAC-239d	295.780	9973.523	934	8.623	9.557
SAC-240d	296.662,88	9971.409,48	917,7	8.665	9.583
SAC-241d	296.687,7	9971.782,45	917,5	8.656	9.573
SAC-242d	295.682	9971.552	917,5	8.626	9.544
SAC-244d	292.471,31	9970.658,73	924	8.619	9.543
SAC-245d	295.237,08	9966.292,96	908,5	8.621	9.530
SAC-246d	294.920	9966.926	909	8.611	9.520
SAC-247d	296.756,03	9967.218,19	908,5	8.643	9.551
SAC-248d	295.798,57	9966.618,7	908,5	8.636	9.544
SAC-249d	294.463,14	9968.878,66	916,2	8.592	9.508
SAC-250d	295.461,18	9969.294,14	916,2	8.597	9.513
SAC-251d	295.435,7	9968.633,11	916,1	8.603	9.519
SAC-253d	295.846	9968.687	916	8.615	9.531
SAC-255d	293.693	9968.285	916	8.588	9.504
SAC-256d	296.277	9969.411	916	8.617	9.533
SAC-273d	296.326,18	9970.308,43	925	8.627	9.552
SAC-274d	295.722,72	9970.519,08	925	8.627	9.552

POZO	X(metros)	Y(metros)	KB	MD(pies)	TVD(pies)
SAC-275d	295.268,97	9971.108,26	925	8.628	9.553
SAC-276d	296.991	9970.346	925	8.645	9.570
SAC-277d	296.439	9970.869	925	8.666	9.591
SAC-278d	295.863	9969.684	925	8.622	9.547
SAC-320d	296.820,66	9972.735	915	8.650	9.565
SAC-321d	297.205	9972.112,25	915	8.673	9.588
SAC-454d	296.447	9973.440	918	8.646	9.564

3.2. Uso de los registros de pozos

3.2.1. Potencial Espontáneo

El potencial espontáneo (SP) es un registro de la diferencia de potencial de un electrodo móvil en el pozo y un potencial fijo en un electrodo de superficie, en función de la profundidad.

- El SP es útil en pozos con lodos dulces para:
- Detectar capas permeables.
- Ubicar sus límites y permitir la correlación entre capas.

- Determinar valores de la resistividad del agua de formación.
- Dar valores cualitativos del contenido arcilloso de una capa.

3.2.2. Potencial Resistivo

En los perfiles convencionales de Resistividad, se envían corrientes a la formación a través de unos electrodos y se miden los potenciales eléctricos entre otros. La medición de estos potenciales permite determinar las resistividades. Para que haya una circulación de corriente entre electrodos y formación, la sonda debe ser corrida en pozos que contengan lodo (barro, inyección) o agua, conductores de electricidad.

3.2.3. Potencial Gamma Ray

El Perfil de Rayos Gamma mide la radioactividad natural de las formaciones. Es por lo tanto útil en la detección y evaluación de minerales radioactivos como potasio y uranio.

En formaciones sedimentarias, el Perfil de Rayos Gamma generalmente refleja el contenido de la lutita de las formaciones. Esto es porque los elementos radioactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas.

Formaciones limpias tienen normalmente un nivel bajo de radioactividad, a menos que estén contaminadas de cenizas volcánicas o rodados graníticos radioactivos, o cuando las aguas de formación contienen sales disueltas en potasio

3.2.4. Potencial de Densidad

El perfil de Densidad de la Formación se utiliza principalmente como Perfil de Porosidad. La medición de la densidad de la formación tiene también aplicación de la identificación de minerales en depósitos de evaporitas, descubrimiento de gas, determinación de la densidad de hidrocarburos; evaluación de arenas arcillosas y litologías complejas y en la determinación del rendimiento de lutitas petrolíferas.

3.2.5. Potencial Capilar

Este registro mide el diámetro del pozo perforado y da una indicación de su condición por lo tanto permite estimar la confiabilidad de los otros registros tomados en el pozo.

Un ensanchamiento del pozo puede indicar cavidades o caídas de las paredes del pozo lo cual puede generar errores en las lecturas de los registros. Este registro es particularmente útil para en sucesiones mezcladas de evaporitas donde la lixiviación ha removido a las evaporitas más solubles.

3.3. Uso de los registros de pozos

3.3.1. Estratos marcadores

La respuesta de un registro de un estrato distintivo o series de estratos pueden ser usados como marcadores incluso si la litología u origen del estrato no es conocido del todo. Estratos distintos lateralmente pero pertenecientes a un mismo grupo son resultado de transgresiones, regresiones o

procesos erosivos que redistribuyen los sedimentos. Estratos marcadores que pueden ser mapeados regionalmente pueden estar por lo tanto relacionados o incluidos a importantes superficies alostratigráficas como por ejemplo secciones condesadas.

3.3.2. Coincidencia de patrones

Esta técnica involucra el reconocimiento de patrones de distintos registros y de cualquier origen. La correlación de estos patrones puede representar sucesión de facies verticales, facies sobrepuestas o unidades discordantes.

Haciendo coincidir estos patrones en las bases de las curvas de los registros se realiza correlaciones en intervalos superiores a 10 pies. Las coincidencias de los patrones pueden permitir correlacionar incluso donde haya ocurrido cambios laterales de facies, variaciones de litologías, facies y espesores. Los registros de dos o más pozos pueden desplazarse buscando coincidir una de estas curvas patrón lo mejor posible.

3.3.3. Técnicas de corte

Cuando ninguno de los anteriores métodos dio resultado, se puede realizar subdivisiones arbitrariamente de un intervalo a estudiarse tratando en unidades con espesores proporcionales a dicho intervalo. Esta división en intervalos no genera verdaderas correlaciones, es solo una manera de dividir una sección que no pudo ser subdividida de otra manera.

En este método se asume implícitamente que las líneas de tiempo a través de este intervalo son horizontales y en zonas donde esta suposición es invalida, este método puede dar errores.

Este espesor debe ser elegido para minimizar complicaciones; por ejemplo, en un área donde la arena tiene un espesor de 30 pies, realizar cortes o subdivisiones menores a 30 pies podría no producir resultados interpretables.

3.4. Correlación estratigráfica en base a los registros de pozos

La correcta correlación estratigráfica es absolutamente necesaria para realizar cortes estructurales y mapas confiables, y para realizar un análisis regional de facies.

Existen complejos procesos numéricos para coincidir y correlacionar los registros de pozos los cuales serán analizados más adelante. Actualmente la mayoría de geólogos correlacionan los patrones de los registros a simple vista lo que no considera en ocasiones variaciones de litologías o espesores.

3.5. Procesamiento de la secuencia de facies

La serie de números de orden de una secuencia de facies es una serie de tiempo, si se supone que la tasa de sedimentación es constante, lo que es una buena aproximación si se trabaja con valores promedios sobre intervalos de espesor suficiente, y cuando no hay mucha diferencia de espesor de columna entre los pozos.

En el intervalo de la arena U esa condición está realizada entre buena parte de los pozos, pero una cantidad importante de ellos tienen un espesor total de columna bastante superior al promedio (a veces casi el doble), eso indica que la sedimentación está afectada por eventos tectónicos sin-sedimentarios.

La mayor parte de esos pozos con espesor anómalo de sedimentos están alineados a lo largo de segmentos de líneas rectas, lo que indica que hubo fallas activas durante una parte del tiempo de sedimentación. Las arenas se concentran principalmente en esas áreas donde la columna es más espesa, especialmente en la parte inferior del intervalo, lo que indica una canalización del aporte detrítico en depresiones tectónicas en la época correspondiente; ese aporte detrítico no era suficiente como para llenar de arena todas las depresiones ni para cubrir con arenas las áreas situadas entre los canales, las áreas correspondientes se llenaron con sedimentos finos y hasta calcáreos en algunas partes, también se formaron rocas residuales (paleosuelos) en partes altas durante las épocas de bajo nivel del mar. Esa diversidad de ambientes obliga a trabajar con varias secuencias-tipo combinadas.

Ciclos de transgresión y regresión

Las secuencias de facies no son funciones continuas, sino sucesiones de eventos de sedimentación y erosión apilados en forma caótica, sin embargo cada banco o grupo de bancos tiene características promedio que se pueden ordenar en procesos continuos que reflejan las variaciones eustáticas del nivel del

mar, produciendo repeticiones cíclicas de partes de una secuencia. Para poder evidenciar esas variaciones cíclicas es necesario suavizar las curvas correspondientes a las secuencias, eliminando variaciones de alta frecuencia, cuya extensión lateral es muy limitada, y muchas veces no se pueden correlacionar ni entre dos pozos vecinos. Para esto se pueden utilizar los métodos de análisis de series de tiempo, como la media móvil o el desarrollo en serie de Fourier.

3.5.1. Uso de Media móvil para suavización de curvas

3.5.1.1. Media móvil simple

Ese proceso de suavización de curvas consiste en reemplazar cada valor de la curva por un promedio ponderado entre el valor en ese punto y el valor en puntos vecinos. Se pueden utilizar varios tipos de ponderación (lineal, exponencial, gaussiano, etc...), usaremos el más sencillo (lineal con peso $\frac{1}{2}$ en el punto y $\frac{1}{4}$ en sus vecinos inmediatos) y repetiremos ese proceso cierta cantidad de veces.

Las figuras siguientes muestran el efecto del proceso con 3 iteraciones a partir de un pico de valor 1 aislado,

y la variación de la varianza expresada en función del número de iteraciones en el caso de la curva de 7 facies en el pozo Sacha 29. A continuación se presentan los resultados para diferentes valores del número de iteraciones con los mismos datos.

En la primera figura, Figura 3.1, se ve que el pico se transforma en una curva gaussiana cada vez más aplanada, en la Figura 3.2 la varianza expresada se reduce cada vez menos con el número de iteraciones, En las siguientes, Figura 3.3 y Figura 3.4 se nota como los pequeños picos se fusionan progresivamente y al final se obtiene una distribución multimodal compuesta de curvas gaussianas centradas sobre unos picos principales.

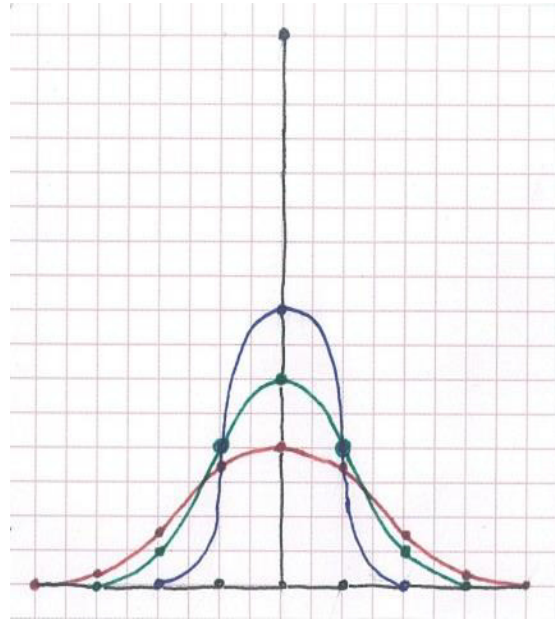


Figura 3.1 Modificación de un pico. [5]

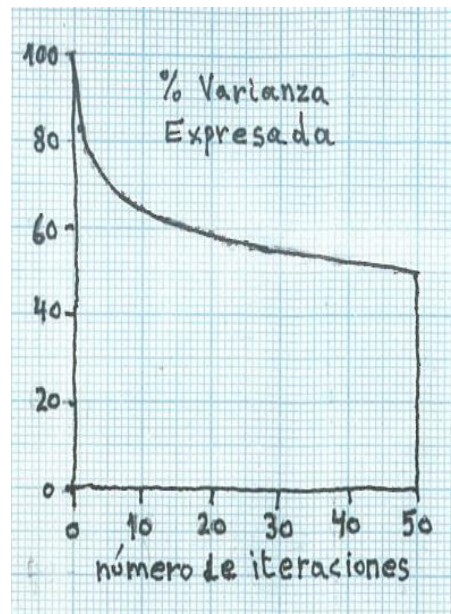


Figura 3.2 Modificación de un pico con porcentaje de varianza expresada. [5]

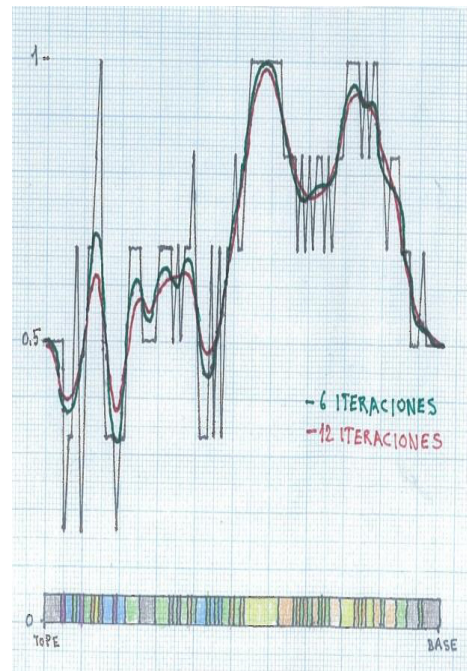


Figura 3.3 Media móvil a 6 y 12 iteraciones. [5]

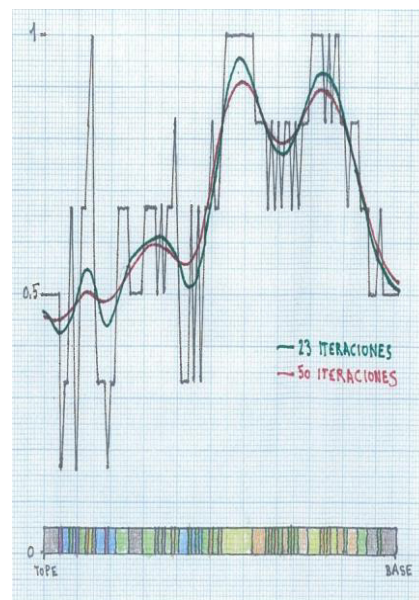


Figura 3.4 Media móvil a 23 y 50 iteraciones. [5]

La variación del porcentaje de la varianza expresada (de la curva original irregular) en un proceso de media móvil está directamente relacionada con la autocovarianza de esa curva (el inverso del variograma usado en geo-estadística). Si se usa esa curva suavizada para correlacionar facies entre pozos vecinos el resultado será parecido al que se obtiene por ese tipo de métodos.

Para obtener correlaciones directamente relacionadas con ciclos estratigráficos, un método de suavización de las curvas que parece más apropiado es el desarrollo en serie de Fourier, que se expone a continuación.

3.5.2. Uso de la Serie de Fourier para suavización de curvas

Toda función, continua o no, puede ser representada sobre un intervalo de 0 a 2π por una combinación lineal de senos y cosenos (desarrollo en serie de Fourier), cuya fórmula se da a continuación en la Figura 3.5.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx))$$

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) dx$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \cos(nx) dx$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \sin(nx) dx$$

Figura 3.5 Serie de Fourier

Hecha por la autora, 2015

Con funciones representadas por una serie de valores numéricos, esos cálculos se reducen a simples sumas de combinaciones de los valores de Sin(x) y COS(x) en cada punto, donde los valores de x son espaciados de $2 \cdot \text{Pi} / (N-1)$ si se tienen N valores de datos, y los valores de SIN y COS se calculan uno a partir de otro por las fórmulas trigonométricas de suma de ángulos.

3.5.2.1. Desarrollo de la Serie de Fourier

Para el desarrollo en serie de Fourier, se necesita disponer de datos correspondientes a un ciclo completo, con $f(1)=f(N)$, para esto se reemplaza los valores de x por valores de 0 a 2π , usando un intervalo de muestreo de $(N-1)/(2\pi)$, también se puede trabajar con un medio ciclo (también con $f(1)=f(n)$) y un intervalo de muestreo de $(N-1)/\pi$, si se lo completa por simetría con un medio ciclo ficticio hasta 2π ($2N-1$ valores de x). Esa opción es conveniente porque en realidad se trabaja solo sobre la parte regresiva del ciclo completo, la mitad transgresiva está compuesta de litologías marinas (calizas y lutitas) que no se diferencian bien en los registros eléctricos y que no nos interesan (no importa si ese medio ciclo ficticio corresponde o no a la realidad, se lo usa solo para calcular los coeficientes de Fourier para el medio ciclo que se estudia y se lo ignora en el resto del análisis).

Se puede completar ese medio ciclo ficticio para obtener un ciclo puro, o con un medio ciclo invertido, en el caso en que se piensa que la regresión está ligada a un evento tectónico inicial (o la transgresión a un evento final). Esas dos opciones están representadas en las figuras siguientes.

Habrán diferencias en los resultados si el medio ciclo estudiado es muy asimétrico, en caso contrario los resultados de las dos opciones serán muy parecidos entre sí.

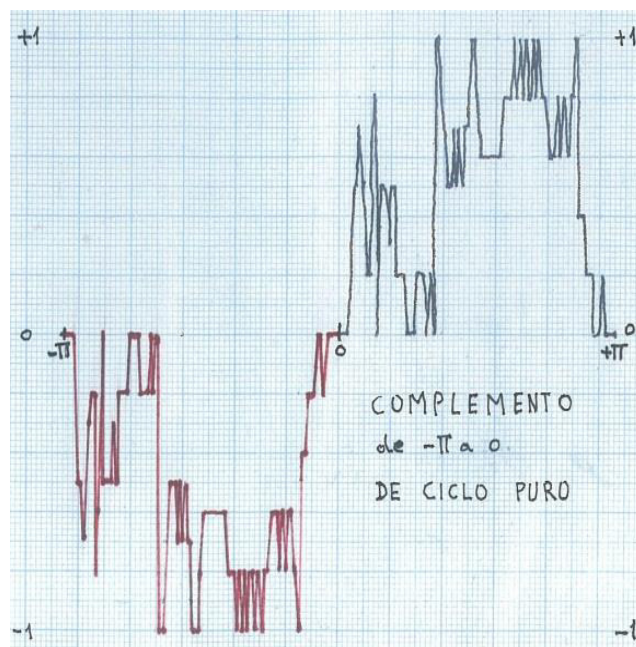


Figura 3.6 Complemento de $-\pi$ a 0 de Ciclo Puro. [5]

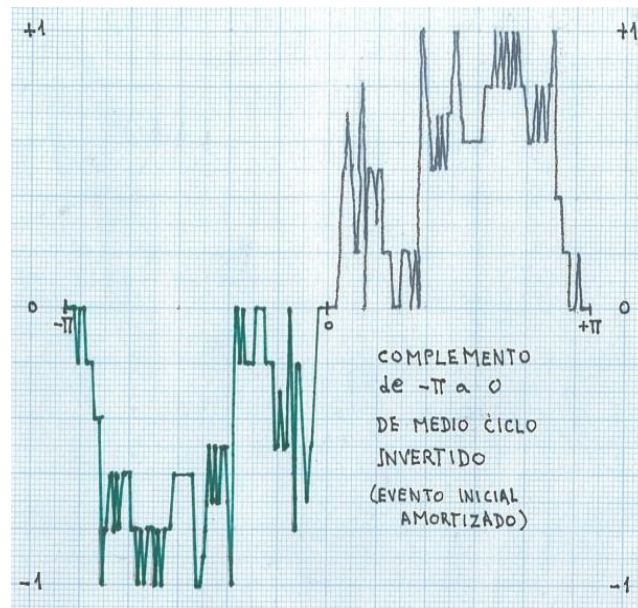


Figura 3.7 Complemento de $-\pi$ a 0 de Medio Ciclo Puro Invertido. [5]

El principal objetivo del procesamiento por desarrollo en serie de Fourier es determinar las existencias de ciclos menores en una secuencia cíclica, si se limita el desarrollo a un pequeño número de términos, eso elimina la contribución de términos de alta frecuencia, los cuales corresponden a ruido o a eventos de corta duración. Para limitar el desarrollo al número adecuado de términos, se observa cómo evoluciona la varianza residual entre la curva cruda y el desarrollo de Fourier en función del número de

términos incluidos. Las figuras siguientes indican esa variación en el caso del pozo 29 para la curva de facies de profundidad de agua, en las dos opciones de complementar el medio ciclo.

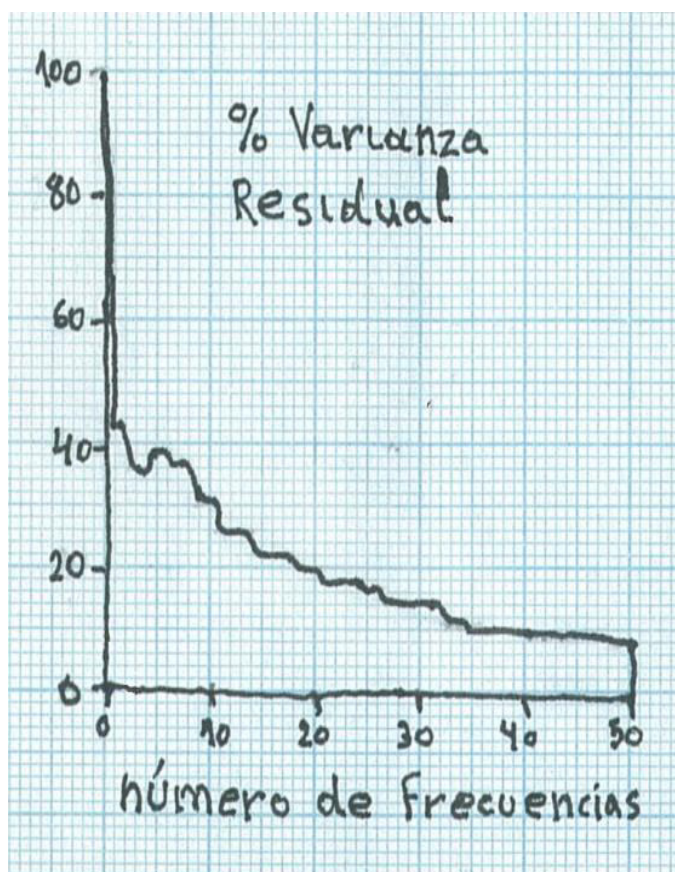


Figura 3.8 Ciclo Puro. [5]



Figura 3.9 Medio Ciclo Ficticio Invertido. [5]

Se nota que hay poca diferencia entre las dos opciones, excepto para los primeros términos (menos de 10, lo cual indica una tendencia globalmente asimétrica, pero no un evento inicial o final importante), también se nota que hay términos que, tomados aisladamente, aumentan esa varianza en vez de reducirla, lo que indica que esas frecuencias no corresponden a componentes cíclicas reales de la

secuencia. El desarrollo se debe limitar en frecuencias que corresponden a una bajada significativa de la varianza residual, en el caso del pozo 29 se representan las curvas suavizadas correspondientes a valores que cumplen con ese criterio, en ambas opciones (con un valor menor a los escogidos se obtenían solo dos ciclos principales).

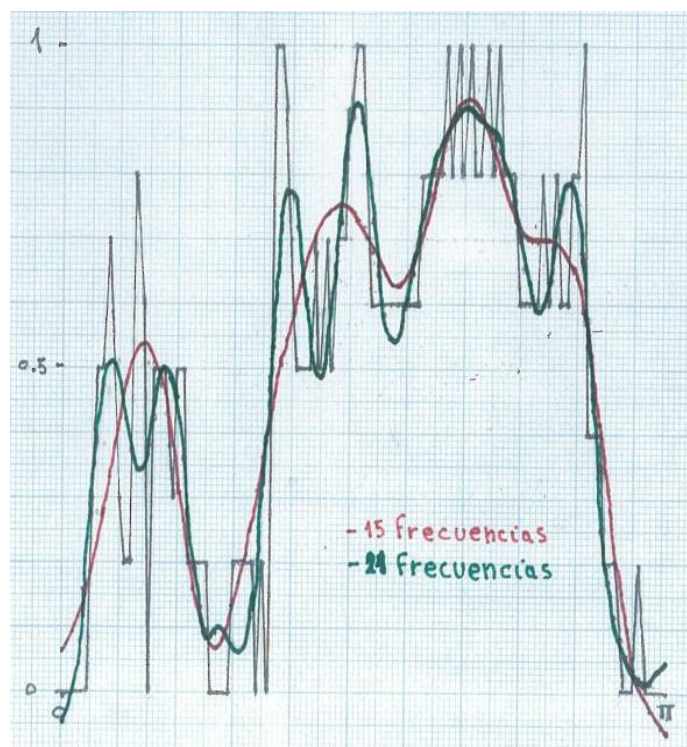


Figura 3.10 Ciclo Puro. [5]

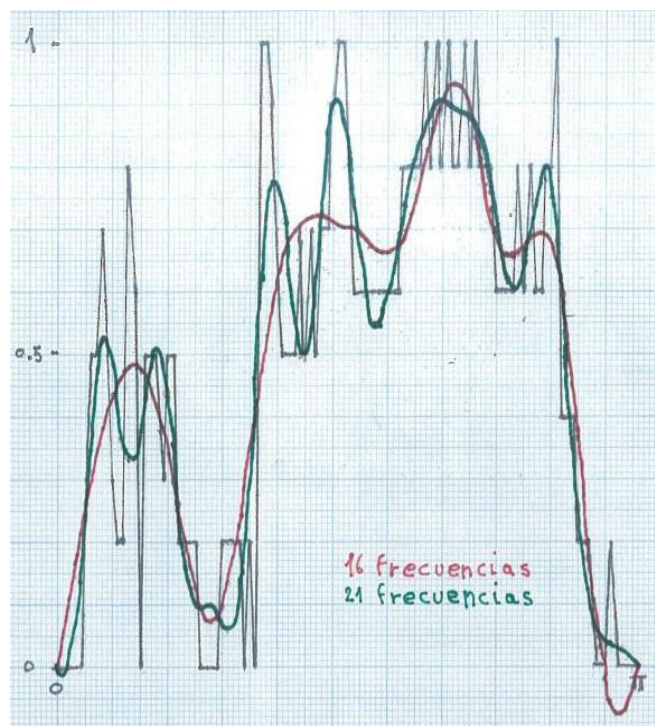


Figura 3.11 Medio Ciclo Ficticio Invertido. [5]

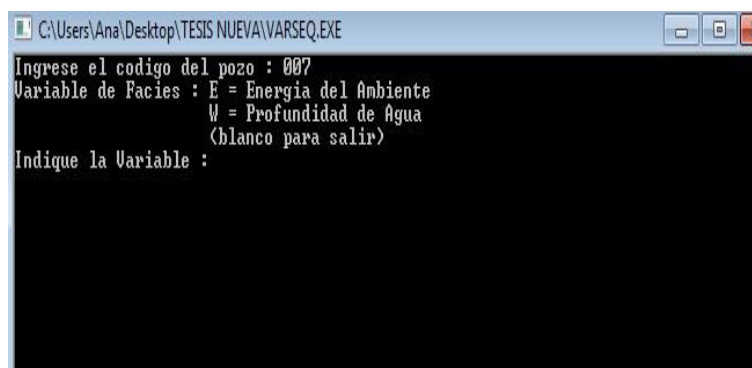
Como en el diagrama de varianza residual, se nota que a nivel de los ciclos menores que nos interesan en el caso del pozo 29 casi no hay diferencias, eso parece indicar que los eventuales eventos tectónicos que pueden haber influenciado la sedimentación no interfieren con los ciclos que representan la mayor parte de la varianza de la curva (ni son causantes de esos ciclos).

Con esos resultados se determina un rango de valores de frecuencia de corte para aplicar a los demás pozos y tratar de encontrar una función eustática común para todos.

3.5.2.2. Uso de Fortran 95 para suavización de curvas por Serie de Fourier

Las siguientes imágenes muestran los pasos que se prosiguieron para la obtención de curvas suavizadas, así como las opciones y elementos que constituyen este programa.

Como se puede observar en esta primera imagen se tiene las variables de facies a elegir, señalando que E es para Energía del ambiente y W para profundidad de agua.



```
C:\Users\Ana\Desktop\TESIS NUEVA\VARSEQ.EXE
Ingrese el codigo del pozo : 007
Variable de Facies : E = Energia del Ambiente
                   W = Profundidad de Agua
                   (blanco para salir)
Indique la Variable :
```

Figura 3.12 Ingreso de variables en FORTRAN 95
Hecha por la autora, 2015

Luego de que se elige la variable de facie, el programa indica que método matemático se prefiere para suavizar las curvas.

```

C:\Users\Ana\Desktop\TESIS NUEVA\VARSEQ.EXE
Ingrese el codigo del pozo : 007
Variable de Facies : E = Energia del Ambiente
                   W = Profundidad de Agua
                   (blanco para salir)
Indique la Variable : E
Tipo de Procesamiento : M = Media Movil
                       F = Serie de Fourier
                       P = Particion Optima
Indique el tipo : P
Tipo de Regresion asociada : R = Lineal en cada bloque
                           P = Particion Poligonal entre puntos de la Serie
                           S = Particion simple (Bancos de composicion fija)
Indique el tipo de Regresion : S
Variable de Facies : E = Energia del Ambiente
                   W = Profundidad de Agua
                   (blanco para salir)
Indique la Variable : W
Tipo de Procesamiento : M = Media Movil
                       F = Serie de Fourier
                       P = Particion Optima
Indique el tipo : F
Simetria para complementar el medio Ciclo : C = Central (ciclo periodico)
                                             E = Espejo (evento atenuado)
Indique el tipo : E_
  
```

**Figura 3.13 Elección del método matemático
Hecha por la autora, 2015**

Luego este programa al procesar la información que se indicó, muestra un gráfico que corresponde al porcentaje de varianza residual, y en su parte posterior pregunta el número particiones o frecuencias de acuerdo al método matemático seleccionado.

Se anexa la siguiente tabla que muestra valores de los datos ingresados y datos generados en el programa FORTRAN 95 como los de las variables XWDS (Variable Cruda de Profundidad del Agua), WES (Fourier Espejo de n Frecuencias - Profundidad del Agua).

**Tabla III. Profundidad TVD del Tope U superior
Pozo Sacha 007**

WELL. SACHA 007				
9.367 pies: Profundidad TVD del Tope U superior				
TVD (pies)	DEPTH (pies)	XWDS (%)	WES1 (%)	WES2 (%)
9.363	9.363	0,00	0,00	0,002
9.364	9.364	0,00	11,034	3,726
9.365	9.365	0,00	21,232	8,07
9.366	9.366	0,00	29,869	13,475
9.367	9.367	0,00	36,416	20,056
9.368	9.368	50,00	40,599	27,541
9.369	9.369	50,00	42,43	35,291
9.370	9.370	50,00	42,19	42,416
9.371	9.371	50,00	40,376	47,946
9.372	9.372	50,00	37,619	51,043
9.373	9.373	50,00	34,589	51,198
9.374	9.374	50,00	31,892	48,36
9.375	9.375	37,50	29,985	42,995
9.376	9.376	25,00	29,119	36,026
9.377	9.377	37,50	29,31	28,679
9.378	9.378	37,50	30,352	22,264
9.379	9.379	0,00	31,865	17,914
9.380	9.380	18,75	33,367	16,358

WELL. SACHA 007				
9.367 pies: Profundidad TVD del Tope U superior				
TVD (pies)	DEPTH (pies)	XWDS (%)	WES1 (%)	WES2 (%)
9.381	9.381	50,00	34,364	17,751
9.382	9.382	0,00	34,438	21,628
9.383	9.383	0,00	33,323	26,973
9.384	9.384	50,00	30,957	32,416
9.385	9.385	50,00	27,499	36,511
9.386	9.386	37,50	23,315	38,049
9.387	9.387	50,00	18,926	36,344
9.388	9.388	0,00	14,937	31,419
9.389	9.389	0,00	11,951	24,05
9.390	9.390	18,75	10,483	15,658
9.391	9.391	50,00	10,886	8,051
9.392	9.392	18,75	13,301	3,065
9.393	9.393	0,00	17,641	2,183
9.394	9.394	0,00	23,604	6,21
9.395	9.395	0,00	30,716	15,073
9.396	9.396	0,00	38,394	27,795
9.397	9.397	12,50	46,03	42,666
9.398	9.398	100,00	53,063	57,558
9.399	9.399	100,00	59,047	70,339
9.400	9.400	87,50	63,70	79,29
9.401	9.401	81,25	66,92	83,434
9.402	9.402	62,5	68,778	82,71
9.403	9.403	62,5	69,487	77,957
9.404	9.404	75,00	69,354	70,711
9.405	9.405	75,00	68,716	62,86
9.406	9.406	31,25	67,885	56,246
9.407	9.407	62,50	67,102	52,287
9.408	9.408	62,50	66,504	51,702
9.409	9.409	62,50	66,116	54,407
9.410	9.410	62,50	65,865	59,573
9.411	9.411	62,50	65,606	65,841
9.412	9.412	62,50	65,166	71,645
9.413	9.413	75,00	64,388	75,548
9.414	9.414	75,00	63,165	76,544
9.415	9.415	75,00	61,473	74,253
9.416	9.416	62,50	59,378	68,974

WELL. SACHA 007				
9.367 pies: Profundidad TVD del Tope U superior				
TVD (pies)	DEPTH (pies)	XWDS (%)	WES1 (%)	WES2 (%)
9.417	9.417	62,50	57,025	61,605
9.418	9.418	62,50	54,622	53,439
9.419	9.419	43,75	52,393	45,899
9.420	9.420	43,75	50,546	40,25
9.421	9.421	43,75	49,232	37,358
9.422	9.422	43,75	48,517	37,531
9.423	9.423	31,25	48,367	40,476
9.424	9.424	31,25	48,655	45,369
9.425	9.425	31,25	49,183	51,03
9.426	9.426	75,00	49,712	56,154
9.427	9.427	75,00	50,01	59,577
9.428	9.428	62,50	49,887	60,501
9.429	9.429	62,50	49,238	58,651
9.430	9.430	43,75	48,057	54,329
9.431	9.431	43,75	46,444	48,347
9.432	9.432	43,75	44,591	41,859
9.433	9.433	31,25	42,753	36,122
9.434	9.434	31,25	41,201	32,236
9.435	9.435	43,75	40,183	30,914
9.436	9.436	31,25	39,878	32,342
9.437	9.437	31,25	40,365	36,146
9.438	9.438	31,25	41,606	41,49
9.439	9.439	56,25	43,451	47,268
9.440	9.440	56,25	45,656	52,348
9.441	9.441	56,25	47,922	55,822
9.442	9.442	56,25	49,936	57,182
9.443	9.443	56,25	51,422	56,405
9.444	9.444	56,25	52,179	53,912
9.445	9.445	43,75	52,108	50,433
9.446	9.446	43,75	51,229	46,805
9.447	9.447	43,75	49,668	43,76
9.448	9.448	43,75	47,636	41,763
9.449	9.449	43,75	45,395	40,937
9.450	9.450	43,75	43,207	41,076
9.451	9.451	43,75	41,302	41,748

WELL. SACHA 007				
9.367 pies: Profundidad TVD del Tope U superior				
TVD (pies)	DEPTH (pies)	XWDS (%)	WES1 (%)	WES2 (%)
9.452	9.452	43,75	39,836	42,45
9.453	9.453	43,75	38,876	42,752
9.454	9.454	31,25	38,39	42,417
9.455	9.455	43,75	38,271	41,433
9.456	9.456	43,75	38,354	39,993
9.457	9.457	31,25	38,459	38,402
9.458	9.458	31,25	38,429	36,973
9.459	9.459	43,75	38,167	35,935
9.460	9.460	43,75	37,651	35,379
9.461	9.461	43,75	36,951	35,263
9.462	9.462	31,25	36,211	35,46
9.463	9.463	31,25	35,628	35,836
9.464	9.464	31,25	35,411	36,312
9.465	9.465	18,75	35,74	36,905
9.466	9.466	50,00	36,724	37,717
9.467	9.467	50,00	38,369	38,888
9.468	9.468	37,50	40,566	40,513
9.469	9.469	37,50	43,094	42,579
9.470	9.470	50,00	45,639	44,915
9.471	9.471	50,00	47,838	47,196
9.472	9.472	50,00	49,325	48,995
9.473	9.473	50,00	49,784	49,868
9.474	9.474	50,00	48,998	49,452
9.475	9.475	37,50	46,881	47,545
9.476	9.476	37,50	43,49	44,158
9.477	9.477	37,50	39,023	39,507
9.478	9.478	37,50	33,788	33,976
9.479	9.479	37,50	28,16	28,032
9.480	9.480	37,50	22,525	22,144
9.481	9.481	18,75	17,227	16,703
9.482	9.482	0,00	12,515	11,967
9.483	9.483	0,00	8,514	8,038
9.484	9.484	0,00	5,209	4,868
9.485	9.485	0,00	2,453	2,277
9.486	9.486	0,00	0,001	0,001

3.6. Procesamiento de la secuencia de facies

3.6.1. Litologías encontradas en los registros de pozos

La información interpretada de las curvas de un registro de pozo nos permite hacer un análisis petrofísico y diferenciar los diferentes tipos de rocas y los ambientes a los cuales pertenecen.

Carbón vegetal

El carbón se origina por la descomposición de vegetales terrestres, hojas, maderas, cortezas, y esporas, que se acumulan en zonas pantanosas, lagunares o marinas, de poca profundidad. Los vegetales muertos se van acumulando en el fondo de una cuenca. Quedan cubiertos de agua y, por lo tanto, protegidos del aire que los destruiría.

La carbonización comienza cuando una capa de materia vegetal se comprime por un depósito superior de nueva materia orgánica y de sedimentos arcillosos. La compresión provoca la eliminación del oxígeno con lo que se genera un ambiente anaerobio en el que

bacterias transforman la materia orgánica en una sustancia rica en carbono.

- Reconocimiento: Se lo diferencia generalmente porque presenta una baja densidad en la lectura de densidad aunque tenga una alta resistividad como presentan las areniscas.

Caliza

Es una roca sedimentaria compuesta mayormente de cristales de calcita y aragonito los cuales son diferentes formas de cristalización del carbonato de calcio (CaCO_3). La mayoría de las calcitas sobre todo en cuencas sedimentarias se forman por la acumulación de restos de los esqueletos de organismos marinos como corales o foraminíferos.

- Reconocimiento: Las calizas presentan una resistividad relativamente alta muy característica, así como una alta densidad; superior a $2,65 \text{ g/cm}^3$, y alta velocidad en el registro sísmico (70 us/ft). También se las reconoce ya que muestran lecturas muy elevadas

que en ocasiones sobrepasan la escala de micro-normal MNO y micro-inversa MIN.

Tabla IV. Propiedades petrofísicas utilizadas para el reconocimiento de calizas

Parámetro	Símbolo	Unidad	Rango
Gamma Ray	Gr	API	40 – 60
Resistividad	Rxo	Ohm-m	100
Densidad	Rhob (bulk density)	g/cm ³	>2,65
Sónico	DT24	us/ft	<70
Porosidad	Neutron Porosity	pu	10 – 20

Lutita

La lutita es una roca sedimentaria detrítica o clástica de textura pelítica; es decir, integrada por detritos clásticos constituidos por partículas de los tamaños de la arcilla y del limo. En las lutitas negras el color se debe a existencia de materia orgánica. Si la cantidad de ésta es muy elevada se trata de lutitas bituminosas.

Los colores gris, gris azulado, blanco y verde son característicos de ambientes deposicionales ligeramente reductores. Las coloraciones rojas y amarillas representan ambientes oxidantes.

Las lutitas son porosas pero poco permeables, porque sus poros son muy pequeños y no están bien comunicados entre ellos. Pueden ser rocas madre de petróleo y de gas natural. Por metamorfismo se convierten en pizarras o en filitas. Su diagénesis corresponde a procesos de compactación y deshidratación.

Reconocimiento: Las lutitas se las reconoce fácilmente por presentar una respuesta de GR muy alta junto a una resistividad baja. Además las lutitas por lo general tienen una densidad inferior a 2,40 g/cm³.

Tabla V. Propiedades petrofísicas utilizadas para el reconocimiento de lutitas.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Rango
Gamma Ray	Gr	API	120 – 140
Resistividad	Rxo	Ohm-m	<10

Densidad	Rhob (bulk density)	g/cm ³	2,35
Sónico	DT24	us/ft	90 – 100
Porosidad	Neutron Porosity	pu	>25

Arenisca

Es una roca sedimentaria de tipo detrítico de color variable que contiene clastos de tamaño de arena por lo cual tiene espacios intersticiales entre sus granos. Generalmente estos granos se encuentran unidos por una matriz de sílice o de carbonado de calcio. En estos espacios intersticiales es donde se acumula el petróleo o el agua en un yacimiento petrolero. Se depositan en varios ambientes sedimentarios pero en general de alta energía ya que requieren más energía de las corrientes de agua para transportar los granos de arena a su sitio de depositación.

Reconocimiento: Las arenas son generalmente fáciles de reconocer debido al cruce de las curvas densidad y neutrón así como también se utiliza la lectura de las

curvas micros resistivos (separación de micro normal y micro inversa). Según la porosidad y el contenido de arcilla (indicado por el GR y el neutrón), se distingue entre arenas gruesas y finas.

Tabla VI. Propiedades petrofísicas utilizadas para el reconocimiento de areniscas.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Rango
Gamma Ray	Gr	API	<80
Resistividad	Rxo	Ohm-m	50 - 300
Densidad	Rhob (bulk density)	g/cm ³	2,45 – 2,55
Sónico	DT24	us/ft	80 - 90
Porosidad	Neutron Porosity	pu	10 – 20

Limolita

Roca sedimentaria endurecida compuesta principalmente por partículas angulares del tamaño de las del limo y que no es laminada ni se parte fácilmente en capas delgadas.

La limolita, la cual es dura y resistente, se encuentra en capas que rara vez son lo bastante gruesas como para ser clasificadas como formaciones. Son intermedias entre la arenisca y la pizarra arcillosa, pero no tan común como ellas.

Reconocimiento: El reconocimiento de limolitas se lo hace comúnmente descartando a que litología no corresponde la zona que se identifica en un registro de pozo. Se clasifica generalmente como limolita a una zona con menor densidad que una arenisca pero mayor respuesta de GR.

Los limos no presentan valores típicos en un registro eléctrico como Gr, Rxo, Rho ya que va a mostrar mayor o menor respuesta a uno de estos valores dependiendo de las rocas a las cuales estén asociados estos limos. Así si un limo está próximo a una caliza mostrara Gr menor a 80 Api, Rxo de 100 Ohm-m pero si este limo está asociado a lutitas puede mostrar Gr de más de 120 Api y Rxo inferior a 50 Ohm-m.

3.6.2. Nivel de energía (ENRG) de las litologías descritas

Al referirnos a nivel de energía nos referimos a la cantidad de energía que se necesita para transportar y depositar los sedimentos descritos en el registro.

Este nivel de energía se entiende como el movimiento y la fuerza del agua de un drenaje para el transporte de estos sedimentos. Por lo cual se ha ordenado a la litología de acuerdo a su cantidad de energía de ambiente y al tamaño de grano asignándole el valor de 1 a la que fue depositada en un ambiente de menor energía y 7 a la depositada en un ambiente de mayor energía.

Tabla VII. Facies sedimentarias descritas en función de la cantidad de energía descrita en los registros de pozo.

	Litología	Símbolo	Color
1	Carbón vegetal in situ, suelo orgánico	CB	
2	Caliza siderítica o pirítica anóxica	CS	
3	Caliza o limolita calcárea lagunar	CA	
4	Lutita arcillosa marina	LU	
5	Limolita calcárea o cementada	LC	
6	Arenisca fina laminada o con flasers	AF	
7	Arenisca gruesa bien sorteada de canal	AG	

Estas facies son identificadas con facilidad y sirven de base para clasificarlas en facies dependiendo de la profundidad del agua.

3.6.3. Ordenamientos de las litologías descritas en secuencias de facies

Las litologías previamente identificadas se ordenan en secuencias de barras y canales las cuales en ocasiones tienen terminaciones hacia el tope de paleo-suelos o carbón lo cual refleja variaciones de la profundidad del agua y pueden ser utilizadas para evidenciar variaciones relativas del nivel del mar. Los autores clásicos utilizaron secuencias ordenadas de ese tipo para poner en evidencia las variaciones cíclicas de nivel del mar en las secuencias sedimentarias de plataforma del Carbonífero (Ciclotemas de carbón – Duff & Walton), ellos utilizaban estos principios para definir secuencias sedimentarias y datos paleontológicos que no estaban disponibles a través de los datos de registros eléctricos de pozos que disponemos hoy en día.

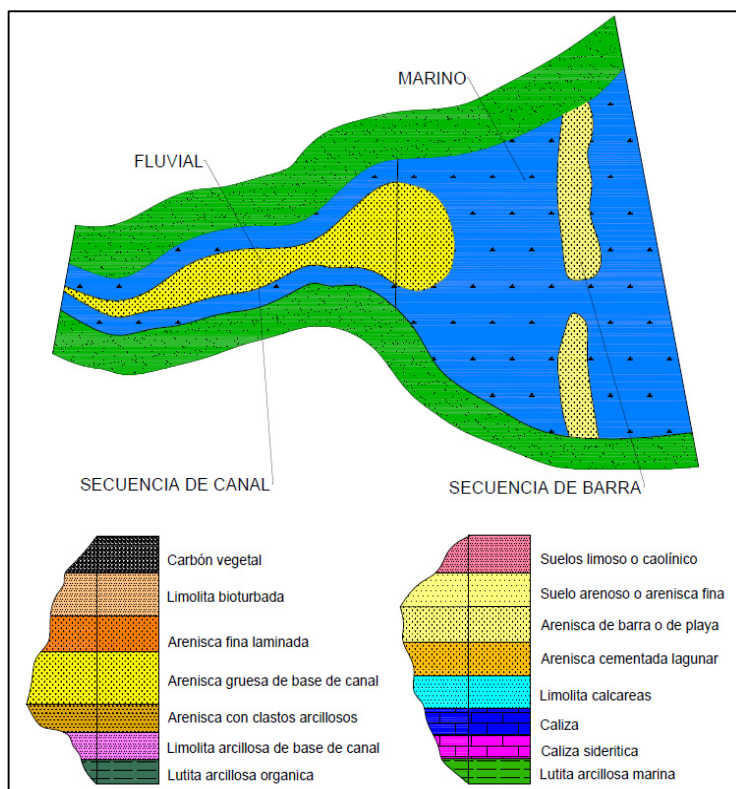


Figura 3.16 Secuencias sedimentarias para barras y canales.

Fuente: Apuntes de Pierre Kummert, 2014

Existen litologías muy similares en cuanto a nivel de energía pero pueden provenir de una profundidad de nivel de agua muy distinta. Una manera de diferenciar estas litologías es ubicarlas dentro de las secuencias de facies de las cuales forman parte. Estas dos secuencias son visibles en la arenisca U (completa e incompleta hasta combinadas en un mismo pozo).

Se escribió un pequeño programa para transformar las 7 facies iniciales determinadas por energía de ambiente a las de la secuencia-tipo de profundidad de agua tomando en cuenta las asociaciones entre litologías sucesivas, y con eso probar los métodos de procesamiento de la secuencia de cada pozo; esa conversión automática resultó solo parcialmente correcta y la secuencia final tuvo que ser corregida manualmente pozo por pozo (Kummert, 2014).

3.6.4. Litologías en base a la profundidad de agua (WDPT)

Para obtener estas litologías se las integró a las dos secuencias (Barras y canales) en una sola lista ordenada de números de menor a mayor profundidad de agua.

Estas litologías son empíricas e interpretadas observando el tipo de secuencia que se observe en el registro. Esta secuencia representa un ambiente sea de barra o de canal donde los sedimentos tienen un orden para su depositación; granodecreciente en el caso de un canal y granocreciente para una barra.

Observamos así que una misma limolita puede en realidad ser tres diferentes tipos de limolita dependiendo de las facies que se encuentren próximas a ella.

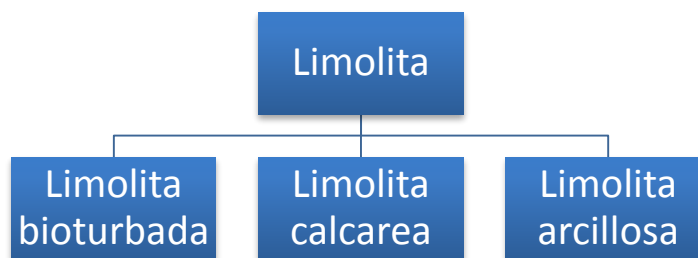


Figura 3.17 Diferentes tipos de limolita dependiendo de las facies.

Fuente: Apuntes de Pierre Kummert, 2014

Limolita bioturbada.- va a estar relacionada a un ambiente más somero donde haya disminuido el aporte sedimentario.

Limolita calcárea.- se encuentra próxima a las calizas o intercalada mostrando una disminución de la profundidad del agua respecto a la depositación de la caliza.

Limolita arcillosa.- Intercalada con capas identificadas de lutitas muestra un ambiente sedimentario más profundo.



Figura 3.18 Diferentes tipos de arenisca.

Fuente: Apuntes de Pierre Kummert, 2014

Arenisca de playa.- corresponde a las arenas de barras donde se observa una secuencia grano creciente en su depositación por relleno de la cuenca sedimentaria.

Arenisca cementada.- una arena depositada sobre una facie de calizas por lo cual posee un cemento calcáreo.

Arenisca fina.- se deposita sobre la arenisca gruesa de canal al comenzar a llenarse el mismo y disminuir el espacio de acomodamiento.

Arenisca gruesa.- es la arena que se deposita en el fondo del canal fluvial donde hay alta energía capas de poder transportar sedimentos más gruesos.

Arenisca con clastos.- una arena depositada durante el inicio de la erosión del fondo de un canal donde se mezclan sedimentos de arcillas o lutitas de la base del canal con arenas gruesas.

Litología	Símbolo	Color
Carbón vegetal in situ, suelo		
1 orgánico	CB	
2 Suelo caolinico (underclay)	UC	
3 Suelo limoso y caolinico	LS	
Suelo arenoso o Arenisca fina de		
4 duna	AS	
Arenisca de playa o de barra		
5 litoral	AB	
6 Limolita bioturbada o laminada	Li	
Arenisca cementada de borde de		
7 laguna	AC	
Arenisca fina laminada o con		
8 flasers	AF	
9 Limolita calcarea o cementada	LC	
Arenisca gruesa bien sorteada		
10 de canal	AG	

11	Caliza o limolita calcarea lagunar	CA	
12	Arenisca con clastos arcillosos	AL	
	Caliza sideritica o piritosa		
13	anoxica	CS	
	Limolita arcillosa de base de		
14	canal	LA	
	Lutita organica, carbon		
15	transportado	LO	
	Hard-Ground (glauconita,		
16	conchas, fosfato)	HG	
17	Lutita arcillosa marina	LU	




Figura 3.19 Cuadro de litología de facies usando la variable Profundidad de agua (WDPT). [5]

3.6.4. Descripción de facies sedimentarias a partir de los registros de pozos

Se observa la descripción de dos pozos seleccionados el cual uno corresponde a un registro antiguo como el del Sacha-123 y un registro nuevo para el caso de Sacha-341D.

Una vez interpretado la litología de los registros se realiza un archivo de extensión LAS (Log American

Standar) con la información de la facie observada tanto en valores de energía como de profundidad de agua.

Este archivo es el utilizado para ingresar la información de las facies al programa PETREL donde se puede graficar las curvas y realizar columnas estratigráficas de los pozos.

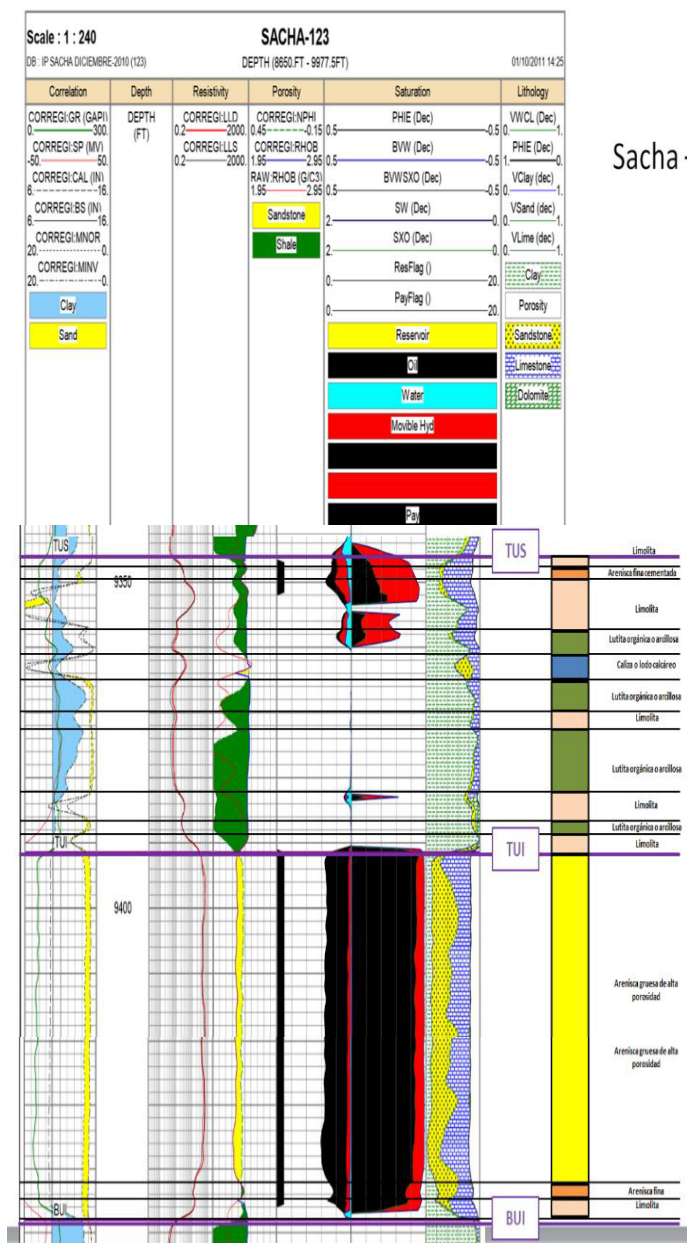


Figura 3.20 Interpretación de las facies en la arenisca U en el pozo Sacha-123.

Fuente: cortesía RIO NAPO CEM, 2014

Tabla VIII. Interpretación de facies con valores numéricos de facies de Energía y Profundidad de Agua del pozo Sacha – 123.

WELL. SACHA 123							
9346 pies: Profundidad TVD del Tope U superior							
TVD(pies)	DEPT(pies)	ENRG	WDPT	TVD(pies)	DEPT(pies)	ENRG	WDPT
9.342	9.344	4	15	9.394	9.394	7	9
9.344	9.344	4	15	9.396	9.396	7	9
9.346	9.346	4	15	9.398	9.398	7	9
9.348	9.348	5	5	9.400	9.400	7	9
9.350	9.350	5	13	9.402	9.402	7	9
9.352	9.352	5	13	9.404	9.404	7	9
9.354	9.354	5	13	9.406	9.406	7	9
9.356	9.356	5	13	9.408	9.408	7	9
9.358	9.358	1	14	9.410	9.410	7	9
9.360	9.360	4	15	9.412	9.412	7	9
9.362	9.362	3	10	9.414	9.414	7	9
9.364	9.364	1	14	9.416	9.416	7	9
9.366	9.366	4	15	9.418	9.418	7	9
9.368	9.368	4	15	9.420	9.420	7	9
9.370	9.370	4	15	9.422	9.422	7	9
9.372	9.372	5	13	9424.	9424	7	9
9.374	9.374	4	15	9426.	9426	7	9
9.376	9.376	4	15	9428.	9428	7	9
9.378	9.378	4	15	9430.	9430	7	9
9.380	9.380	4	15	9.432	9.432	5	5
9.382	9.382	4	15	9.434	9.434	6	11
9.384	9.384	5	13	9.436	9.436	5	13
9.386	9.386	5	13	9.438	9.438	5	13
9.390	9.390	5	5	9.442	9.442	4	15
9.392	9.392	6	7				

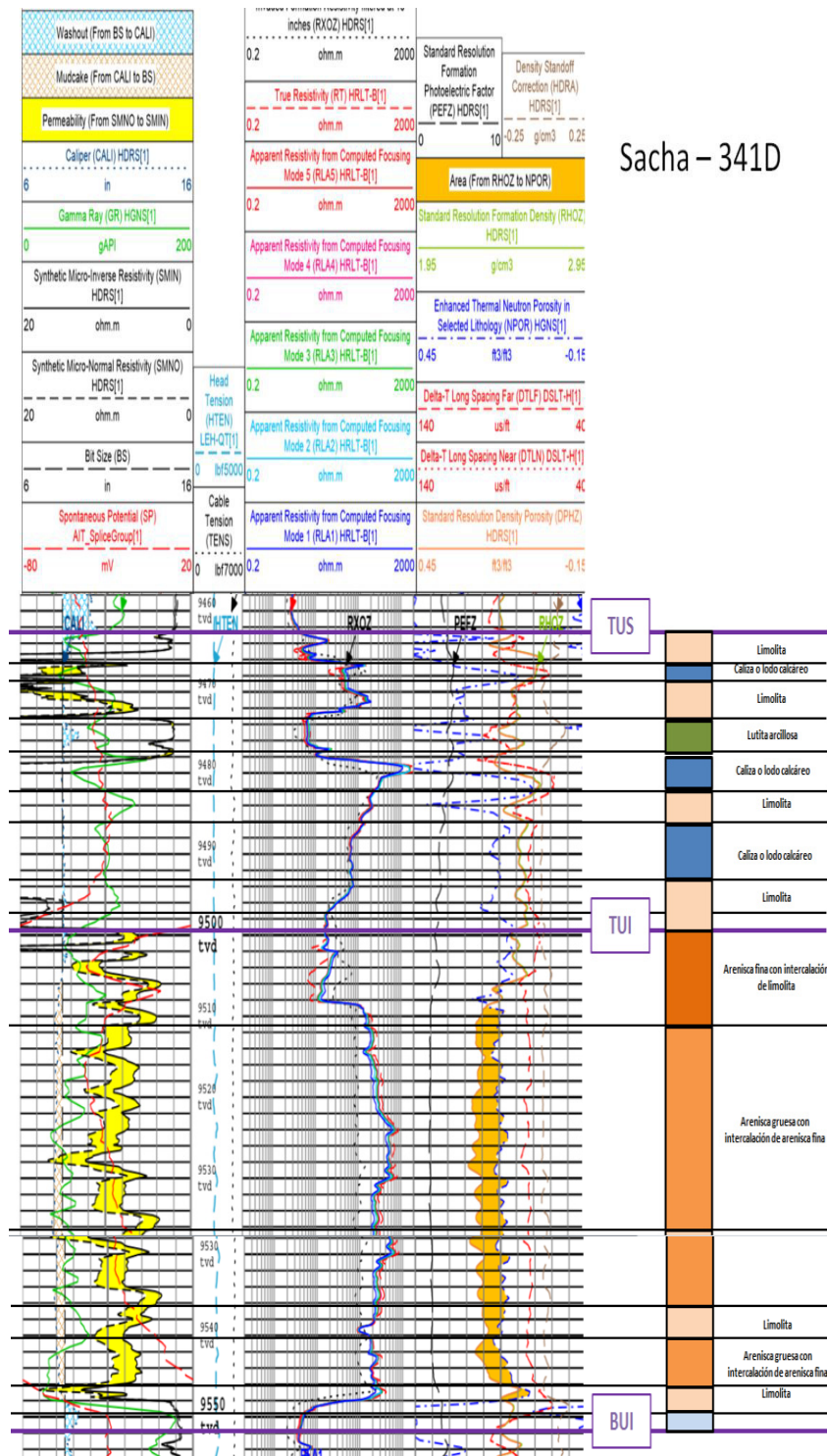


Figura 3.21 Interpretación de las facies en la arenisca U en el pozo Sacha - 341D.

Fuente: cortesía RIO NAPO CEM, 2014

Tabla IX. Interpretación de facies con valores numéricos de facies de Energía y Profundidad de Agua del pozo Sacha – 341D.

WELL. SACHA 341-D							
9462 pies: Profundidad TVD del Tope U superior							
TVD(pies)	DEPT(pies)	ENRG	WDPT	TVD(pies)	DEPT(pies)	ENRG	WDPT
9.458	10.438,6	4	15	9.508	10.493,4	5	5
9.460	10.440,8	4	15	9.510	10.495,5	7	9
9.462	10.443,0	5	13	9.512	10.497,7	6	7
9.464	10.445,2	3	10	9.514	10.499,9	7	9
9.466	10.447,4	2	12	9.516	10.502,1	6	7
9.468	10.449,6	3	10	9.518	10.504,3	7	9
9.470	10.451,8	5	8	9.520	10.506,5	7	9
9.472	10.453,9	5	8	9.522	10.508,7	7	9
9.474	10.456,1	4	15	9.524	10.510,9	7	9
9.476	10.458,3	5	13	9.526	10.513,1	7	9
9.478	10.460,5	4	15	9.528	10.515,2	7	9
9.480	10.462,7	3	10	9.530	10.517,4	7	9
9.482	10.464,9	2	12	9.532	10.519,6	7	9
9.484	10.467,1	5	8	9.534	10.521,8	7	9
9.486	10.469,3	3	10	9.536	10.524,0	7	9
9.488	10.471,5	3	10	9.538	10.526,2	6	7
9.490	10.473,6	3	10	9.540	10.528,4	6	7
9.492	10.475,8	3	10	9.542	10.530,6	7	9
9.494	10.478,0	5	8	9.544	10.532,8	7	9
9.496	10.480,2	3	10	9.546	10.534,9	6	7
9.498	10.482,4	3	10	9.548	10.537,1	5	13
9.500	10.484,6	5	8	9.550	10.539,3	4	15
9.502	10.486,8	6	6	9.552	10.541,5	4	15
9.504	10.489,0	3	10	9.554	10.543,7	4	15
9.506	10.491,2	6	6	9.556	10.545,9	4	15
				9.558	10.548,1	4	15

CAPITULO 4

4. RESULTADOS

4.1. Determinación de los ciclos sedimentarios que conforman la Arenisca U

Los valores numéricos de las facies descritas en los pozos son proyectados en una línea (azul). Sin embargo usando esta línea, los cambios cíclicos de los eventos transgresivos o regresivos son difíciles de leer, además de que en la mayoría de los pozos

se muestra con valores erráticos y cambios bruscos en su numeración.

Por lo que se empleó métodos estadísticos como Partición Simple o Fourier para alisar la línea de color azul, obteniéndose unas nuevas curvas (verde y roja) que permitan visualizar y analizar de mejor manera los cambios más representativos y tendencia que se da en las facies sedimentarias al pasar de un ambiente profundo cuando se ha producido una transgresión y un ambiente somero cuando se ha producido una regresión.

Con estas nuevas curvas también se puede ubicar con mayor precisión los topes y bases a los ciclos identificados.

En este proyecto la variable Profundidad de agua (WDPT) y el método de Fourier, fueron considerados como los ideales para identificar de mejor manera los ciclos menores sedimentarios de la arenisca U, y luego proseguir con la realización de los distintos mapas de facies correspondiente a cada uno de ellos. *Ver Anexo A y Anexo B.*

4.2. Descripción de eventos en caso ejemplo Pozo Sacha – 007 y Pozo Sacha -161

A este primer evento que ocurre en la arenisca U inferior se lo identificó como LST (Lowstand System Track), el cual se lo considera en algunas fuentes como un sistema agradacional de bajo nivel que se sitúa en el horizonte estratigráfico correspondiente al nivel más bajo, alcanzado después de un intervalo prolongado de caída del nivel del mar, y después del cual el nivel permanece bajo durante un intervalo dado de tiempo. En este evento hay una gran variación de espesor entre los pozos, por lo que resultó mejor para su estudio y análisis dividirlo en dos partes equivalentes, teniéndose como resultado dos mapas de facies, uno de su parte inferior y otro de su parte superior. En las columnas de facies de los pozos del sector norte del campo Sacha, en la mayoría de estos se puede ver un cambio de litología visible, desde su base inicialmente con sedimentos de una profundidad mayor pero de menor energía, como son las lutitas arcillosas y presencia de depósitos calcáreos, para luego ser ocupado su espacio generalmente por grandes espesores de areniscas gruesas de canal y barras de arena. El pozo Sacha 007 al igual que otros, como el Sacha- 050 y el Sacha-034, poseen un mayor espesor de arena gruesa de canal en este nivel sedimentario. También se observan en las columnas de facies de algunos pozos, que están más

constituidos de sedimentos calcáreos y finos como se puede apreciar en la figura del pozo Sacha-161. Generalmente en el LST el mayor aporte sedimentario es fluvial.

El segundo evento menor sedimentario que se observa y se determinó en los pozos del campo Sacha es el TST, y que corresponde a una subida del nivel del mar. Se visualizó que algunos de los pozos de la zona norte de este campo, presentaban areniscas gruesas de canal, y en otros se ve interrumpida por una secuencia de caliza con limos y limos con arcilla mostrando un aumento en la profundidad del agua. Según la secuencia de facies estos sedimentos pueden corresponder a un ambiente lacustre con algo de influencia marina. Es un nivel retrogradacional.

Se produce un tercer evento conocido como HST, que es un nivel agradacional alto. Para el pozo Sacha 007 se observa en las curvas y columnas de facies que aún se tiene la arenisca gruesa de canal alternada con arenisca cementada y arenisca de playa. Se observa en algunos pozos una litología de cuerpos calcáreos y suelos caolinícos, limosos. También se dividió en secciones a este evento, por lo que se tiene un mapa de facies denominado HST inferior y otro mapa de facies HST superior.

El siguiente evento que se tiene, corresponde a la Primera transgresión de la arenisca U superior, y cuya litología en la mayoría de pozos corresponde a lutitas arcillosas marinas. Se deduce por su litología que para que los canales antes ocupados por diferentes tipos de arenas ahora estén rellenos de lutita arcillosa, es porque en esta transgresión la subida del nivel del mar fue alta y lenta, en comparación con la Transgresión ocurrida en la Arenisca U inferior. Aquí la influencia marina es bien alta y la fluvial es casi nula. Se depositan secuencias grano decreciente.

En la Arenisca U superior se tiene el evento regresivo denominado como RST, y en el cual se observa más depósitos de sedimentos finos como limolita arcillosa y depósitos calcáreos. Los canales antes ocupados con lutita arcillosa, ahora poseen sedimentos más gruesos por el inicio del retroceso del nivel del mar dejando zonas inundadas, y dándose la precipitación de carbonatos formando calizas y algunos cuerpos arenosos de matriz calcárea. Llegando al tope de la U superior se depositaron sedimentos de secuencia de barra por la influencia de marea como son calizas, limos y pequeños cuerpos de arenas finas que se puede atribuir a arenas de playa o suelos arenosos. *Ver Anexo C*

4.3. Curva modelo representativa de los ciclos transgresivos y regresivos de la arenisca U

Generalmente esta es la curva modelo representativa de los ciclos transgresivos y regresivos de la arenisca U.

Un 65 % de las curvas de los pozos del campo Sacha sección norte poseen una similitud con esta curva.

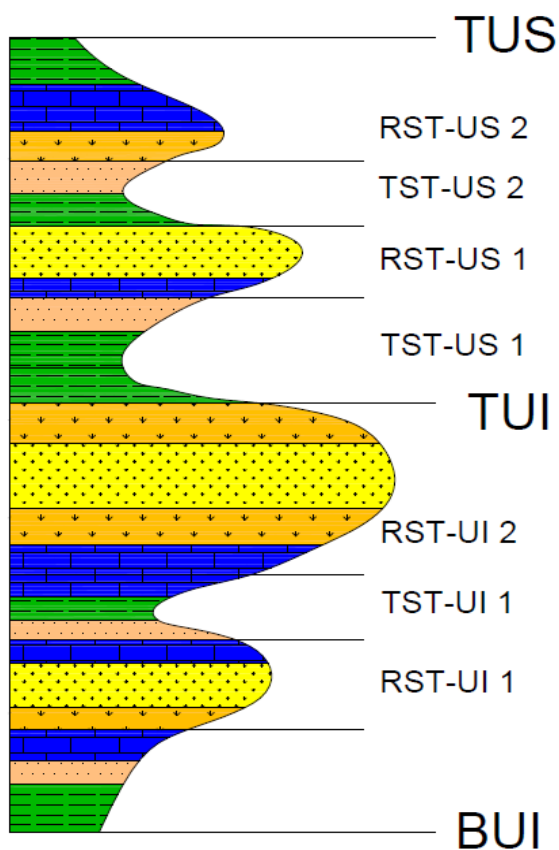


Figura 4.1 Columna tipo señalando los ciclos sedimentarios de la arenisca U en el Campo Sacha.

Fuente: Cortesía Rio Napo CEM, 2014

Observando las curvas alizadas de las columnas de facies de los pozos estudiados, se pudo observar en general que la Arenisca U está formada por eventos transgresivos y regresivos.

Ver Anexo D.

4.4. Interpretación de mapas paleogeográficos por ciclos o eventos menores sedimentarios.

Mapa de facies LST inferior de la Arenisca U Inferior (LST-UI).

Partiendo de una transgresión anterior en el cual se dio el depósito de la lutita U de la formación Napo, en este evento denominado LST del miembro Arenisca U inferior, se inicia con la progradación de sedimentos de granos gruesos sobre aquellas lutitas.

Con la caída del nivel del mar (regresión) y su retroceso del continente; en su nivel más bajo (LST), se da el relleno de los valles incisos que se habían formado en eventos anteriores a la arenisca U. Los depósitos en estos valles corresponden a areniscas gruesas de canal transportadas por las corrientes de

los ríos. También se observa en este mapa zonas que corresponden a una facie de una alta profundidad de agua como lo es la caliza siderítica o piritosa anóxica. La explicación de la presencia de esta facie probablemente corresponde a residuos del evento transgresivo anterior en la lutita U o son depósitos con minerales autigenos. En los pozos Sacha 170, Sacha 175h, 174h, Sacha 006, Sacha 039 se observan cuerpos arenosos de granos gruesos como finos, los cuales no están conectados a los depósitos en los valles, y cuya depositación en esas zonas se deba a la acción de corrientes de turbidez de dominio fluvial. En el LST inferior los espesores de arenas son menores, existe una mayor distribución de estas arenas y, el tamaño de sus granos son gruesos. Son consideradas arenas de muy buena calidad. *Ver Anexo E.*

Mapa de facies de LST superior de la Arenisca U Inferior (LST-UI).

Este mapa de facies corresponde a la parte superior del LST de la arenisca UI. En éste, ya se puede observar totalmente la depositación de arena gruesa de canal hacia el oeste del campo Sacha. También se observan depósitos de arenisca fina laminada o con flasers en los canales lo que indicaría el relleno

de sedimentos que se estaba dando en estas zonas, y por lo tanto el espacio de acomodamiento iba disminuyendo. Es apreciable también sedimentos calcáreos como limolitas de matrix calcárea y calizas, depositadas sobre sedimentos de limolita arcillosa y lutita marina que se observaba en el mapa anterior. Esto indicaría la reciente influencia del mar dando paso al evento posterior del miembro de la Arenisca U inferior.

Aquí los granos de arena se presentan más finos, lo que denotaría que en este evento totalmente (LST) la secuencia es grano decreciente. En el inicio de la depositación de la arenisca U inferior, es notable el cambio de ambiente sedimentario, ya que va de un ambiente de plataforma marino a un ambiente fluvial en este evento. (LST). *Ver Anexo F.*

Mapa de Facies de TST de la Arenisca U inferior (TST-UI).

Aquí se da la subida del nivel del mar, observándose ahora depósitos de sedimentos de granos finos como limolita arcillosa en zonas que se pueden estimar de menor profundidad.

La energía de la corriente de los ríos que transportaba los sedimentos de granos más gruesos ha disminuido, limitado por la influencia del mar. Se observan también áreas con facies

calcáreas cuya energía de depositación es menor que las que presentan las areniscas finas o de canal. En este evento también puede observarse la erosión que ha tenido el fondo del canal originado por las corrientes del río y del mar. La facie que indicaría esta erosión está dada por la arenisca con clastos arcillosos. El TST de la arenisca UI marcaría el inicio de un ambiente estuarino somero por la mayor influencia del mar adentrándose hacia el continente. En el pozo Sacha 10 y Sacha 253d se observa lutita orgánica o carbón transportado, que podrían indicarnos presencia de lagunas. En la mayoría de las columnas de facies de los pozos estudiados para esta zona del campo Sacha, este evento posee un espesor constante y pequeño entre 6 a 9 pies. *Anexo G.*

Mapa de Facies de HST inferior de la Arenisca U inferior (HSTinf.-UI)

En este evento sedimentario del miembro Arenisca U inferior inicialmente se observa en su mayoría zonas marinas estables por la presencia de sedimentos calcáreos y calizas. Los canales de arenisca gruesa se observan algo estrechos en comparación a los observados en los eventos anteriores debido a la acumulación de areniscas de borde de laguna y de barras litoral

acuñándose a facies próximas a ellas. En el HST inferior se aprecia también algunas facies que corresponde a ambientes lacustres o pantanosos. Presencia de suelos caolinícos en menor porcentaje y suelos limosos o arcillosos. El caolín precipita en profundidad, y reemplaza los espacios porosos antes ocupados de cuarzo en las areniscas. El espacio de acomodamiento también ha disminuido por el mayor aporte sedimentario. Ver *Anexo H*.

Mapa de Facies de HST superior de la Arenisca U inferior (HSTsup.-UI)

En el mapa de facies que corresponde a la parte superior del HST-UI, se observa ahora un mayor porcentaje de suelos caolinicos y limosos, por lo tanto mayor presencia de caolín, esto es visible en muestras de ripios y que en perforación indicaría que se está atravesando o se encuentra en el miembro Arenisca U inferior. En la mayoría de los casos la presencia de caolín en las arenas se considera corrosivo ya sea como cemento o matriz en ellas. Existe una influencia mayormente marina que fluvial en este evento. La presencia de depósitos de carbón en algunos pozos indicaría áreas pantanosas y más alejadas del mar.

En este evento, el ambiente sedimentario correspondería a uno marino somero próximo a la costa. *Ver Anexo I.*

Mapa de Facies de Transgresión inicial de la Arenisca de la U Superior (TiUS)

Este evento es bastante distinguible porque marca el límite entre los miembros Arenisca U superior y Arenisca U inferior. Y se puede observar el cambio brusco de un ambiente a otro en el reservorio U. En esta transgresión la subida del nivel del mar fue bastante rápida para depositar lutitas sobre los canales de areniscas, y que no dio espacio a la erosión. En la columna de facies observadas en la mayoría de pozos este evento posee un espesor constante. Facies calcáreas también es bastante visible en este cortejo sedimentario.

Ver Anexo J.

Mapa de Facies de RST inferior de la Arenisca U superior (RST1-US)

Muchos de los depósitos en el inicio de esta regresión son calcáreos (calizas y limos calcáreos). Esto se pudo deber a que aun en la disminución del nivel del mar quedaron zonas de lagos poco profundas sin influencia de ríos que pudieran depositar

arenas de canal y en su lugar depositaron estos sedimentos calcáreos. En este ciclo sedimentario se puede notar zonas aun con lutitas arcillosas marinas del evento anterior donde se encuentran ubicados los pozos: sachas 16, sachas 114, sachas 15, sachas 135, sachas 7, sachas 127, así como también es observable facies de calizas sideríticas que indicarían presencia de fauna calcárea. *Ver Anexo K.*

Mapa de Facies de RST Superior de la Arenisca US (RST2-US)

Finalmente en este mapa de facies, se puede observar un alineamiento y horizontalidad en los sedimentos más que nada de caliza y sedimentos calcáreos. Esto podría ser producto de la acción erosiva de las corrientes del mar que se dieron en la transgresión posterior que formó la Caliza A y la lutita en la base de esta caliza.

Pozos como el Sacha 63 y Sacha 136 presentan depósitos de arenas con matriz calcárea y los cuales están aislados respecto a los pozos vecinos. *Ver Anexo L.*

4.5. Correlación de los cortes estructurales: A1-B1, A2-B2, A3-B3, y A4-B4.

Se trazaron cuatro cortes estructurales en el mapa de ubicación de la zona norte del campo Sacha. *Ver ANEXO M.*

Corte A1-B1 Dirección NO-SE (Sacha 160d a Sacha 321d)

Se puede apreciar en este corte y en los demás, la conectividad de los cuerpos de arena tiende a ser en más bien con una dirección E-O, y pozos como el Sacha 214D y 321D con mayores espesores de arena en la Arenisca Ui nos demuestra que estos presentaban un espacio de acomodamiento mucho mayor que otros pozos próximos y puede ser debido a erosión en el fondo del canal o a depresiones ocasionadas por fallas. Los pozos con dirección Noroeste poseen sedimentos finos en el miembro Arenisca U inferior.

La Arenisca U Superior está caracterizada por calizas, lutitas y limolitas mayormente.

Corte A2-B2 Dirección NO-SE (Sacha 093 a Sacha 276d)

Se aprecia en este corte estructural, que pozo el 93 es el que posee un mayor espesor del reservorio Arenisca U inferior, por lo que se podría deducir que este se encuentra en una zona con una depresión mayor y por lo tanto posee un mayor espacio de acomodamiento, a pesar de la distancia de este pozo del

continente. Le sigue en orden de espesor el pozo Sacha 053. Observando los mapas de facies de cada uno de los eventos menores, y principalmente los que contengan las arenas, en el TST de la U inferior se puede observar arenisca arcillosa que indicaría erosión en el fondo de canal, eso podría explicar por qué hay un mayor espesor de esta litología en estos pozos, o podría ser una depresión formada antes de la depositación de la Arenisca U inferior, perteneciendo al paleo relieve que se formó antes del reservorio U. En la parte de la arenisca U superior para el pozo Sacha 093 se observa que no posee sedimentos de lutitas marinas y es mayor el depósito de sedimentos calcáreos, al observarse el mapa de facies de la Transgresión de la Arenisca U superior.

Corte A3-B3 Dirección NO-SE (Sacha 048 a Sacha 247d)

En las columnas litológicas de los pozos correspondientes en este corte estructural presentan en el miembro Arenisca U inferior depósitos de arenisca tanto gruesa como fina, pero depositadas en diferentes eventos sedimentarios. En la mayoría de los pozos, los depósitos de arenas tuvieron lugar en el TST a excepción pozo Sacha 247 cuyo espesor de arenisca es visible en el evento HST.

Corte A4-B4 Dirección NO-SE (Sacha 320d a Sacha 007)

Pozos ubicados al Sur de esta zona de estudio del Campo Sacha existe grandes espesores de arena como se puede apreciar en las columnas de facies de estos pozos.

Los pozos Sacha 007 y Sacha 214d se caracterizan por ser los pozos con mayor espesor de areniscas en el miembro U inferior, lo que indicaría por lo tanto que estos poseían un mayor espacio de acomodamiento al momento de depositarse la arenisca. En otras palabras, una mayor depresión en estas dos zonas, originadas lo más probable por fallas.

En las columnas litológicas de los pozos sachá 035 y sachá 226d se aprecia que éstos están constituidos mayormente de sedimentos granos finos, calcáreos y acumulación de caolín en el tope de la arenisca U inferior.

El pozo con menor espesor de sedimentos es el sachá 161, y mayormente éstos corresponden a sedimentos calcáreos.

En este corte estructural se puede apreciar que la conectividad de las arenas entre pozos vecinos no está dado, porque se ve interrumpido por pozos con sedimentos de granos finos y calcáreos, que indicaría que estas zonas pudieron ser unos

paleo-relieves en los cuales no existía suficiente espacio de acomodamiento para la depositación de arenas gruesas. A diferencia de los pozos con corte en dirección O-E, se pueden observar una mejor continuidad y conexión de las arenas en esa dirección.

CONCLUSIONES

1. Debido a que el Campo Sacha es una estructura anticlinal cortada por una falla transpresional de NE-SO se generaron zonas de fallamiento en la misma dirección en la zona anticlinal.
2. Se determinó que el reservorio Arenisca U en el campo Sacha está constituido por dos ambientes sedimentarios: la arenisca U inferior que pertenece a un ambiente

estuarino de poca profundidad dominado por mareas a deltaico con predominancia de areniscas gruesas de canal y la arenisca U superior que pertenece a un ambiente estuarino profundo dominado por mareas a plataforma donde hay mayormente sedimentos finos como lutitas, limos y calizas.

3. Se obtuvo un mejor resultado en la suavización de las curvas usando las series de Fourier para la variable profundidad de agua y el método de partición simple para la variable energía. Las curvas proporcionadas por estos métodos permitió de mejor manera identificar los eventos menores sedimentarios que conformaron la Arenisca U y determinar de manera adecuada los topes y bases de los mismos y obteniéndose así que para el miembro U inferior en todos los pozos se presentaron tres ciclos menores de menor importancia: LST, TST, HST y para la Arenisca U superior dos eventos menores: TST y RST.
4. Gracias a la visualización de las columnas litológicas y con la ayuda de mapas de espesores de cada uno de los eventos de la arenisca U, se comprueba que de los dos miembros que constituyen este reservorio en el campo Sacha, la Arenisca U inferior es la que posee mayores

espesores de arena mientras que en la U superior esta litología es nula.

5. La parte más baja LST como se mencionó anteriormente, hay importantes variaciones de espesor entre los pozos, mientras que en la parte restante de la sección el espesor es casi constante incluso cuando se producen importantes cambios de facies laterales.
6. La Arenisca U superior se diferencia en gran medida de la Arenisca U Inferior tanto en espesor, litología y ambiente.
7. En el área norte del Campo Sacha a diferencia de las zonas sur y centro, se encontraron pocos pozos con grandes espesores de arena perteneciente al miembro Arenisca U inferior, además de que se pudo visualizar mediante los mapas de facies que la conectividad y desarrollo de los cuerpos de arena tienen una dirección preferencial E-O que N-S.
8. En los mapas de facies también se desprende que los canales de arenas LST y TST están vinculados a depresiones tectónicas teóricamente relacionadas con fallas laterales NW-SE que produjeron depresiones de tipo full-apart, pero en una escala muy pequeña.

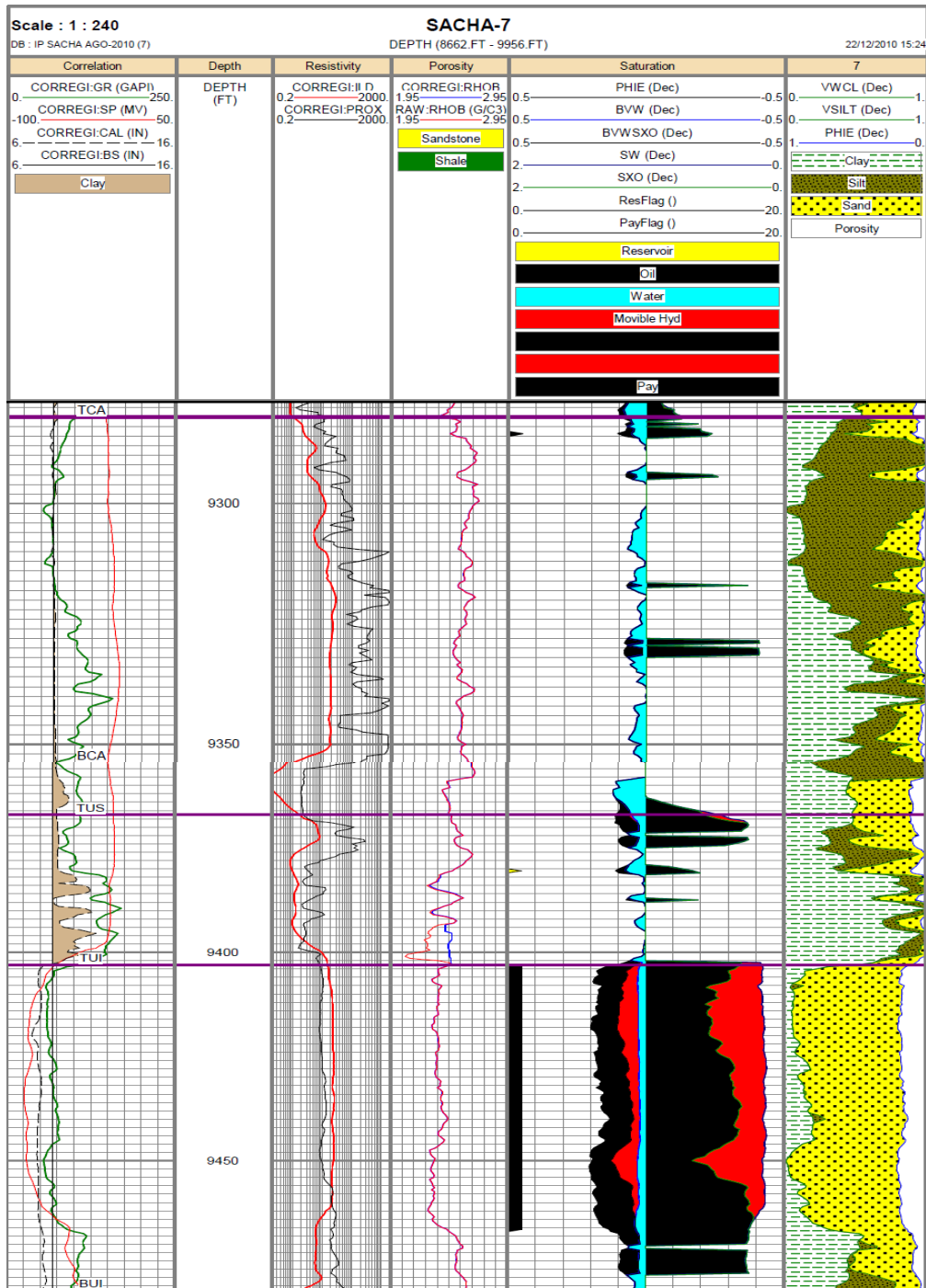
RECOMENDACIONES

1. Obtener núcleos del reservorio Arenisca U para la verificación de la información obtenida mediante los registros eléctricos.
2. Sería bueno contar con información sísmica de alta resolución para visualizar el dominio estructural del campo Sacha, principalmente fallas.
3. Hay que tener en cuenta la segmentación de las arenas laminadas del TST del reservorio de U inferior para el diseño de proceso de inyección de agua, ya que caso

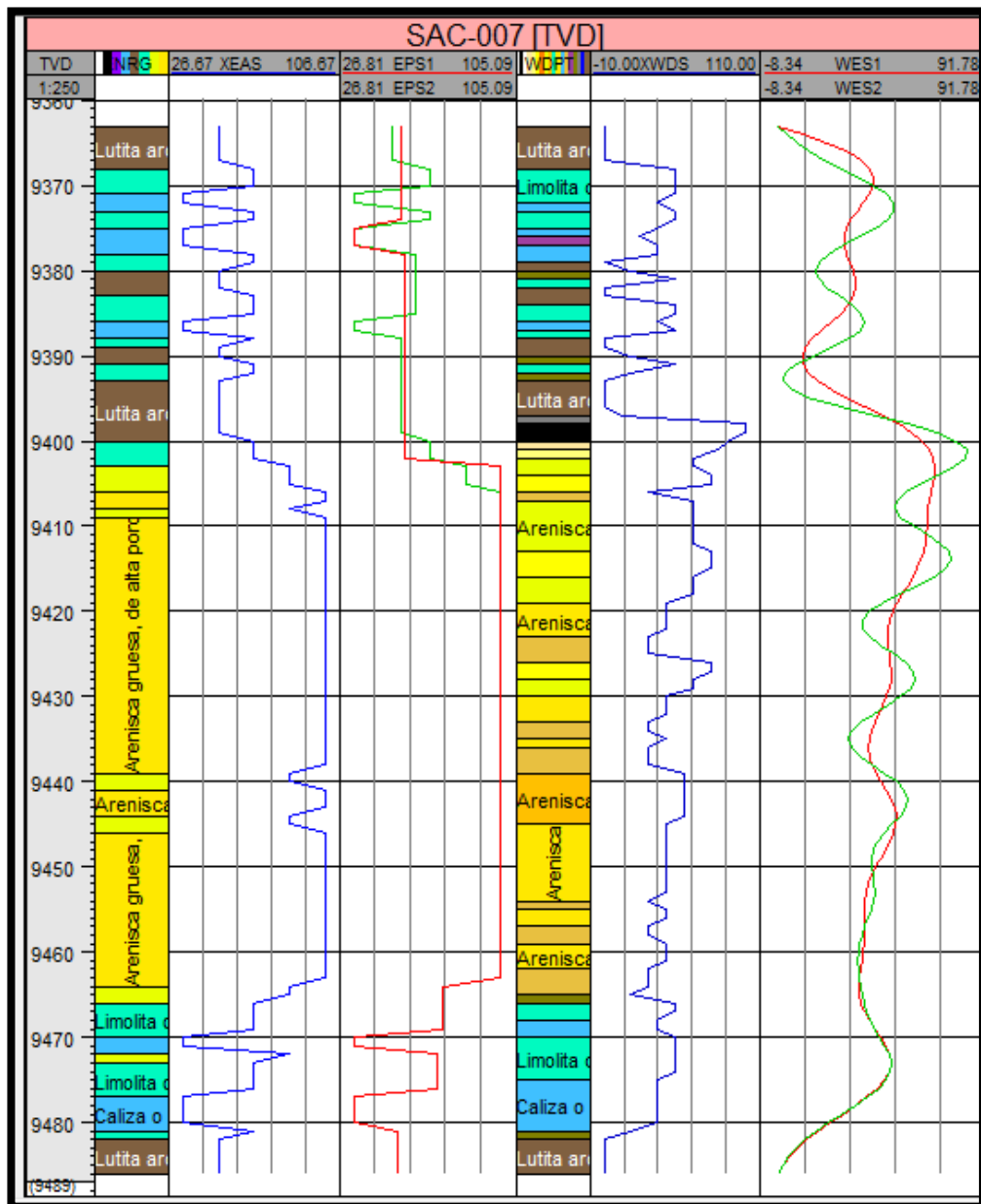
contrario la aplicación de este podría resultar ineficaz o contraproducente.

ANEXOS 1
(REGISTROS)

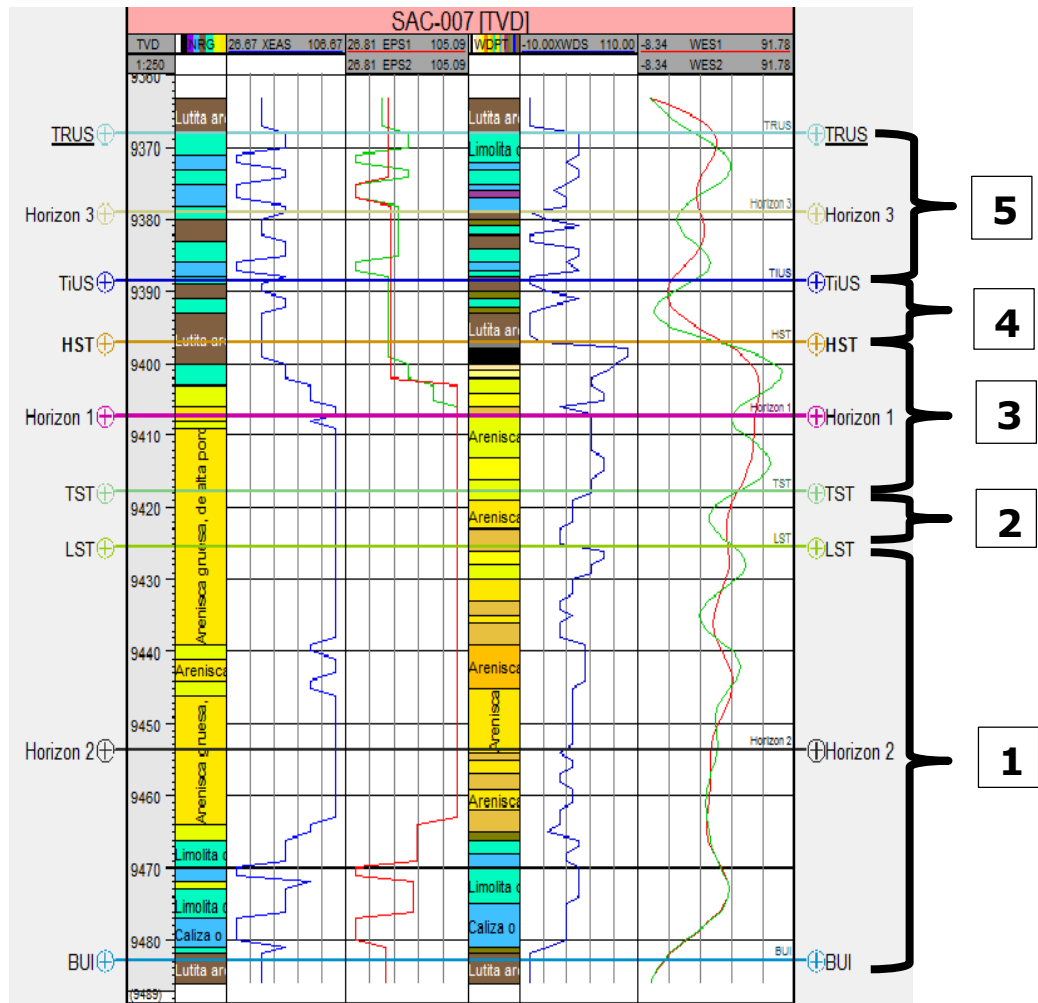
Anexo A: Registro compuesto del Pozo Sacha-007 mostrando la zona de la arenisca U

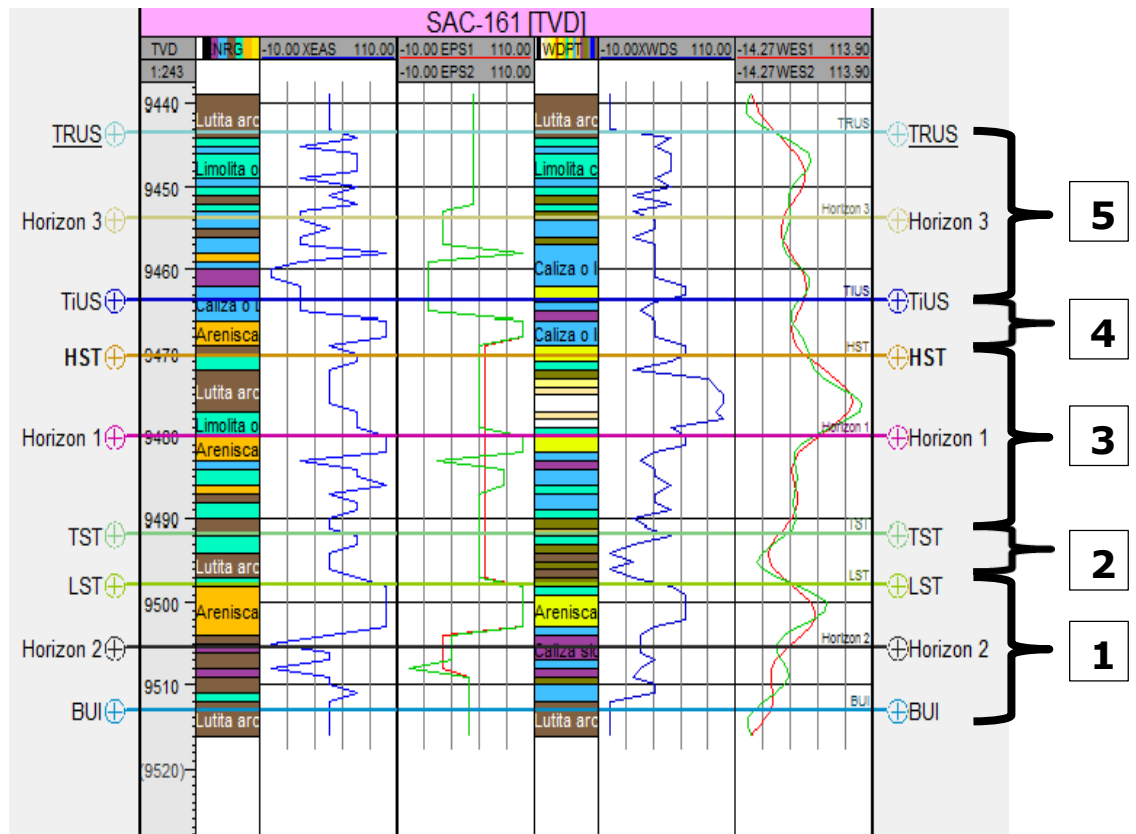


Anexo B: Pozo Sacha – 007 mostrando columna de facies y las curvas de los valores de facies sin alizar (azules) y suavizadas con Partición Simple (verde y roja) para la variable ENRG y Fourier (verde y roja) para la variable WDPT.

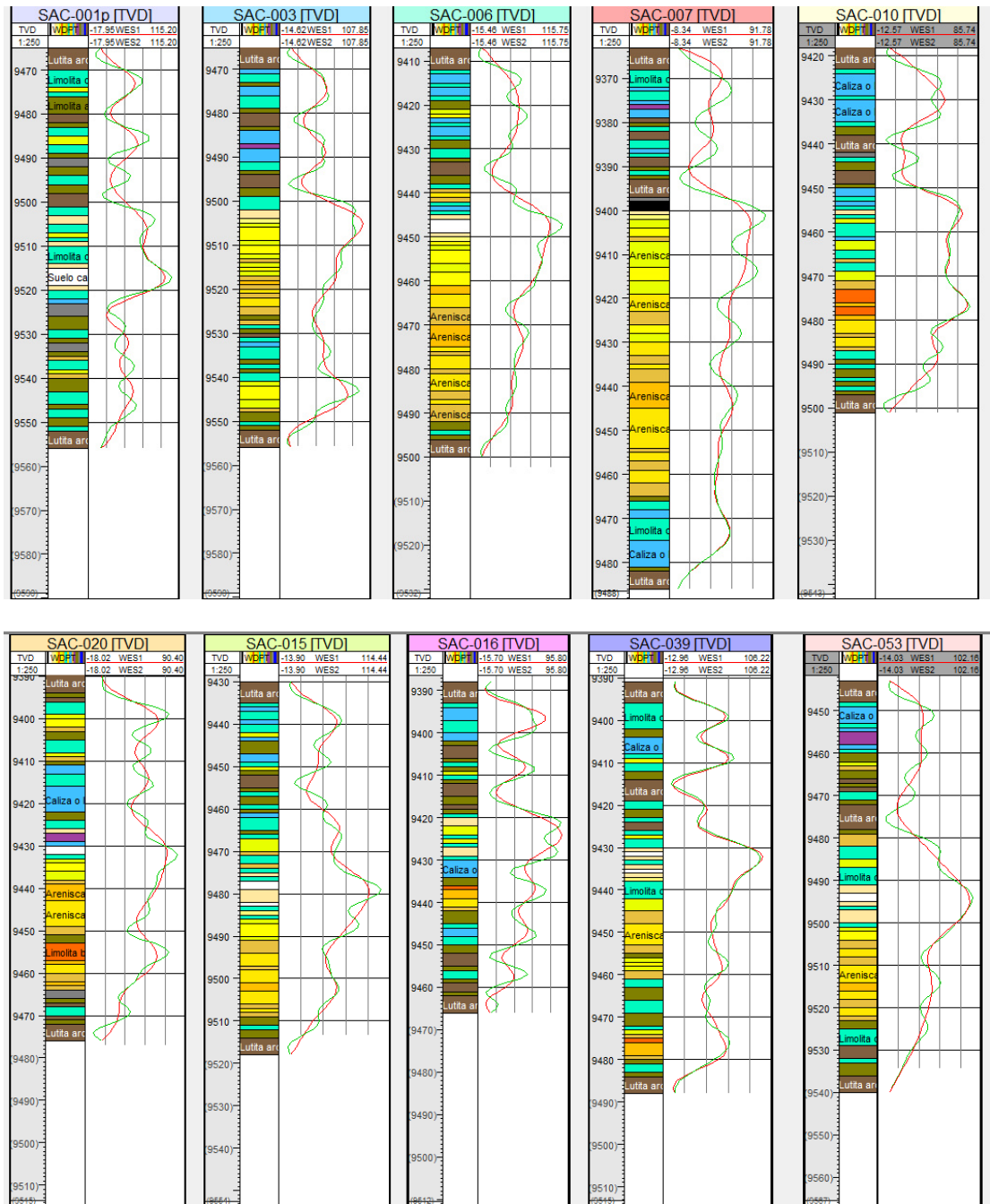


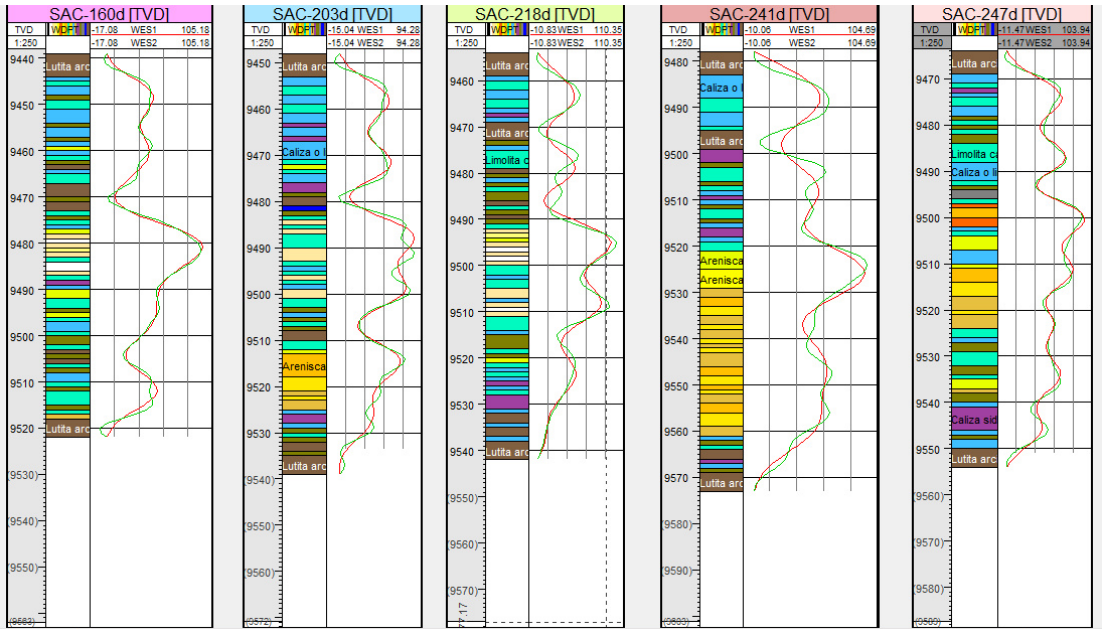
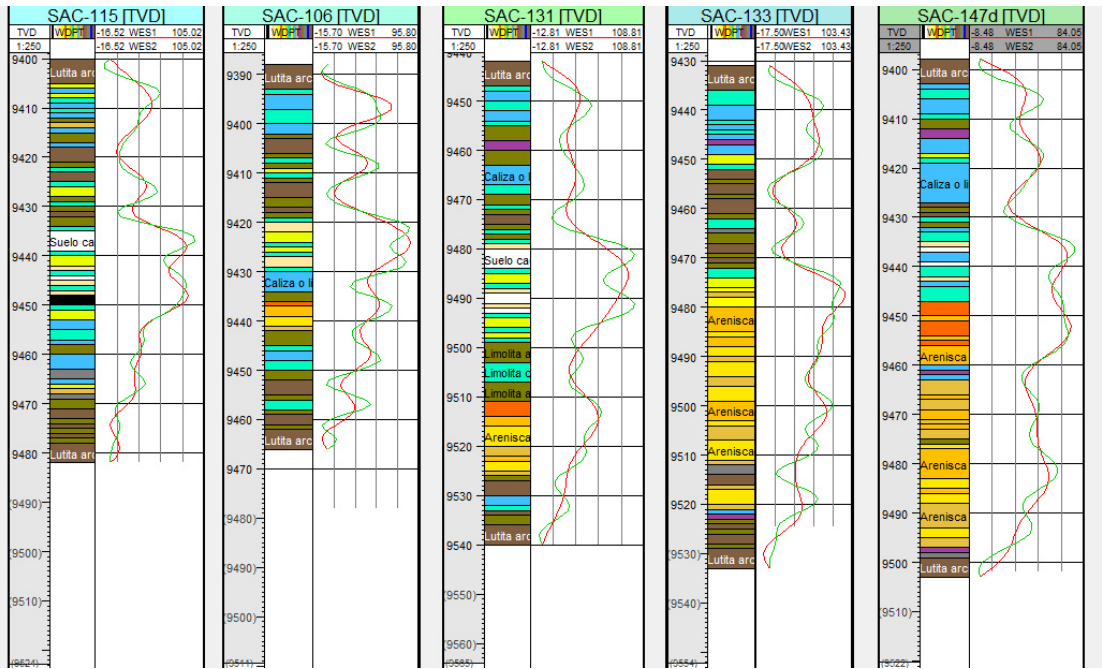
Anexo C: Descripción de eventos en caso ejemplo Pozo Sacha – 007 y Pozo Sacha -161

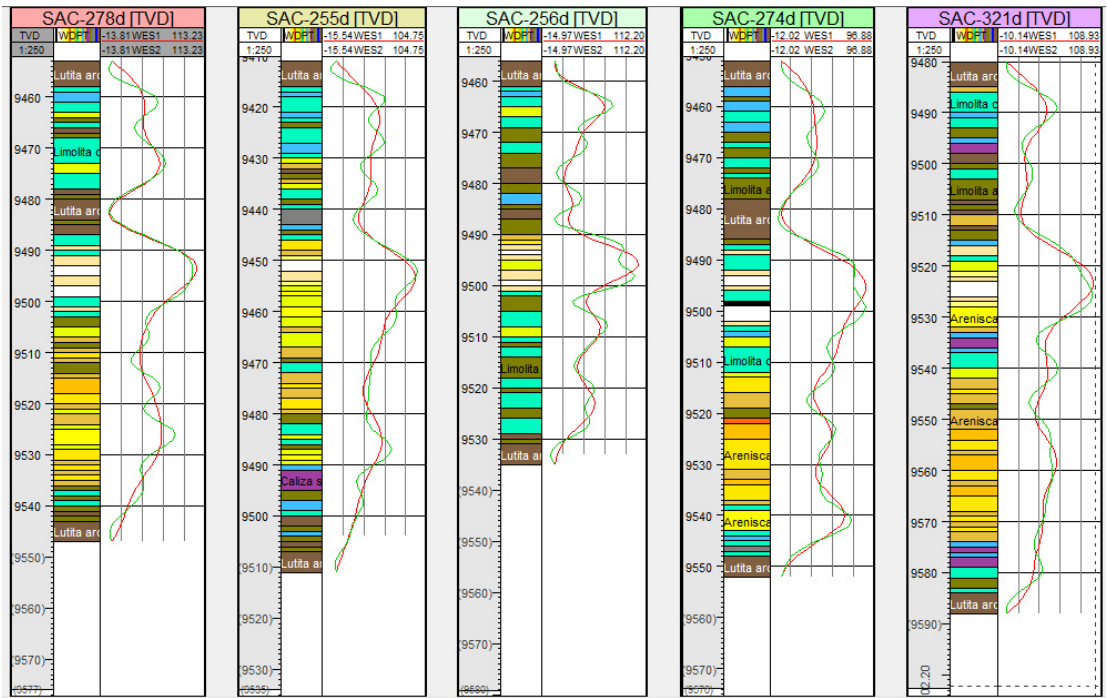


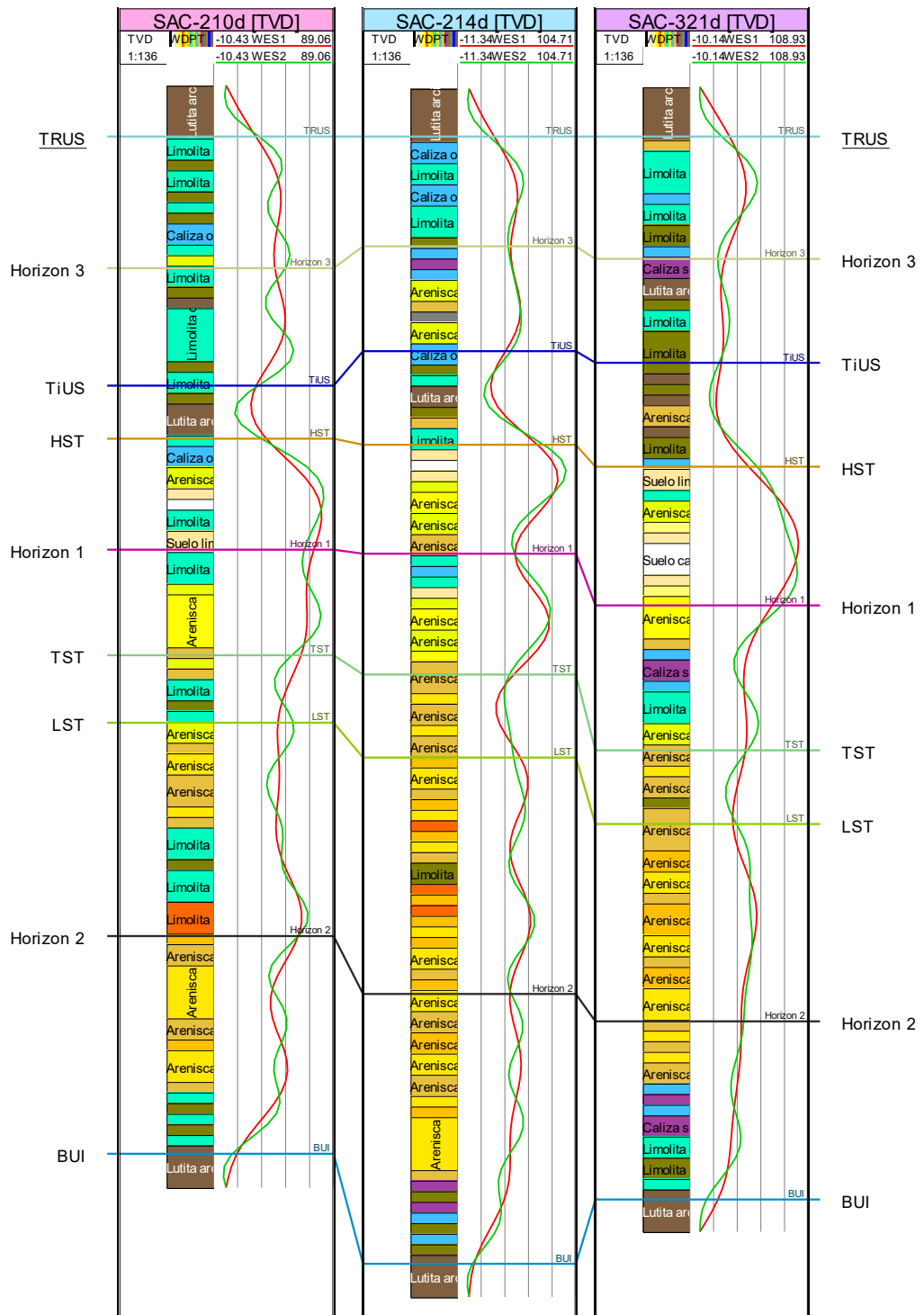


Anexo D: Curva modelo representativa de los ciclos transgresivos y regresivos de la arenisca U

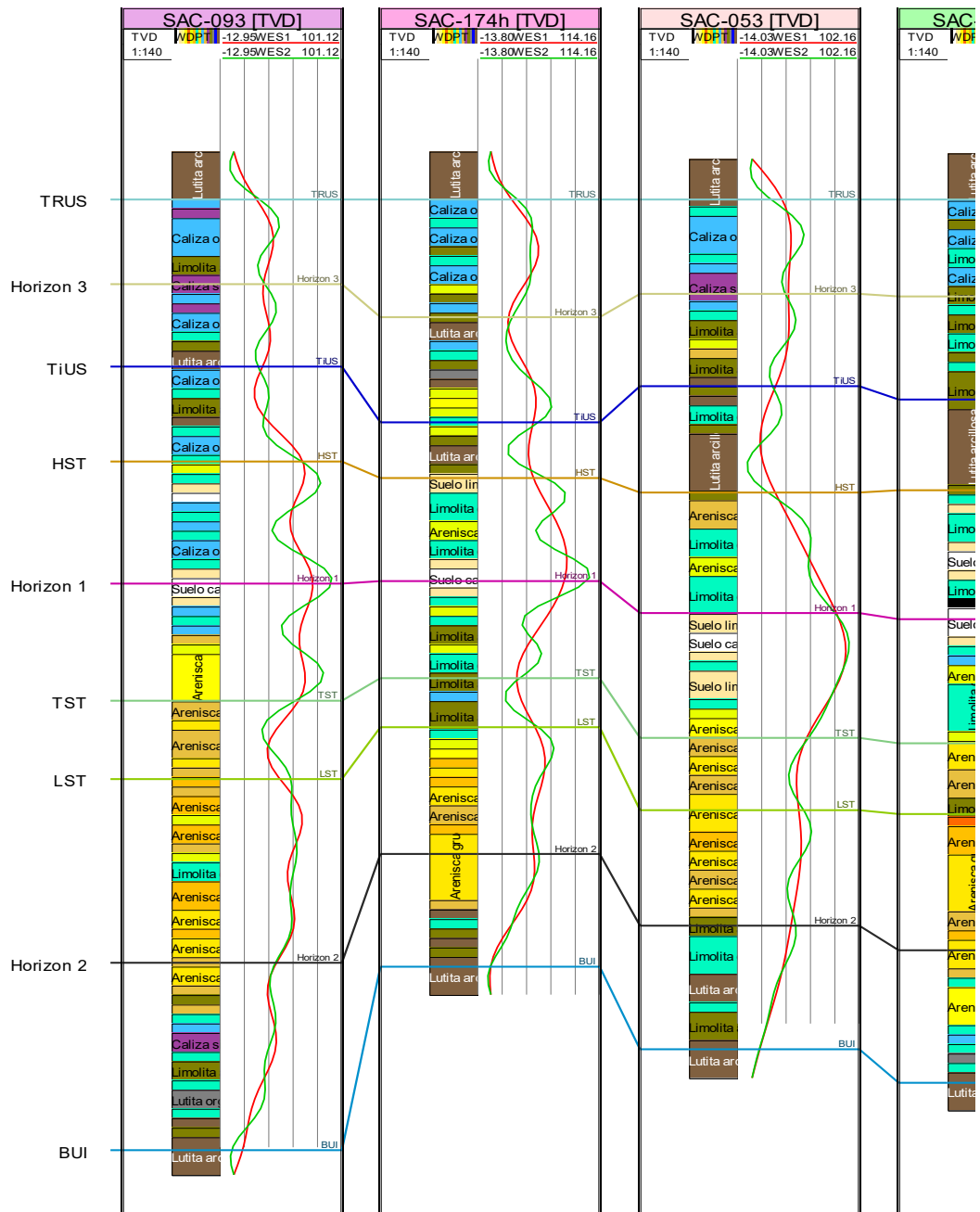


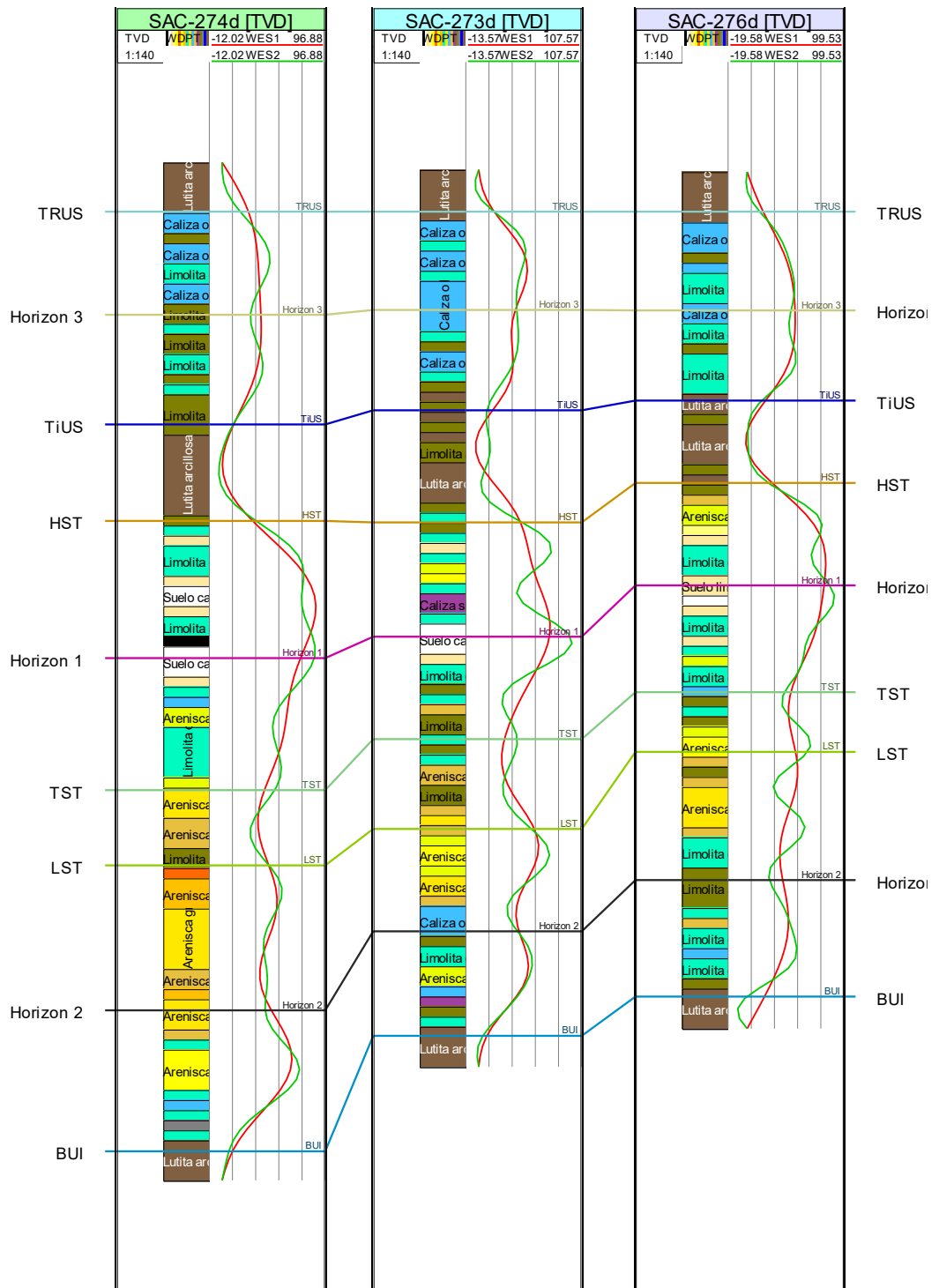






ANEXO Q: Pozos del Corte A2-B2 DIRECCION NO-SE (Sacha 093 a Sacha 276d)

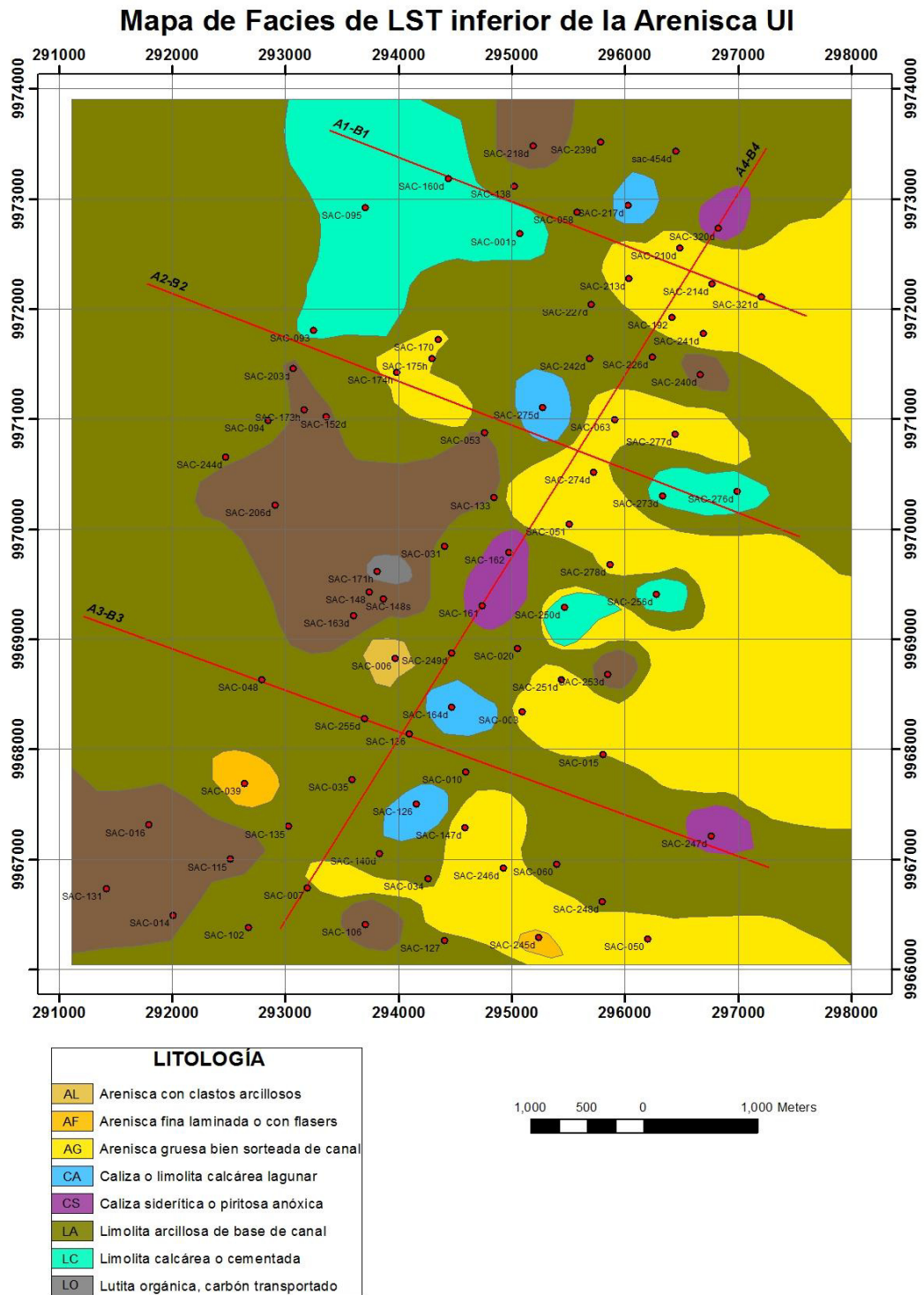




ANEXOS 2

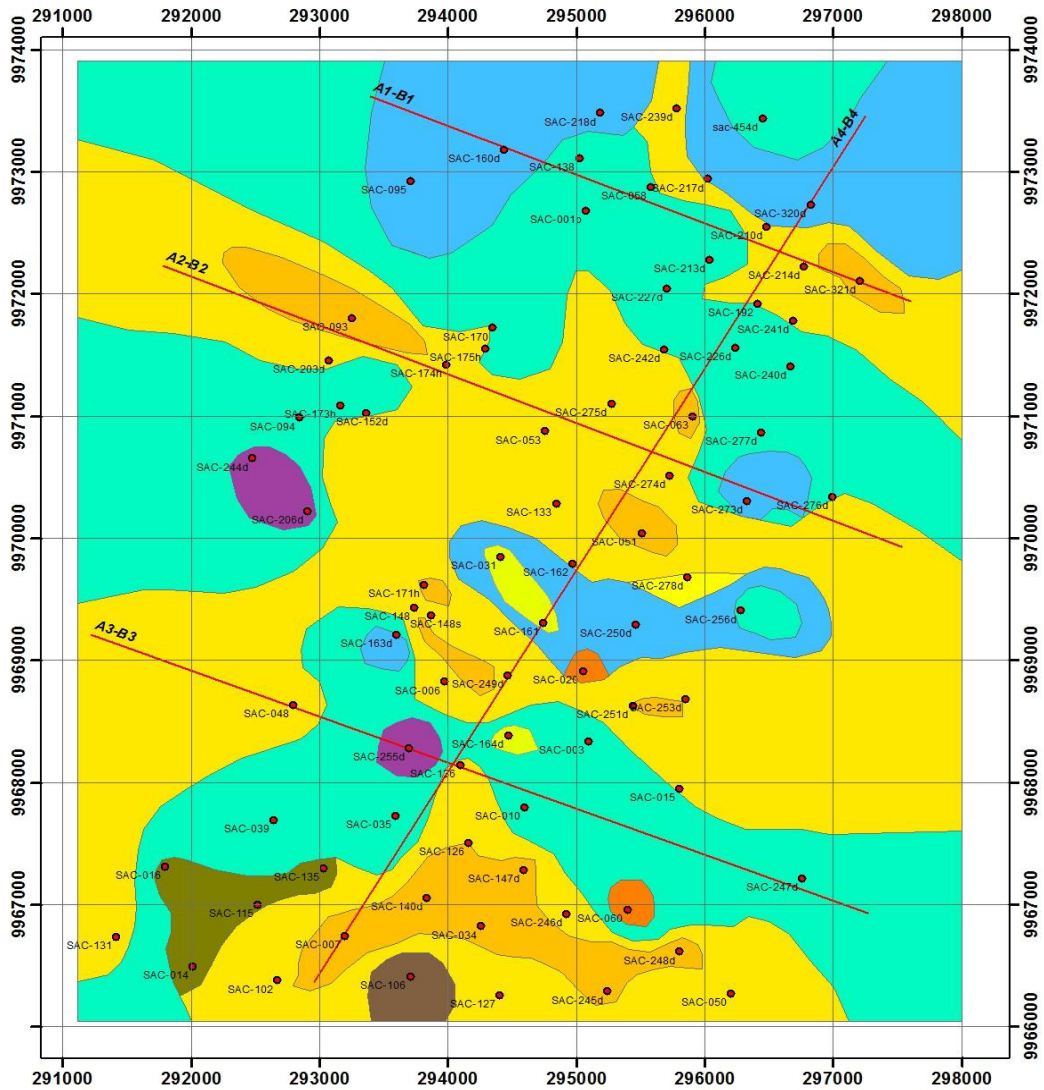
(MAPAS)

Anexo E: Mapa de facies de LST inferior de la Arenisca UI



Anexo F: Mapa de facies de LST superior de la Arenisca UI (LST-UI)

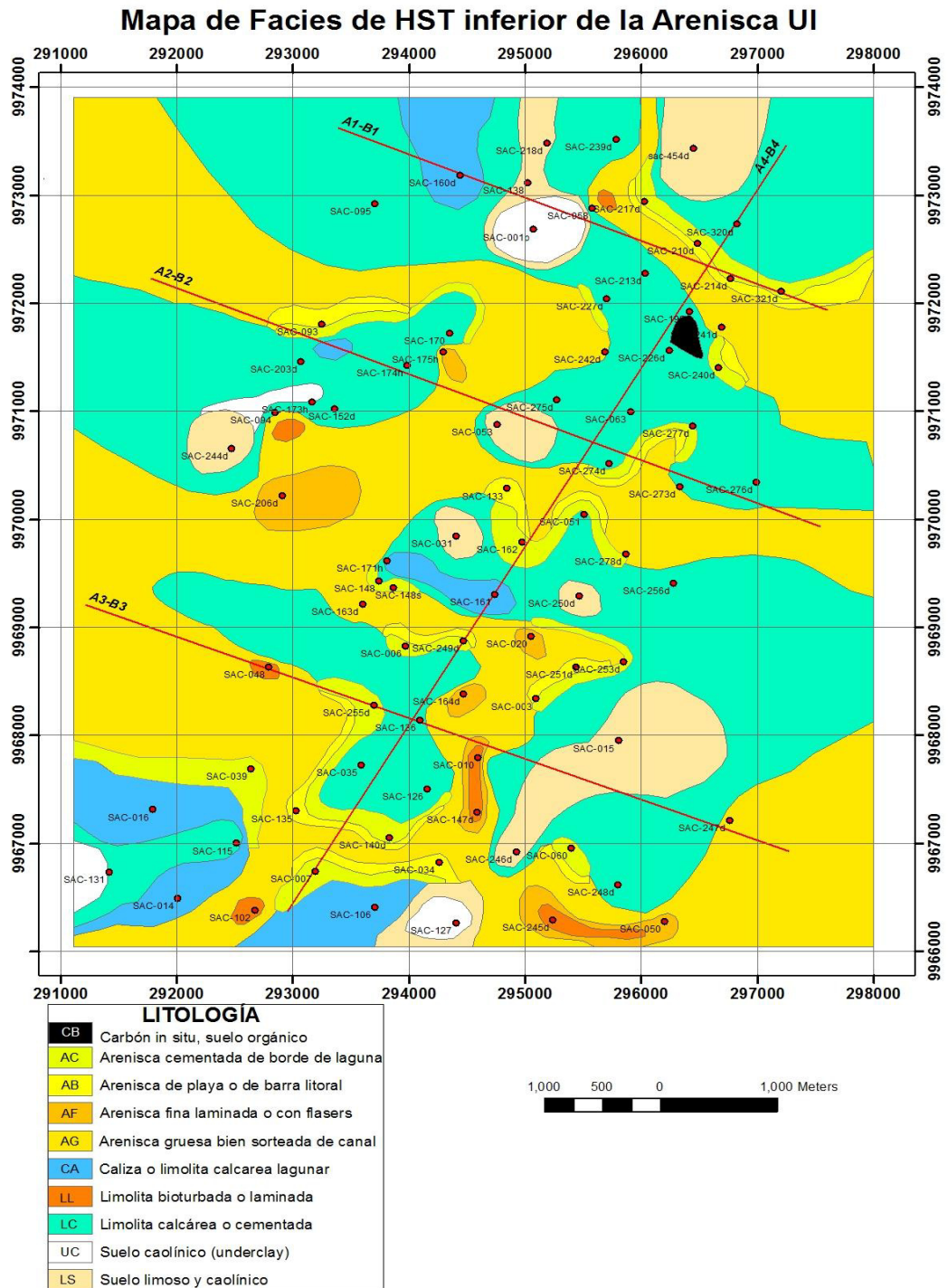
Mapa de Facies de LST superior de la Arenisca UI



LITOLOGÍA	
AB	Arenisca de playa o de barra litoral
AC	Arenisca cementada de borde de laguna
AF	Arenisca fina laminada o con flasers
AG	Arenisca gruesa bien sorteada de canal
CA	Caliza o limolita calcárea lagunar
CS	Caliza siderítica o piritosa anóxica
LA	Limolita arcillosa de base de canal
LC	Limolita calcárea o cementada
LL	Limolita bioturbada o laminada
LU	Lutita arcillosa marina

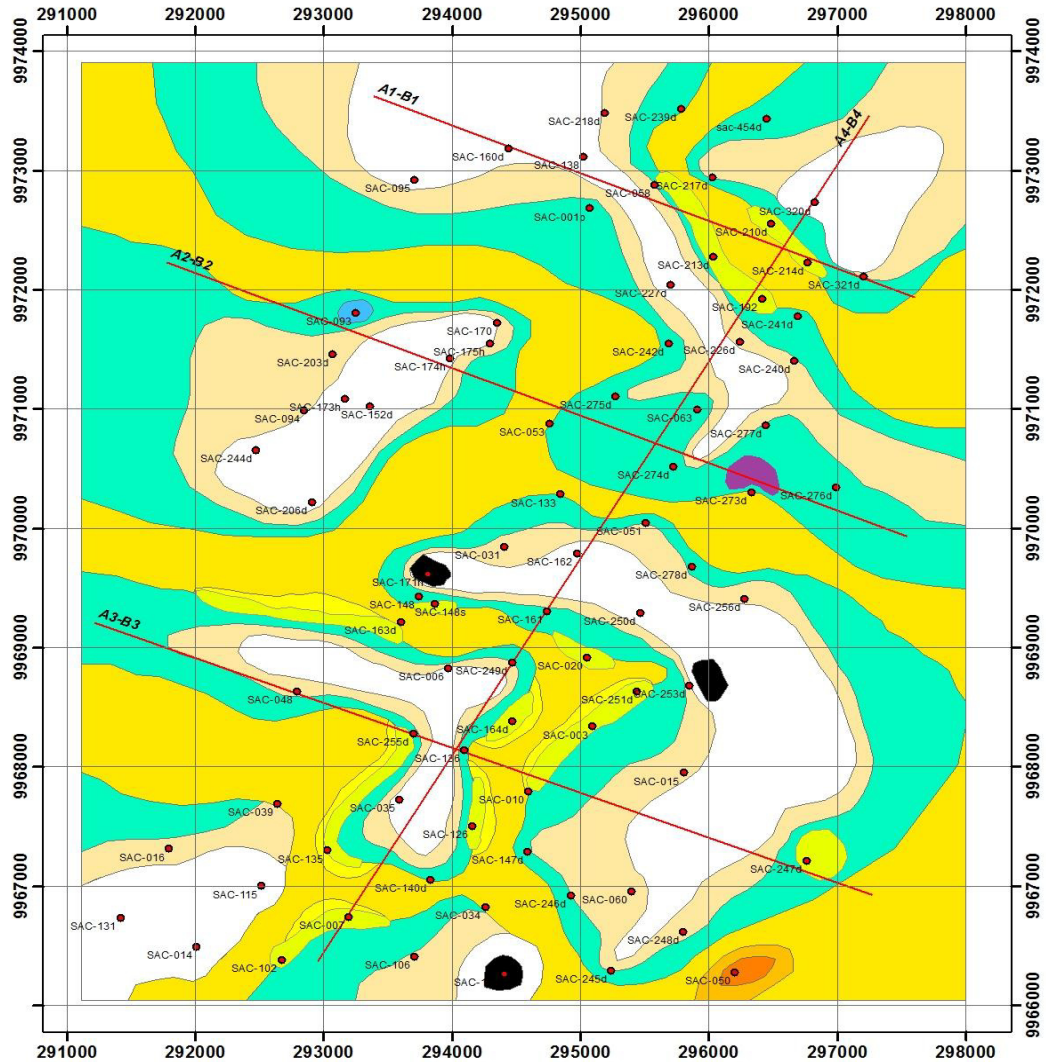
1,000 500 0 1,000 Meters

ANEXO H: Mapa de Facies de HST inferior de la Arenisca U inferior (HSTinf.-UI)

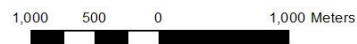


ANEXO I: Mapa de Facies de HST superior de la Arenisca U inferior (HSTsup.-UI)

Mapa de Facies de HST superior de la Arenisca UI

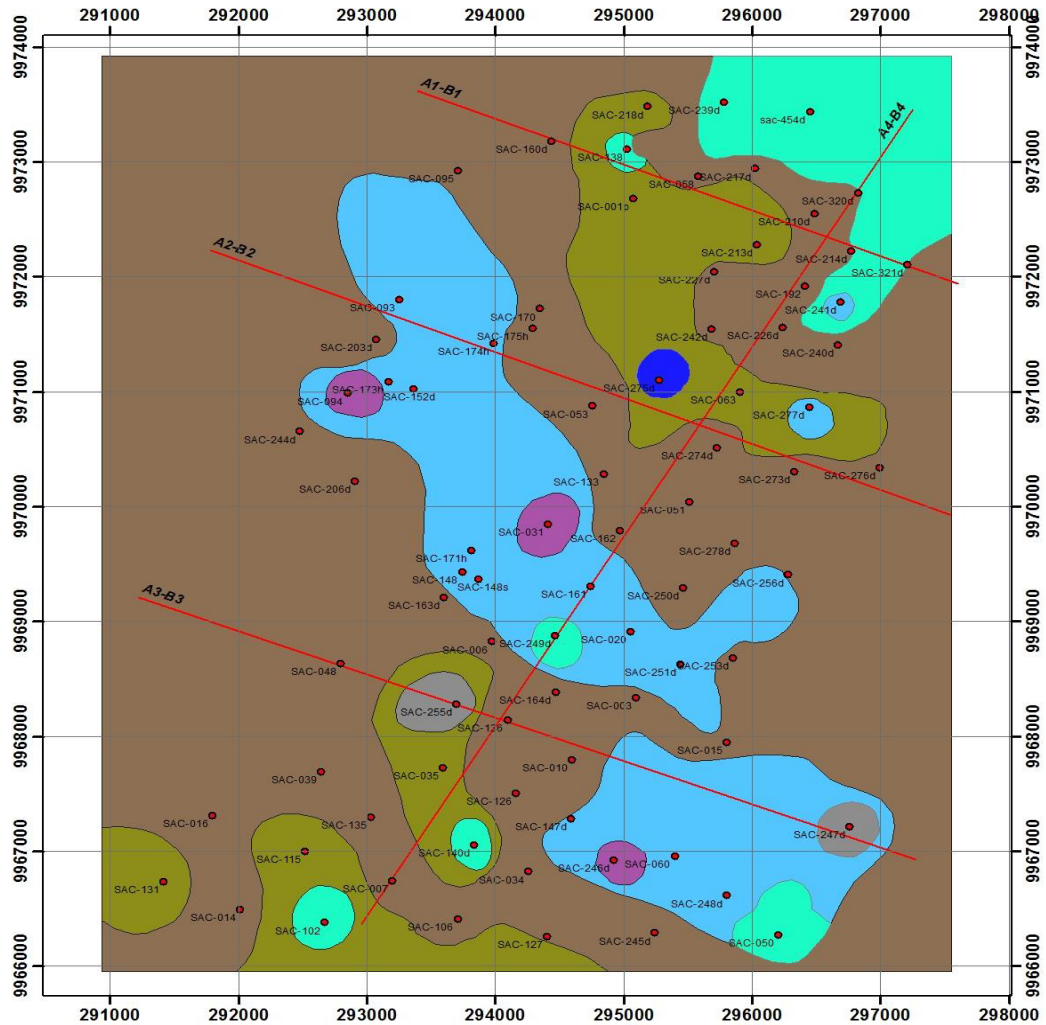


LITOLOGIA	
CB	Carbón in situ, suelo orgánico
AC	Arenisca cementada de borde de laguna
AB	Arenisca de playa o de barra litoral
AF	Arenisca fina laminada o con flasers
AG	Arenisca gruesa bien sorteada de canal
CA	Caliza o limolita calcarea lagunar
LL	Limolita bioturbada o laminada
LC	Limolita calcárea o cementada
UC	Suelo caolínico (underclay)
LS	Suelo limoso y caolínico
CS	Caliza siderítica o piritosa anóxica

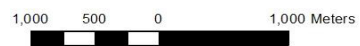


ANEXO J: Mapa de Facies de Transgresión inicial de la Arenisca de la U Superior (TIUS)

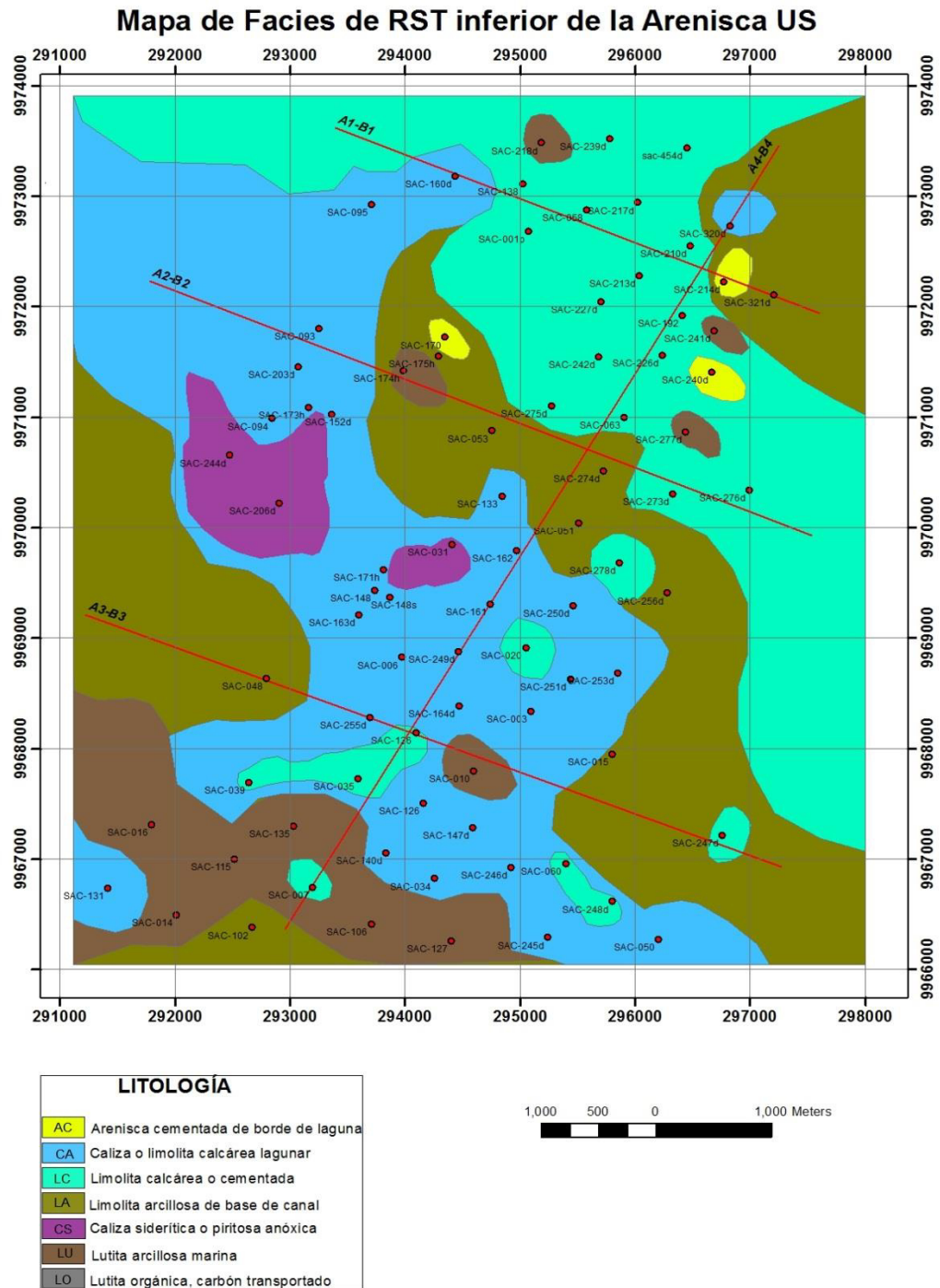
Mapa de Facies de la Transgresión inicial de la Arenisca US



LITOLOGÍA	
CA	Caliza o limolita calcárea lagunar
CS	Caliza siderítica o piritosa anóxica
HG	Hard-Ground (glauconita, conchas, fosfatos)
LA	Limolita arcillosa de base de canal
LC	Limolita calcárea o cementada
LU	Lutita arcillosa marina
LO	Lutita orgánica, carbón transportado

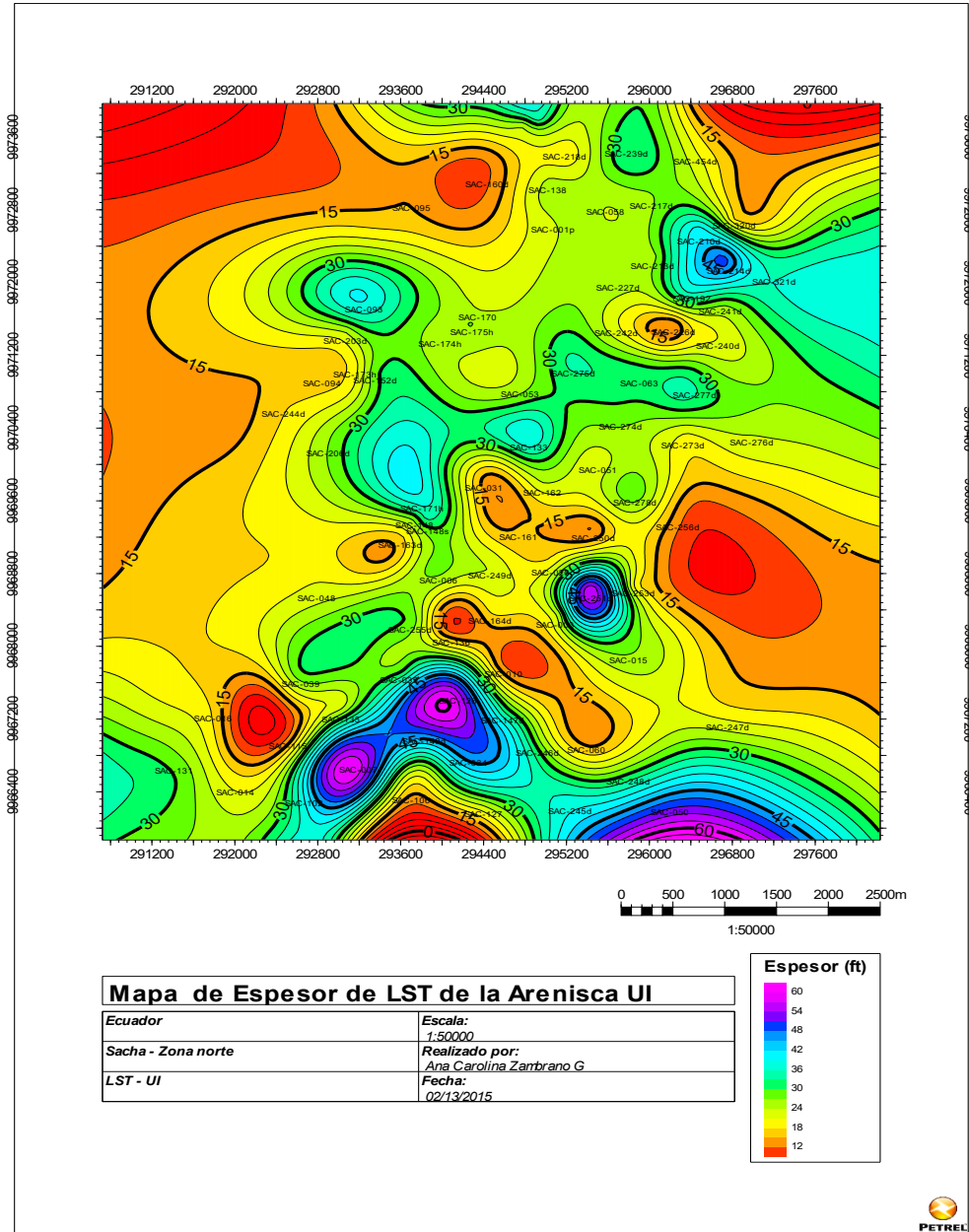


Anexo K: Mapa de Facies de RST inferior de la Arenisca U superior (RST1-US)

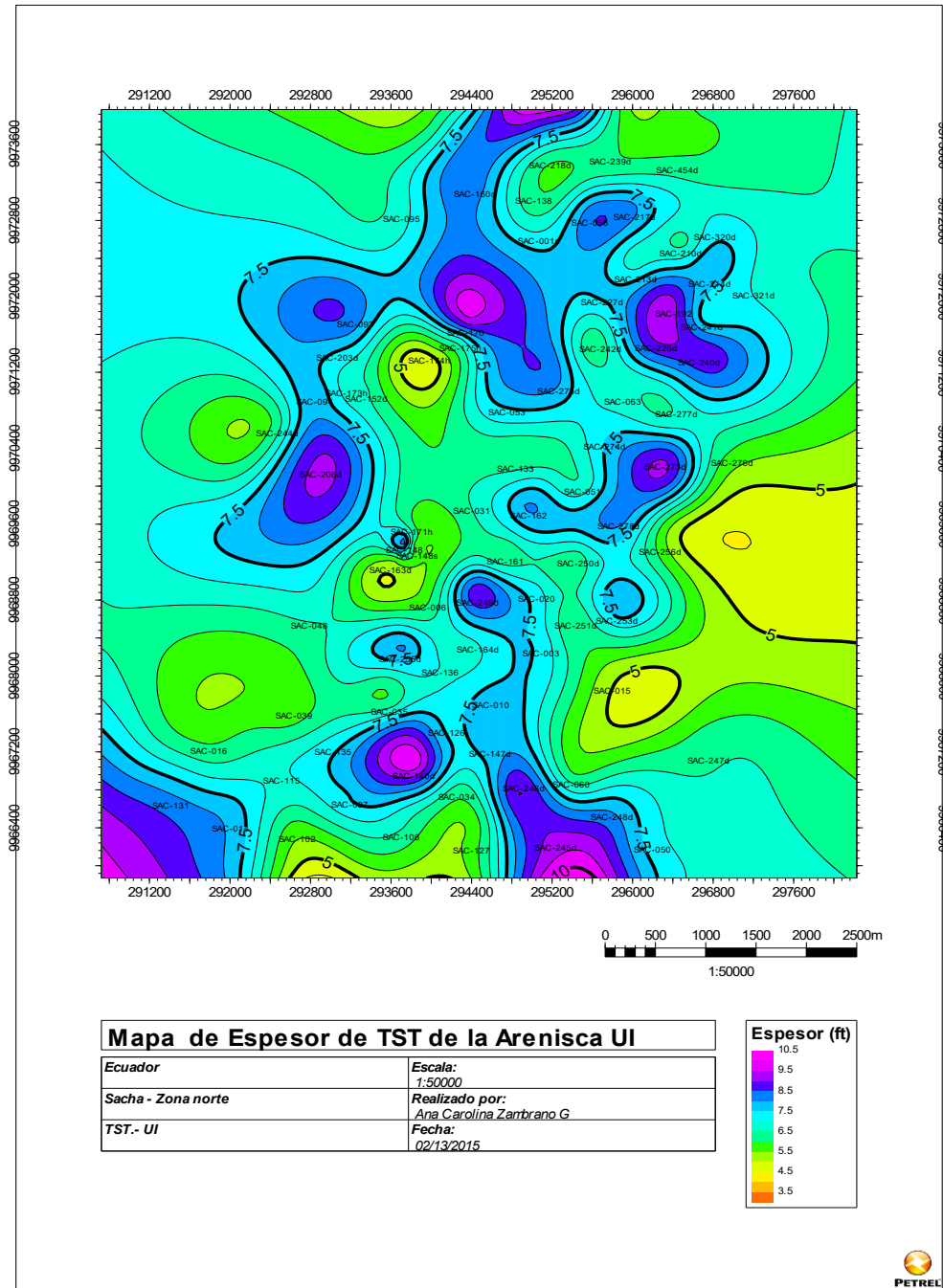


ANEXO N: Mapa de espesores de los diferentes eventos sedimentarios.

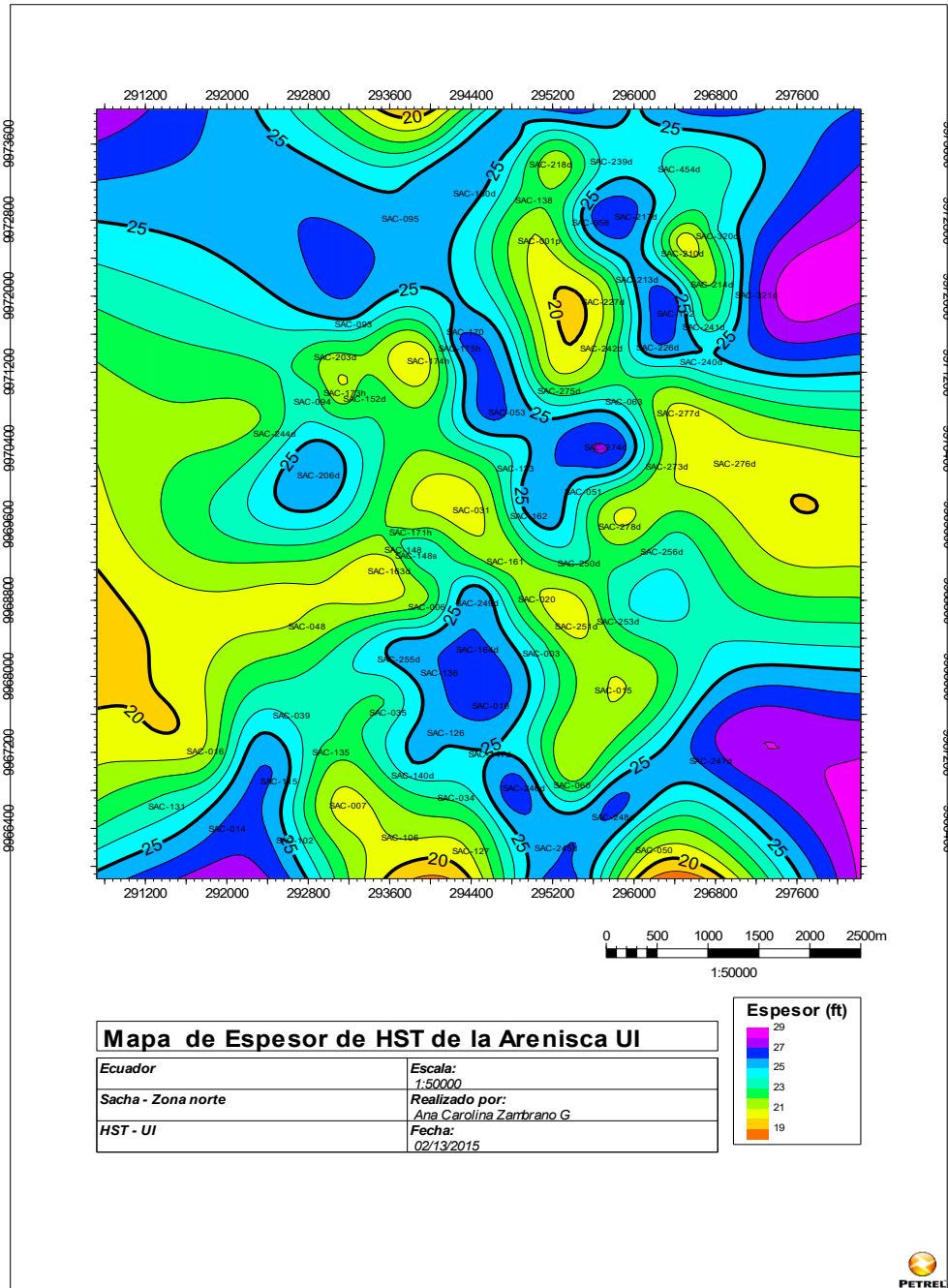
Mapa de Espesor de LST-UI



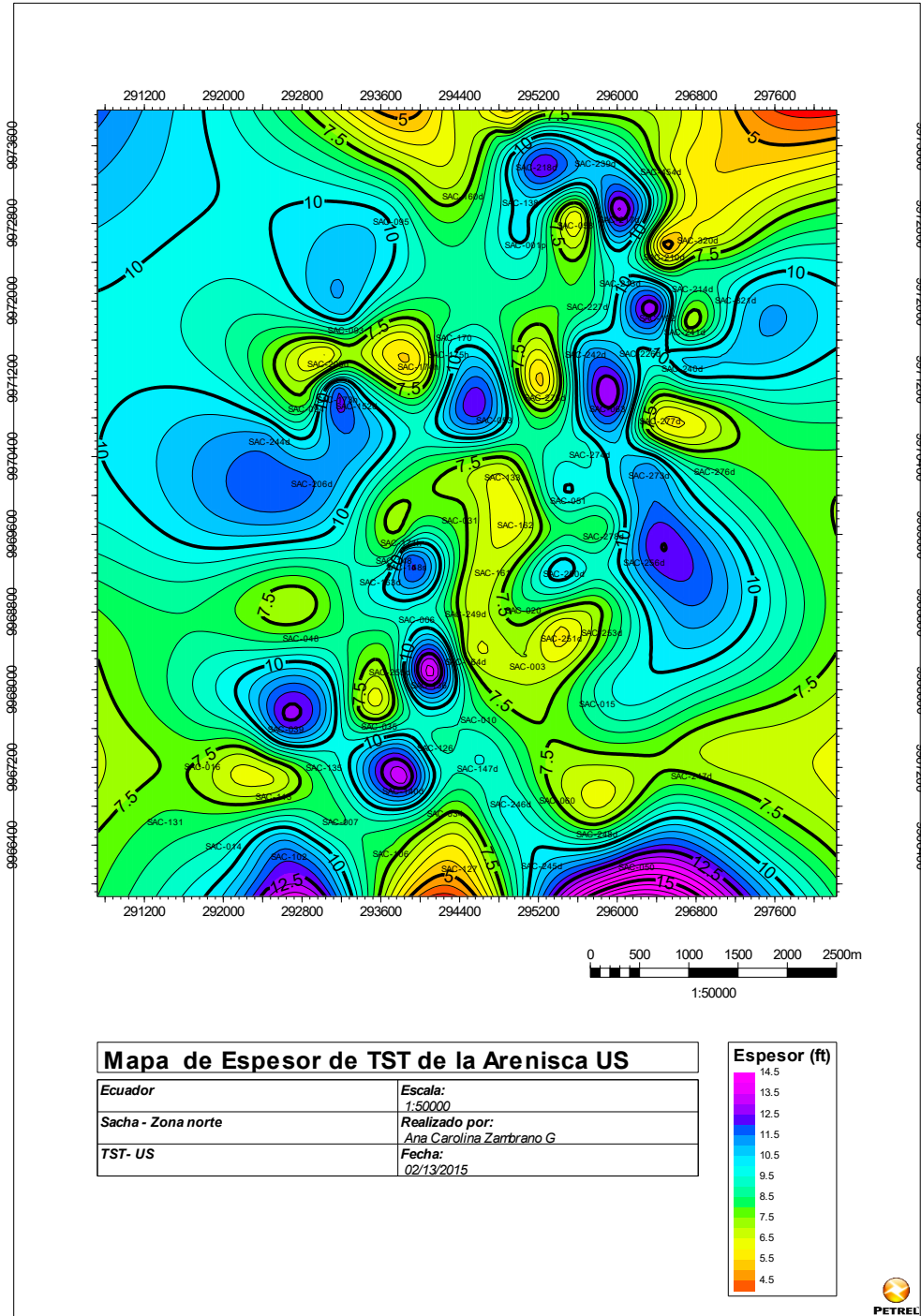
Mapa de Espesor de TST-UI



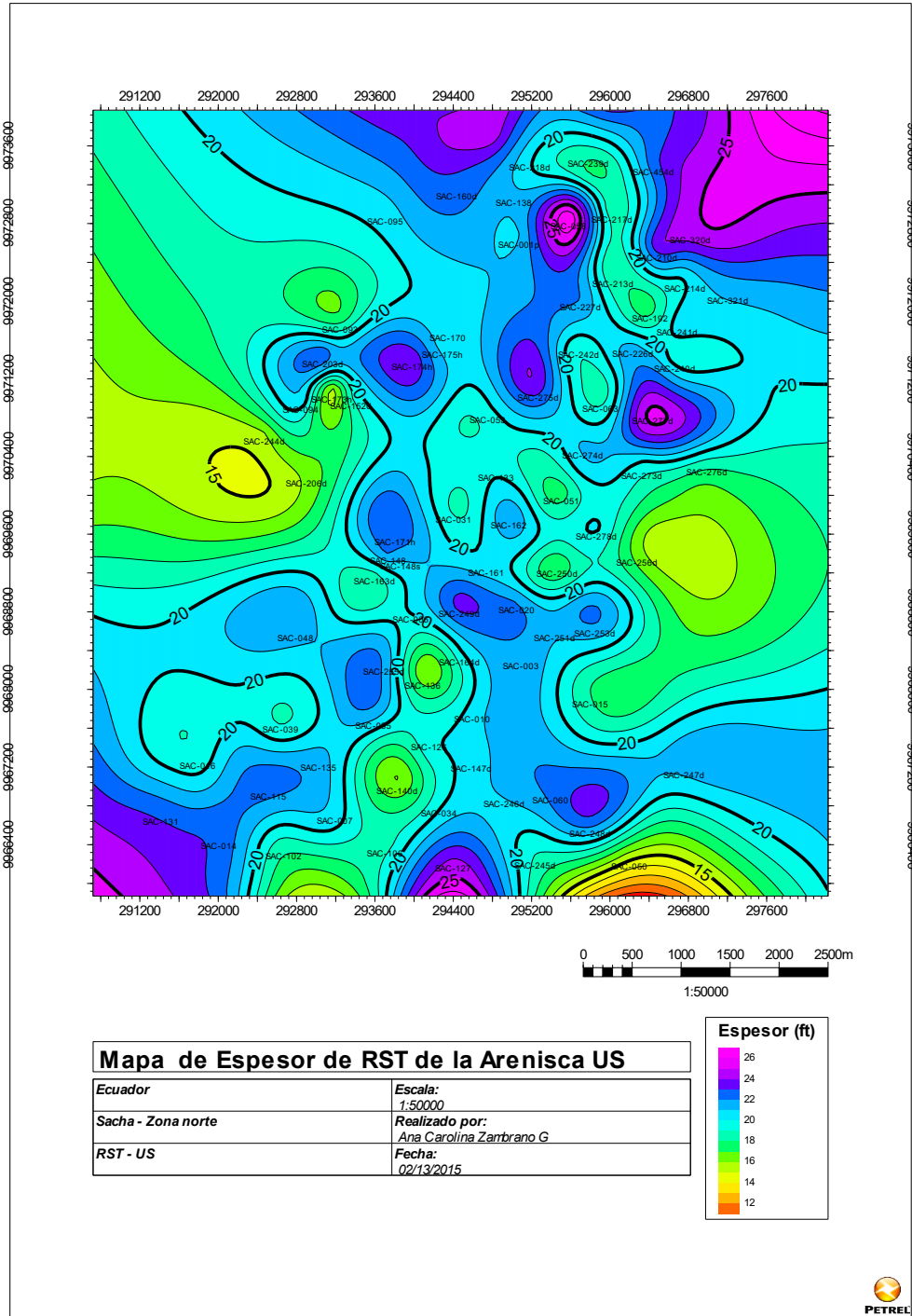
Mapa de Espesor de HST-UI



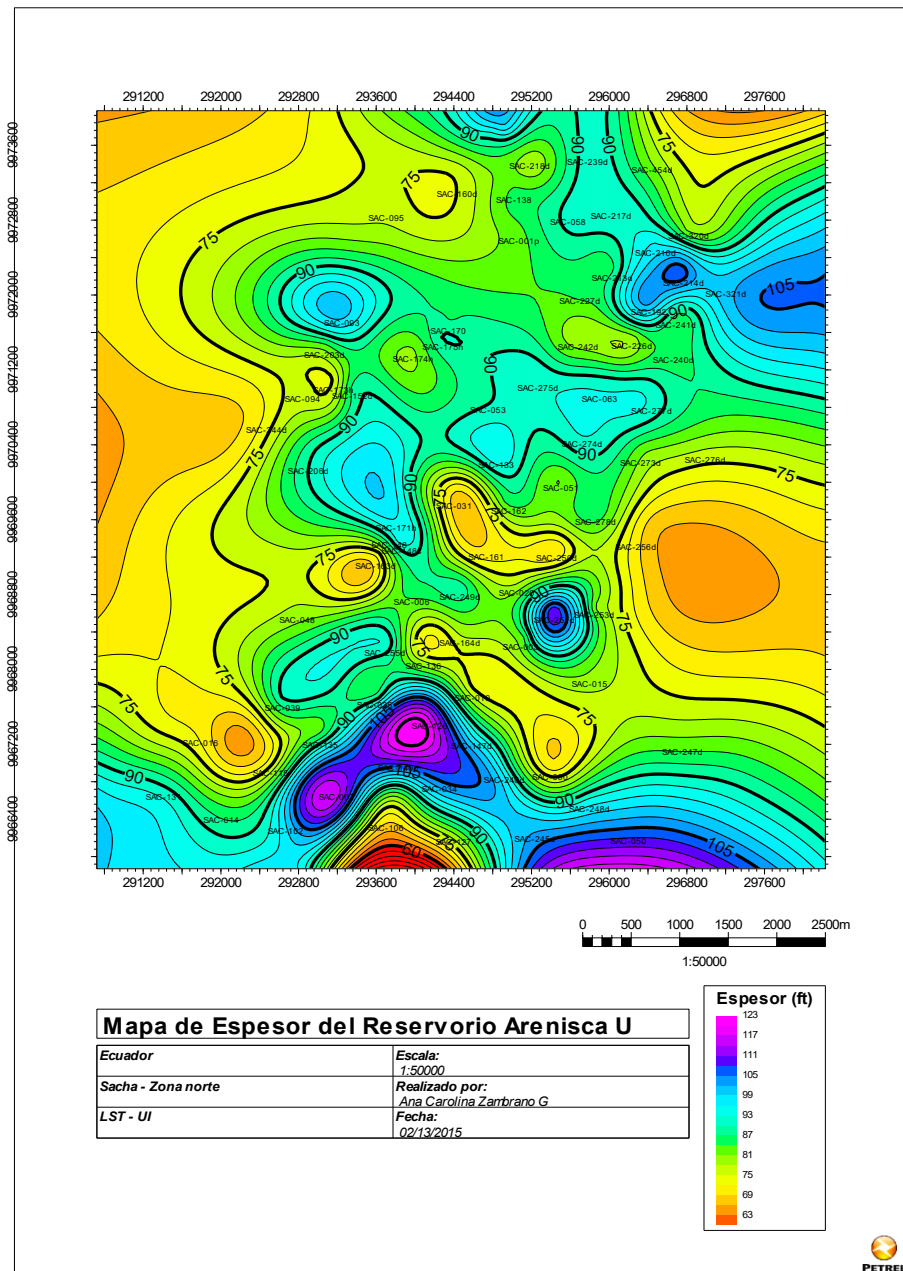
Mapa de Espesor de TST-US



Mapa de Espesor de RST-US



ANEXO O: Mapa de espesor de la Arenisca U



BIBLIOGRAFIA

- [1]** Catuneanu, Q. (2006) Principles of Sequence Stratigraphy. 2da edición. Amsterdam Elsevier.
- [2]** Baby, P. Barragán, N. Rivadeneira, M. (2004). La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo. Quito Ecuador. IEFA
- [3]** Facies Models (1992) W. Roger
- [4]** Marocco René. (2008), Introducción a la Estratigrafía Secuencial
- [5]** Kummert P, 2014 Rio Napo CEM

- [6]** Patrice B, Rivadeneira M, Barragan R. (2004) La cuenca Oriente: Geología y Petróleo
- [7]** Pritchard, D.W (1967) What is an estuary: Physical viewpoint
- [8]** Chang J. (2009) Curso Procesos Estuarianos
- [9]** Bates, R.L. & Jackson, J.A. (1987). Glossary of Geology. Third Edition. American Geological Institute. 788 p
- [10]** Walker, R.G., (1992). Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. En: R.G. Walker y N.P. James (Eds.). Facies Models, Response to Sea Level Change. Geological Association of Canada: 1-14
- [11]** Middleton, G. V., 1973, Johannes Walther's Law of the Correlation of Facies: Geological Society of America Bulletin, v. 84, p. 979-988
- [12]** Vail, Pr Mitchum, R.M y Tompson III S (1977b) Seismic stratigraphy and global changes of level sea. Part4. Global cycles of relative changes of sea level