

ESTUDIO INTEGRADO DEL GOLFO DE GUAYAQUIL DEL MIOCENO AL RECIENTE

Luis Emilio Cobos Mite ⁽¹⁾, Galo Montenegro Santos ⁽²⁾

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Km. 30.5 Vía Perimetral, Casilla 09-01-5863, Guayaquil-Ecuador <cobosluis@hotmail.com>

⁽²⁾ Centro de Investigaciones Geológicas Petroproducción-Guayaquil, Km. 6.5 Vía a Salinas, Casilla 10829, Guayaquil- Ecuador <gmontenegro@petroproduccion.com.ec>

Resumen

Este estudio integra la información bioestratigráfica, registros de pozos y secciones sísmicas disponibles del Golfo de Guayaquil. Fueron determinados límites de secuencias, cortejos de sistemas, fallas y estructuras principales. Se concluyó que el Golfo de Guayaquil no es una cuenca de pull-apart tradicional; esta es una cuenca pull-apart en régimen transtensivo y con una zona de despegue dúctil, donde los depocentros se desarrollaron junto a las fallas de borde de cuenca, separados por altos estructurales intracuenca que son las zonas de transferencia del movimiento transcurrente. Su apertura se inició en el Mioceno Medio. Analizando la edad de la roca generadora, el tiempo de la expulsión de petróleo, los períodos de formación de las estructuras, y la presencia verificada de petróleo y gas, se determinó que las estructuras formadas en el Mioceno tardío o antes son las más favorables para ser yacimientos efectivos.

Palabras Claves: Golfo de Guayaquil, yacimiento, petróleo, gas, modelo, estratigrafía secuencial, tectónica, transcurrente, pull-apart, despegue.

Abstract

This study integrates biostratigraphic information, well logs and seismic sections available in the Gulf of Guayaquil. Sequence boundaries, systems tracts, faults and structures major were determined. Was concluded that the Gulf of Guayaquil is not a traditional pull-apart basin; this is a pull-apart basin in transtensive regime and with a ductile detachment zone, were depocentres developed near the basin boundary faults, separated by intra-basin structural highs that are the transfer zones of transcurrent movement. The opening began in the Middle Miocene. Analyzing the source rock age, the oil expulsion time, periods of structure's formation, and the verified presence of oil and gas; was determined that the structures formed in the late Miocene or earlier are the more favorable to be effective reservoir.

Key words: Gulf of Guayaquil, reservoir, oil and gas, model, sequence stratigraphy, tectonics, strike-slip, transcurrent, pull-apart, detachment.

1. Introducción

El Golfo de Guayaquil, por presentar indicios de hidrocarburo y un campo productor de gas, por ser una región geográfica y fisiográficamente de fácil acceso (ceranía a la costa y la tabla de agua no sobrepasa los 500 metros), es atractiva para la exploración y producción de hidrocarburos.

El Golfo es considerado una cuenca de antearco por estar entre el prisma de acreción generado por la zona de subducción y el arco volcánico de Los Andes (Benítez, 1995). Está ubicada al Este de la fractura Grijalva la misma que probablemente se extiende debajo de la placa sudamericana (Gutscher et al., 1999; Spikings et al., 2001; ver Figura 1).

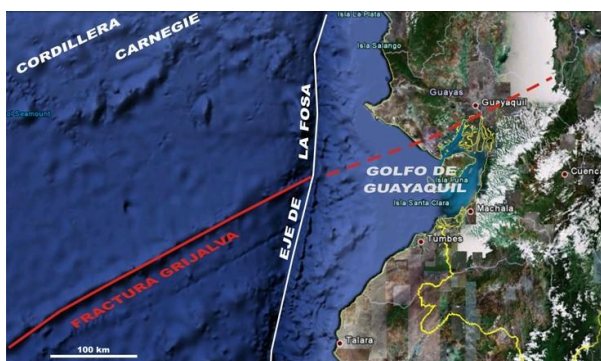


Figura 1. Mapa de ubicación.

2. Objetivos

El objetivo general es obtener un modelo estratigráfico-estructural integrando datos de bioestratigrafía y subsidencia, junto con registros geofísicos de pozos y secciones sísmicas.

Como objetivos específicos se tiene:

- Identificar las principales secuencias estratigráficas de 3er orden, desde el Mioceno Inferior hasta el Reciente.
- Identificar inicio y fin de actividad de fallas principales y estilos tectónicos dominantes.
- Determinar período de formación de las principales estructuras.
- Determinación de sistemas petrolíferos atractivos para la exploración y explotación.

3. Base de Datos

Considerando que la zona de estudio es costa afuera, se dispuso únicamente con datos de subsuelo (ver Figura 2). Se utilizaron:

- Registros geofísicos GR, SP y Resistividad de los pozos P1, P2, P3, P4 y P5.
- Bioestratigrafía: edad y ambiente de depósito.
- Litología: descripción de ripios de perforación.
- Velocidades Sísmicas: V_{RMS} y V_i .
- Líneas sísmicas 2D adquiridas por la empresa CGG.

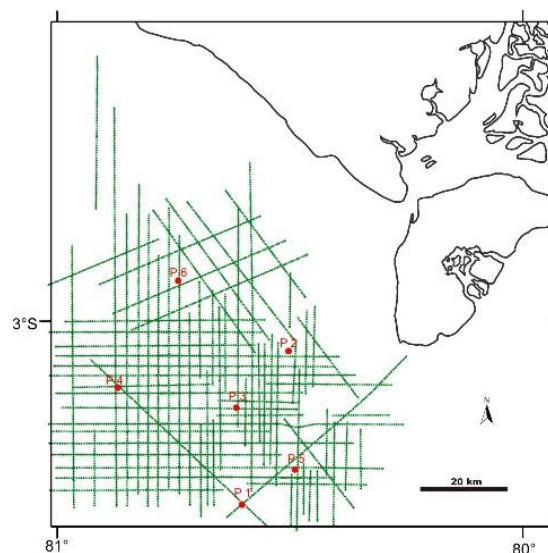


Figura 2. Mapa de ubicación de pozos y secciones sísmicas.

4. Metodología

Un estudio integrado busca como producto final un modelo integrado que permita la identificación de nuevas oportunidades de exploración y desarrollo, mediante la integración de toda la información disponible de geología y yacimientos. En este caso se siguió el siguiente proceso:

- Análisis de sedimentación, eustasia y subsidencia.
- Modelo estratigráfico: determinación de límites de secuencias y sistemas utilizando registros geofísicos de pozos.
- Conversión Profundidad a Tiempo: determinación de leyes de velocidades.
- Modelo Sísmico - Estructural: determinación de límites de secuencias, fallas y estructuras principales utilizando secciones sísmicas.
- Evolución tectónica: reconstrucción e implicaciones hidrocarburiíferas.

5. Análisis de Sedimentación y Subsistencia

Se realizó un análisis de las formaciones sedimentarias presentes en el Golfo, sus sucesiones paleoambientales y la relación con la subsidencia tectónica para determinar posibles límites de secuencia.

5.1. Formaciones sedimentarias y variaciones paleoambientales

La sedimentación del Golfo puede ser analizada desde el Mioceno Temprano hasta el Reciente, separándola en series sedimentarias correlacionables con la estratigrafía costa-adentro de la Cuenca Progreso e Isla Puná, excepto la serie sedimentaria más joven que no tiene equivalencia en tierra.

El **Paleógeno** representado por el Grupo Ancón solo fue perforado en el pozo P1 ubicado en el Levantamiento de Santa Elena. En el Golfo no ha sido alcanzado por las perforaciones pero se supone su existencia a mayores profundidades.

Las **Formaciones Dos Bocas/Villingota** no diferenciadas subafloran en la Isla Puná. En el Golfo no han sido alcanzadas por las perforaciones pero se supone su existencia a mayores profundidades.

La **Formación Subibaja** es atravesada parcialmente en el Golfo, reportándose como interestratificaciones de arcillolitas y areniscas cuarzosas. Corresponde a un ambiente estuarino transicional a continental palustre.

La **Formación Progreso** se describe como interestratificaciones de areniscas y lutitas carbonosas. Corresponde a un ambiente de plataforma interna a estuarino-deltaico.

La **Formación Puná** se reporta como interestratificaciones de areniscas y arcillolitas limosas, limolitas y lutitas. Corresponden a ambientes de plataforma media-externa, pasando a interna hasta deltaico-estuarino.

La **Zona N23** se reporta como una sucesión de areniscas gruesas y microconglomerados mal seleccionados.

Analizando datos bioestratigráficos a detalle de las formaciones encontradas en el Golfo y en subafloramientos de la Isla Puná, se evidencian marcadas discontinuidades paleobatimétricas, las mismas que están relacionadas con variaciones del nivel relativo del mar (ver Figura 3).

FORMACION	EPOCA	BIOZONA Y EDAD (MA)	PALEOAMBIENTE	Movimiento de la línea de costa
TABLAZO	Pleistoceno Tardío - Reciente	N23	Marino plat. interna	Somerización
PUNA	SUPERIOR	0.8 Pleistoceno Temprano	Marino muy somero a transicional	Regresión
	INFERIOR	1.9 N21	Marino plat. media-externa	Transgresión
		5.5 N19	Estuarino con transgresiones marinas	Inicio de transgresión
PROGRESO	Mioceno Tardío	10.5	Estuarino de agua salobre	Somerización
	Tope Mioceno Medio Tardío		Plataforma interna	Transgresión
SUBBAJA	ZACACHUM	Mioceno Temprano Tardío a Mioceno Medio Temprano	Estuarino transicional a continental palustre	Regresión
	SAIBA	Mioceno Temprano Tardío	Plataforma central a interna	Inicio de regresión
VILLINGOTA Y DOS BOCAS	Mioceno Temprano Medio	N6	Plataforma externa a talud continental	Máximo transgresivo
	Mioceno Temprano Temprano	N4		

Figura 3. Discontinuidades paleobatimétricas de las Formaciones Sedimentarias presentes en el Golfo de Guayaquil e Isla Puná.

5.2. Determinación de límites de secuencias

Por bioestratigrafía y litología en los pozos perforados en el Golfo de Guayaquil, se encontraron ambientes de depósito que van desde plataforma externa hasta estuarino-deltaico.

En las discontinuidades paleobatimétricas se evidenció dos casos que indican la presencia de un posible límite de secuencia:

- Sobre un complejo deltaico progradacional se depositaron facies de plataforma media o externa y/o depósitos de transgresión marina.
- En presencia únicamente de facies marinas, se depositaron facies de plataforma interna sobre facies de plataforma externa indicando somerización.

Del análisis realizado por Berrones (1994) se determinó que las tasas de subsidencia tectónica son constantes durante períodos mayores que las variaciones eustáticas de 3er Orden. Esto permitió obtener, del análisis de variaciones paleobatimétricas y de las tasas de subsidencia, los límites de secuencias existentes en el Golfo de Guayaquil (ver Figura 4).

6. Modelo Estratigráfico

La determinación de las secuencias estratigráficas con sus elementos (límites de secuencias, superficie de inundación y cortejos de sistemas), utilizando registros geofísicos de pozos y datos bioestratigráficos constituyen este modelo.

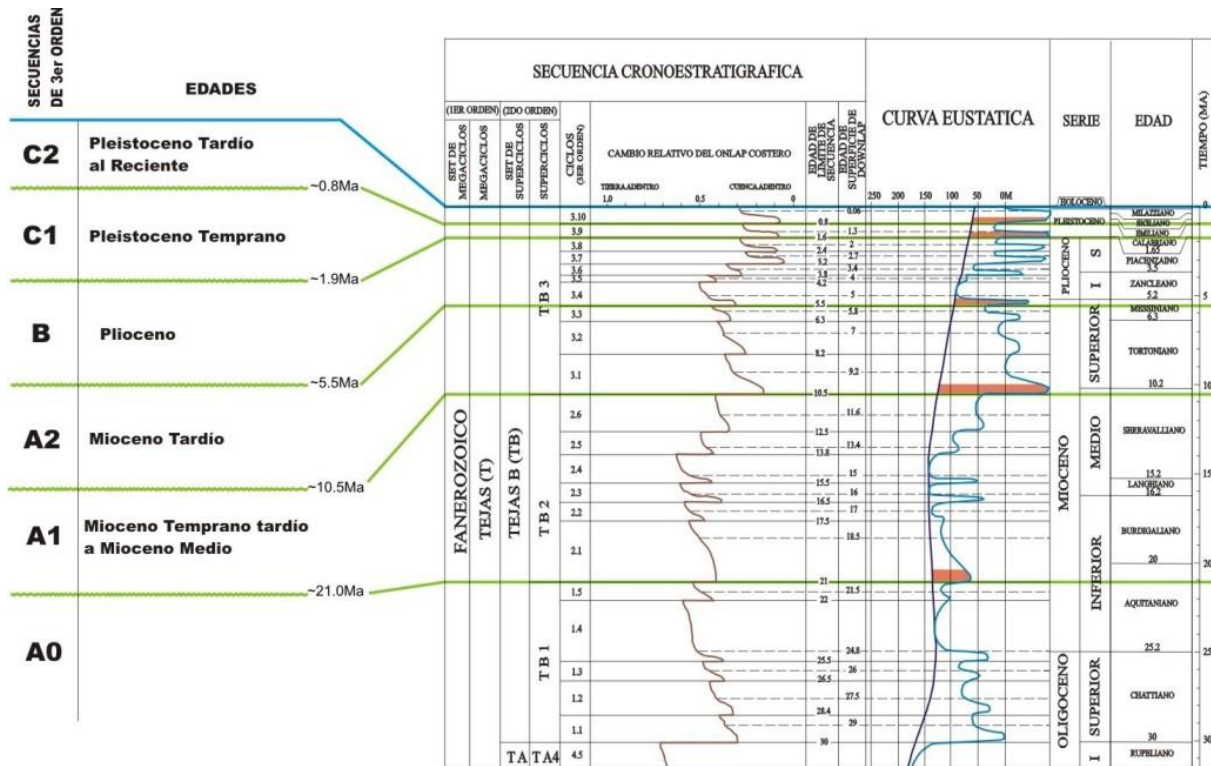


Figura 4. Secuencias de 3er Orden determinadas para el Golfo de Guayaquil.

Se utilizó el concepto de electrofacies basado en que los registros geofísicos de pozos reflejan en parte la litología, por consiguiente la configuración de las electrofacies se relaciona con las facies sedimentarias y cortejos de sistemas.

Los cortejos de sistemas encontrados en el Golfo de Guayaquil fueron los sistemas transgresivos (transgressive systems tract) y sistemas de mar alto (highstand systems tract).

Se realizó el análisis secuencial para cada pozo y se correlacionaron obteniendo la extensión areal de límites de secuencias, superficies de inundación máxima y cortejos de sistemas (ver Figura 5).

7. Conversión Profundidad a Tiempo

Para integrar la información de los pozos que está referenciada a profundidad con las secciones sísmicas que está referenciada al tiempo doble de tránsito de la onda sísmica, se realizó la denominada “conversión profundidad a tiempo”.

Se utilizaron las velocidades intervalar (V_i) y media cuadrada (V_{RMS}) obtenidas de la medida sísmica en superficie (procesamiento sísmico), las mismas que se relacionan por la fórmula de Dix:

$$V_i = \left[\frac{V_{RMSi}^2 T_{0i} - V_{RMSi-1}^2 T_{0i-1}}{T_{0N} - T_{0i-1}} \right]^{1/2}$$

derivada de esta fórmula se utilizó la expresión:

$$T_{0i} = T_{0i-1} \frac{V_i^2 - V_{RMSi-1}^2}{V_i^2 - V_{RMSi}^2}$$

como método numérico implícito para calcular el tiempo de tránsito de la onda sísmica y determinar las leyes de velocidades para cada pozo (ver Tabla 1). Estas se utilizaron para convertir la profundidad a tiempo y viceversa.

Pozo P3						
Nivel	h_i (pie)	h_i (m)	Δh_i (m)	V_i (m/s)	ΔT_{0i} (ms)	T_{0i} (ms)
Nivel del mar	0	0,0	0,0	1524	0	0
Base capa 1	-250	-76,2	76,2	1524	100	100
Base capa 2	-636	-193,7	117,5	1567	150	250
Base capa 3	-1443	-439,9	246,2	1641	300	550
Base capa 4	-2391	-728,8	288,9	1926	300	850
Base capa 5	-3994	-1217,3	488,5	2057	475	1325
Base capa 6	-4721	-1438,8	221,5	2531	175	1500
Base capa 7	-8174	-2491,4	1052,6	2339	900	2400
Base capa 8	-10109	-3081,1	589,7	2775	425	2825
Base capa 9	-12453	-3795,6	714,5	2722	525	3350
Base capa 10	-15025	-4579,7	784,1	3485	450	3800

Tabla 1. Leyes de velocidades sísmicas.

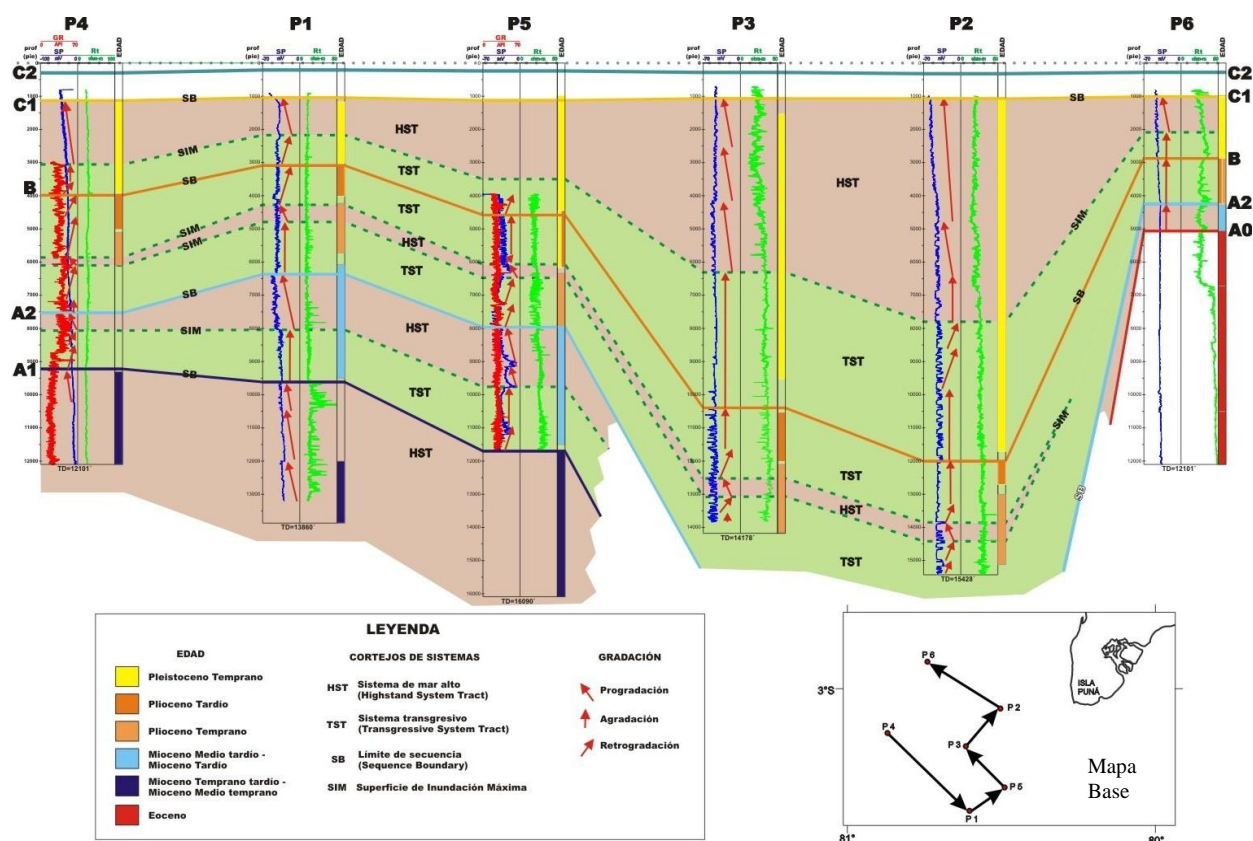


Figura 5. Correlación de Electrofacies. Identificación de límites de secuencias y cortejos de sistemas.

8. Modelo Sísmico-Estructural

Correlacionando la información del modelo estratigráfico con las secciones sísmicas se mapearon topes de secuencias, fallas y estructuras principales, elementos que en conjunto forman el modelo sísmico-estructural.

Utilizando los conceptos de Sismoestratigrafía se interpretaron 35 secciones sísmicas (1700 Km), identificándose 6 límites de secuencias (ver Tabla 2) reconocidos por terminaciones onlap encima de los límites; y toplap, truncamiento y truncamiento aparente, abajo (ver Figura 6).

Límite de Secuencia	Edad (Tope)	Color (Tope)
C2	Reciente	Blanco
C1	Pleistoceno Temprano	Amanillo dorado
B	Plioceno	Naranja
A2	Mioceno Tardío	Celeste
A1	Mioceno Medio	Azul
A0	Tope Paleógeno	Rojo

Tabla 2. Límites de secuencias interpretados en las secciones sísmicas.

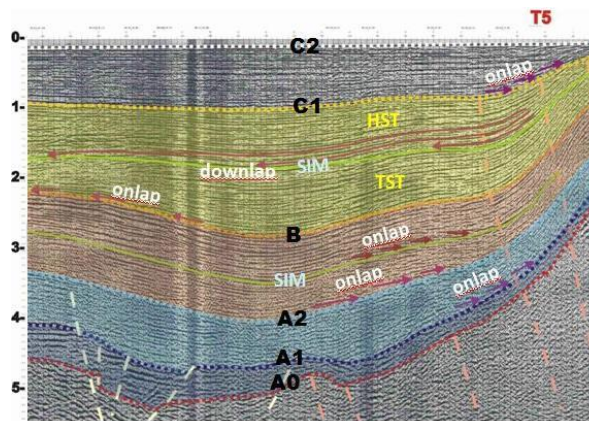


Figura 6. Mapeo de límites de secuencias, fallas y estructuras principales.

Como resultado de la interpretación sísmica se encontraron dos altos intracuenca formados por estructuras en flor positivas, que corresponden a las zonas de transferencia del desplazamiento de rumbo y que en conjunto forman el Sistema Transcurrente Guayaquil (ver Figura 7). El primer alto se ubica en la parte Central y NE incluyendo a los pozos P2 y P3; y el segundo al S y SE incluyendo a los pozos P1 y P5 (ver Figura 8A).

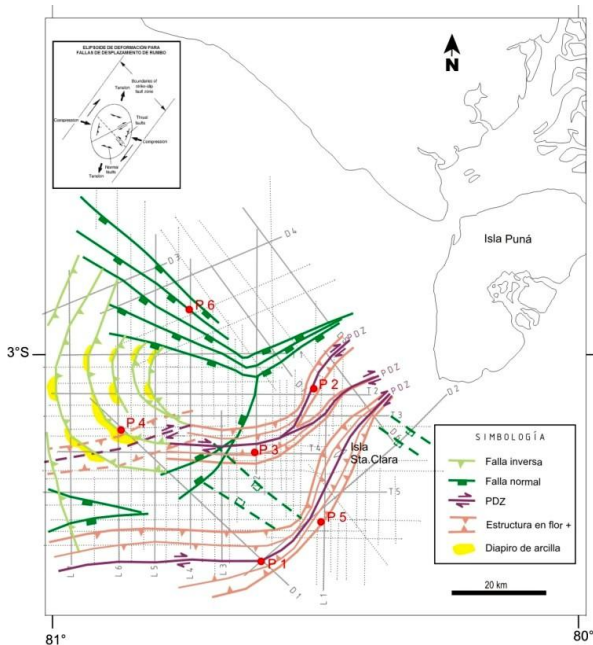


Figura 7. Mapa de fallas y estructuras principales determinadas en las secciones sísmicas.

En el N se encontraron fallas normales lítricas denominadas en este trabajo Fallas Normales del Norte, las mismas que están agrupadas en dos sistemas: el primero ubicado en el NE con rumbo $N60^\circ$ buzando al SE, y el segundo en el NO con rumbo $N120^\circ$ buzando al SO. Este último, también conocido como Fallas Posorja, ha generado un sistema conjugado de fallas lítricas-fallas inversas acompañadas de diapiros de arcilla que han emergido a través de los planos de las fallas inversas (ver Figura 8B).

Desarrollando un patrón conceptual coherente que armonice con las estructuras encontradas, con la evolución geológica regional, con otros ejemplos naturales y con modelos físicos actuales, se determinó que el Golfo de Guayaquil corresponde tectónicamente a una cuenca de pull-apart no tradicional sino en régimen transtensivo y con una zona de despegue dúctil (Figura 8C). Este modelo explica que exista el depocentro ubicado junto a las fallas de borde de cuenca del norte y que existan los altos estructurales intracuenca a manera de estructuras en flor que corresponden a las zonas de transferencia del desplazamiento de rumbo (Rahe et al., 1998; Sims et al., 1999; Wu et al., 2009).

El sistema conjugado de fallas lítricas-fallas inversas ubicado al NO y la presencia de diapiros arcillosos, se debe también a la presencia de una zona de despegue dúctil (Rowan et al., 2004; Krueger et al., 2009; Mourgues et al., 2009).

9. Evolución Tectónica

Los reflectores sísmicos son buenas aproximaciones primarias para determinar la posición de las superficies depositacionales originales y pueden utilizarse para una buena aproximación de la historia del movimiento de una falla. Con este fin se utilizaron los métodos de Sismoestratigrafía aplicados a Interpretación Estructural desarrollados por J.A. Cartwright (1992), llegando a reconstruir la evolución tectónica del Golfo desde el Mioceno Temprano al Reciente (ver Figura 9).

En el **Mioceno Temprano** el área del Golfo ya era una zona poco deprimida y con escasa movilidad del sustrato, se depositaron sedimentos de plataforma silicoclástica excepto sobre el Levantamiento de Santa Elena que se encontraba moderadamente emergido. Existían fallas normales con un rumbo aproximado $N120^\circ$ que más tarde constituirían las fallas de basamento y de borde de cuenca.

En el **Mioceno Medio** en el SE (vecindades de los pozos P1 y P5) y en el extremo SO, inició su actividad un sistema de desplazamiento de rumbo de dirección NE-SW que posteriormente sería la componente principal del Sistema Transcurrente Guayaquil.

En el **Mioceno Tardío** comenzó a actuar el sistema de fallas de borde de cuenca ubicado al N (Fallas Normales del Norte), lo que controló la distribución sedimentaria. La componente principal del Sistema Transcurrente Guayaquil ya generaba estructuras en flor positivas, a la vez que otra componente transcurrente ubicada al O se desarrolló durante esta época.

En el **Plioceno** la actividad de las Fallas Normales del Norte aumentó, en especial el sistema de rumbo $N120^\circ$ y buzamiento al SO (Fallas Posorja), provocando que el depocentro se ubique inmediatamente al SO de estas fallas. En el frente de deformación de las fallas normales comienzan a desarrollarse fallas inversas y diapiros de arcilla. La componente principal del Sistema Transcurrente Guayaquil continuó su actividad durante esta época.

En el **Pleistoceno Temprano** continuó la actividad de las Fallas Normales del Norte, de las fallas inversas en su frente de deformación, de la componente principal del Sistema Transcurrente Guayaquil y el desarrollo de diapiros. Al inicio de esta época comenzó su actividad la

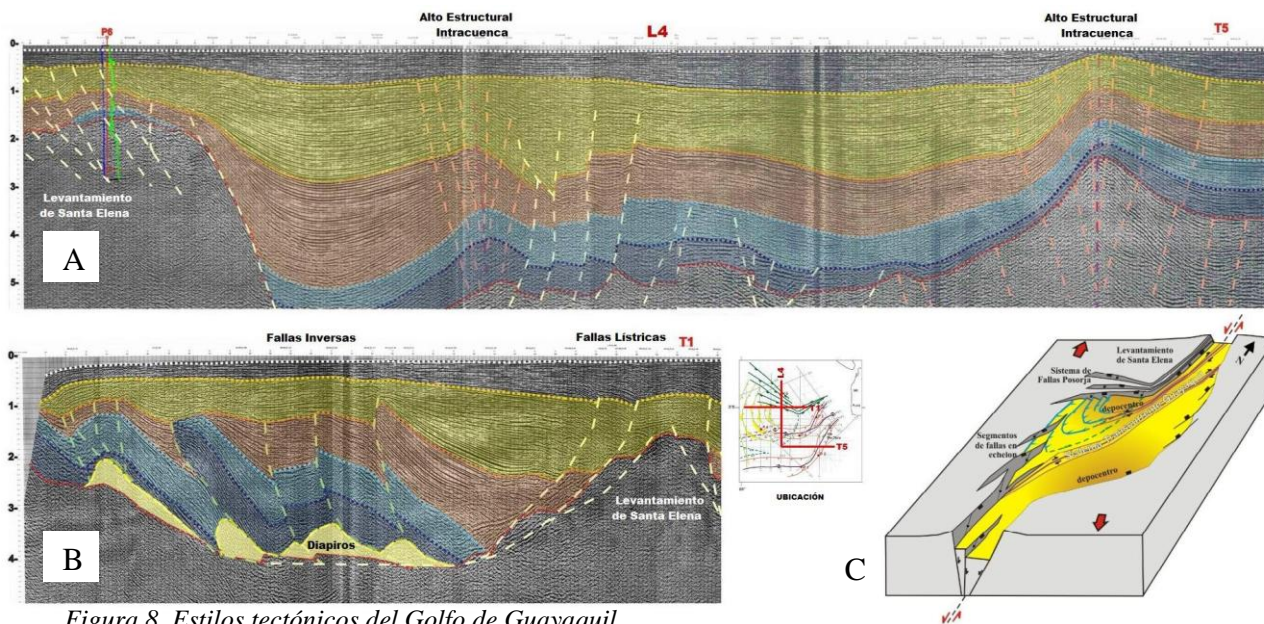


Figura 8. Estilos tectónicos del Golfo de Guayaquil.
 A) Altos estructurales intracuenca: zonas de transferencia del movimiento transcurrente dextral.
 B) Sistema deformacional conjugado de fallas listricas-fallas inversas.
 C) Modelo esquemático del Golfo de Guayaquil (adaptado de Wu et al., 2009).

componente del NE del Sistema Transcurrente Guayaquil generando estructuras en flor positivas.

En el **Pleistoceno Tardío** y el Reciente en general la actividad de las fallas disminuye.

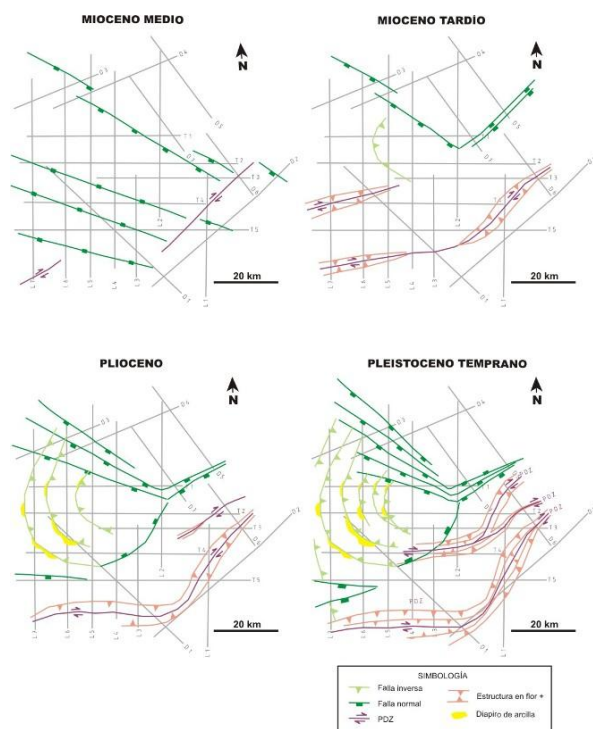


Figura 9. Evolución Tectónica basada en la datación de la actividad de fallas, edad de las estructuras y distribución sedimentaria.

El mecanismo que generó la apertura del Golfo probablemente se relacione con el choque de la Cordillera Carnegie con la trinchera ecuatorial hace 15 Ma en el Mioceno Medio (Spikings et al., 2001), producto de lo cual se comenzaron a desplazar hacia el NE los terrenos oceánicos alóctonos que forman el basamento de la costa ecuatorial (Gustcher et al., 1999) generando el movimiento transcurrente dextral regional.

10. Implicaciones Hidrocarburíferas

La existencia del campo gasífero Amistad, la presencia de petróleo en el pozo P1 (200 BOPD de 34°API, posible daño de formación) y los indicios en los pozos P4 y P5 tiene relación con la edad de la estructura. Se encuentran ubicados en la componente principal del Sistema Transcurrente Guayaquil en rocas de edad Mioceno Tardío.

Según Montenegro y Benítez (1991) el tiempo de expulsión y migración primaria en el Campo Ancón, ubicado en la Península de Santa Elena, se produjo desde el Oligoceno hasta el Mioceno Tardío.

Las muestras de crudo del Pozo Pacoa-1, ubicado en la Península, y del pozo P1 tienen biomarcadores que indican que pertenecen a una misma familia de petróleos (A. Aleman, 2000,

ver Tabla 3). La roca generadora es de tipo lutita de fuente clástica enriquecida con materia orgánica mixta (kerógeno de tipo II/III), de edad Terciaria y probablemente no más joven que el Eoceno Medio medio. Corresponde a un ambiente de depósito de una plataforma marina silicoclástica.

Pozo	Biomarcadores (determinados por GC-MS)						
	Pri/Phy	Pri/n-C17	Phy/n-C18	C23t/C30H	C24tet/C26tS	Ts/Tm	Olea/C30H
Pacoa-1	1.20	0.82	0.82	0.91	0.39	2.87	0.97
P1	1.12	0.67	0.95	0.15	0.49	3.18	0.50

Tabla 3. Biomarcadores de muestras de crudos de los pozos Pacoa-1 y P1 (A. Aleman, 2000)

Como producto del análisis de las relaciones temporales entre la edad de la roca generadora, edad de las estructuras y tiempo de expulsión y migración primaria, se determina que las estructuras formadas durante el Mioceno Tardío o antes son las más prospectivas a ser yacimientos efectivos de petróleo y/o gas, en este caso la componente principal y la componente Oeste del Sistema Transcurrente Guayaquil.

11. Conclusiones y Recomendaciones

En el Golfo de Guayaquil desde el tope del Paleógeno hasta el Reciente fueron encontrados 6 límites de secuencias de 3er Orden.

Tectónicamente el Golfo corresponde a una cuenca de pull-apart pero en régimen transtensivo y con una zona de despegue dúctil. Esto explica la presencia de altos estructurales intracuenca, distribución de depocentros, sistema conjugado de fallas lítricas-fallas inversas y diapiros de arcilla.

La apertura del Golfo de Guayaquil ocurrió en algún momento durante el Mioceno Medio cuando por el choque de la Cordillera Carnegie se comenzaron a desplazar hacia el NE los terrenos alóctonos que forman el basamento de la costa ecuatoriana, generando el movimiento transcurrente dextral regional y la extensión en el sur.

La presencia de petróleo, gas y sus indicios ocurre en la componente principal del Sistema Transcurrente Guayaquil. Esto es debido a que las estructuras que se desarrollaron desde antes del Mioceno Tardío son las favorables para ser yacimientos efectivos de hidrocarburos.

Según los biomarcadores la roca generadora del crudo del pozo P1 corresponde a una lutita enriquecida con materia orgánica mixta (kerógeno de tipo II/III), depositada en un ambiente de plataforma silicoclástica; de edad Cretáceo Tardío y más propiamente Terciario, no siendo más antigua que el Eoceno Medio si se considera a esta la misma roca generadora del crudo del pozo Pacoa-1.

Se recomienda realizar estudios geoquímicos que determinen el tiempo de expulsión y migración primaria en el Golfo.

12. Referencias Bibliográficas

- Aleman A. (2000). *Geological and Geophysical Evolution of the Progreso Basin, Southwestern Ecuador*. Duke Energy.
- Benítez S. (1995). *Évolution géodynamique de la province côtière sud-équatorienne au Crétacé supérieur - Tertiaire*, Géologie Alpine 71.
- Berrones G. (1994). *Evolución Geodinámica del Graben de Jambelí desde el Mioceno Superior hasta el Reciente*. Informe Interno Petroproducción.
- Cartwright J.A. (1992). *Application of Seismic Stratigraphic Methods in Structural Interpretation*. Royal School of Mines, Imperial College of London.
- Gutscher M.A., Malavieille J., Lallemand S., Collot J.Y. (1999). *Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision*. Earth and Planetary Science Letters 168, 255–270.
- Montenegro G. & Benítez S. (1991). *Estado Actual del Conocimiento Geoquímico de las Cuencas del Suroeste Ecuatoriano*. Boletín Geológico Ecuatoriano, Vol. 2, N°1, 27-46
- Rahe B., Ferril D.A., Morrins A.P (1998). *Physical analog modeling of pull-apart basin evolution*. Tectonophysics 285, 21-40.
- Rowan M.G., Peel F.J., and Vendeville B.C. (2004). *Gravity-driven foldbelts on passive margins*, in K.R. McClay, ed., Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems: AAPG Memoir 82, 157-182.
- Sims D., Ferrill D.A., Stamatakos J.A. (1999). *Role of a ductile décollement in the development of pull-apart basins: Experimental results and natural examples*. Journal of Structural Geology 21, 533-554.
- Spikings R.A., Winkler W., Seward D., Handler R. (2001). *Along-strike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust*. Earth and Planetary Science Letters 186, 57-73.
- Wu Jonathan E., McClay Ken, Whitehouse Paul, Dooley Tim. (2009). *4D analogue modelling of transtensional pull-apart basins*. Marine and Petroleum Geology 26, 1608–1623.