

PREDICCIÓN DE FACIES EN SISTEMAS HIPERPÍCNICOS. FORMACIÓN NARICUAL EN EL ÁREA NORTE DEL ESTADO MONAGAS; SUB-CUENCA DE MATORÍN. VENEZUELA .

**Por: José Marcano, Jair Carvajal, Manuel Delgado y
Carlos Zavala.**

**PREDICCIÓN DE FACIES EN SISTEMAS HIPERPÍCNICOS. FORMACIÓN NARICUAL
EN EL ÁREA NORTE DEL ESTADO MONAGAS; SUB-CUENCA DE MATURÍN.
VENEZUELA**

Por: José Marcano, Jair Carvajal, Manuel Delgado y Carlos Zavala
PDVSA. Laboratorio Geológico El Chaure. Puerto La Cruz, Venezuela, E-mail:
marcanojau@pdvsa.com

RESUMEN

En este trabajo se presentan las conclusiones de un estudio de subsuelo llevado a cabo en el Norte del Estado Monagas, específicamente en el área del Campo Travi y campos vecinos, aplicado en la sucesión clástica del Oligoceno de la Formación Naricual. Se analizaron un total de 12.719 pies de núcleo correspondientes a 30 pozos. El análisis de facies sugiere que estos depósitos clásticos se habrían acumulado en un medio marino de plataforma, por flujos gravitativos de sedimentos vinculados directamente a descargas fluviales de alta densidad y larga duración (sistemas hiperpícnicos). La determinación del modelo depositacional permitió aplicar nuevas técnicas de análisis genético de facies, las cuales permiten el procesamiento de un gran volumen de datos de núcleos y la elaboración de mapas de distribución de las facies en el subsuelo. Dichos mapas de índices tuvieron en cuenta el cálculo de índices de proximidad y lateralidad. Estos índices se basan en la cuantificación de las relaciones entre distintas categorías de facies relacionadas a carga de lecho (B), carga suspendida (S) y *lofting* (L). El cálculo y cartografiado de los índices se efectuó dentro de un marco estratigráfico secuencial, el cual resultó en la identificación de tres secuencias depositacionales de 3er orden, identificadas en este estudio, de base a tope, como M1, M2 y M3. Los mapas obtenidos indican que el sistema depositacional se encuentra dentro de zonas proximales, y que sería mucho más extenso que el área de estudio. El cartografiado de facies sugiere zonas de aporte de sedimentos múltiples, localizadas hacia el sureste, sur y suroeste. Las mejores facies desde el punto de vista de su petrofísica, están asociadas a las facies "B", seguidas de las facies "S" que presentan buenas porosidades pero pueden estar reducidas por la presencia de minerales de arcilla.

1- INTRODUCCIÓN.

Se presentan los principales resultados de un estudio de subsuelo llevado a cabo a partir del análisis sedimentológico de núcleos de la Formación Naricual, en pozos localizados en el área norte del estado Monagas. Los núcleos fueron analizados teniendo en cuenta su asignación al modelo sedimentológico, y sus facies catalogadas de acuerdo a un esquema genético. Además, se presenta una nueva metodología para caracterizar el modelo de acumulación de los depósitos clásticos gruesos de la Formación Naricual, a fin de mejorar el modelo predictivo aplicable a exploración y desarrollo. Los intervalos analizados comprenden los depósitos clásticos de edad Oligoceno, los cuales se disponen discordantemente y con un arreglo transgresivo sobre distintas unidades litoestratigráficas, cuyas edades van del Cretácico al Eoceno.

El estudio de estos núcleos reveló que estos depósitos se habrían acumulado a partir de flujos gravitativos de sedimentos en un medio subacuático de plataforma. La presencia de capas arenosas de espesor considerable con cambios graduales en la litología y en sus facies sugiere flujos sostenidos de larga duración. La asociación de estos depósitos gruesos con niveles heterolíticos correspondientes a depósitos de ritmitas de *lofting*, sugiere un medio marino afectado por un aporte fluvial directo. Consecuentemente, el modelo depositacional para el intervalo en cuestión fue asignado a sistemas hiperpícnicos, lo cual permitió aplicar nuevas técnicas de análisis y mapeo de facies, basado en el cálculo de índices predictivos (Zavala, C., 2007).

2.- OBJETIVO.

Establecer un modelo sedimentológico predictivo para la Formación Naricual, que integre la data de núcleos, perfiles eléctricos, sísmica y bioestratigráfica existente, con el objetivo final de mejorar el modelo predictivo aplicable a las actividades de exploración y desarrollo, a fin de contribuir a incrementar el éxito exploratorio en el área y a incrementar el factor de recobro.

3.- MARCO GEOLÓGICO.

El área de estudio abarca aproximadamente 450 km², y se encuentra ubicada en la Subcuenca de Maturín, que constituye la parte Este de la Cuenca Oriental de Venezuela (Fig. 1). El relleno sedimentario de la cuenca supera los 28.000 pies de espesor, principalmente de origen marino y continental, representados por una sucesión del Cretácico – Eoceno asociadas a un margen pasivo, y una sucesión de edad post-Eoceno asociada a un régimen compresivo (Erlich y Barrett, 1994).

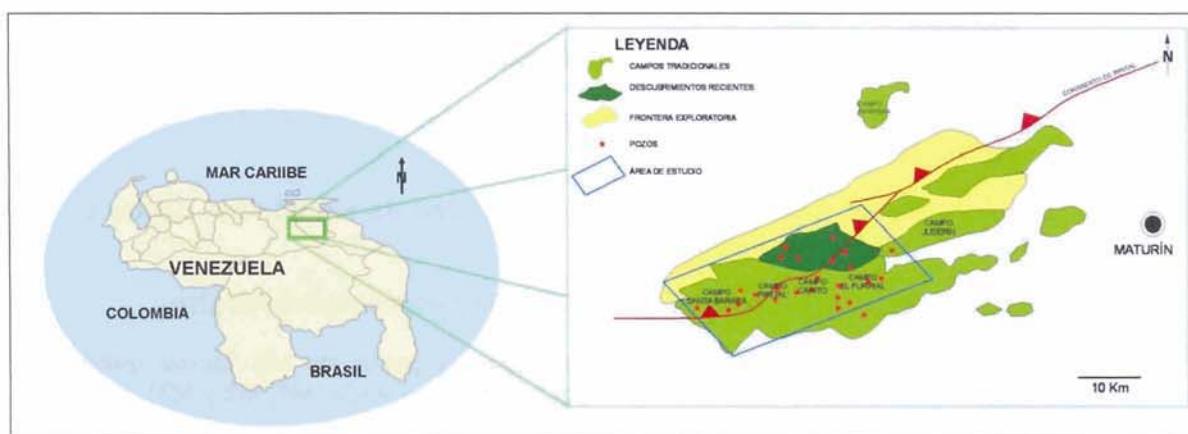


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

Esta sucesión Post-Eoceno representa la finalización de la megasecuencia de Margen Pasivo, que durante el Oligoceno fue interrumpida por la colisión de la Placa del Caribe contra la Placa Suramericana, por lo que la cuenca pasó a ser una cuenca *foreland*. La colisión oblicua migró progresivamente hacia el este durante el Oligoceno – Mioceno temprano, dividiendo la cuenca *foreland* en tres áreas: (1) un área correspondiente a la zona de plataforma, (2) una zona central correspondiente al *foredeep* y (3) una región al norte correspondiente al área sobre corrida. (Parnaud et al., 1995).

La sección analizada corresponde a la Formación Naricual, la cual, en su sección tipo (Mioceno temprano – Oligoceno Superior), es marcadamente diferente a la definida en el subsuelo (Oligoceno Superior) (Socas, 1991), en lo referente a su marco tectónico de sedimentación. Esto es debido a que se plantea una doble fuente de aporte de sedimentos para la misma: una para sus facies del norte (sección tipo), como bordeando un frente de corrimientos, mientras que al sur (en el subsuelo) tendría una fuente del interior del cráton (Shlumberger, 1997).

La fuente detrítica ubicada al Noroeste (sección tipo), depositó más de 1500 metros de molasa con niveles de carbón pertenecientes a la Formación Naricual, acumulados en ambientes de plataforma interna muy subsidente e inestable. Hacia el noroeste, el alóctono Caribe Central está en proceso de levantamiento y desplazamiento hacia el este. Su erosión

intensa alimenta las molasas arenoso-lutíticas de la Formación Naricual y lutíticas de la Formación Carapita (Shlumberger, 1997).

La fuente de sedimentos clásticos ubicada al sur, provenientes del interior de cráton, depositó secuencias espesas de areniscas de grano medio-grueso o fino-medio con intercalaciones de arcillitas grises pertenecientes a la Formación Naricual en el subsuelo del norte del estado Monagas, siendo esta última el objetivo de este estudio.

4.- METODOLOGÍA.

Las principales actividades realizadas, se resumen a continuación (Fig. 2):

1. Recopilación de información, generación de base de datos y selección de núcleos.
2. Descripción sedimentológica del núcleo:
 - a. Análisis de facies y asignación de facies de acuerdo a su clasificación genética.
 - b. Elaboración de tablas Excel con espesores de facies y observaciones (Fig. 3).
 - c. Calibración núcleo-perfil e integración de las facies con los perfiles eléctricos.
3. Correlación regional, análisis secuencial y ubicación de los núcleos dentro de un esquema estratigráfico secuencial.
4. Elaboración de columnas de facies a escala 1:500 y hoja sedimentológica.
5. Cálculo de índices de proximidad y lateralidad a partir de las facies genéticas identificadas para cada secuencia deposicional reconocida (M1, M2 y M3).
6. Elaboración de mapas de facies, índices y tendencias de facies.
7. Elaboración de un modelo deposicional predictivo.

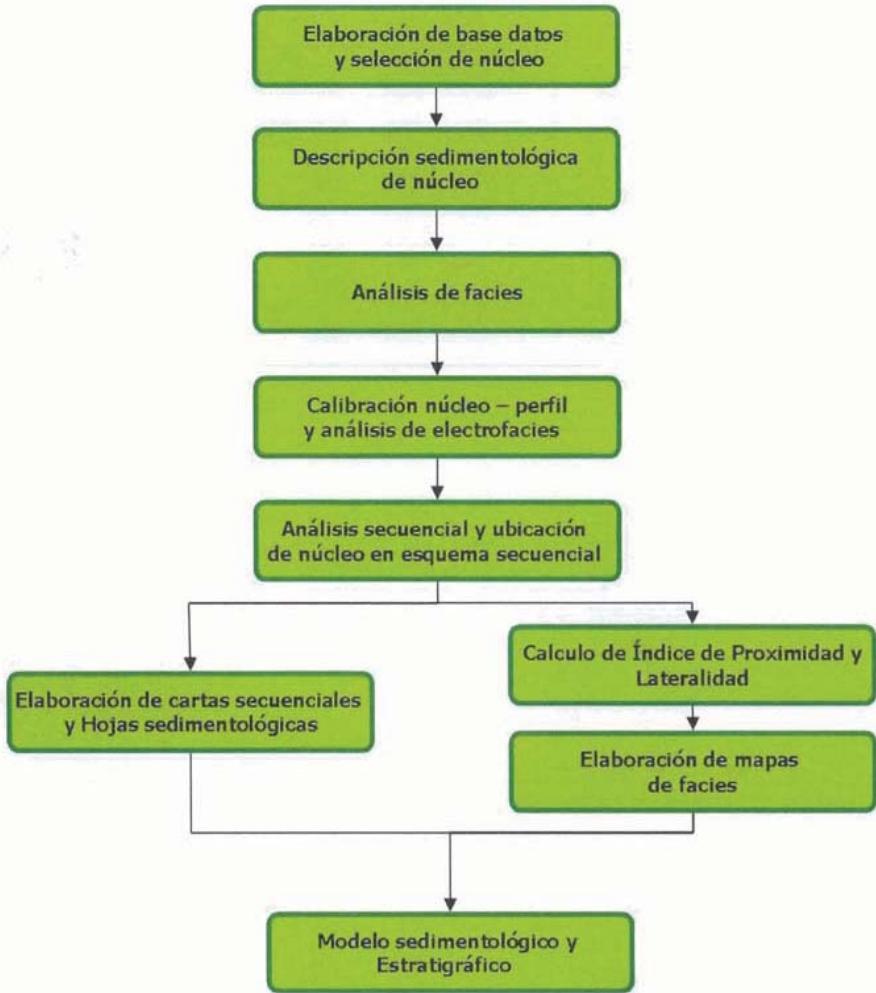


Figura 2: Flujoograma de procesos para establecer un modelo sedimentológico.

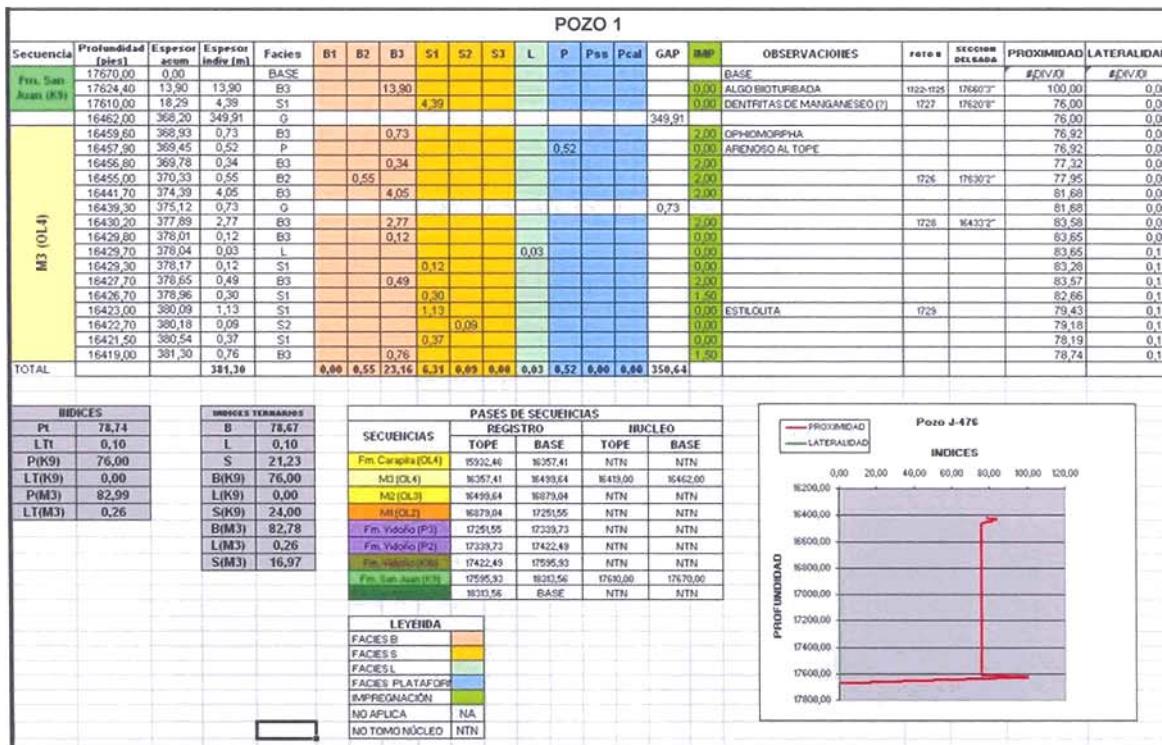


Figura 3: Vista de una tabla Excel utilizada para la descripción de núcleo y el cálculo de índices,

5.- ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO PREDICTIVO.

5.1.- Análisis de Facies Genético.

La discriminación, clasificación y análisis de facies ha sido efectuado tomando en cuenta un modelo genético-descriptivo desarrollado y calibrado por Carlos Zavala durante los últimos cinco años, el cual ha sido diseñado específicamente para el análisis de sistemas hiperpicnícos. Dicho modelo de facies ha sido aplicado con éxito para el análisis de reservorios clásticos en las formaciones Lajas, Tordillo, Lotena, Mulichinco y Rayoso (Cuenca Neuquina, Argentina), Formación Magallanes (Cuenca Austral, Argentina) y está siendo aplicado actualmente en las cuencas de Burgos y Veracruz (Méjico), Cuenca de Maracaibo y Cuenca Oriental (Venezuela) y Cuenca de Colón (*Columbus Basin, Trinidad & Tobago*). Este modelo genético se basa en la discriminación de tres categorías básicas de facies (Fig. 4). Las facies tipo "B" (*bedload*) comprenden a aquellas relacionadas con procesos de carga de lecho, la cual se encuentra vinculada en su origen al pasaje de un flujo turbulento de larga duración. Las facies "S", por otra parte, corresponden a depósitos relacionados directamente al colapso gravitativo de los materiales transportados en suspensión por turbulencia en el cuerpo del flujo principal sobrepasante. Finalmente, las facies L se relacionan a procesos de *lofting* en un medio marino (Zavala C., 2006).

La utilización de un esquema de facies genético descriptivo proporciona nuevas perspectivas al análisis paleoambiental, ya que permite no solo el cartografiado de facies dentro de las zonas analizadas, sino que también permite la predicción de facies en zonas no prospectadas. En este sentido, el modelo de facies que se presenta a continuación es altamente predictivo, ya que las tres categorías generales de facies son interdependientes y permiten la utilización de índices analíticos. En la Fig. 5 se presenta el esquema conceptual básico para la interpretación genética de las facies identificadas. A continuación se describirán las principales características de las facies identificadas (Zavala C., 2007).

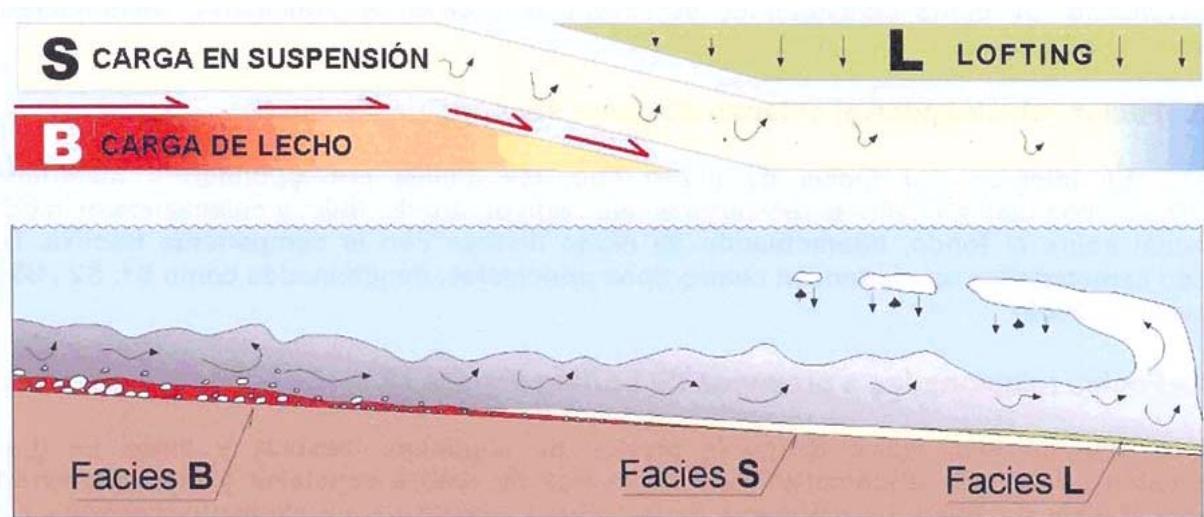


Figura 4: Modelo conceptual para la clasificación y análisis de facies (Zavala, 2006).

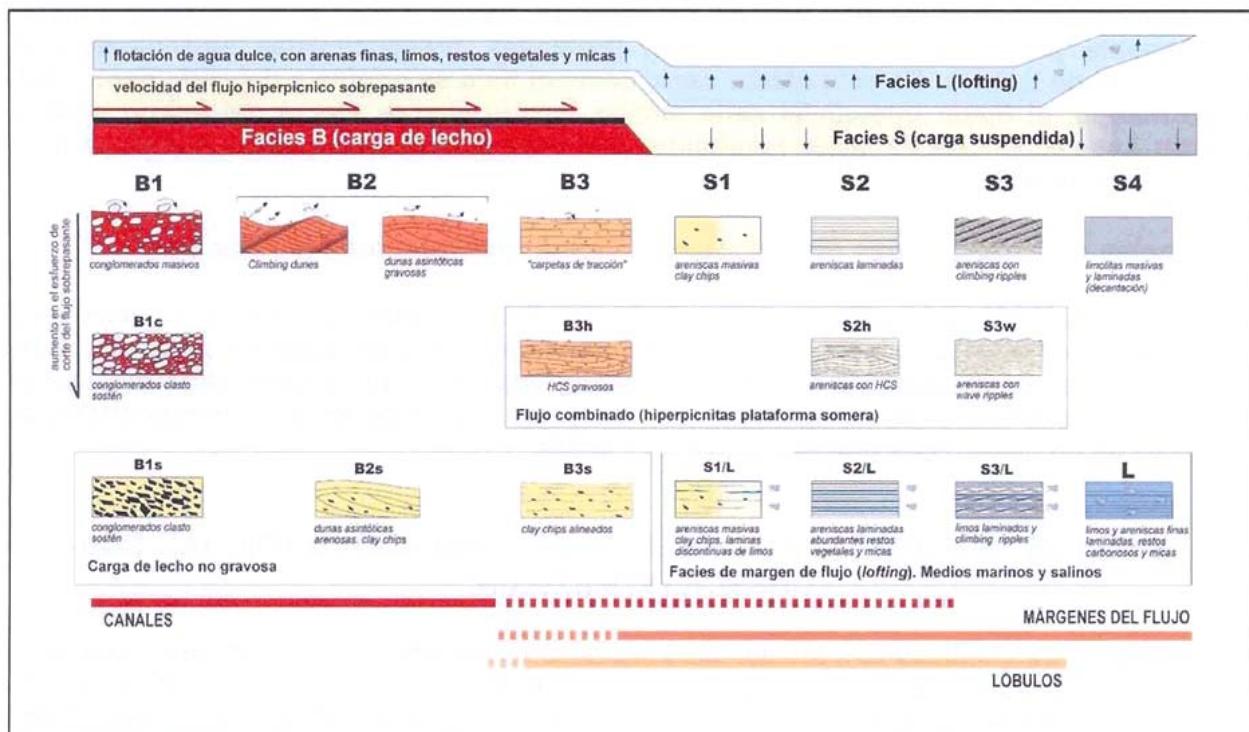


Figura 5: En el esquema conceptual para la interpretación genética de las facies clásticas relacionadas a sistemas hiperpícnicos, las facies tipo B corresponden a carga de lecho relacionada a un flujo turbulento sobrepasante de larga duración. Las facies de tipo S se relacionan al colapso del material en suspensión en el flujo turbulento y las facies L, corresponden a arenas finas y limos laminados con abundantes restos vegetales, relacionados a la pluma de "lofting". Esta última facies es característica de medios marinos. (Zavala, C., 2006).

5.2.- Facies relacionadas a procesos de carga de lecho (facies B).

Comprende distintos tipos de facies, normalmente de grano grueso, originadas a consecuencia del arrastre ejercido por el flujo turbulento sobre el fondo del cauce fluvio-hiperpícnico. De modo característico se reconocen tres tipos principales, denominados como B1, B2 y B3 (Zavala C., 2006).

5.3.- Facies relacionadas al colapso de carga suspendida (facies S).

Se integran por facies de grano fino, las cuales corresponden a materiales transportados originalmente como carga suspendida dentro del flujo, y colapsados de modo gradual sobre el fondo, interactuando de modo diverso con la componente tractiva. De modo característico se reconocen cuatro tipos principales, denominados como S1, S2 , S3 y (Zavala C., 2006).

5.4.- Facies relacionadas a procesos de *Lofting* (Facies L).

Integran esta facies delgados niveles de areniscas masivas y limos de gran extensión lateral con abundantes intercalaciones de restos vegetales y (eventualmente) micas (Zavala C., 2006). La presencia de la facies L constituye un elemento diagnóstico y característico de la sedimentación hiperpícnica en un medio marino, ya que sugiere la existencia de un flujo turbulento con un fluido intersticial de menor densidad (agua dulce) que aquel del medio hospedante (agua de mar), derivado de la descarga fluvial directa. Por otra parte, si a pesar de encontrarnos en un medio marino tenemos depósitos con un buen desarrollo de ondulitas de tipo *climbing ripples* en arenas finas, estas podrían sugerir posiblemente procesos de resedimentación (turbiditas convencionales episódicas) por inestabilidad de taludes. En este último caso, como el flujo se origina y deposita dentro del medio marino, el fluido intersticial sería similar, por lo cual el efecto del *lofting* estaría inhibido. Las secuencias de facies resultantes serían de esta manera similares a las de tipo Bouma (Ta-e) (Zavala C., 2006).

5.5.- Facies no relacionadas directamente a flujos hiperpícnicos (Facies P).

Esta facies se compone por areniscas finas, lutitas y fangolitas masivas, bioturbadas. Los niveles lutíticos presentan a menudo abundantes restos de moluscos. Las areniscas por su parte aparecen altamente diagenetizadas, con abundantes microfracturas y dendritas posiblemente de manganeso. Se interpreta que esta facies correspondería a depósitos de *offshore* hasta prodelta (Zavala C., 2006).

6.- ANÁLISIS DE FACIES PREDICTIVAS DE LA FORMACIÓN NARICUAL, SUB-CUENCA DE MATURÍN.

Las facies clásticas con elementos texturales de tamaño medio a grueso presentan una fábrica y arreglo interno que sugieren un origen relacionado al movimiento de flujos densos con un elevado contenido de materiales en suspensión. El análisis de facies sugiere que estos depósitos clásticos se habrían acumulado en un medio marino de plataforma, a partir de flujos densos de larga duración vinculados a descargas fluviales directas (sistemas hiperpícnicos).

La descripción detallada de los núcleos permitió discriminar 12 facies clásticas para el área de estudio (Formación Naricual). A continuación se presenta un cuadro de síntesis (Fig. 6) y las fotografías (Figs. 7, 8, 9 10, 11 y 12) mostrando las principales características de las facies clásticas identificadas en los núcleos analizados para la Formación Naricual.

	facies	litología	estructuras sedimentarias	geometría	origen	espesor (metros)
carga de lecho	B1	conglomerados finos matriz sostén	masivos, clay chips	cuerpos tabulares a lenticulares	Carga de lecho por el pasaje de flujos estacionarios. Bajo esfuerzo de corte	0.1 - 0.9
	B2	conglomerados finos a areniscas conglomeráticas	estratificación diagonal de bajo a mediano ángulo. clay chips.	cuerpos irregulares y rellenos de canales	Carga de lecho. Rolido y saltación modif. Migración de dunas asintóticas	0.2 - 7
	B2s	areniscas medianas a gruesas	estratificación diagonal de bajo a mediano ángulo. clay chips.	cuerpos irregulares y rellenos de canales	Carga de lecho. Rolido y saltación modif. Migración de dunas asintóticas	0.2 - 1.5
	B3	conglomerados finos a areniscas conglomeráticas	laminación horizontal difusa. Clastos alineados	cuerpos tabulares	Carga de lecho. Rolido	0.12 - 14.75
	B3h	conglomerados finos a areniscas conglomeráticas	laminación diagonal tipo hummocky	cuerpos tabulares	Carga de lecho. Rolido. flujo combinado	0.2 - 3
decantación + tracción / decantación	S1	areniscas finas a gruesas moderada selección	masivas, clay chips, dish (escape de agua)	cuerpos tabulares	agradación progresiva a partir de flujos estacionarios	0.1 - 9.5
	S1/L	areniscas finas a gruesas moderada selección, delgadas intercalaciones de lutitas discontinuas	masivas, clay chips, dish estructuras de carga. clay chips plásticos	cuerpos tabulares	agradación progresiva a partir de flujos estacionarios (transición a levee)	0.1 - 3.6
	S2	areniscas finas a medianas	laminación paralela	cuerpos tabulares	agradación progresiva a partir de flujos estacionarios	0.1 - 3
	S2h	areniscas finas a medianas	laminación diagonal tipo hummocky	cuerpos tabulares	agradación progresiva a partir de flujos estacionarios (flujo combinado)	0.1 - 1.5
	S3	areniscas finas a medianas	rizaduras de corriente (ripples)	cuerpos tabulares	tracción-decantación a partir de flujos estacionarios	0.1 - 0.3
	L	limolitas y areniscas finas, restos vegetales y micas	masivas a laminadas	cuerpos tabulares	decanación a partir de plumas de lofting	0.1 - 6
	P	lutitas y areniscas finas	masivas a laminadas	cuerpos tabulares	decanación (offshore/prodelta hasta shoreface)	0.1 - 10

Figura 6: Cuadro de síntesis mostrando las principales características de las facies clásticas reconocidas en los núcleos analizados para la Formación Naricual.

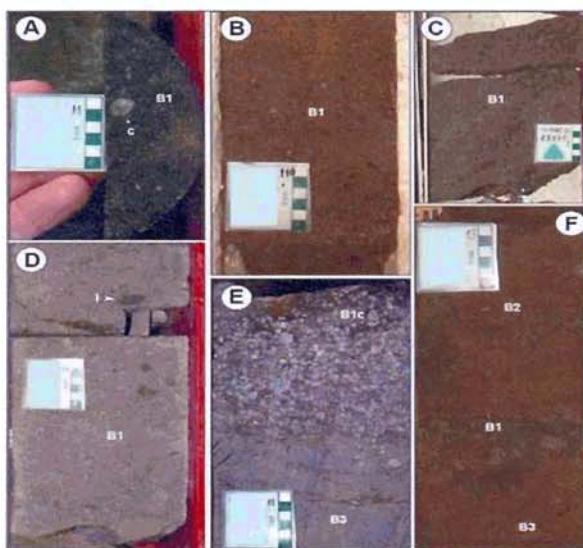


Figura 7: Facies B1, A: Detalle de un clasto de cuarzo (c) en areniscas gruesas. B y C: Conglomerados finos con matriz arenosa, de aspecto masivo. D: Conglomerado masivo, note la imbricación de los clastos (I). E: Areniscas medianas con clastos dispersos (facies B3) las cuales pasan a conglomerados finos masivos, con estructuras de deformación en la base (B1c). F: Conglomerados masivos, sucedidos por areniscas conglomeráticas con estratificación diagonal (facies B2).

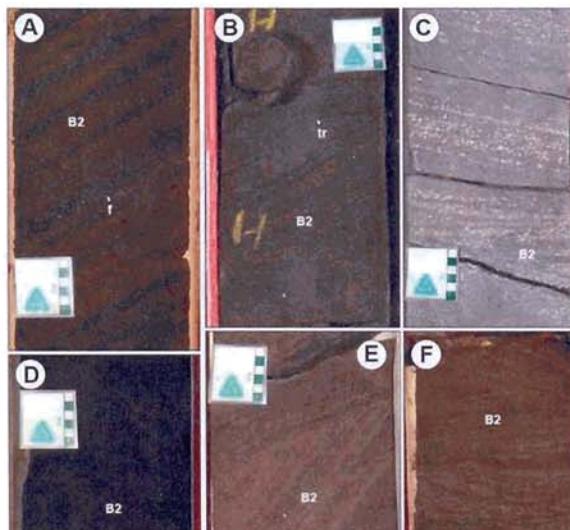


Figura 8: Facies B2, A y D: Areniscas medianas a gruesas, con estratificación diagonal. Note las heterogeneidades en el “foreset” (f). B y C: Detalle de la base de los cuerpos con estratificación diagonal asintótica. Note el progresivo aumento en el ángulo de los “foresets” y la presencia hacia el techo de superficies de truncación interna (tr) o “coset”. E y F: Detalle de formas festoneadas correspondientes a la migración de formas de lecho de crestas sinuosas. Esta facies es diagnóstica de cuerpos canalizados. En la mayoría de los casos esta facies se encuentra impregnada de hidrocarburos y con buenas propiedades petrofísicas aparentes.

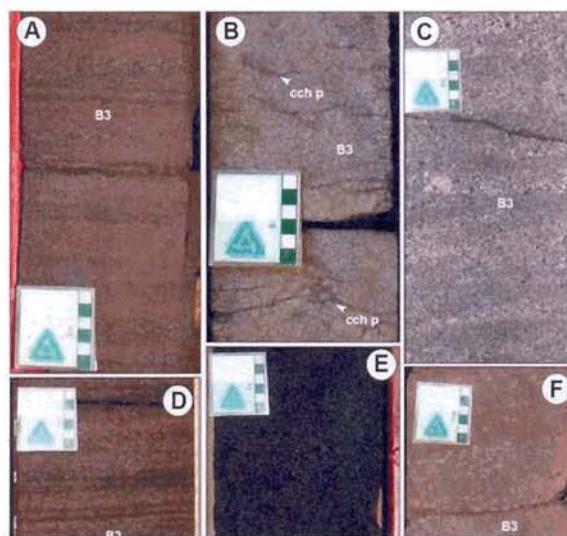


Figura 9: Facies B3, A, D y F: Areniscas gruesas a conglomerados finos con laminación horizontal difusa, vinculadas a procesos de carga de lecho a la base de un flujo turbulento. B: Areniscas gruesas con clastos de arcilla deformados (plásticos, cch p) posiblemente erosionados de limos singenéticos en zonas de “levee”. C: Detalle de facies B3, note la laminación difusa de bajo ángulo. E: Areniscas gruesas con clastos dispersos. Normalmente esta facies presenta una buena impregnación de hidrocarburos.

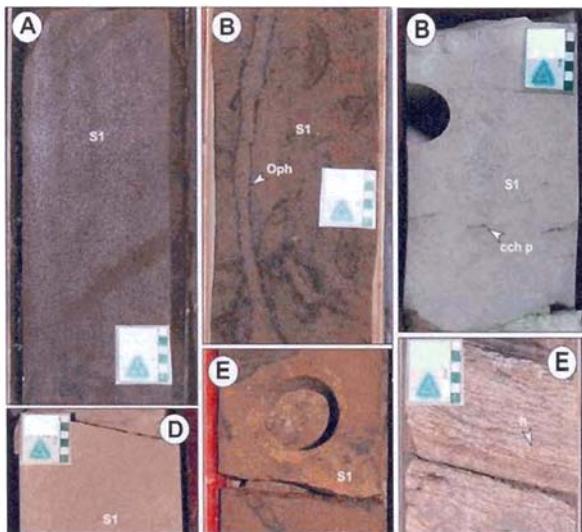


Figura 10: Facies S1, A, D: Areniscas finas masivas, acumuladas por agradación progresiva a partir de flujos turbulentos casi estacionarios. B y E: Areniscas finas masivas, con trazas fósiles de Ophiomorpha (Oph) posiblemente relacionadas a crustáceos transportados por el flujo (“doomed pioneers”, Grimm y Föllmi, 1994) y F: Areniscas finas masivas, con abundantes restos vegetales alineados, los cuales posiblemente correspondan a restos de hojas (h)

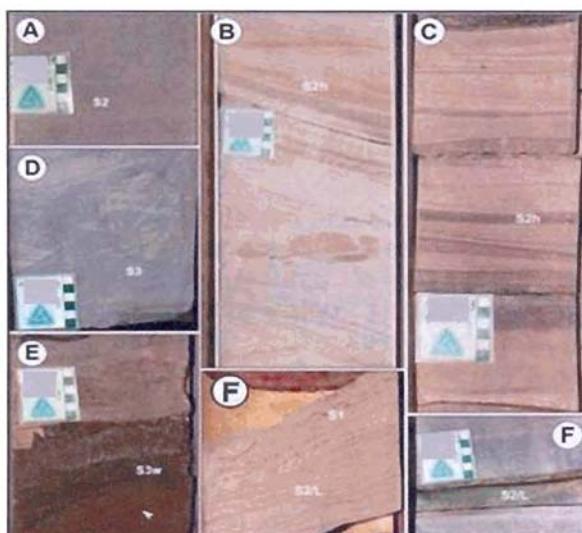


Figura 11: Facies S2, S2h, y S3, A: Areniscas finas con laminación horizontal (facies S2). D: Areniscas finas con rizaduras escalonadas (facies S3). E: Areniscas finas con rizaduras escalonadas de ola (facies S3w). B – C: Detalle de areniscas finas con laminación paralela de tipo “hummocky” (facies S2h) relacionados a flujos unidireccionales afectados por una componente oscilatoria (flujos combinados). Esta facies sugiere medios someros. E y F: Areniscas finas con laminación paralela e intercalaciones de niveles limosos correspondientes a la facies S2/L. Esta facies es característica de zonas de “levee”.

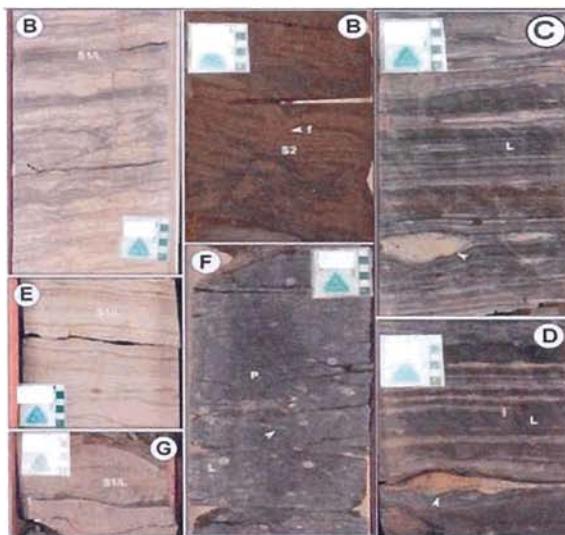


Figura 12: Facies S1L, S2, L y P, A, E y G: areniscas finas masivas, las cuales incluyen delgadas intercalaciones de limolitas carbonosas y abundantes restos vegetales (facies S1/L). B: areniscas finas con laminación horizontal (facies S2). Se indica una traza de escape o *fugichnia* (f) (facies S2). F: Facies de plataforma (P), se observan lutitas de “offshore” /prodelta con abundantes restos de moluscos (flecha). C y D: limolitas con delgadas intercalaciones de areniscas finas, con restos carbonosos y micas orientadas.

7.- ANÁLISIS SECUENCIAL.

A fin de efectuar un análisis sedimentológico-evolutivo de la sucesión, fue necesario establecer un marco estratigráfico-secuencial (relaciones – tiempo / espacio) de referencia, basado en la distinción de distintos órdenes de ciclicidad. Un aspecto fundamental para encarar exitosamente cualquier estudio de estratigrafía secuencial es la jerarquización adecuada de las superficies límites (Campbell 1967; Van Wagoner *et al.*, 1990).

El establecimiento de las líneas de correlación principales y el análisis de la ciclicidad permitió el reconocimiento de tres ciclos principales de introducción de material clástico (secuencias), denominados en este estudio como secuencia M1, M2 y M3 (Fig. 13). Estos ciclos de sedimentación a su vez fueron subdivididos en ciclos menores de alta frecuencia. De esta manera, dentro de la secuencia M1 se reconocieron tres ciclos menores (o secuencias elementales, en el sentido de Mutti *et al.*, 1994), denominados como M1.1, M1.2 y M1.3. La secuencia M2 por su parte se integra por dos secuencias elementales, correspondientes a M2.1 y M2.2. Finalmente, dentro de la secuencia M3 se reconocieron tres secuencias elementales, denominados M3.1, M3.2 y M3.3. Litoestratigráficamente, las secuencias M1, M2 y parte de la M3 (M3.1 y M3.2) corresponden a la Formación Naricual mientras que la parte superior de la secuencia M3 (M3.3) corresponde a la parte basal de la Formación Carapita (equivalente temporal de la Formación Oficina).

Los datos bioestratigráficos (Sánchez *et al.*, 2007) sugieren que el intervalo analizado se habría acumulado durante el Oligoceno. De acuerdo a los estándares cronoestratigráficos (IUGS), el intervalo Chattiano (Oligoceno tardío) comprende unos 5 millones de años. De este modo, las secuencias mayores identificadas (M1 a M3) corresponderían a ciclos de 3er orden (1-10 millones de años), mientras que los ciclos de alta frecuencia (secuencias elementales) caerían dentro de 4to orden (centenares de miles de años).

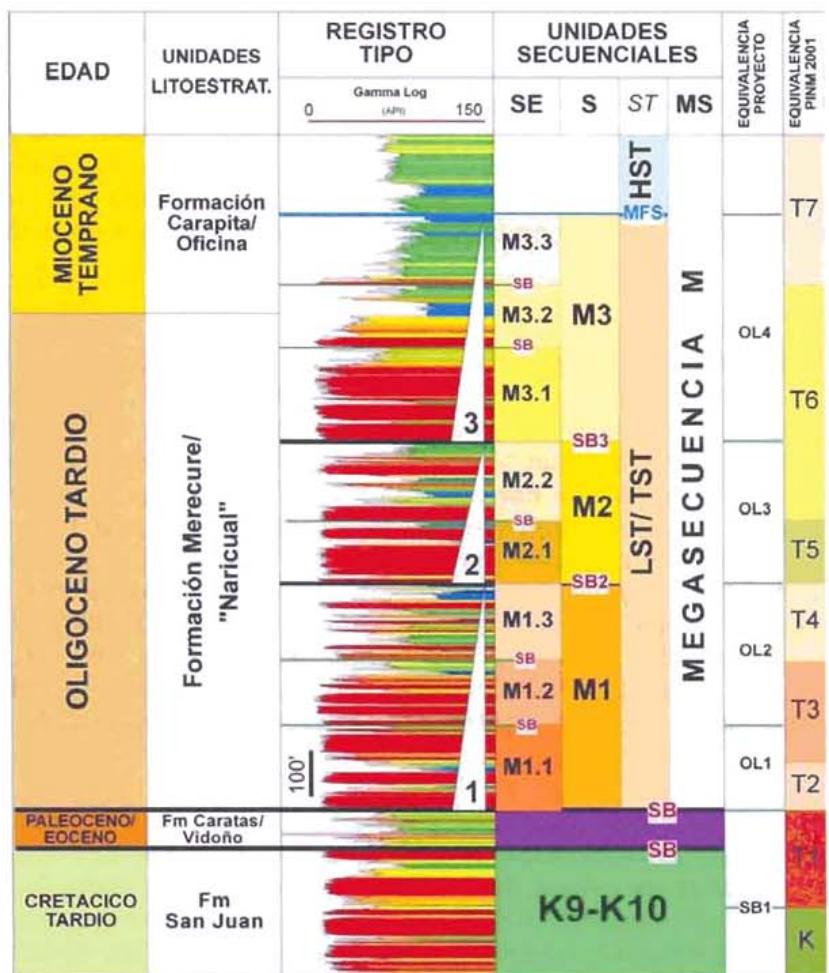


Figura 13: Cuadro de síntesis del esquema estratigráfico secuencial utilizado en el presente trabajo. Se indica la jerarquía de las unidades secuenciales reconocidas, las cuales corresponden a ciclos de introducción de materiales clásticos controlados por factores alocíclicos. ES: Secuencia elemental; S: secuencia; ST: Cortejo de facies; MS: Megasecuencia; SB: Límite de secuencia; LST: Cortejo de bajo nivel; TST: Cortejo transgresivo; HST: Cortejo de alto nivel; MFS: Superficie de máxima inundación; 1, 2 y 3: Ciclos litogenéticos principales.

8.- ÍNDICES GENÉTICOS Y MAPAS DE FACIES.

8.1.- Análisis de la posición relativa de los cuerpos clásticos.

El análisis de facies relacionadas a sistemas hiperpícnicos efectuados con un esquema de facies de base genética permite efectuar análisis predictivos, los cuales permiten conocer la posición relativa dentro del sistema. La ubicación relativa del dato permite planificar de modo más adecuado el desarrollo futuro de los yacimientos y, asimismo, plantear estrategias exploratorias en áreas de frontera (Zavala *et al.*, 2007).

El análisis de facies predictivo se basa en la cuantificación de dos índices, denominados como Índice de Proximidad e Índice de Lateralidad (Zavala *et al.*, 2007), los cuales permiten conocer la posición del dato respecto del sistema en su conjunto, la ubicación posible de las facies genéticamente relacionadas en un marco local y regional, y el mapeo de facies respecto del tipo y calidad de facies. El cálculo de estos índices se basa en una cuantificación relativa de las proporciones de las tres categorías de facies utilizadas

para el análisis de sistemas hiperpícnicos, las cuales ya fueron explicadas y que corresponden a las facies B, S y L (Fig. 4) (Zavala et al., 2007).

Cada una de las categorías de facies genéticas utilizadas para el análisis de sistemas hiperpícnicos tiene un significado preciso, cuya adecuada valoración nos permite obtener datos útiles para la determinación del tipo y localización de las facies clásticas. A modo de síntesis, a continuación se enumera el significado principal de cada una de las categorías para el análisis predictivo de facies y su ubicación dentro del sistema depositacional (Zavala et al., 2007).

Las Facies B corresponden a una familia de facies originada por el arrastre provocado por el movimiento cuenca adentro de un flujo turbulento cargado de sedimentos. Consecuentemente, esta familia de facies es característica de zonas de *bypass* sedimentario, o zonas de transferencia relativamente proximales. Así mismo, estas facies son más comunes en zonas próximas al eje de cuerpos canalizados. Es una categoría de facies sumamente predictiva, ya que permite determinar la presencia de cuerpos arenosos en zonas internas para tiempos equivalentes. Petrofísicamente son facies moderadas a buenas, ya que normalmente incluyen las fracciones más gruesas presentes dentro del sistema, aunque a menudo la presencia de materiales finos en los poros puede obliterar parcialmente sus propiedades petrofísicas. En este sentido, el material intersticial y su posterior historia diagenética tendrán una gran importancia en las características petrofísicas finales, ya que si el flujo turbulento sobrepasante contiene materiales volcánicos y/o fango calcáreo, el depósito puede sufrir una obliteración severa de sus propiedades primarias (Zavala et al., 2007).

Las Facies S corresponden a una familia de facies que se relaciona directamente al colapso de los materiales transportados en turbulencia dentro del flujo hiperpícnico. En el caso de flujos hiperpícnicos de origen fluvial en un medio marino, normalmente incluye las fracciones arenosas (normalmente arenas medias a finas, excepcionalmente arenas gruesas). Estas facies comienzan a predominar hacia zonas medias distales del flujo, así como también hacia zonas laterales. El punto en el cual desaparecen las facies de carga de lecho y el depósito comienza a estar dominado por facies de tipo S marca la transición entre zonas de transferencia y los lóbulos distales. Petrofísicamente las facies S son moderadas a muy buenas, dependiendo de su historia diagenética. Las facies más interesantes por sus propiedades homogéneas y alta porosidad son las arenas masivas (Facies S1), ya que poseen un empaquetamiento bastante abierto y desordenado. No obstante, la presencia de materiales finos de naturaleza volcánica y/o carbonática puede obliterar la permeabilidad, dependiendo de la historia diagenética. Asimismo, las facies de arenas masivas son muy sensibles a la sobrecarga, y puestas a profundidades de más de 2000 o 3000 metros sin una mineralización previa, a menudo sufren un reempaquetamiento mas cerrado, el cual resulta en una disminución marcada en las propiedades petrofísicas originales (Zavala et al., 2007).

Las Facies L incluyen tipos de facies sumamente características, compuestas por láminas delgadas (pocos milímetros), rítmicas, de arenas finas, limos, micas y restos vegetales. Estos depósitos se originan por decantación a partir de una pluma de flotación interna, originada por la inversión gravitacional producida a consecuencia de la inversión de la flotación del flujo inducida por el agua dulce intersticial heredada de la descarga fluvial original. Estas facies son diagnósticas de una conexión fluvial directa y de un origen hiperpícnico para los depósitos, así como también indican de modo indirecto un medio salino más denso para la cuenca receptora. El mayor desarrollo de estas facies es hacia áreas laterales respecto del flujo hiperpícnico principal (Fig. 3). De este modo, la cuantificación relativa de la abundancia de facies de tipo L constituye de alguna manera un indicio claro de la presencia de facies localizadas lateralmente respecto del flujo hiperpícnico principal (Zavala et al., 2007).

8.2.- Índice de Proximidad.

El índice de proximidad (P) es un número adimensional que varía entre 0 y 100, el cual relaciona la importancia relativa de las facies de carga de lecho respecto de aquellas de carga suspendida. Si la base de datos en el estudio es suficientemente grande, permite cartografiar con relativa facilidad las áreas de proveniencia, posible distribución de facies y localización de la transición entre facies de transferencia y lóbulos distales. El índice de proximidad se obtiene de la siguiente manera (Zavala et al., 2007):

$$P = 100 \frac{B}{B+S}$$

Donde P= Índice de proximidad, B= espesor de facies relacionadas a carga de lecho y S= Espesor de facies relacionadas a carga suspendida (Zavala et al., 2007).

Para calcular el índice de proximidad para un núcleo dado, se deben computar el espesor total de facies B y S. Las facies clásicas no hiperpícnicas y las facies calcáreas o evaporíticas no son tomadas en consideración. La lectura puede efectuarse utilizando cualquier tipo de unidad ya que el número resultante es adimensional. A fin de obtener índices confiables, se debe tratar de seleccionar en lo posible los registros de núcleos más continuos (Zavala et al., 2007).

Si el índice de proximidad indica valores comprendidos entre 100 y 50 el sistema considerado se encuentra en su parte proximal. Valores entre 50 y mayores que 0 indican parte media del sistema, mientras que valores de 0 son típicos de lóbulos distales (Fig. 14) (Zavala et al., 2007).

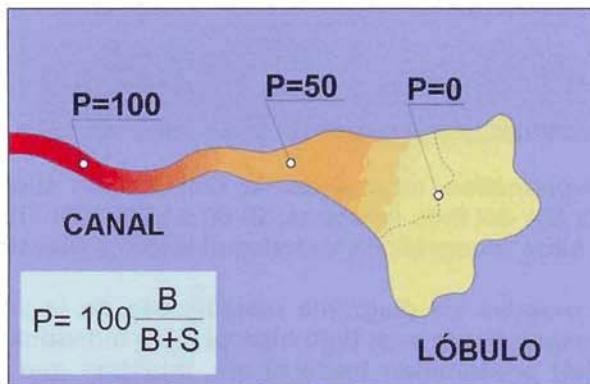


Figura 14: Diagrama esquemático mostrando la distribución idealizada del índice de proximidad. Si $100 \geq P \geq 50$: Parte proximal del sistema; Si $50 \geq P > 0$: Parte media del sistema; Si $P=0$ Lóbulos distales. (Zavala et al., 2007).

El índice de proximidad siempre debe ser analizado conjuntamente con el índice de lateralidad, a los fines de no confundir la zona de lóbulos distales con depósitos laterales (Zavala et al., 2007).

8.3.- Índice de Lateralidad.

El índice de lateralidad (LT) es un número adimensional que varía entre 0 y 100, el cual contrasta la importancia relativa de las facies de *lofting* (Facies L) respecto de aquellas relacionadas a carga de lecho (Facies B) y carga suspendida (Facies S). Permite cuantificar la posición relativa del núcleo analizado respecto del eje del flujo hiperpícnico, y desde un punto de vista más regional, la posición del núcleo analizado respecto de la paleotopografía

del fondo de la cuenca. Dado que las facies de *lofting* se desarrollan a consecuencia de la flotación del agua dulce en un medio más denso (normalmente agua salada), el índice de lateralidad aplica solo para medios marinos (Zavala et al., 2007).

$$LT = 100 \frac{L}{L+B+S}$$

Donde LT= Índice de lateralidad, L= espesor de facies relacionadas a *lofting*, B= espesor de facies relacionadas a carga de lecho y S= Espesor de facies relacionadas a carga suspendida (Zavala et al., 2007).

A fin de calcular el índice de lateralidad deben ponderarse los espesores totales de facies de tipo B, tipo S y Tipo L. Las facies no hiperpícnicas no son tomadas en consideración para este cálculo. Puede notarse que si el índice de lateralidad se aproxima a 0, esto indica que el núcleo considerado se encuentra próximo al eje del sistema hiperpícnico. Un índice de lateralidad comprendido entre 0 y 50 indica zonas centrales respecto del sistema hiperpícnico, mientras que un índice comprendido entre 50 y 100 representa la transición hacia facies laterales de levee. Un índice de lateralidad de 100 es característico de altos topográficos. (Fig. 15) (Zavala et al., 2007).

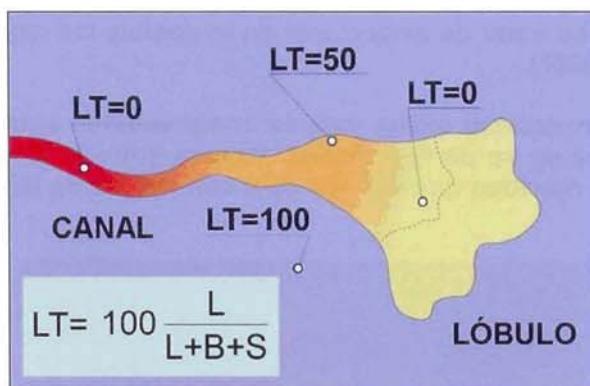


Figura 15: Diagrama esquemático mostrando la distribución idealizada del índice de lateralidad. Si $0 \leq LT \leq 50$: Eje del flujo / sistema; Si $50 \leq LT \leq 100$: Transición a levee / altos topográficos; Si $LT=100$: Altos topográficos laterales al sistema (Zavala et al., 2007).

En la Fig. 16 se muestra un diagrama simplificado de la variación horizontal del índice de lateralidad correspondiente a un flujo hiperpícnico individual. Note como las facies de tipo B (carga de lecho) predominan hacia el eje, mientras que hacia los laterales se reconocen facies de tipo S y L. El análisis conjunto de los índices de proximidad y lateralidad permite conocer si las facies S presentes en un sistema dado corresponden a lóbulos o a facies laterales respecto de sistemas hiperpícnicos principales (Zavala et al., 2007).

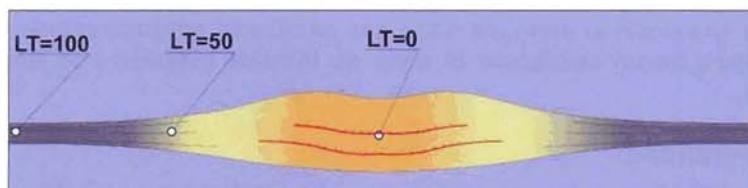


Figura 16: Sección vertical idealizada mostrando los cambios de facies existentes a lo largo de la extensión horizontal de un flujo hiperpícnico, y las variaciones progresivas en el índice de lateralidad (Zavala et al., 2007).

8.4.- Mapa de facies de los cuerpos clásticos para la Formación Naricual en el área de estudio.

Se calcularon índices genéticos de facies (índices de proximidad y lateralidad), mediante la aplicación de una nueva técnica de análisis genético, el cual permitió procesar un volumen considerable de datos.

Para poder desarrollar los mapas se estableció un marco estratigráfico-secuencial lográndose diferenciar tres (3) secuencias depositacionales de 3er orden, denominadas M1, M2 y M3. A partir de la ponderación de los índices de proximidad y lateralidad para cada una de las secuencias consideradas (M1, M2 y M3), se elaboraron mapas de proximidad y mapas paleogeográficos (Fig.17), los cuales representan las variaciones espaciales y las tendencias de la acumulación.

El cartografiado de los índices de proximidad y lateralidad sugieren la presencia de tres (3) zonas de aportes clásticos localizadas al SO, S y SE para el área de estudio (Fig. 17).

Los mapas de índices genéticos y paleogeográficos, muestran que los cuerpos sedimentarios y paleoaltos siguen alineamientos principales de orientación NO-SE y NE-SO, con una migración progresiva de los mismos hacia el Este (Fig. 17).

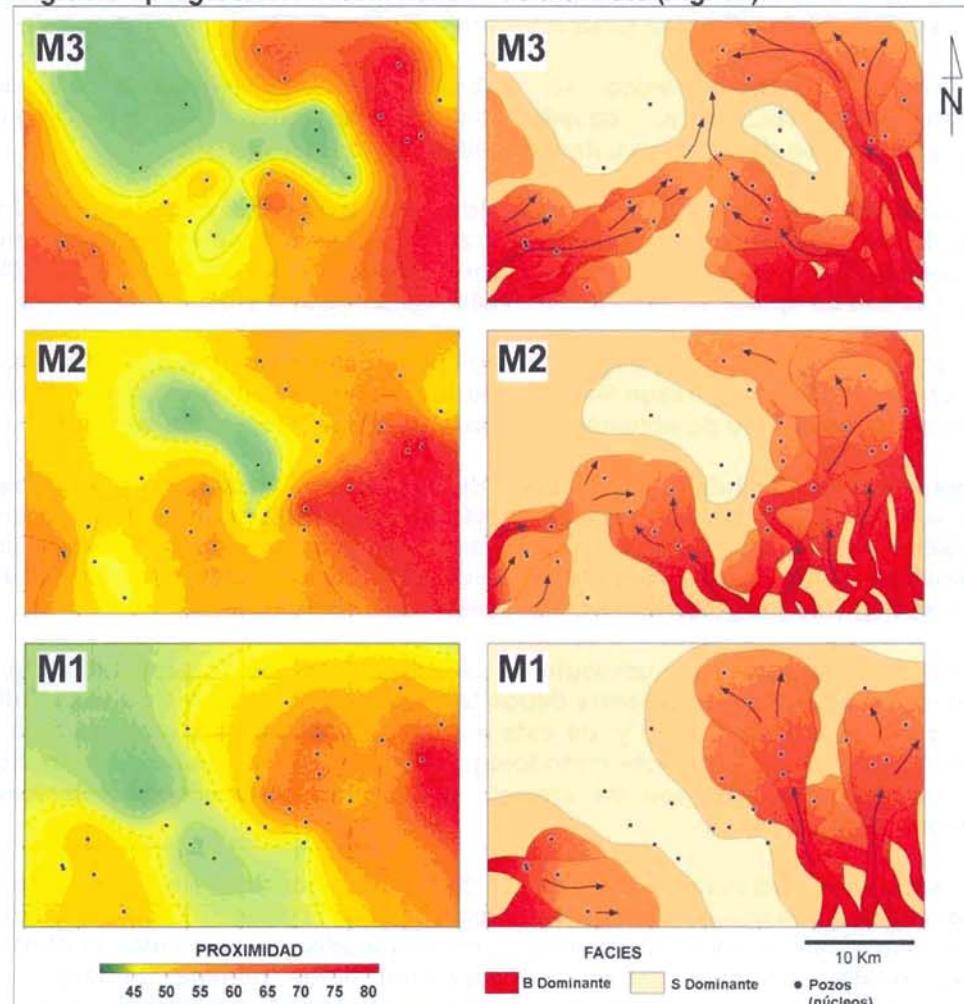


Figura 17: Mapas de proximidad y predicción de facies de las secuencias M1, M2 y M3, Formación Naricual (Oligoceno). Estos mapas sugieren tres zonas de aportes de clásticos (SE, SO y S).

9.- CONCLUSIONES.

- El catálogo de facies definido en este estudio responde de manera excelente para el análisis e interpretación de las facies clásticas observadas en los núcleos de la Formación Naricual.
- La Facies B3 es la más común en los cuerpos de arenas de la Formación Naricual para el área del norte de Monagas, subcuenca de Maturín. Este tipo de facies indica una proximidad alta a media, lo que sugiere que el sistema depositacional es más grande que el conocido y probablemente exista una continuidad del sistema hacia las zonas internas o de mayor pendiente, que de acuerdo a la historia geológica de la cuenca es hacia el Norte y Noreste.
- La presencia de la facies L constituye un elemento diagnóstico y característico de la sedimentación hiperpícica en un medio marino, ya que sugiere la existencia de un flujo turbulento con un fluido intersticial de menor densidad (agua dulce) que aquel del medio hospedante (agua de mar), derivado de la descarga fluvial directa.
- El análisis de facies, sugiere que estos depósitos se habrían acumulado en un medio marino de plataforma, a partir de flujos densos de larga duración vinculados a descargas fluviales directas (sistemas hiperpícnicos).
- El análisis sedimentológico se elaboró tomando en cuenta un esquema estratigráfico secuencial, basado en la distinción de tres secuencias depositacionales de 3er orden, denominadas como M1, M2 y M3.
- La cartografía de los índices de proximidad y de lateralidad sugiere, para el área de estudio, la presencia de al menos tres zonas de aporte de clásticos gruesos, las cuales persisten con algunas variaciones para las tres secuencias identificadas. Estas zonas de aporte clástico se localizan hacia el SO, S y SE.
- El cartografiado de índices sedimentológicos indica asimismo que la distribución de los sedimentos más gruesos habría sido controlada por la presencia de un relieve submarino, vinculado posiblemente a una incipiente deformación tectónica.
- El mapeo secuencial de la distribución de los cuerpos clásticos y paleoaltos indica que la distribución de los mismos sigue alineamientos principales de orientación NO-SE y NE-SO, los cuales parecen estar asociados a rasgos estructurales o paleoaltos. Estos paleoaltos no tendrían una posición estática, sino que los mismos habrían migrado progresivamente hacia el Este.
- Aplicando esta nueva metodología de cálculo de índices de proximidad, se puede predecir en qué parte del sistema depositacional se encuentra y a su vez inferir hacia dónde se orienta el sistema y, de esta manera, cuáles son las mejores áreas para la exploración, haciendo de esta metodología una herramienta de análisis predictivo de sedimentación de cuerpos de arenas, para flujos subacuáticos relacionados a sistemas hiperpícnicos.
- A través de la Sedimentología Clásica, en muchas ocasiones es difícil explicar los procesos de formación de muchos cuerpos de arenas de la Formación Naricual, que tradicionalmente han sido explicados como originados en ambientes continentales a transicionales. En este trabajo, se proponen flujos densos de larga duración vinculados a descargas fluviales directas (sistemas hiperpícnicos) como los responsables para la sedimentación de la Formación Naricual, en el subsuelo, al norte del Estado Monagas.

10.- Referencias.

- Erlich R. N. and S. F Barrett., 1994, Petroleum Geology of the Eastern Venezuela Foreland Basin. AAPG Memoir Vol. 55 p.341-362
- Pindell, J. L., Higgs, R., & Dewey, J. F., 1998. Cenozoic palinspatic reconstruction, paleogeographic evolution and hidrocarbon setting of the northern margin of South America. SEPM Special Publication, Nº 58, pp 45-85
- Parnaud, F., Y. Gou, J.-C. Pascual, I. Truskowski, O. Gallango, H. Passalacqua, and F. Roure (1995). Petroleum geology of the central part of the Eastern Venezuela basin, *in* A. J. Tankard, R. Suárez S., and H. J. Welsink, Petroleum basins of South America: AAPG Memoir 62, p. 741–756.
- Sánchez, D., Mestre, A., & Solórzano, V., 2007. Estudio Bioestratigráfico (Bloque Autóctono) de los pozos de los pozos PIC-2E, PIC-10, PIC-25, PIC-26, MGC-1E, MGC-2X, SBC-6E, SBC-18, SBC-55, SBC-2, SBC37E, SBC-130, SBC-136, MUC-20, SBC-51, SBC-22E, CRC-7, TRV-2, TRV-3,TRV-4X, FUL-7, FUL-12, FUL-13, J-479,COT-1X, COT-2X, CHL-8,CHL-6 CHL-1, CHL-2 y CHL-3;Proyecto Travi-Bosque, Cuenca Oriental de Venezuela. PDVSA Exploración Oriente, Gerencia Corporativa de Laboratorios y Núcleotecas. Puerto La Cruz. Informe interno P 86.
- Schlumberger, 1997. WEC. Venezuela. Evaluación de Pozos. Schlumberger. Caracas. 397 p.
- Zavala, C., 2006. A Predictive Sedimentology Workshop. UTT CONFERENCE FACILITIES AND OMNI LABS, Churchill Roosevelt Highway and Pasea Road, Tunapuna. Monday September 18 - Friday September 22, 2006. Organized by The Geological Society of Trinidad & Tobago and Schlumberger Trinidad Inc.
- Van Wagoner J.C., Mitchum R.M., Campion K.M. and Rahamanian V.D. 1990. Siliciclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Cores, and Outcrops: Concepts for High-Resolution Correlation of Time and Facies. A.A.P.G. Methods in Exploration Series 7, 55 pp.
- Zavala, C., Arcuri, M. & Gamero H., 2006. Towards a genetic model for the analysis of hyperpycnal systems. 2006 GSA Annual Meeting, 22-25 October, Philadelphia, PA., USA. Topical session T136: River Generated Hyperpycnal Events and Resulted Deposits in Modern and Ancient Environments.
- Zavala, C., Marcano J., Carvajal J., 2007. Proximity and Laterality indexes: a new tool for the analysis of ancient hyperpycnal deposits in the subsurface. GSTT 4TH GEOLOGICAL CONFERENCE "Caribbean Exploration – Planning for the Next Century" June 17-22, 2007 – Port of Spain, Trinidad.