

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/329453847>

Máximos Eventos de Inundación Marina del Mioceno en Cuencas Subandinas; Evaluación de su uso como Superficies Cronoestratigráficas y Aporte en la Exploración de Hidrocarburos

Conference Paper · December 2018

CITATIONS

0

READS

680

6 authors, including:



Edward Duarte

French National Centre for Scientific Research

23 PUBLICATIONS 347 CITATIONS

SEE PROFILE



Germán Bayona

Corporación Geológica ARES

131 PUBLICATIONS 4,317 CITATIONS

SEE PROFILE



Carlos Jaramillo

Smithsonian Tropical Research Institute

433 PUBLICATIONS 17,985 CITATIONS

SEE PROFILE



Mauricio Parra

University of São Paulo

130 PUBLICATIONS 4,520 CITATIONS

SEE PROFILE



Máximos Eventos de Inundación Marina del Mioceno en Cuencas Subandinas; Evaluación de su uso como Superficies Cronoestratigráficas y Aporte en la Exploración de Hidrocarburos

Edward Duarte¹, German Bayona¹, Carlos Jaramillo², Mauricio Parra³, Ingrid Romero², José Alejandro Mora⁴

¹Corporación Geológica ARES, ²Smithsonian Tropical Research Institute, ³Instituto de Energía e Ambiente, Universidade de São Paulo, ⁴HOCOL

Copyright 2016, ACGGP.

This paper was selected for presentation by an ACGGP Technical Committee following review of information contained in an abstract submitted by the author(s).

Resumen

Correlaciones regionales en cuencas subandinas con relleno predominantemente continental, como la cuenca de los Llanos de Colombia, utilizando superficies cronoestratigráficas del Mioceno temprano-medio permiten establecer la temporalidad, continuidad lateral y magnitud de los eventos de inundación marina, los cuales presentan un comportamiento sincrónico, que facilita reconstruir la posición de acumulación para entender la migración lateral de canales fluviales y los procesos de entrapamiento de hidrocarburos. Las litologías finas tienen una amplia distribución en cuencas subandinas y pueden actuar como sello regional o como reservorio para sistemas no convencionales.

Los eventos de inundación marina se soportan por el análisis estratigráfico secuencial que integra la interpretación de electrofacies, palinofacies y contrastes sísmicos. Como resultado se identificaron dos superficies de máxima inundación marina, correspondientes a la superficie de máxima inundación marina del Mioceno temprano (< 2 ma), localizada en el miembro informal Carbonera C2 (base de la biozona T-13) y la inundación marina del Mioceno medio (<4 ma), localizada en la Formación León (tope de la biozona T-14). Ambas presentan alta relevancia como superficies de correlación cronoestratigráficas en la cuenca de los Llanos, debido a su extensión regional, fácil identificación y comportamiento sincrónico.

Introducción

Las cuencas subandinas que bordean el flanco oriental de la cordillera Andina corresponden a cuencas tipo antepaís, las cuales se definen como una región elongada formada entre un cinturón orogénico y un cratón estable, en respuesta a la subsidencia flexural y levantamientos intracuenca que generan una carga orogénica (Beaumont, 1981, DeCelles and Giles, 1996).

La cuenca de los Llanos Orientales hace parte del sistema antepaís del norte de Suramérica y presenta relleno predominantemente continental, principalmente de rocas siliciclásticas procedentes de la erosión de la Cordillera Oriental al oeste y del escudo de la Guyana al este (Figura 1) (Bayona et al., 2008a, Bayona et al., 2009b, Mora et al., 2010, Parra et al., 2009). Es posible identificar transgresiones regionales que cubren varias cuencas (Boonstra et al., 2015) relacionadas a las superficies de máxima inundación marina las cuales representan superficies de correlación cronoestratigráficas efectivas debido a su comportamiento sincrónico y amplia extensión.

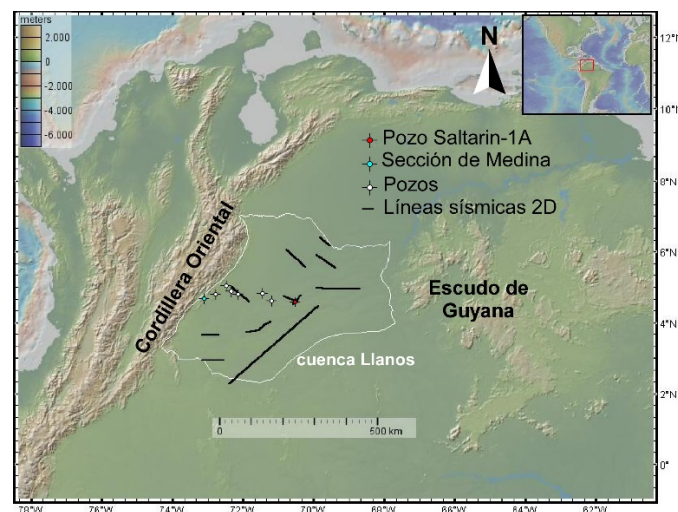


Figura 1. Mapa de localización de: pozo con núcleo (Saltarin 1A), 6 pozos con información de registros eléctricos, 1 sección estratigráfica (Medina) y 11 líneas sísmicas 2D (590 km²) utilizadas en el presente estudio. Sistema de Coordenadas Geográficas WGS 1984. Global Multi-Resolution Topography (GMRT) tomado de Ryan et al. (2009).

Estas superficies presentan importantes implicaciones en la prospectividad de hidrocarburos en las cuales las litologías finas generadas por estas transgresiones sirven como sello regional para trampas estratigráficas que incluyen los depósitos de canales fluviales del Eoceno superior al Oligoceno (Cooper et al., 1995, Torrado et al., 2014, Villamil,

2003). A pesar de estas implicaciones no se han documentado en detalle estas superficies de correlación regional para el Mioceno en la cuenca Llanos debido a que la historia de exploración de hidrocarburos se concentra en estratos más antiguos. Estudios regionales (Campos and Mann, 2015, Cooper et al., 1995, Hermeston and Nemcok, 2013, Moreno-López and Escalona, 2015, Sarmiento, 2011), entre otros, realizaron análisis tectono-estratigráficos secuenciales y estratigráficos a partir de facies sísmicas y registros de pozos. Estos estudios identificaron superficies de correlación regionales, las cuales corresponden en algunos casos a topes formacionales, con pobre a nulo control bioestratigráfico.

Este estudio emplea el análisis estratigráfico secuencial e integra información de roca, bioestratigrafía, registros de pozo y sísmica 2D, para identificar las superficies de inundación marina del Mioceno y poder establecer la temporalidad, extensión y continuidad lateral que presentan en la cuenca de los Llanos Orientales de Colombia.

Análisis estratigráfico secuencial en roca

El análisis estratigráfico secuencial se enfoca en los miembros superiores de la Formación Carbonera (miembros C3 a C1) y en la Formación León, considerando el análisis sedimentológico, palinológico y petrográfico realizados al pozo Saltarin-1A en el sector distal de los Llanos, presentado en Bayona et al. (2008b) (Figura 1) y de la sección de Medina en el piedemonte, presentado en Parra et al. (2010) (Figura 1).

La interpretación de ambientes sedimentarios sigue la metodología de identificación de litofacies, relación de litofacies y apilamiento vertical propuestas en James and Dalrymple (2010). La interpretación de estratigrafía secuencial para la identificación de superficies de correlación sigue los criterios presentados en Catuneanu et al. (2009).

Las muestras palinológicas son parte de la tesis de maestría de Ingrid Romero (Romero, 2014), las cuales siguen la técnica standard palinológica (Traverse, 2007). Para cada muestra, se contaron al menos 200 palinomorfos los cuales se clasificaron en tres categorías: terrestres, marinos (dinoflagelados y foraminíferos quitinosos) y lacustrinos (*Pediastrum* y *Botryococcus*). Para cada muestra se calculó un índice de salinidad que consiste en la proporción de palinomorfos marinos en relación al conteo total de cada muestra, con lo cual se elaboró la curva de porcentaje de palinomorfos marinos (Figura 2; Figura 3), las biozonas siguen la zonación palinológica para el Cenozoico de los Llanos y el piedemonte de Colombia presentado en Jaramillo et al. (2011).

Pozo Saltarin-1A. El estudio se concentra en los miembros superiores de la Formación Carbonera (Mioceno temprano; biozonas T-12 a T-13). El miembro informal Carbonera C2 (46 m) corresponde a un sistema de centro de lago profundo con influencia de aguas marinas, en esta unidad se interpretan 4 límites de secuencia de cuarto orden y entre cada secuencia, se presenta un evento de máxima inundación, en donde el mayor porcentaje de influencia marina (95% de índice de salinidad) se presenta a una profundidad de 621 metros, nivel

que corresponde a la máxima superficie de inundación marina. A partir de este evento de máxima inundación el sistema progresa, coincidiendo con el segmento arenoso del miembro informal Carbonera C1 (61 m), este intervalo corresponde a un sistema de margen de lago llegando a planicie continental y se interpreta la máxima superficie de progradación (Figura 2).

La Formación León (Mioceno medio; biozonas T-14 a T-15), presenta en el segmento basal (75 m) 3 límites de secuencias de cuarto orden y entre cada secuencia, se presenta un evento de máxima inundación. A partir de la base de la Formación León, el sistema comienza a retrogradar de margen de lago a sistemas de centro de lago somero, con porcentajes de índice de salinidad no superiores al 3%, indicando el predominio de aguas frescas, posterior a este nivel (533,9 m), el sistema se inunda y se incrementa el índice de salinidad, retrogradando a sistemas de centro de lago profundo con predominio de aguas marinas, en donde la máxima superficie de inundación marina se registra a una profundidad de 491 metros con porcentajes de índice de salinidad entre 73% a 98% (Figura 2).

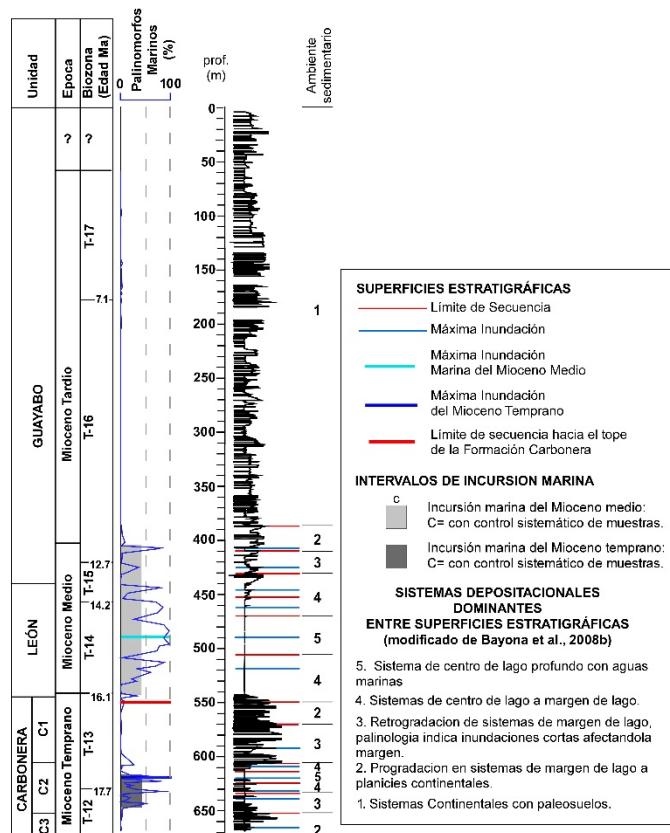


Figura 2. Columna estratigráfica generalizada del pozo SALTARIN 1A, modificada de Bayona et al. (2008b), indicando las superficies estratigráficas identificadas, los eventos de inundación marina, los sistemas depositacionales dominantes y la curva de porcentaje de palinomorfos marinos. Las biozonas siguen la zonación propuesta en Jaramillo et al. (2011).

Sección de Medina. El miembro informal Carbonera C2 (194 m) corresponde a un sistema de centro de lago profundo con aguas marinas. Se interpretan 3 límites de secuencias de cuarto orden y entre cada secuencia, se presenta un evento de máxima inundación, en donde el mayor porcentaje de influencia marina (42% de índice de salinidad) se presenta a una profundidad de 2713m. A partir de este evento de máxima inundación el sistema progresa a depósitos fluviales trenzados correspondientes al miembro informal Carbonera C1 (112 m) (Figura 3).

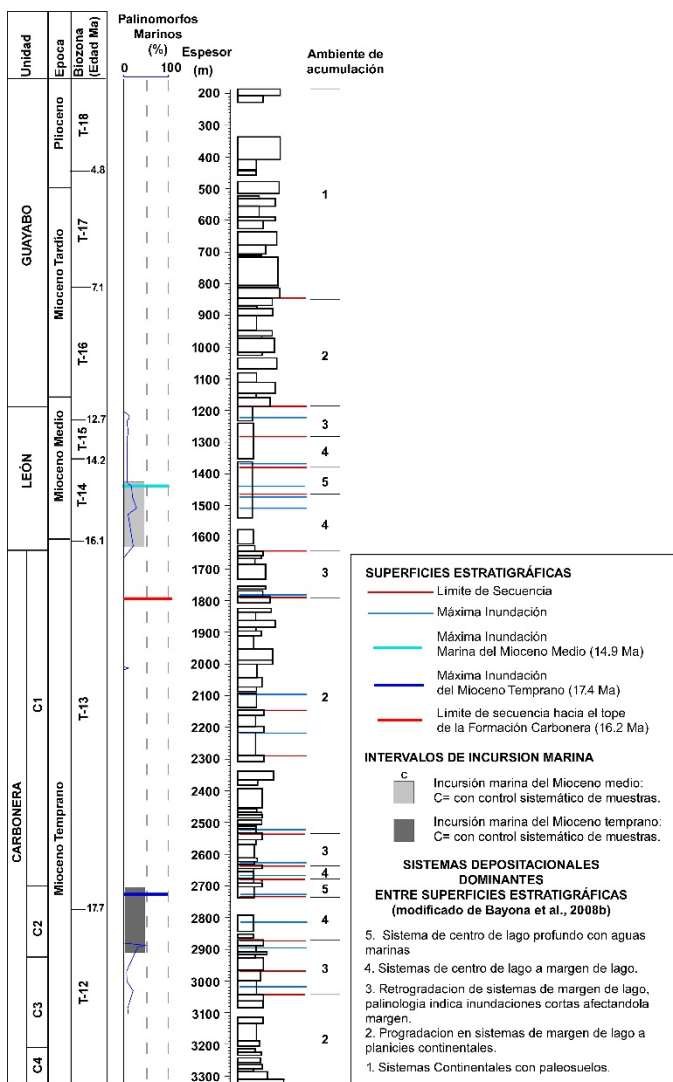


Figura 3. Columna estratigráfica generalizada de la sección de Medina, modificado de Parra et al. (2010), indicando las superficies estratigráficas identificadas, los eventos de inundación marina, los sistemas deposicionales dominantes y la curva de porcentaje de palinóforos marinos. Las biozonas siguen la zonación propuesta en Jaramillo et al. (2011).

La Formación León (Mioceno medio; biozonas T-14 a T-16), presenta un espesor de 640 m y corresponde a un sistema de centro de lago profundo con aguas marinas, se identificaron 4 límites de secuencias de cuarto orden y entre cada secuencia se presenta un evento de máxima inundación. Los porcentajes de índice de salinidad no superan el 24%, registrando la máxima superficie de incursión a una profundidad de 1433 metros (Figura 3).

Correlación a partir de registros eléctricos

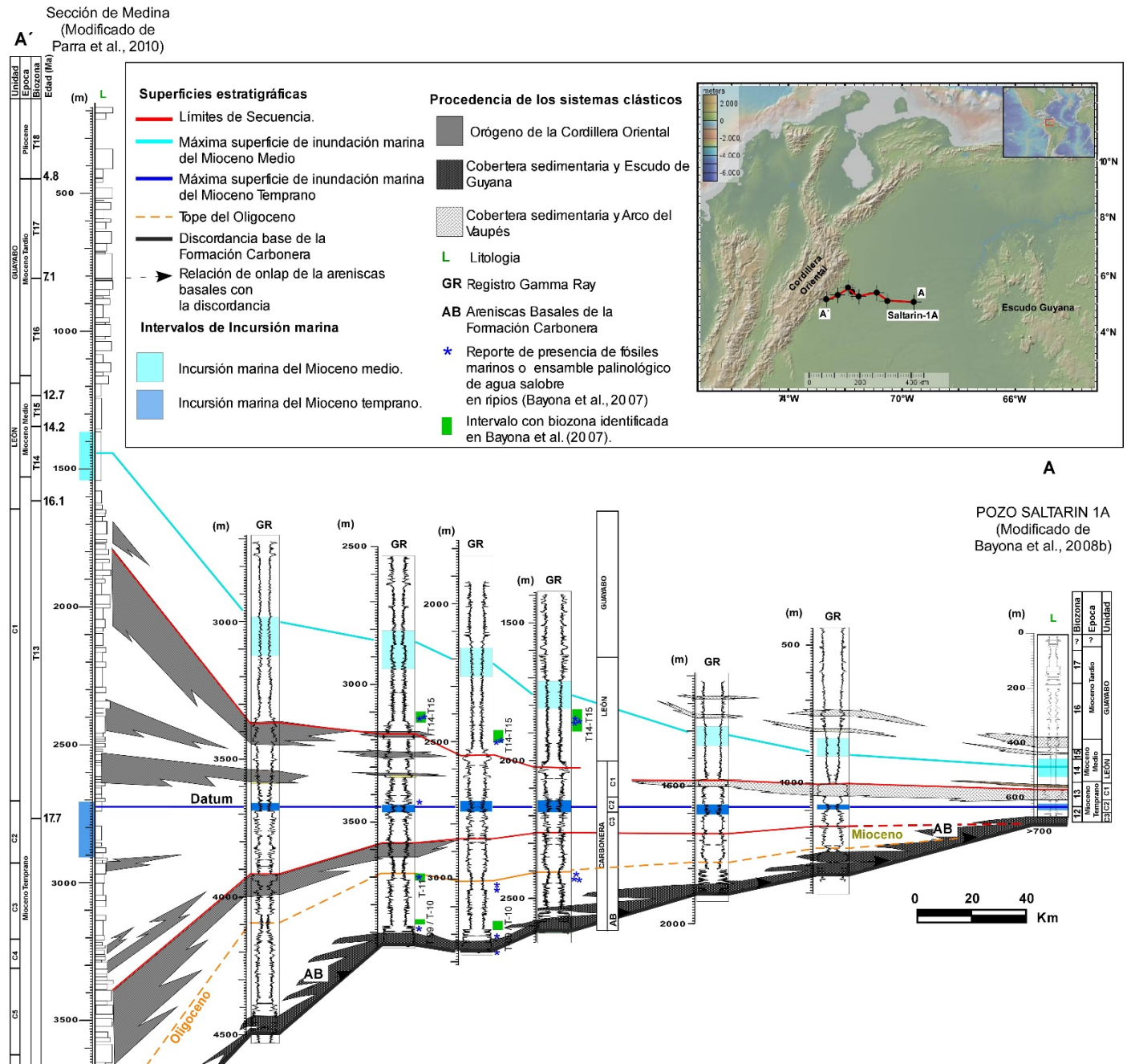
A partir del análisis estratigráfico secuencial en roca y del análisis palinológico realizado al pozo Saltarín-1A y en la sección de Medina (Figura 1), se logran identificar superficies cronoestratigráficas correspondientes a límites de secuencia (máximas superficies de progradación) y máximas superficies de inundación marina.

Estas superficies se correlacionan entre sí, a partir de la utilización de registros eléctricos (Gamma Ray) correspondientes a 6 pozos profundos localizados de este a oeste en la cuenca Llanos (Figura 1), con interpretaciones bioestratigráficas previas (Bayona et al., 2007, Bayona et al., 2009a, Bayona et al., 2009b).

El análisis estratigráfico secuencial tiene en cuenta (1) el registros Gamma Ray (2) información bioestratigráfica en rípios (3) El apilamiento vertical de las litologías con sus patrones de engrosamiento o adelgazamiento de cuerpos litológicos (Van Wagoner, 1995) (4) cambios globales del nivel base, presentados en Hardenbol et al. (1998) (5) la geometría de cuenca antepaís producto de los controles tectónicos (flexural y topografía dinámica) y aporte de sedimentos (Bayona et al., 2007, Campos and Mann, 2015, Roddaz et al., 2010). La descripción de electrofacies utiliza las formas de la curva (recta, cilíndrica, de campana, de embudo y ovalada) y el perfil (recto o aserrado). Los eventos de inundación marina se localizan en secciones cilíndricas con altos valores API, dominadas por litologías finas y acumuladas en llanuras de inundación, llanuras costeras o fondos de lago.

Estos eventos suprayacen la tendencia de campana producto de la retrogradación de los sistemas de acumulación e infrayacen la tendencia de embudo producto de la progradación de los sistemas de acumulación.

Las anteriores consideraciones permiten identificar para el Mioceno dos superficies de máxima inundación marina separados por una superficie de máxima progradación (límite de secuencia) (Figura 4). Estas superficies corresponden a la superficie de máxima inundación marina del Mioceno temprano (base de biozona T-13), El límite de secuencia hacia el tope de la Formación Carbonera (tope de la biozona T-13) infrayace el apilamiento retrogradacional que va desde los sistemas continentales, a sistemas de margen y centro de lago. Esta retrogradación es abrupta en el sector distal de la cuenca mientras al occidente del eje de acumulación el cambio es más gradual y finalmente la superficie de máxima inundación marina del Mioceno medio (tope de a biozona T-14) se localiza en los sistemas de centro de lago profundo con indicadores de palinóforos marinos.



Análisis en líneas sísmicas 2D

La interpretación sísmica se realiza con el objetivo de determinar el comportamiento regional de los eventos de incursión marina previamente identificados en roca y en

registros eléctricos, cubriendo desde el sector distal hasta el sector proximal y de norte a sur de la cuenca Llanos (Figura5). Reconociendo principalmente dos facies sísmicas características:

(1) facies sísmicas con reflectores de baja amplitud de picos y valles que generan un aspecto sordo por la ausencia de contraste de impedancia en las litologías lodosas homogéneas, características del miembro informal Carbonera C2 y de la Formación León, formaciones donde se localizan los eventos de máxima inundación marina del Mioceno (Figura 5).

(2) facies sísmicas con alta amplitud de picos y valles, discontinuos y no paralelos con respecto a la facies sísmica del miembro informal Carbonera C2, característicos de los miembros informales Carbonera C3, Carbonera C1 y de la Formación Guayabo.

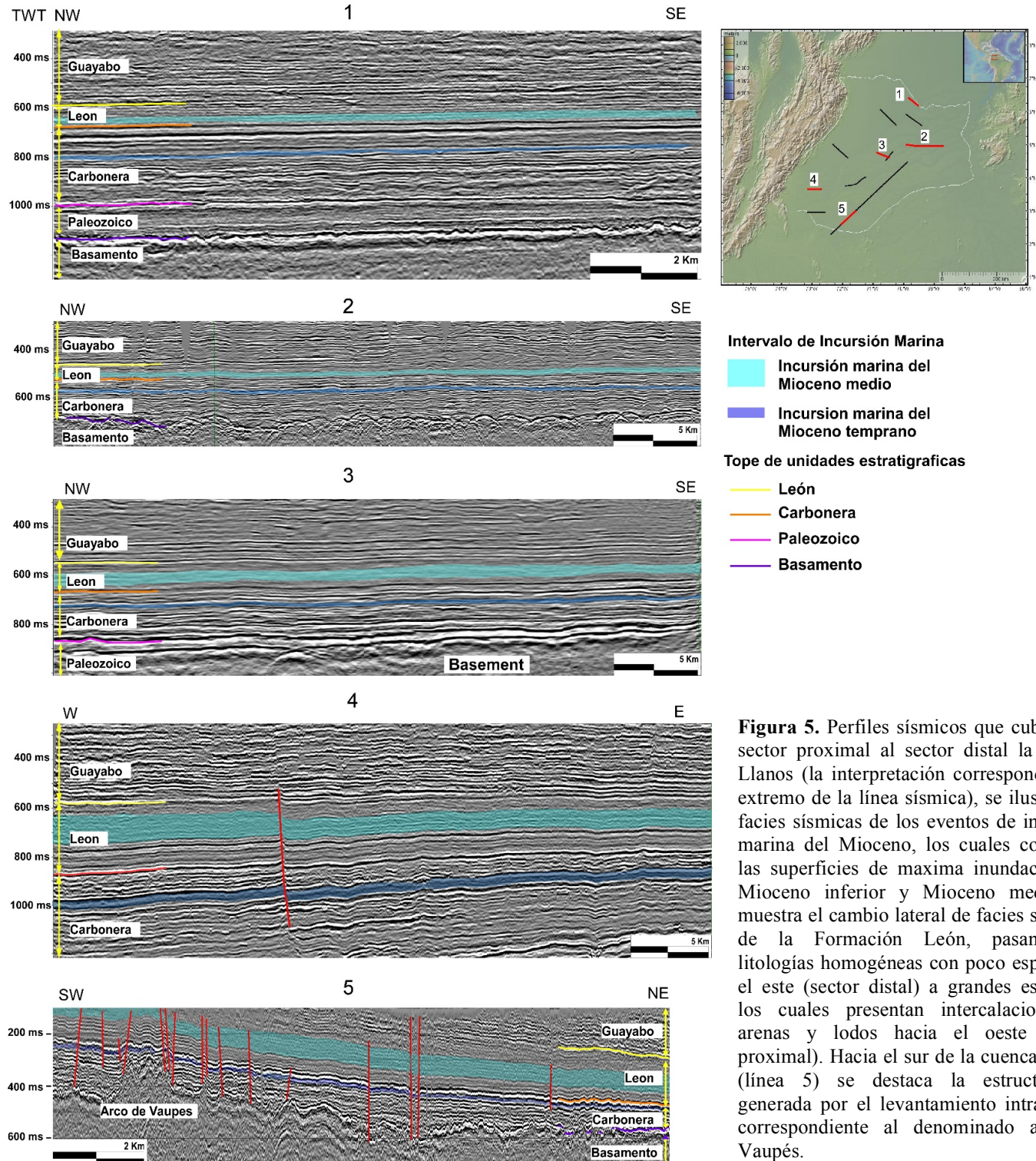


Figura 5. Perfiles sísmicos que cubren del sector proximal al sector distal la cuenca Llanos (la interpretación corresponde a un extremo de la línea sísmica), se ilustran las facies sísmicas de los eventos de incursión marina del Mioceno, los cuales contienen las superficies de máxima inundación del Mioceno inferior y Mioceno medio. Se muestra el cambio lateral de facies sísmicas de la Formación León, pasando de litologías homogéneas con poco espesor en el este (sector distal) a grandes espesores los cuales presentan intercalaciones de arenas y lodos hacia el oeste (sector proximal). Hacia el sur de la cuenca Llanos (línea 5) se destaca la estructuración generada por el levantamiento intracuenca correspondiente al denominado arco de Vaupés.

Discusión de Resultados

Correlaciones regionales en la cuenca Llanos se han llevado a cabo a partir del seguimiento de superficies estratigráficas que en algunos casos corresponden a topes de unidades formacionales (ej. tope de la Formación León), estas superficies se identifican fácilmente en los registros de pozo (Gamma Ray) y en los contrastes de impedancia en líneas sísmicas debido a los contrastes litológicos. Sin embargo, estas superficies por ser depositadas en una cuenca tipo antepaís, se encuentran condicionadas por diferentes factores: (1) tasas de acortamiento, (2) subsidencia flexural, (3) levantamientos intracuenca, (4) aporte de sedimentos del orógeno y cratón (5) el clima y (6) la topografía dinámica (Bayona et al., 2009a, Bayona et al., 2008b, Bayona et al., 2009b, Hardenbol et al., 1998, Mora et al., 2010, Mora et al., 2015, Shephard et al., 2010, Zachos et al., 2001), lo cual genera diacronismo hacia los bordes de la cuenca donde se encuentran las áreas fuente con respecto al depocentro.

Por ello se hace necesario el seguimiento de superficies estratigráficas con valor cronoestratigráfico, cuya identificación parte del análisis secuencial y del análisis bioestratigráfico que reflejen las variaciones en la tasa máxima de cambio del nivel del mar representadas en la variación del nivel base de primer orden, presentadas en Hardenbol et al. (1998). Incursiones marinas han sido registradas en diferentes cuencas subandinas entre las que se encuentran la cuenca Oriental de Venezuela donde la sedimentación marina es relativamente continua y registrada en los depósitos turbidíticos de la Formación Carapita del Mioceno temprano-medio (Parnaud et al., 1995a, Parnaud et al., 1995b) y en la Cuenca Amazonas/Solimoes (Boonstra et al., 2015, Hoorn, 1993, Hoorn, 1994b, Hoorn, 1994a, Hoorn, 2006, Hoorn et al., 1996).

Este estudio permitió identificar en la cuenca Llanos, dos eventos de incursión marina durante el Mioceno y para cada uno identificar la superficie máxima de inundación marina. El intervalo que presenta mayor relevancia como superficie de correlación regional corresponde a la incursión marina del Mioceno temprano, debido a que su limitado espesor permite documentar la superficie máxima de inundación utilizando una baja densidad de muestras para análisis palinológico. En comparación con el evento de incursión marina del Mioceno medio, el cual presenta un gran espesor lo que dificulta el reconocimiento de la superficie de máxima inundación marina y requiere una alta densidad de muestras para análisis palinológico.

Por otra parte, debido a la baja amplitud de picos y valles que caracteriza los dos eventos de inundación marina del Mioceno, no es posible identificar sísmicamente la superficie máxima de inundación marina para cada intervalo. Lo cual requeriría del amarre sísmica-pozo. Sin embargo, debido al reducido espesor de la incursión marina del Mioceno temprano se puede inferir el trazo de la superficie de máxima inundación marina (datum) y utilizarlo para realizar un aplanamiento sísmico que permitiría documentar la migración lateral de los canales fluviales y entrapamiento estratigráfico

de hidrocarburos para reservorios clásticos del Eoceno superior al Oligoceno, particularmente para los miembros informales Carbonera C1 y Carbonera C7, los cuales son considerados como reservorios clásticos favorables en la cuenca de los Llanos Orientales de Colombia (Torrado et al., 2014).

Conclusiones

El análisis integrado de información sedimentológica, palinológica, estratigrafía secuencial, sísmica y de pozos, permite la identificación de dos superficies de máxima inundación marina para el Mioceno temprano y medio, las cuales tienen alta relevancia como superficies de correlación debido a su comportamiento sincrónico y extensión regional a lo largo de la cuenca antepaís de los Llanos orientales.

La superficie máxima de inundación marina del Mioceno temprano (base de la biozona T-13) se localiza en el miembro informal Carbonera C2, es fácilmente identificable debido a su reducido espesor de litologías finas y homogéneas, fácil identificación en registros eléctricos con altos valores API identificable en los registros Gamma Ray y baja amplitud de reflectores sísmicos característico del miembro informal Carbonera C2 que contrasta con los reflectores de alta amplitud correspondientes a los miembros informales Carbonera C3 y C1, y su identificación mediante análisis de estratigrafía secuencial.

La superficie de máxima inundación marina del Mioceno medio (tope de la biozona T-14) se localiza hacia el sector medio a superior de la Formación León no es detectable en registros eléctricos ni en sísmica 2D debido a su gran espesor.

Agradecimientos

Los resultados presentados en este proyecto hacen parte del trabajo conjunto entre la Corporación Geológica ARES bajo la dirección de German Bayona y el Instituto Smithsonian de investigaciones tropicales (STRI) bajo la dirección de Carlos Jaramillo. Agradecemos a COLCIENCIAS por la financiación del presente proyecto de investigación a partir del programa Jóvenes Investigadores e innovadores 2014. A la Agencia Nacional de hidrocarburos (ANH) por su colaboración y disposición de la información sísmica y de pozos necesaria para el desarrollo del estudio y a la empresa HOCOL S.A. por el acceso a la información proveniente del corazonamiento del pozo Saltarin-1A.

Referencias

- BAYONA, G., CORTES, M., JARAMILLO, C., OJEDA, G., ARISTIZABAL, J. & REYES-HARKER, A. 2008a. An integrated analysis of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous-Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and the Llanos foreland basin of Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 120, 1171-1197.

- BAYONA, G., JARAMILLO, C., RUEDA, M., REYES-HARKER, A. & TORRES, V. 2007. Paleocene-middle Miocene flexural-margin migration of the nonmarine Llanos foreland basin of Colombia. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3 (3), 141-160.
- BAYONA, G., VALENCIA, A., DE ARMAS, M., GUERRERO, J., GÓMEZ, E., LEYVA, I., VILLAMARIN, P. & MORA, A. Oligocene - Miocene Filling of the Distal Llanos Basin of Colombia; Interaction of Flexural Subsidence, Intraplate Faulting and Dynamic Topography Models. AAPG International Conference and Exhibition, 15-18 of November 2009 2009a Rio de Janeiro, Brasil.: AAPG.
- BAYONA, G., VALENCIA, A., MORA, A., RUEDA, M., ORTIZ, J. & MONTENEGRO, O. 2008b. Estratigrafía y procedencia de las rocas del Mioceno en la parte distal de la cuenca de antepais de los Llanos de Colombia. *Geología Colombiana*, 33, 23-46.
- BAYONA, G., VILLAMARIN, P., MORA, A., OJEDA, G., CORTES, M., VALENCIA, A., MAHECHA, H. & TORRES, V. Exploratory Implications of Forebulge Geometry and Migration in the Llanos Basin. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, Memorias del X Simposio Bolivariano de Cuencas Subandinas, 2009b. 10.
- BEAUMONT, C. 1981. Foreland basins. *Royal Astronomical Society Geophysical Journal*, 65, 291-329.
- BOONSTRA, M., RAMORS, M. I. F., LAMMERTSMA, E. I., ANTOINE, P.-O. & HOORN, C. 2015. Marine connections of Amazonia: Evidence from foraminifera and dinoflagellate cysts (early to middle Miocene, Colombia/Peru). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 417, 176-194.
- CAMPOS, H. & MANN, P. 2015. Tectonostratigraphic Evolution of the northern Llanos Foreland Basin of Colombia and Implications for Its Hydrocarbon Potential. In: BARTOLINI, C. & MANN, P. (eds.) *Petroleum geology and potential of the Colombian Caribbean Margin*. AAPG Memoir.
- CATUNEANU, O., ABREU, V., BHATTACHARYA, J. P., BLUM, M. D., DALRYMPLE, R. W., ERIKSSON, P. G., FIELDING, C. R., FISHER, W. L., GALLOWAY, W. E., GIBLING, M. R., GILES, K. A., HOLBROOK, J. M., JORDAN, R., KENDALL, C. G. S. C., MACURDA, B., MARTINSEN, O. J., MIAL, A. D., NEAL, J. E., NUMMEDAL, D., POMAR, L., POSAMENTIER, H. W., PRATT, B. R., SARG, J. F., SHANLEY, K. W., STEEL, R. J., STRASSER, A., TUCKER, M. E. & WINKER, C. 2009. Towards the Standardization of Sequence Stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 92, 1-33.
- COOPER, M. A., ADDISON, F. T., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R. H., HAYWARD, A. B., HOWE, S., MARTINEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A. J. & TABORDA, A. 1995. Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 79, 1421-1443.
- DECELLES, P. & GILES, K. 1996. Foreland basin systems. *Basin Research*, 8, 105-123.
- HARDENBOL, J., THIERRY, J., FARLEY, M. B., JACQUIN, T., DE GRACIANSKY, P. C. & VAIL, P. 1998. Mesozoic and Cenozoic sequence chronostratigraphic framework of European basin. In: GRACIANSKY, P. C. (ed.) *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*. SEPM Special Publication.
- HERMESTON, S. & NEMCOK, M. 2013. Thick-skin orogen - foreland interactions and their controlling factors, Northern Andes of Colombia. *Geological Society of London, Special Publication*, 377, 443-471.
- HOORN, C. 1993. Marine incursions and the influence of Andean tectonics on the Miocene depositional history of northwestern Amazonia: Results of a palynostratigraphic study. *Palaeoclimatology, Palaeogeography, Palaeoecology*, 105, 267-309.
- HOORN, C. 1994a. An environmental reconstruction of the palaeo-Amazon River system (Middle-Late Miocene, NW Amazonia). *Palaeoclimatology, Palaeogeography, Palaeoecology*, 112, 187-238.
- HOORN, C. 1994b. Fluvial palaeoenvironments in the intracratonic Amazonas Basin (Early Miocene-early Middle Miocene, Colombia). *Palaeoclimatology, Palaeogeography, Palaeoecology*, 109, 1-54.
- HOORN, C. 2006. Mangrove Forests and Marine Incursions in Neogene Amazonia (Lower Apaporis River, Colombia). *Palaios*, 21, 197-209.
- HOORN, C., PAXTON, C., CRAMPTON, W., BURGESS, P., MARSHALL, L., LUNDBERG, J., RASANEN, M. & LINNA, A. 1996. Miocene Deposits in the Amazonian Foreland Basin. *Science* 273, 122-125.
- JAMES, N. P. & DALRYMPLE, R. W. 2010. *Facies Models 4*, Kingston, ON, GEOtext 6.
- JARAMILLO, C., RUEDA, M. & TORRES, V. 2011. A Palynological Zonation for the Cenozoic of the Llanos and Llanos Foothills of Colombia. *Palynology*, 35, 46-84.
- MORA, A., BABY, P., RODDAZ, M., PARRA, M., BRUSSET, S., HERMOZA, W. & ESPURT, N. 2010. Tectonic history of the Andes and sub-Andean zones: implications for the development of the Amazon drainage basin. In: HOORN, C., WESSELINGH, F. P. (ed.) *Amazonia, Landscape and Species Evolution: A Look into the Past*. Oxford: Wiley-Blackwell Publishing.
- MORA, A., CASALLAS, W., KETCHAM, R. A., GOMEZ, D., PARRA, M., NAMSON, J., STOCKLI, D., ALMENDRAL, A., ROBLES, W. & GHORBAL, B. 2015. Kinematic restoration of contractional basement structures using thermokinematic model: A key tool for petroleum system modeling. *AAPG Bulletin*, 99, 1575-1598.
- MORENO-LÓPEZ, M. C. & ESCALONA, A. 2015. Precambrian-pleistocene tectonostratigraphic evolution of the southern Llanos Basin, Colombia. *AAPG Bulletin*.
- PARNAUD, F., GOU, Y., PASCUAL, J.-C., CAPELLO, M. A., TRUSKOWSKI, I. & PASSALACQUA, H. 1995a. Stratigraphic synthesis of western Venezuela. In: TANKARD, A. J., SUÁREZ S., R. & WELSINK, H. J. (eds.) *Petroleum basins of South America*. AAPG Memoir.
- PARNAUD, F., GOU, Y., PASCUAL, J.-C., TRUSKOWSKI, I., GALLANGO, O., PASSALACQUA, H. & F., R. 1995b. Petroleum geology of the central part of the Eastern Venezuela basin. In: TANKARD, A. J., SUÁREZ S., R. & WELSINK, H. J. (eds.) *Petroleum basins of South America*. AAPG Memoir.
- PARRA, M., MORA, A., JARAMILLO, C., STRECKER, M. R., SOBEL, E. R., QUIROZ, L. I., RUEDA, M. & TORRES, V. 2009. Orogenic wedge advance in the northern Andes: Evidence from the Oligocene-Miocene sedimentary record of the Medina Basin, Eastern Cordillera, Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 121, 780-800.

- PARRA, M., MORA, A., JARAMILLO, C., TORRES, V., ZEILINGER, G. & STRECKER, M. R. 2010. Tectonic controls on Cenozoic foreland basin development in the north-eastern Andes, Colombia. *Basin Research*, 22, 874-903.
- RODDAZ, M., HERMOZA, W., MORA, A., BABY, P., PARRA, M., CHRISTOPHOUL, F., BRUSSER, S. & ESPURT, N. 2010. Cenozoic sedimentary evolution of the Amazonian foreland basin system. In: HOORN, C. & F.P., W. (eds.) *Amazonia, Landscape and Species Evolution: A look into the past*. Blackwell publishing.
- ROMERO, I. C. 2014. *Palynological evidence for the paleoenvironmental history of the Miocene Llanos Basin, Eastern, Colombia*. Master of Sciences, Seton Hall University.
- RYAN, W. B. F., CARBOTTE, S. M., COPLAN, J. O., HARA, S. O., MELKONIAN, A., ARKO, R., WEISSEL, R. A., FERRINI, V., GOODWILLIE, A., NITSCHKE, F., BONCZKOWSKI, J. & R., Z. 2009. Global Multi-Resolution Topography synthesis. *Geochem. Geophys. Geosyst.*
- SARMIENTO, L. F. 2011. Geology and hydrocarbon potential Llanos basin. In: CEDIEL, F. & OJEDA, G. Y. (eds.) *Petroleum geology of Colombia*. Medellin: ANH, Fondo editorial Universidad Eafit.
- SHEPHARD, G. E., MÜLLER, R. D., LIU, L. & GURNIS, M. 2010. Miocene drainage reversal of the Amazon River driven by plate–mantle interaction. *Nature Geoscience*, 3, 870-875.
- TORRADO, L., MANN, P. & BHATTACHARYA, J. 2014. Application of seismic attributes and spectral decomposition for reservoir characterization of a complex fluvial system: Case study of the Carbonera Formation, Llanos foeland basin, Colombia. *GEOPHYSICS*, 79, B221-B230.
- TRAVERSE, A. 2007. *Paleopalynology*, Dordrecht, Springer.
- VAN WAGONER, J. C. 1995. Overview of Sequence Stratigraphy of Foreland Basin Deposits: Terminologi, Summary of Papers, and Glossary of Sequence Stratigraphy. In: VAN WAGONER, J. C. & BERTRAM, G. T. (eds.) *Sequence Stratigraphy of Foreland Basin Deposits*. Tulsa, OK: AAPG.
- VILLAMIL, T. 2003. Regional hydrocarbon systems of Colombia and western Venezuela: Their origin, potential, and exploration. In: BARTOLINI, C., BUFFLER, R. & BLICKWEDE, J. (eds.) *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics*. American Association of Petroleum Geologists.
- ZACHOS, J., PAGANI, M., SLOAN, L., THOMAS, E. & BILLUPS, K. 2001. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, 292, 686-693.