

MODELO ESTRATIGRAFICO DEL CARBONICO EN EL SECTOR SUR DE LA CUENCA DE TARIJA

Alberto Schulz*, Marcelo Santiago*, Roberto Hernández**, Claudia Galli**, Luis Alvarez** y Cecilia Del Papa***

*Tecpetrol S.A. **XR s.r.l. ***Universidad Nacional de Salta - CONICET

ABSTRACT

The intracratonic Tarija basin, extending from Southern Perú to Northern Argentina, is comprised of a complex sedimentary section, Late Paleozoic to Early Mesozoic in age. The Carboniferous section has been studied by a number of authors, but due to the presence of erosional internal surfaces, corresponding to paleovalleys, there is widespread incoherency for surface and subsurface interpretation criteria. This paper introduces a stratigraphic model for the Carboniferous section, based on an outcrop study of seven locations in Southern Bolivia and Northern Argentina, as well as a correlation with subsurface data. Analysis of field data correlation within the Carboniferous Megacycle drew to the identification of six supercycles (SC): Itacua, Tupambi-Tarija, Chorro-Taiguati, Las Peñas, San Telmo I and San Telmo II. Each SC is composed of two hemisuper cycles (HSC). The lower HSC corresponds to an interglacial stage and it is comprised of fluvial, deltaic and lacustrine facies which develop on top of a basinwide erosional surface. The upper HSC represents the glacial stage of the SC, and is comprised of subglacial and supraglacial diamictic facies and periglacial deposits. The relationship between observed cyclicity and erosional processes is explained by an interaction of eustatism and glaciation. After a glacial stage, while sea level is rising, isostatic rebound and decompaction locally cause a relative base level fall, triggering erosion and paleovalley sculping. During transgression and highstand periods, the interglacial HSC is deposited, filling the paleovalleys. Climatic changes drive new glacial expansion, causing vertically limited regional erosion and the deposition of the glacial HSC.

INTRODUCCION

La cuenca intracratónica de Tarija, desarrollada en tiempos Neopaleozoicos a Eomesozoicos, presenta una espesa columna sedimentaria con depósitos que se extienden desde el Norte de Argentina hasta el Sur de Perú. Esta cuenca ha sido estudiada por muchos autores, pero debido a la complejidad mostrada en las sedimentitas de edad carbónica, aún hoy no se cuenta con un modelo estratigráfico regional. El prisma sedimentario se encuentra particularmente afectado por la frecuente presencia de paleovalles, los que confieren gran irregularidad a su geometría interna. Por esta razón, existe una gran disparidad de criterios en el análisis e interpretación de la información de subsuelo y superficie.

El Carbónico de la Cuenca de Tarija aporta importantes reservorios productivos en el ámbito de las Sierras Subandinas y el Chaco Salteño - Boliviano. Asimismo, es igualmente conocida la influencia del factor estratigráfico en el entrapamiento de hidrocarburos en estas unidades.

El objetivo de este trabajo apunta a definir un modelo estratigráfico para el área que involucra las Sierras de Aguarañe y Campo Durán, ubicadas en el sector Sur de la Cuenca de Tarija. Con este modelo se intenta facilitar el análisis e interpretación de la información de subsuelo para la exploración y explotación de hidrocarburos.

En una primera etapa del trabajo, ejecutada en 1996, la consultora XR s.r.l. efectuó el relevamiento estratigráfico de perfiles ubicados en la Sierra de Aguarañe, en el Norte de Argentina y Sur de Bolivia (figura 1). A partir del trabajo de campo, se realizó un estudio que incluyó análisis sedimentológicos, de facies e interpretación de paleoambientes de depositación para los grupos Machereti y Mandiyuti (Carbónico). El informe --inédito-- elaborado por XR s.r.l. sirvió de base para el presente trabajo.

CONSIDERACIONES Y PREMISAS

Se asume como hipótesis de trabajo que los eventos sedimentarios registrados durante el período Carbónico - Triásico en el sector Sur de la Cuenca de Tarija se desarrollaron en una cuenca de tipo intracratónica (Starck et al., 1991; Gohrbandt, 1993 y otros autores).

Esta cuenca estuvo controlada por ascensos y descensos del nivel del mar combinados con una fuerte influencia glacial durante todo el período Carbónico. Ambos procesos se desarrollaron en el marco de una subsidencia termal propia de una cuenca intracratónica, sin tectonismo involucrado.

Estas hipótesis permiten asumir un subparalelismo en determinados eventos sedimentarios sincrónicos (al menos en la escala de este trabajo), principalmente aquellos que generaron depósitos en estadios de alto nivel de base, cuando se conserva su continuidad lateral.

Las muestras recolectadas durante el trabajo de campo para su análisis micropaleontológico no aportaron datos de significación para realizar un ajuste cronoestratigráfico confiable. La bibliografía consultada muestra que no existen dataciones precisas y confiables para la zona de los perfiles bajo estudio.

CORRELACION ENTRE PERFILES DE SUPERFICIE

Como primera aproximación y teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, se identificaron los eventos sedimentarios depositados durante períodos de alto nivel de base. Estos fueron puestos en fase tomando como referencia de nivelación el evento que depositó a las calizas de la Formación Vitiacua (Grupo Cuevo, Pérmico medio). Esta unidad está compuesta principalmente por facies carbonáticas, depositadas en un ambiente de plataforma marina somera (Beltan et al., 1987).

Se consideró a toda la rampa carbonática como un evento sincrónico, dados los objetivos y la escala del trabajo. El espesor total de la misma no supera los 30 metros, por lo que el rango de error involucrado no superaría ese valor. Este potencial error está referido a una posible variación lateral de las facies calcáreas hacia facies clásticas, así como a la erosión que pudo afectar el tope de este evento.

Con esta nivelación se identificaron los ciclos sedimentarios y se definieron y jerarquizaron las principales discontinuidades. Esto permitió discriminar el Megaciclo Carbónico (Grupo Machareti y Grupo Mandiyuti) y el Megaciclo Pérmico medio - Triásico (Grupo Cuevo). La figura 2 muestra la correlación entre todos los perfiles de superficie, base para el análisis estratigráfico objetivo de este trabajo.

MEGACICLO CARBONICO

La base del Megaciclo Carbónico está representada por una discordancia erosiva y levemente angular (Starck et al., 1992). La misma lo separa de los sedimentos devónicos de ambiente marino, identificados como Formación Los Monos. El tope del Megaciclo Carbónico está marcado por la discontinuidad dada por la aparición de facies de ambiente eólico, identificadas litoestratigráficamente como Formación Cangapi (Grupo Cuevo). El Megaciclo Carbónico completo está representado en los perfiles de Los Monos y Pilcomayo (figura 1).

Dentro del Megaciclo Carbónico se jerarquizan las superficies marcadas por una génesis fuertemente erosiva (figura 2). De acuerdo al modelo presentado, estas superficies constituyen los límites de ciclos sedimentarios de mayor rango o superciclos, en adelante denominados "SC".

Se reconocieron seis superciclos (SC), denominados de base a techo como Itacua, Tupambi-Tarija, Chorro-Taiguati, Las Peñas, San Telmo I y San Telmo II. Se mantuvieron los nombres de la nomenclatura litoestratigráfica para facilitar la relación con el modelo estratigráfico propuesto. La columna estratigráfica idealizada del Megaciclo Carbónico y los SC identificados pueden verse en la figura 3.

ARREGLO INTERNO DE LOS SUPERCICLOS (SC)

Cada SC está integrado por dos conjuntos de ciclos deposicionales o hemisuperciclos, en adelante denominados "HSC". El conjunto basal representa el estadio interglacial (HSC interglacial), mientras que el conjunto superior representa el estadio de glaciación (HSC glacial) (figuras 2 y 3). Los HSC constituyen las unidades estratigráficas de menor jerarquía que se definen en este trabajo.

Conjunto Basal de Ciclos (HSC interglacial)

En los ciclos que integran el conjunto basal predomina una tendencia grano y estratodecreciente, marcada por una retrogradación de facies depositadas en un medio de alta energía hacia facies originadas por procesos de menor energía. Esta disminución de la energía queda reflejada por la superposición de depósitos que comienzan con sistemas fluviales proximales y medios, y culminan con sistemas fluviales distales, deltaicos y/o lacustres.

Conjunto Superior de Ciclos (HSC glacial)

En los ciclos que integran el conjunto superior, la sección inferior está conformada por facies subglaciales y supraglaciales, depositadas bajo el control del avance de la masa de hielo. La sección superior grada a facies periglaciales por el efecto de la retracción glaciaria.

CONTROLES ESTRATIGRAFICOS DE LOS SUPERCICLOS (SC)

Para explicar el mecanismo que regula la intensidad de los procesos erosivos y la ciclicidad observada en los registros sedimentarios, se propone la siguiente interrelación entre los descensos del nivel del mar, los periodos de glaciación, en el marco de la subsidencia termal propia de una cuenca intracratónica.

Si se toma como punto de partida el final de un período glaciario (figura 4a), con su correspondiente estadio de nivel eustático bajo, la retracción de la masa de hielo da lugar a dos fenómenos. En primer término se produce un alivio de carga sobre el sustrato, lo que se traduce en descompactación y rebote isostático (Eyles y Eyles, 1992), produciendo subsidencia negativa local y alterando el perfil de erosión en la zona de su influencia (figura 4b). En segundo lugar el deshielo activa los sistemas fluviales y produce un gran aumento de energía en el medio. La combinación de estos fenómenos se traduce en un descenso relativo del nivel de base local, mientras el nivel eustático se encuentra en ascenso por el retiro de los hielos. Se produce así el labrado de los paleovalles característicos del Megaciclo Carbónico, cuya importancia depende de la intensidad local de la glaciación y de la magnitud de la caída eustática.

Cuando el ascenso del nivel eustático inhibe el efecto de descenso relativo del nivel de base local, se producen los depósitos de ambiente fluvial, que rellenan los espacios generados en los paleovalles. Estos son sucedidos por depósitos de alto nivel de base, representados por ambientes deltaicos y/o lacustres, que traslapan los paleovalles (figura 4c).

El estadio transgresivo y de nivel alto está representado por el HSC interglacial. En este punto el sistema queda estabilizado, con la consecuente pérdida de energía en los procesos deposicionales. Esto es evidenciado por la instalación de paleosuelos en el tope de algunos ciclos.

Cuando un nuevo cambio climático vuelve a dar origen al avance de la masa de hielo, éste es correspondido por una caída eustática. Sin embargo, la energía producida por el descenso del nivel de base no se traduce en la activación de los sistemas fluviales, sino en el propio avance del glaciar. Esta expansión del casquete glacial produce efectos erosivos, cuya magnitud e irregularidad en sentido vertical no tienen la significación de la erosión generada por los sistemas fluviales.

El estadio de nivel bajo está representado, entonces, por el HSC glacial. Su registro sedimentario involucra diamictitas subglaciales y supraglaciales, con depósitos periglaciales asociados. El desarrollo del HSC glacial cierra el ciclo glacioeustático que controla la depositación de un SC (figura 4d). La repetición de estos eventos a lo largo del Megaciclo Carbónico originó los seis SC identificados.

La observación de los afloramientos muestra que los paleovalles están generalmente labrados sobre depósitos diamictíticos, mientras que el relleno sedimentario basal es siempre de origen fluvial. Esto corrobora la idea de que la activación de los sistemas fluviales --no la activación de los sistemas glaciares-- es la responsable del labrado de paleovalles característicos del megaciclo Carbónico. Los paleovalles más profundos, aparecen labrados sobre las diamictitas de la Formación Tarija, la que a su vez refleja la glaciación más importante para este sector de la cuenca.

GEOMETRIA EXTERNA DE LOS SUPERCICLOS (SC)

La geometría externa resultante de cada SC constituye un prisma muy irregular, controlado por las superficies de erosión basales de los SC, las que conforman los paleovalles característicos del Carbónico. El espacio generado por el labrado de los paleovalles controla principalmente la geometría lenticular de la sección basal de los HSC interglaciales.

Las secciones superiores de los HSC interglaciales y los HSC glaciales generalmente traslapan los altos topográficos, dando continuidad lateral a los depósitos con una geometría tabular. El efecto erosivo del ciclo suprayacente puede interrumpir esta tabularidad.

El SC Chorro - Taiguati constituye un caso particular, ya que se desarrolla enteramente en los paleovalles de mayor magnitud, sin traslapar sus límites. Esta particularidad le confiere a todo el SC una geometría lenticular, la que ha sido observada en las imágenes satelitales que cubren el flanco occidental de la Sierra de Aguara Güe. Sobre este flanco y hacia el Sur del perfil del río Pilcomayo, donde se presenta el mayor espesor medido para el SC Chorro - Taiguati, puede seguirse el acuñaamiento del SC, el que desaparece al Norte del perfil de Sanandita.

La escasa representación del SC Itacua en los afloramientos relevados indicaría que este SC también se desarrolla sólo en los paleovalles más profundos. Sin embargo, no se dispone de mayores evidencias para aseverar esta afirmación.

ARREGLO DEL CONJUNTO DE SUPERCICLOS (SC)

De la observación del conjunto que integran los seis SC se desprende la existencia de dos etapas de aumento en la intensidad de los procesos glaciares. Sin embargo, a esta subdivisión del Megaciclo Carbónico no se le asigna significación estratigráfica, dado que sólo reviste carácter de observación (figura 3).

La primera etapa abarca los SC Itacua y Tupambi - Tarija. Este último representa la máxima expresión en el avance e intensidad de los procesos glaciares en todo el Megaciclo Carbónico. Consecuentemente, y corroborando el mecanismo planteado en párrafos anteriores, el paleovalle labrado al finalizar este período glaciario es el de mayor magnitud identificado. Como se verá más adelante, esta apreciación tiene un buen correlato en la información sísmica analizada.

La segunda etapa incluye los SC Chorro - Taiguati, Las Peñas, San Telmo I y San Telmo II. Los procesos glaciares alcanzan su máximo en el SC San Telmo II. Sin embargo, en ningún caso se llega a la magnitud que expresa el HSC glacial del SC Tupambi - Tarija.

Por otra parte, la apreciación del conjunto de HSC interglaciales permite inferir una tendencia hacia la aridización en los ambientes sedimentarios hacia el final del Megaciclo Carbónico. Esta tendencia se observa en la aparición de regímenes más esporádicos en los sistemas fluviales, en particular en los SC San Telmo I y II.

Por último, la identificación de los ejes de los paleovalles más profundos muestra que existe una tendencia a la superposición de los mismos, a nivel de cada SC. Existe una mayor profundización de los paleovalles en la zona de los perfiles Pilcomayo y Los Monos, y otra de menor magnitud en la zona de los perfiles Capiazuti y Carapary. El sector del perfil de Campo Pajoso parece haber sido un alto topográfico entre ambos sectores, traslapado sólo por los tramos superiores de los SC.

EDAD DEL CONJUNTO DE SUPERCICLOS (SC)

La ausencia de dataciones absolutas y de datos paleontológicos que permitan definir intervalos acotados de edades, sumada a la complejidad estratigráfica donde interactúan factores locales, regionales y globales, no permite elaborar un cuadro cronoestratigráfico de detalle y confiable. Es por esta razón que sólo se hace el encuadre del conjunto de SC dentro de un marco acotado por información regional, aportada por la bibliografía existente y sujeta a posibles ajustes con el avance del conocimiento.

El comienzo del megaciclo que incluye los seis SC estaría ubicado en el rango de tiempo que va desde el Devónico superior al Carbónico inferior. Dentro de este rango están representados el hiatus sedimentario y los procesos erosivos que generan la discordancia regional de bajo ángulo, asignada a la fase Chánica (Salfity y Gorustovich, 1978; Salfity et al., 1984).

En la sección inferior del SC Itacua se registró la presencia de Retispora Lepidophita (Devónico superior) y Reticulatisporitis magnidictyus (Carbónico inferior), (Suárez Soruco y Lopez Paulsen, 1983; Lobo Boneta, 1989). Estos datos corroboran lo considerado en el párrafo anterior.

El final del megaciclo que abarca los depósitos de los seis SC podría ubicarse entre el Carbónico superior y el Pérmico inferior. La culminación del megaciclo coincide con la fase Aimará o Atacama (Salfity et al., 1984), también denominado Ciclo Subandino (Lopez Paulsen et al., 1992).

Como referencia suprayacente se puede citar la presencia de fragmentos en la caliza de la Formación Vitiacua, referidos a Coelacanthus ef. Granulatus, datados en el intervalo correspondiente entre Pérmico Medio y la etapa temprana del Pérmico superior (Sempere et al., 1992).

Sin embargo, existen dataciones asignadas al Pérmico inferior en la Formación Copacabana (Sempere et al., 1992 y otros autores), cuya presencia se manifiesta en el centro de Bolivia (columna estratigráfica generalizada de YPFB). Las características sedimentológicas y ambientales de esta unidad, así como su posición en la columna estratigráfica, permitirían asignarla al megaciclo que incluye al Grupo Cuevo. Teniendo como cierta esta posibilidad, se asume que los seis SC definidos en este trabajo se encuadran dentro del período Carbónico.

BREVE DESCRIPCION DE LOS SUPERCICLOS (SC)

En líneas generales, la siguiente descripción se basa principalmente en la interpretación de facies y ambientes sedimentarios efectuada por la consultora XR s.r.l. La figura 5 presenta un cuadro sedimentológico resumen, donde se describen las principales facies identificadas durante el trabajo de campo y su interpretación ambiental. Las asociaciones de facies de cada SC pueden verse también en la columna estratigráfica idealizada de la figura 3.

SC Itacua

Ocupa la posición basal del conjunto de SC del evento carbónico. El HSC interglacial está constituido por depósitos de ríos efímeros, mientras que el hemicycleo glacial está integrado por depósitos subglaciales retrabajados por corrientes tractivas relacionadas a etapas de deshielo. Este SC se encuentra poco representado en la zona estudiada, registrándose su presencia sólo en los perfiles estratigráficos de Pilcomayo Los Monos. Hasta la fecha no existen registros de estas sedimentitas en el Noroeste Argentino. El SC Itacua se restringe a posiciones de interior de cuenca, en territorio boliviano.

SC Tupambi - Tarija

Tiene una importante extensión regional, y ante la ausencia del SC Itacua, su base apoya sobre la Formación Los Monos. En el HSC interglacial predominan facies de ambiente fluvial (ríos entrelazados arenoconglomerádicos) con su característico arreglo grano y estratodecreciente. Hacia el tope prevalecen

facies fluviales distales, de llanura de inundación y posiblemente lacustres, con un arreglo de tipo agradante. Litoestratigráficamente, este conjunto de facies fluviales es denominado Formación Tupambi. Por otra parte, las facies distales y lacustres del tope de este HSC son denominadas Formación Itacuami.

El HSC glacial está representado, principalmente, por facies diamictíticas típicas de ambiente subglacial. Intercalan con este conjunto facies fluviales y lacustres de ambientes periglaciales, íntimamente asociados a los ambientes glaciales. Dada la complejidad sedimentaria en este tipo de ambientes, es difícil establecer arreglos y tendencias. De todas formas, se asume que los avances y retrocesos de menor amplitud manifestados en todo el período glacial, actúan como principales controles estratigráficos. Todo este paquete sedimentario es denominado Formación Tarija.

SC Chorro - Taiguati

Ocupa una posición restringida hacia el interior de cuenca. Se considera que constituye el relleno basal de los paleovalles de mayor profundidad, como el identificado en los perfiles Pilcomayo y Los Monos. El HSC interglacial está integrado por facies de flujos de detritos y facies arenosas de ríos efímeros inconfiados, con posible participación eólica. Hacia el tope se desarrollan niveles de paleosuelos poco evolucionados. El conjunto de estos depósitos fue denominado Formación Chorro. El HSC glacial está constituido por facies de diamictitas subglaciales asociadas con facies de ambientes glacifluviales y glacialacustres. Estos sedimentos fueron asignados a la Formación Taiguati.

SC Las Peñas

Está regionalmente representado por espesores muy variables, dependiendo principalmente de la paleotopografía existente. El HSC interglacial presenta arreglos de facies similares a los descritos para el SC Tupambi - Tarija. La diferencia radica en que el registro sedimentario es más completo, involucrando facies que gradan desde ambiente fluvial de ríos entrelazados hasta ambiente litoral (barras de desembocadura). El HSC glacial tiene predominancia de facies de ambiente periglacial, representadas por flujos densos de detritos (vaques masivos) con estructuras de crioturbación, evidenciadas en los perfiles Capiazuti, Carapari y Campo Pajoso.

SC San Telmo I y SC San Telmo II

El HSC interglacial de ambos SC también posee un arreglo estratigráfico similar al de los anteriores. Cabe resaltar que las facies de ambiente lacustre y de planicie de fango tienen, en el SC San Telmo I, una gran continuidad lateral en los registros, denotando la mayor magnitud en el ascenso del nivel de base en todo el Megaciclo Carbónico. La identificación de estos niveles es útil para las correlaciones estratigráficas. Por otra parte, en el SC San Telmo II existe una tendencia a la aridización del sistema, marcada por el carácter más esporádico de los ríos y el tipo de sedimentos pelíticos rojos característicos de un ambiente fluvial efímero.

El HSC glacial está poco representado en el SC San Telmo I, y sólo con facies de ambiente periglacial. Los depósitos diamictíticos típicos de ambiente subglacial y supraglacial están mejor representados en el SC San Telmo II. Si bien este último período sugiere una tendencia de aumento en la magnitud e intensidad de los procesos glaciales, la magnitud alcanzada es menor a la manifestada en el SC Tupambi - Tarija.

CORRELACION CON INFORMACION DE SUBSUELO

Subsuelo de Campo Durán - Madrejones:

La información de superficie obtenida en el trabajo de campo, así como la correlación presentada en este trabajo, tuvieron aplicación directa en el subsuelo de Campo Durán - Madrejones, donde existen más de 90 pozos que perforaron todo el espesor del Megaciclo Carbónico. Si bien se dispuso de numerosos pozos perforados en la Sierra de Aguaragüe, la sección carbónica se encuentra allí afectada por varias fallas que dificultan la correlación, además del efecto erosivo de la discordancia pre-terciaria.

Sin embargo, la restitución estructural de algunos de estos pozos permitió corroborar las tendencias de la correlación de perfiles de superficie hacia el Sur. En particular, los pozos YPF.St.Tuy.x-1 (Tuyunti) y Br.St.Yac-1002 (Yacuy) fueron restituidos siguiendo el modelo estructural disponible, dando apoyo a la correlación del tope de los SC Tupambi - Tarija y Las Peñas.

Por otra parte, el reciente descubrimiento de hidrocarburos en niveles no tradicionales del Carbónico de Campo Durán llevó la atención sobre los numerosos problemas de correlación existentes en los pozos del área. La estratigrafía del Megaciclo Carbónico en el subsuelo de Campo Durán - Madrejones fue entonces revisada utilizando como apoyo la información de superficie, en particular los perfiles Capiazuti y Carapary, adyacentes al área.

La figura 6 muestra una correlación tipo entre pozos de Madrejones (YPF.St.M-26) y Campo Durán (YPF.St.CD-26, TPT.St.CDS.x-1) con los perfiles de Capiazuti y Carapary, nivelada al tope litoestratigráfico de la Formación Las Peñas. La ubicación relativa entre pozos y perfiles de superficie puede verse en el plano de ubicación (figura 1).

El HSC interglacial del SC Tupambi - Tarija está integrado por la Formación Tupambi. Esta es la unidad productiva por excelencia en Campo Durán y Madrejones. Sin embargo, sólo es posible correlacionar su tope con la base del perfil de Iquirá, ya que mayormente no se encuentra expuesta en el extremo Sur de la cuenca de Tarija. Aún así, existe una buena coincidencia entre las tres electrosecuencias granodecrecientes definidas en subsuelo y lo observado en los perfiles Pilcomayo y Los Monos.

El tope de la electrosecuencia superior corresponde a lo que en subsuelo se denominó "T-2" o "Techo del Complejo Tupambi", y definida en superficie como Formación Itacuami. Eléctricamente, este intervalo es difícil de distinguir de la base de la Formación Tarija, por lo que los análisis estratigráficos deben apoyarse en una buena descripción litológica de cuttings. El pase está dado por la desaparición de facies de pelitas negras (tope de la Formación Itacuami), las que por contacto neto pasan a facies diamictíticas de la Formación Tarija.

La Formación Tarija constituye el HSC glacial del SC Tupambi - Tarija. Su respuesta eléctrica es similar a la de las pelitas, mostrando unas pocas intercalaciones arenosas no correlacionables entre pozos vecinos, sin ciclicidad visible. Lo observado en campo explica perfectamente este comportamiento, ya que los vaques diamictíticos de Iquirá, Capiazuti y Carapary presentan sólo algunos niveles arenosos de muy baja continuidad lateral. Muy distinto es lo que se observó a la latitud de Sanandita, donde las facies de ambientes periglaciales y fluviales que intercalan en la Formación Tarija permiten establecer cierta ciclicidad, la que podría estar representada en el subsuelo boliviano.

El SC Las Peñas está integrado por la Formación Las Peñas, la que constituye el HSC interglacial, y el tramo basal de la Formación San Telmo, el que corresponde al HSC glacial. Los perfiles eléctricos de la Formación Las Peñas permiten distinguir tres electrosecuencias, correlacionables con los tres ciclos observados en el campo. Los perfiles de los pozos YPF.St.CD-26 y TPT.St.CDS.x-1, al igual que el perfil de Capiazuti, presentan tres secuencias o ciclos granodecrecientes. Por otra parte, en el pozo YPF.St.M-26 se puede identificar una electrosecuencia granodecreciente y dos granocrecientes, al igual que lo observable en el perfil de Carapary. En dicho perfil se identificaron facies de barras de desembocadura deltaica en estos niveles.

El tope litoestratigráfico de subsuelo de la Formación Las Peñas es coincidente, en general, con el tope del HSC interglacial del SC Las Peñas. Su identificación es importante para establecer las correlaciones de los restantes SC en subsuelo. El tope de este HSC interglacial, representado por depósitos de alto nivel eustático, corresponde a lo que fue definido en subsuelo como "esquistos violáceos oscuros", o "EVO", y constituyen un buen nivel guía en Campo Durán.

Los vaques y vaques diamictíticos de ambiente subglacial y periglacial del HSC glacial del SC Las Peñas están representados en subsuelo por el tramo basal de la Formación San Telmo. Su respuesta eléctrica es similar a la de las pelitas, razón por la cual han sido litoestratigráficamente incluidos en la Formación San Telmo.

Los tramos medio y superior de la Formación San Telmo integran los SC San Telmo I y San Telmo II. Los perfiles eléctricos muestran dos niveles de respuesta predominantemente pelítica, con buena continuidad lateral. El inferior corresponde al HSC interglacial del SC San Telmo I, compuesto por facies lacustres de alto nivel eustático. El superior está integrado por los vaques diamictíticos subglaciales del HSC glacial del SC San Telmo II. Ambos niveles son importantes para las correlaciones entre pozos y tienen significación regional.

El HSC interglacial del SC San Telmo I muestra en el subsuelo de Campo Durán importantes variaciones de espesor, debido a la presencia de paleovalles de cierta magnitud, labrados a expensas del HSC glacial del SC Las Peñas. La disposición de los paleovalles es transversal al eje de la estructura, a lo largo del cual se disponen los pozos. Esta disposición permite asumir una dirección general de paleocorrientes de Este a Oeste, lo que resulta compatible con la media de las mediciones efectuadas en el campo.

Subsuelo del Chaco Salteño:

Existe una interpretación de líneas sísmicas del Chaco Salteño efectuada por Olivieri (1992, informe interno) en la zona de Michicola. Este informe destaca las evidencias sísmicas de la presencia de paleovalles labrados dentro del intervalo de reflectores asignados al Carbónico. El autor mapeó la extensión de los paleovalles y los bordes erosivos, observándose que los ejes principales tienen una orientación Este - Oeste a Sudeste - Noroeste.

El énfasis de la interpretación de Olivieri fue puesto en la determinación de geometrías y facies sísmicas, relaciones de on - lap, down - lap y truncamiento de reflectores de la Formación Tupambi. Definió tres secuencias sísmicas que constituyen el relleno y traslape de los límites de los paleovalles de la base del Carbónico.

De acuerdo a lo observado en las líneas sísmicas del Chaco Salteño, es difícil propagar con claridad el límite Tupambi - Tarija, a partir de la información de pozos. La Formación Tarija presenta grupos de reflectores discontinuos y de baja amplitud, determinando una imagen sísmica de aspecto diferente a la descrita por Olivieri para la Formación Tupambi. Este contraste sísmico, reflejo de un contraste sedimentológico, permite establecer, con un cierto margen de dudas, la posición de la base de la Formación Tarija. Esta no parece tener las irregularidades propias de los paleovalles del Megaciclo Carbónico.

Sin lugar a dudas, el evento erosivo de mayor magnitud identificado por Olivieri es la base de la Formación Las Peñas. Esta geometría tiene una marcada coincidencia con las superficies erosivas establecidas en la correlación de perfiles de superficie. Un buen ejemplo de esto puede verse en la línea sísmica 1016 (figura 7). En el extremo Norte de esta línea se observa el paleovalle de mayor magnitud, labrado sobre la Formación Tarija. En esta situación podría esperarse la presencia del SC Chorro - Tiguati, confinado a los paleovalles más profundos, como es el caso del paleovalle de los perfiles Pilcomayo y Los Monos.

CONCLUSIONES

En el sector Sur de la Cuenca de Tarija, el megaciclo Carbónico está integrado por seis superciclos (SC). Cada SC está conformado por un hemisuper ciclo (HSC) interglacial, desarrollado en un estadio transgresivo y de nivel eustático alto, y un hemisuper ciclo (HSC) glacial, desarrollado en un estadio de nivel eustático bajo.

Se verifica el subparalelismo entre los eventos sincrónicos depositados en estadios de alto nivel de base en cada SC del período Carbónico. Esta observación es válida tanto en subsuelo como en superficie. También se comprueba esta disposición subparalela con el evento carbonático de la Formación Vitiacua. La identificación de estos eventos constituye una herramienta útil para nivelar correlaciones estratigráficas.

Los límites erosivos de la base de cada SC se corresponden con la presencia de paleovalles, cuya generación es producto de procesos fluviales. El rebote isostático y la descompactación producidas al retirarse el casquete glacial contrarrestan localmente el ascenso del nivel eustático, lo que redundará en una caída relativa del nivel de base local. La profundidad de los paleovalles depende de la intensidad local de la glaciación, así como de la magnitud de la caída eustática previa.

El registro sedimentario de la base de cada SC está constituido por facies de ambiente fluvial, las que gradan a facies de ambiente deltaico y/o lacustre. Este conjunto integra el HSC interglacial de cada SC, cuyos tramos superiores generalmente traslapan los altos paleotopográficos, adquiriendo extensión regional. En este sector de la cuenca, sólo los SC Itacua y Chorro - Taiguati quedan restringidos al interior de los paleovalles.

La culminación de cada SC está dominada por un nuevo evento de glaciación, integrándose así los HSC glaciales. Los depósitos están constituidos principalmente por facies diamictíticas típicas de ambiente subglacial y supraglacial. Cuando los efectos de la glaciación son menores, el HSC glacial se compone de facies periglaciales o de clima muy frío.

Las facies arenosas de ambiente fluvial y/o deltaico de los HSC interglaciales constituyen los principales reservorios de hidrocarburos del Megaciclo Carbónico. Las características ambientales de estas facies le confieren a los reservorios su naturaleza predominantemente discontinua. Sólo donde la superposición de facies canalizadas o de barras deltaicas favoreció la amalgamación lateral de arenas, se constituyeron reservorios de mayor continuidad. Estas características son adquiridas preferentemente en los sectores asociados a los paleovalles más profundos.

Los importantes espesores de facies diamictíticas de los HSC glaciales, junto a las facies pelíticas depositadas durante los periodos de alto nivel eustático de los HSC interglaciales, ofician de sellos de extensión regional.

Aún cuando el Megaciclo Carbónico presente reservorios y sellos efectivos para el entrapamiento de hidrocarburos, debería contarse con la presencia del factor tectónico para disminuir el riesgo exploratorio. Esta observación es fundamental para los reservorios que no están en contacto con la roca generadora (Formación Los Monos), ya que es factible que el fallamiento brinde las vías de migración necesarias.

El objetivo principal de este trabajo fue planteado ante la necesidad de ampliar el entendimiento de la estratigrafía del Carbónico en el sector Sur de la Cuenca de Tarija. Resulta obvio aclarar que el aporte de este modelo estratigráfico es sólo un primer paso hacia la consecución del objetivo. La adquisición de nuevos datos, en particular los aportados por la sísmica 3D, permitirá aproximarse más a la definición de un modelo estratigráfico final.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Daniel Starck, Alfredo Disalvo, Eduardo Carrara y Andrés Boll por la lectura crítica del trabajo y por la continua y constructiva discusión de la problemática de la estratigrafía del Carbónico. Se agradece el apoyo brindado por Carlos Grossman y Silvia Arias en la preparación de las figuras que acompañan al texto.

BIBLIOGRAFIA

Beltan, L., Freneix, S., Janvier, B. y Lopez Paulsen, O., 1987. La Faune Triassique de la Formation Viatiacua dans la Région de Villamontes (Departement de Chuquisaca, Bolivie): Neues Jahrbuch für Geologie und Palaontologie, V.2, P. 99-177.

Eyles, N. y Eyles, C. H., 1992. Glacial depositional system, en Walker y James Eds., Facies Models, reponse to sea level change: Geological Association of Canada, p. 73-100.

Gohrbant, K.H.A., 1993. Paleozoic paleogeographic and depositional developments on the central proto-Pacific margin of Gondwana: Their importance to hydrocarbon accumulation: Pergamon Press, earth Sciences and Resources Institute, p. 267-287.

Hernández, R., Alvarez, L., Del Papa, C. y Galli, C., 1996. Análisis estratigráfico sedimentológico del Paleozoico superior - Cuenca de Tarija - Sector Sur. Informe para Tecpetrol S.A. - Inédito.

Legajo del Pozo YPF.St.CD-26 (Campo Durán). Tecpetrol S.A.

Legajo del Pozo YPF.St.M-26 (Madrejones). Tecpetrol S.A.

Lopez Paulsen, O.L.; Lopez Pugliessi, M., Suarez Soruco, M. y Oller Veramendi, J., 1992. Estratigrafía, facies, ambientes y tectónicas fanerozoicas, en un sector de la Cordillera de los Andes. Sucre, Chuquisaca: Primera Conferencia Internacional de las cuencas fanerozoicas del Gondwana Sudoccidental, Santa Cruz, Bolivia, actas, p. 1-29.

Olivieri, G., 1992. Informe preliminar del área de Michicola - Salta. Informe interno de YPF. Inédito. Tecpetrol S.A.

Salfity, J. y Gorustovich, S.A., 1978. Geología pregondwánica del centro-oeste sudamericano. Acta Geológica Lilloana, Tucumán, v.14 (Supl.), p. 34-41.

Salfity, J., Gorustovich, S.A. y Moya, C., 1984. Las fases diastróficas en los Andes del Norte Argentino: Simposio Tectónica Centro-Andina y Relaciones con los Recursos Naturales, Comisión Nacional Estratigráfica y Geofísica, Academia Nacional de Ciencias, Bolivia.

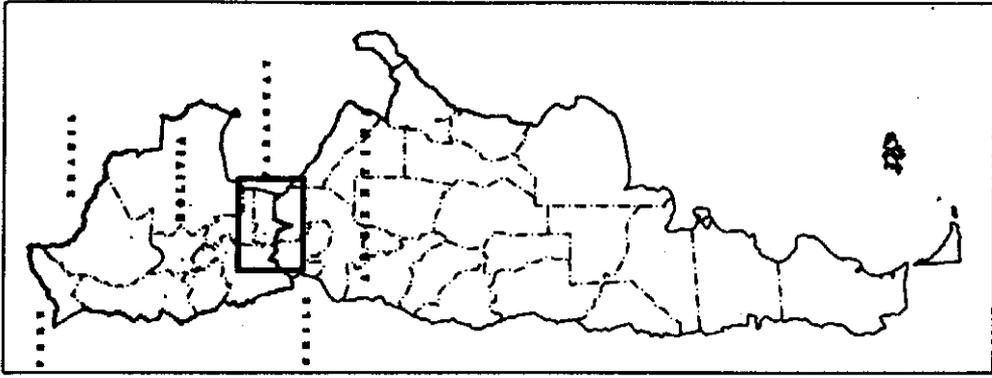
Santiago, M., Pozo, B. y Holman, C., 1997. Informe final del pozo TPT.St.CDS.x-1 (Campo Durán Sur). Informe interno de Tecpetrol S.A. -Inédito.

Sempere, T, Aguilera, E., Doubinger, J., Janvier, Ph., Lobo, J., Oller, J. y Wenz, S., 1992. La Formation de Vitiacua (Permien moyen a superieur-Trias? Inferieur, Bolivie du Sud): Stratigraphie, palynologie et paléontologie, Neues Jahrbuch fur Geologie und Palaontologie, Abhandlungen, v. 185, p. 239-253.

Starck, D., Gallardo, E. y Schulz, A. 1991. La discordancia precarbónica en la porción argentina de la cuenca de Tarija: Comptes Rendus XII ICC-P, v.2: p.

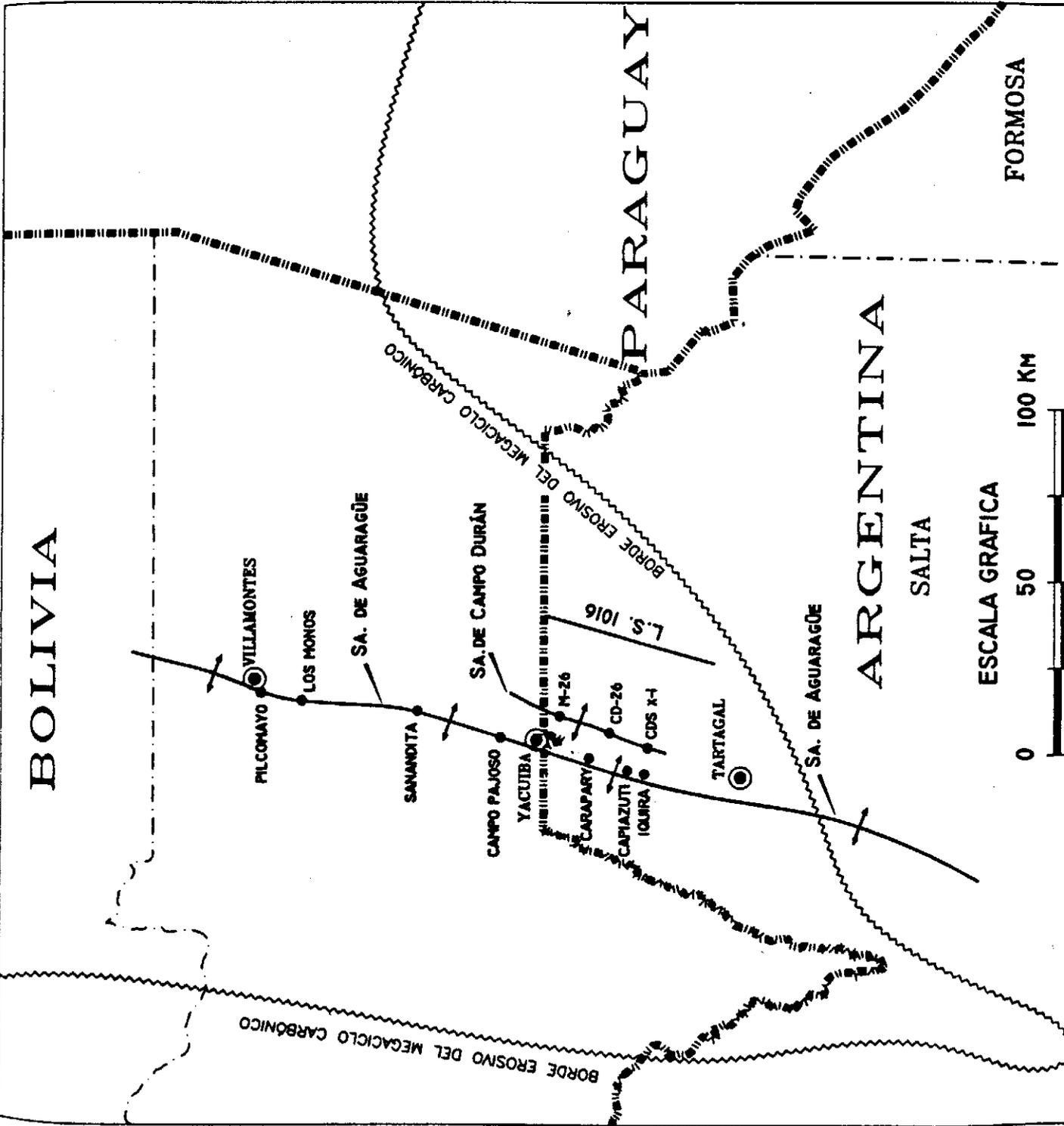
Starck, D., Gallardo, E. y Schulz, A., 1991. Neopaleozoic stratigraphy of the sierras Subandinas Occidentales and Cordillera Occidental Argentina: Comptes Rendus XII ICC-P, v.2: p. 353-372.

Schulz, A., Alarcón, M., 1996. Informe del proyecto exploratorio de Campo Durán Sur. Informe interno de Tecpetrol S.A. - Inédito.



PLANO DE UBICACION

FIGURA I



BOLIVIA

PILCOMAYO

LOS MONOS

SA. DE AGUARAGÜE

SANANDITA

SA. DE CAMPO DURÁN

CAMPO PAJOSO

YACUTIBA

M-26

CD-26

CDS X-1

TARTAGAL

SA. DE AGUARAGÜE

ARGENTINA

SALTA

ESCALA GRAFICA

100 KM

50

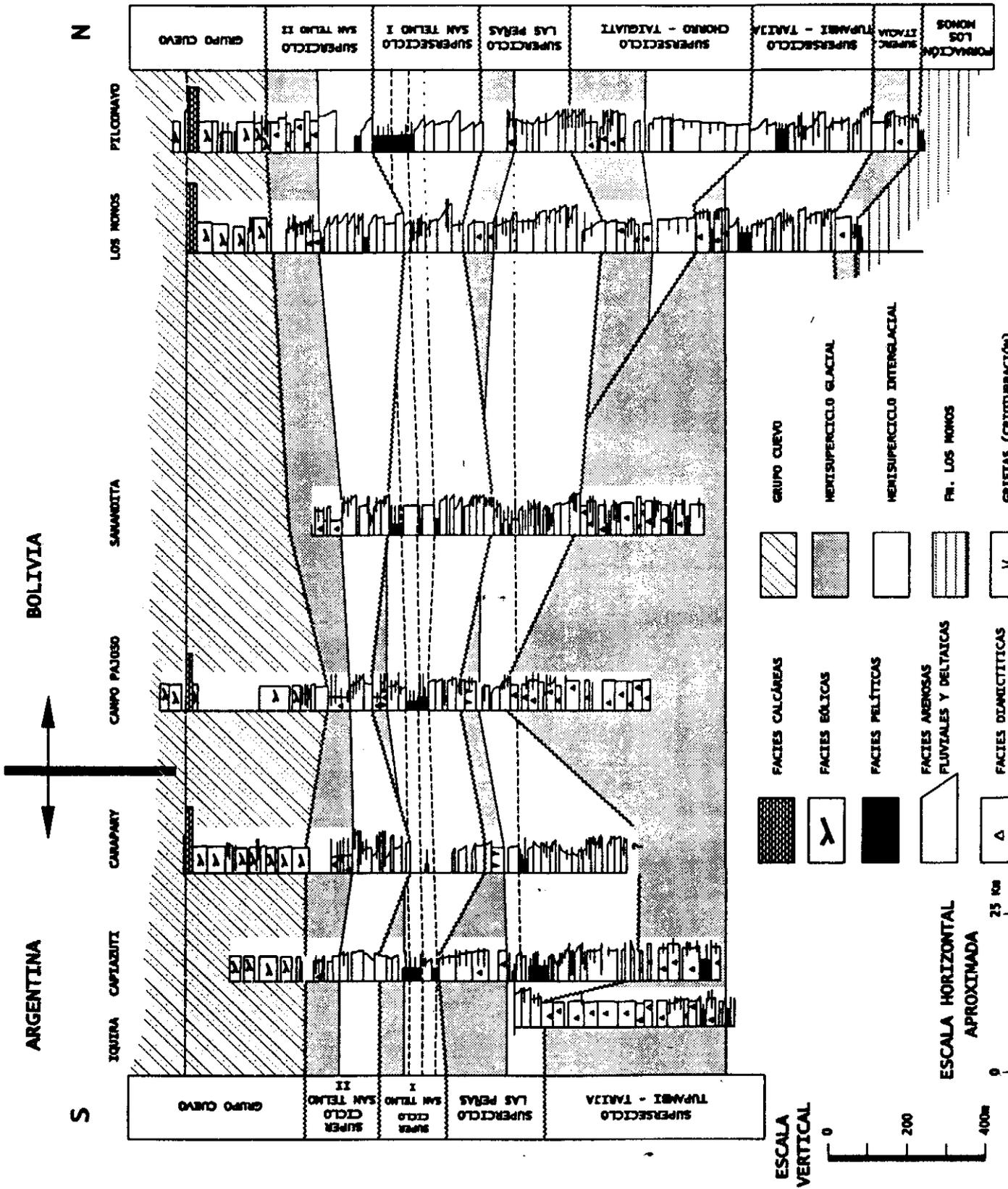
0

FORMOSA

BORDE EROSIONO DEL MEGACICLO CARBONICO

BORDE EROSIONO DEL MEGACICLO CARBONICO

PARAGUAY



ESQUEMA DE LOS CONTROLES ESTRATIGRÁFICOS

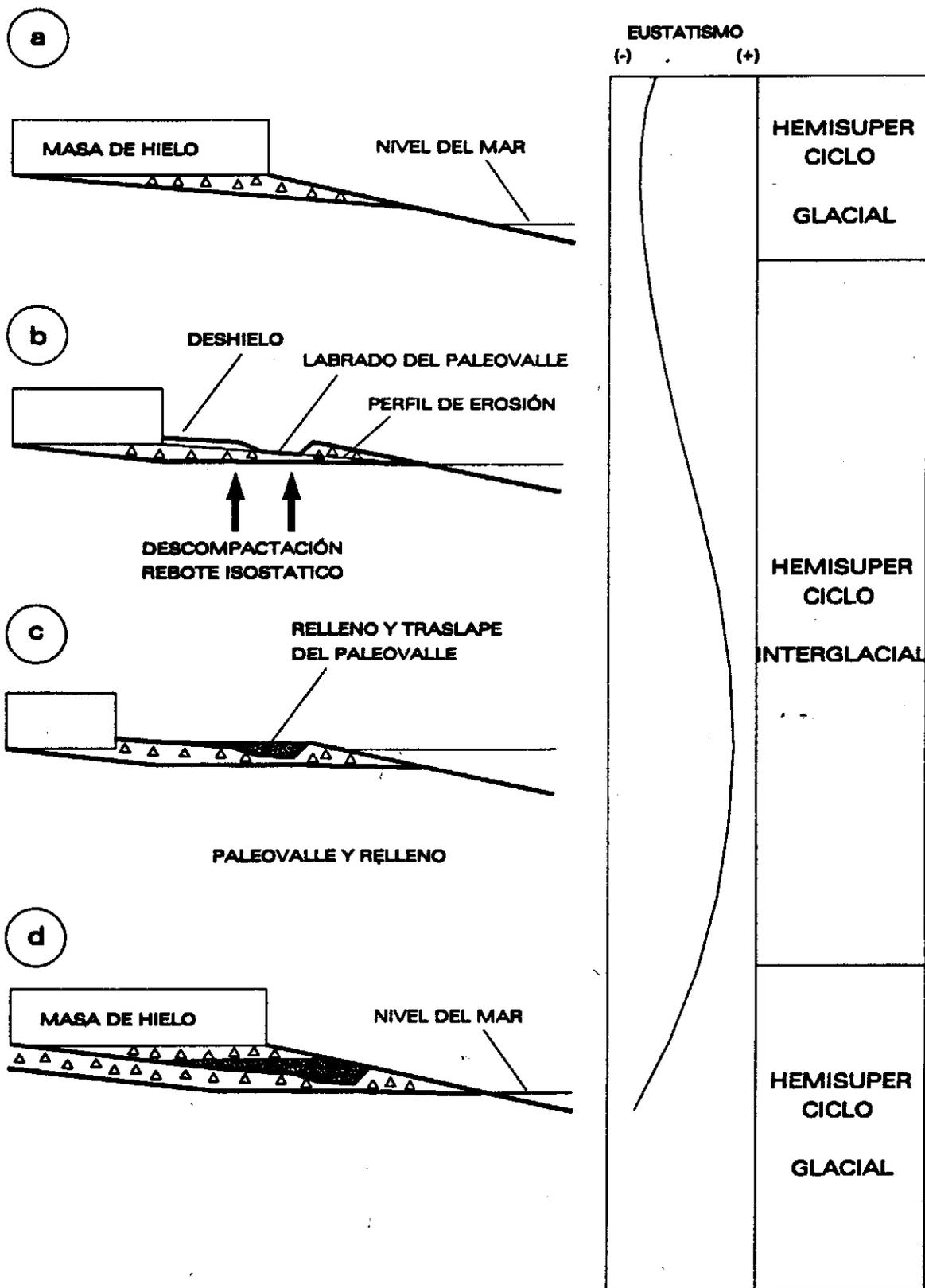
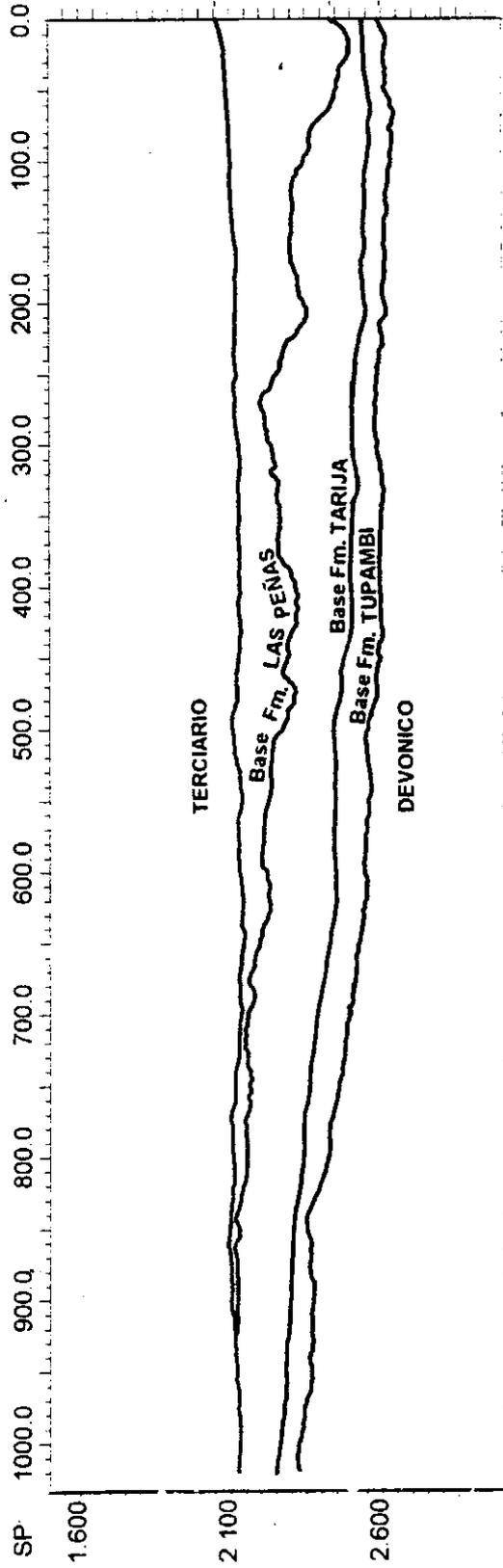
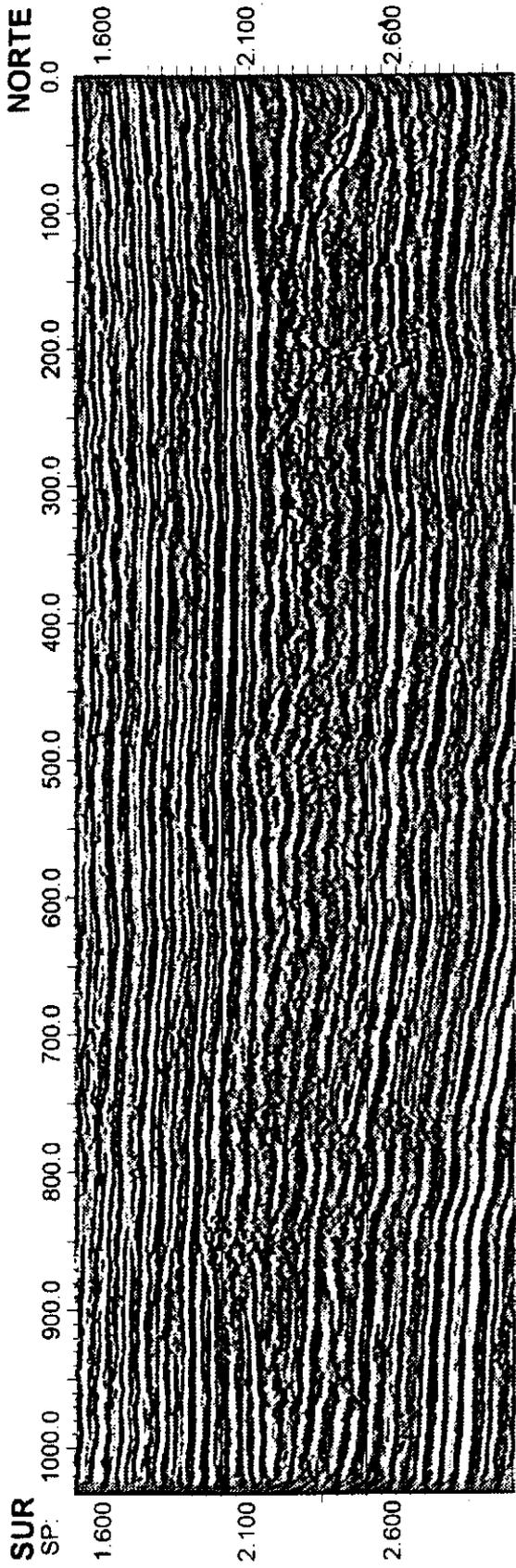


FIGURA 4

CUADRO SEDIMENTOLOGICO RESUMEN

Ambiente	Subambientes		Ódigo	Descripción de Facies	Procesos	Tipo de Depósitos
Glacial	Subglacial		Dm	Vaques, macizas, con clastos facetados y estrados. Estratificación tabular mediana, con lentes de areniscas deformados	Acumulación en la base del glacial y depósitos por corrientes subglaciales	Till Subglacial: depósitos de base del glacial y eskers
	Supraglacial		Dd	Vaques y conglomerados, muy mal seleccionados e inmaduros.	Flujos diamictíticos de origen gravitacional, producto de descongelamiento	Till de derretimiento y Till de sublimación
	Periglacial		Va	Vaques macizas, con clastos blandos y de areniscas. Deformación por carga, diques clásticas y niveles con slump	Flujos hiperconcentrados producto de descarga de agua y sedimento relacionados a retracción glacial. Estos depósitos estaría asociados a un nivel freático alto y a muy bajas temperaturas. Posteriormente se produciría el descongelamiento del sustrato con la formación de cuñas clásticas y deformación de los sedimentos semiconsolidados.	Flujos hiperconcentrados Permafrost
Interglacial	Lacustre		La Vr	Vaques estratificadas (Vr) asociadas con pelitas y areniscas, con acción de olas y facies de laminitas (La)	Deposición rápida de sedimentos en suspensión, asociados a debris. Acción de corrientes turbidíticas seguida de deposición de material de decantación y corrientes de fondo dan origen a laminitas.	Debris flow (Vr) y Laminitas (La)
	Deltaico		Pl	Limolitas interestratificadas con areniscas, macizas, con laminación paralela y ondulitas. Estratificación lenticular y hummocky	Depósitos progradantes producto de un cambio en la pendiente en la desembocadura de un río en un cuerpo de agua	Barras de desembocadura en un sistema deltaico
	Fluvial	Tipo Braided	Ab	Areniscas, con laminación en artesas y ondulitas de corrientes, gradación normal y clastos conglomerádicos en la base.	Depósitos de corrientes tractivas que rellenan canales multipisódicos	Barras longitudinales y laterales
			Amc	Areniscas bien seleccionadas, con laminación diagonal y en artesas. Pelitas laminadas Estratificación lenticular	Corrientes fluidas con carga tractivas que rellenan canales y llanura de inundación	Rellenos y desbordes de canales (mantos de crecida) Llanura aluvial
			Ccb	Conglomerados con matriz arenosa. Gradación normal, laminación diagonal y paralela Estratos lenticulares con bases erosivas. Slumpizadas.	Corrientes tractivas canalizadas	Barras longitudinales y transversales
		Efimero	Ame	Areniscas con laminación paralela de alto régimen y en artesas. Estratos tabulares gruesos, con bases erosivas y clastos blandos	Corrientes efimeras de alto régimen inconfiadas	Depósitos inconfiados
			Ale	Areniscas macizas y con ondulitas en el techo. Estratos con bases erosivas	Corrientes efimeras canalizadas	Depósitos de barras que rellenan canales de mediana embargadura
			Po	Areniscas, con laminación fina, macizas, con concreciones bioturbaciones y pedotubulos.	Paleosuelos inmaduros donde se conserva la estructura primaria de la roca	Paleosuelos

FIGURA 5



Línea sísmica 1016, Área de Michicola. Modificado de Olivieri (1992).