

Geología del Sistema Acuífero Guaraní en el área de afloramiento: formaciones Tacuarembó y Rivera (Cuenca Norte, Uruguay)

Gerardo VEROSLAVSKY^{1,2}, Matías SOTO^{1,2}, Valeria MESA^{1,2}, Alberto MANGANELLI³

¹ UDELAR, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Geológicas, Uruguay.

² PEDECIBA, Programa de Desarrollo de Ciencias Básicas, Uruguay.

³ CEREGAS, Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas en América Latina y el Caribe, Uruguay.

E-Mail: gerardo@fcien.edu.uy, msoto@fcien.edu.uy, vmesa@fcien.edu.uy, amanganelli@ceregas.org

Resumen. Se describe la geología de las formaciones Tacuarembó y Rivera en la región centro – norte de la Cuenca Norte (Uruguay). A estas unidades se las reconoce aflorando a lo largo de una extensa franja, de dirección general NE a NNE, y constituyen (junto a la Formación Itacumbú que se desarrolla en el subsuelo del sector NW) el Sistema Acuífero Guaraní, unidad acuífera de importancia regional. Estas unidades integran una sucesión sedimentaria siliciclástica, que aflora a lo largo de 4864 km², de relativa homogeneidad litológica, esencialmente arenosa, que exhibe un espesor promedio entre 80 y 100 m. Son presentados los resultados de una cartografía geológica a escala 1:100000, que incluye parte de la región basáltica adyacente, el levantamiento e interpretación de quince perfiles litológicos representativos de las facies y asociaciones de facies, así como cinco cortes geológicos que incorporan datos e información de subsuelo. Se suma a lo anterior, el análisis estructural a partir de imágenes digitales de terreno y fotografías aéreas. Se dividió el área de estudio en tres dominios morfoestructurales: Norte, Central y Sur, cada uno de los cuales posee rasgos morfológicos, estratigráficos y estructurales distintivos. Aspectos estratigráficos y estructurales son analizados y relacionados al funcionamiento del SAG, en particular, la afectación del acuífero por la fracturación (diaclasas y fallas) NW y NE que se reconocen en el área de estudio. Los resultados alcanzados sobre la configuración morfológica y geológica de la región central de la Cuenca Norte poseen real significación para explicar el comportamiento hidrogeológico del SAG en el área aflorante.

Palabras clave: sedimentología, estratigrafía, análisis estructural, Jurásico – Cretácico, Uruguay

Abstract

Geology of the Guaraní Aquifer System in the outcrop area: Tacuarembó and Rivera formations (Norte Basin, Uruguay)

The geology of the Tacuarembó and Rivera Formations, in the central-northern región of the Norte Basin (Uruguay) is described. Both units crop out along a wide, NE to NNE-trending belt and they constitute (along with the Itacumbú Formation which develops on the subsurface of the NW sector) the Guaraní Aquifer System (GAS), a regionally important aquifer unit. These units form part of a siliclastic sedimentary sucesion, which crops out along 4864 km², with relatively homogenous, esentially sandy lithologies, with a mean thickness between 80 and 100 m. Results of a 1:100000 geological mapping including part of the adjacent basaltic region are presented. We provide and interpret fifteen lithological logs which are representative of the facies and facies associations, as well as five geological cross-sections including both surface and subsurface data. Moreover, we perform a structural analysis on the basis of digital elevation model and aerial photographs. The study area was divided in three morphostructural domains: North, Central and South, each one possessing distinct morphological, stratigraphical and structural features. Stratigraphic and structural features are analized and related to the SAG behavior, particularly aquifer compartmentalization through NW and NE fractures (both diaclasses and faults) which are recognized in the study area. The new knowledge in the morphological and geological configuration of the central region of the Norte Basin is relevant to explain the hidrogeological behavior of the GAS in the outcropping area.

Keywords: sedimentology, stratigraphy, structural analysis, Jurassic – Cretaceous, Uruguay

INTRODUCCIÓN

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) es un cuerpo hídrico subterráneo, transfronterizo y de fundamental significación para el continente sudamericano que se desarrolla, parcialmente, en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay (Araújo et al. 1995). Se ubica entre los paralelos 16°S y 32°S y los meridianos 47°W y 60°W (Fig. 1a) ocupando un área total de 1087879.5 km² (Gastmans et al. 2012).

En territorio uruguayo, el SAG se extiende por la región centro – norte de la Cuenca Norte (Fig. 1b), comprendiendo un área de 36.170 km² (4864 km² aflorante y 31304 km² confinado) sobre la que viven aproximadamente 400000 habitantes (ANII 2022). Las características sedimentológicas y estratigráficas de las unidades que lo componen le confieren al acuífero propiedades hidrogeológicas que resultan óptimas en diferentes usos. El volumen de agua que se extrae es cercano a 25 millones de m³/año (DINAMIGE 2009) y, entre sus usos en la región aflorante, se destacan el suministro de agua potable a la población urbana, suburbana y rural, el riego, el abastecimiento de agua para ganado y actividades agroindustriales (Montaño 2004). En la región donde el SAG se encuentra a grandes profundidades y confinado por los basaltos, es explotado en centros turísticos termales que se desarrollan sobre el Litoral del Río Uruguay (PEA 2009).

En Uruguay, gran parte del área de afloramiento del SAG exhibe una vulnerabilidad intrínseca moderado a alta, evaluada a través de los métodos GOD y DRASTIC (ANII 2022) mientras que, hacia el Oeste, el acuífero se desarrolla en subsuelo protegido por basaltos eocretácicos que exhiben un aumento progresivo de espesor en esa dirección. Por otra parte, la piezometría de esa área de afloramiento muestra una importante interacción del agua subterránea con los cursos superficiales, particularmente, a través de descargas hacia éstos (Pacheco 2004, ANII 2022). Al mismo tiempo, el área de afloramiento del SAG muestra una componente general de flujo del agua del SAG de Oeste a Este (Manganelli et al. 2021) fuertemente condicionado por el relieve y los elementos morfoestructurales que controlan los cursos superficiales. Situaciones más locales que registran direcciones de flujo de Oeste a

Este, fueron señaladas en el área de las ciudades de Rivera y Santana do Livramento (Collazo 2006, Rodríguez et al. 2008) y la ciudad de Tacuarembó y alrededores (Pochintesta 2018, Carrión 2023). Estos aspectos revelan la necesidad de estudios más exhaustivos sobre el paradigma que concibe en los modelos conceptuales al área de afloramiento cómo área de recarga principal del SAG señalando la existencia de flujos regionales desde el área de afloramiento hacia la región infrabasáltica profunda (e.g. PEA 2009, Gastmans et al. 2012, Mira et al. 2018, Techera et al. 2017).

Figura 1. a) Extensión del Sistema Acuífero Guaraní en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay y b) los rasgos geológicos fundamentales del territorio uruguayo (modificado de Preciozzi et al. 1985, Gastmans et al. 2012). Ubicación de algunos pozos acompañados de los espesores del SAG: 1-Belén (407 m); 2-Gaspar (322 m); 3-Itacumbú (359 m); 4-Artigas (190 m); 5-Cañada Charrúa E-1 (250 m); 6-Pepe Núñez (244 m); 7-Quintana E-1 (188 m); 8-Cerro Padilla (170 m). La línea amarilla señala el área de estudio.

El objetivo de esta contribución es describir y caracterizar la geología de las unidades litoestratigráficas que constituyen el SAG, formaciones Tacuarembó y Rivera, en el área de afloramiento. Cabe acotar que, en la región infrabasáltica, se integra a las unidades constituyentes y definición del SAG, la Formación Itacumbú (areniscas finas, algo micáceas), que infrayace a la Formación Tacuarembó (LEBAC 2008).

Las formaciones Tacuarembó y Rivera constituyen una sucesión jurcretácica de areniscas siliciclásticas, de origen continental, que forman parte del relleno rocoso paleo-mesozoico de la Cuenca Norte (Fig. 1b). Afloran a lo largo de una extensa franja de 150 km por 25 a 50 km de ancho, con dirección general NE a N-S y exhiben, en conjunto, un espesor promedio de 100 m.

Los resultados que se exponen sobre la geología de las formaciones Tacuarembó y Rivera aportan un mayor conocimiento sobre la naturaleza, extensión y configuración espacial de estas unidades en el área de estudio. La elaboración del mapa geológico, a escala 1:100000, permitió realizar una revisión y ajustes en los alcances litoestratigráficos de ambas unidades mientras que, los perfiles levantados, confirmaron facies, asociaciones de facies e interpretaciones paleoambientales dadas en trabajos previos (e.g. Ferrando et al. 1987, Perea

et al. 2009, Mesa 2016, do Amarante et al. 2019, Reis et al. 2019). Adicionalmente, fueron realizados un conjunto de cortes geológicos que permitieron revelar la configuración estratigráfica y estructural del SAG en la región central de la Cuenca Norte. En particular, se constata el papel recurrente que jugaron algunos elementos estructurales (fallas, diaclasas) en la evolución geológica del área. Todos estos aspectos permiten presentar un avance en la actualización del conocimiento de las formaciones Tacuarembó y Rivera en el área de afloramiento situación que, a su vez, contribuye a dar un mejor soporte físico para la comprensión de los procesos y fenómenos que tiene en cuenta la hidrología subterránea de esa región.

MARCO GEOMORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO

El área de estudio comprende a los afloramientos de las unidades constituyentes del SAG y parte de la región basáltica adyacente (Fig. 2), teniendo como límite Oeste a la divisoria de aguas definida por la Cuchilla Negra y la Cuchilla de Haedo. La primera controla las máximas elevaciones (300 a 380 m) y se desarrolla a lo largo de casi 100 km bajo un fuerte control estructural de dirección NE. La prolongación natural de esta cuchilla al suroeste pasa a denominarse Cuchilla de Haedo. Esta última disminuye progresivamente de altitud y, a partir de su intersección con el Lineamiento Tacuarembó Chico, sufre una inflexión en la dirección N-S a SSE y sus altitudes disminuyen oscilando entre 270 y 230 m. En el extremo sur del área de estudio, próximo al arroyo Malo, la Cuchilla de Haedo se desarrolla con altitudes próximas a 140 y 160m.

Figura 2. Mapa hipsométrico del área de estudio que establece el límite occidental por el sistema de cuchillas (Negra y de Haedo) y los principales cursos de agua que la surcan. Referencias: T = río Tacuarembó; Tc = A° Tacuarembó Chico; m = A° Malo; ba = A° Batoví; tc = A° Tres Cruces; ca = A° Carpintería; lc = A° de las Cañas; la = A° Laureles; lu = A° Lunarejo; cu = A° Cuñapirú. LAM = Lineamiento arroyo Malo; LTC = Lineamiento Tacuarembó Chico, LL=Lineamiento Laureles. Se indica la ubicación del material fotográfico que se incluye en las Figs. 3 y 4.

Geomorfológicamente, el área comprende de Oeste a Este: el extremo oriental de la cuesta basáltica; la zona de retroceso de la cuesta y la depresión sedimentaria (Panario 1988). La zona de retroceso se expresa como una escarpa continua y elongada en la dirección norte a

noreste, con pendiente abrupta hacia el Este, gobernada por procesos de erosión fluvial remontante que actúan sobre los basaltos que conforman la cuesta (Fig. 3a). La depresión sedimentaria se caracteriza por un paisaje de suaves colinas labradas sobre las areniscas de las formaciones Rivera y Tacuarembó (Fig. 3b). A veces, esas suaves colinas tienen formas más pronunciadas asociadas, en general, a las areniscas de Rivera (Fig. 3b). La depresión sedimentaria también exhibe el desarrollo de otras geoformas asociadas que distinguen el paisaje del área de estudio: los cerros chatos o testigos y las mesetas basálticas. Los cerros chatos están controlados por niveles de areniscas silicificadas que ofrecen mayor resistencia a la erosión de las formaciones Tacuarembó (e.g. cerros Batoví Dorado y Miriñaque) y Rivera (e.g. cerro de los Chivos) y, otras veces, a la presencia de los basaltos de la Formación Arapey (e.g. cerro Batoví). Las mesetas basálticas se disponen elongadas en la dirección noroeste, a veces en continuidad con la cuesta basáltica y otras completamente aisladas, limitadas por fuertes lineamientos estructurales NW (Fig. 4), subordinadamente NE, que controlaron la incisión vertical de los cursos fluviales, con formación de escarpas muy abruptas (e.g. cañón del Laureles en el valle del Lunarejo).

Figura 3. a) Vista del frente de retroceso de la cuesta basáltica sobre la ruta 30, próximo a la Subida de Pena - departamento de Rivera, y de terrazas aluviales y fluviales que conforman el paisaje adyacente (ver ubicación 3a en la Fig. 2); b) expresión del frente de retroceso en la región Sur del área de estudio, alrededores de Curtina - departamento de Tacuarembó, donde muestra pendientes menos acentuadas (ver ubicación 3b en la Fig. 2).

La actuación de procesos fluviales recientes es responsable de la formación de terrazas aplanadas y planicies aluviales con formas planas y sectores suavemente alomadas que se asocian a la profundización vertical por canales fluviales que ocupan cotas topográficas más bajas del área (Fig. 4). El principal curso de agua es el río Tacuarembó, afluente del río Negro, que recorre la depresión sedimentaria bajo distintos controles estructurales, principalmente N-S y NW, y subordinadamente NE. La mayoría de sus afluentes nacen en el sistema de cuchillas y el diseño de sus redes de drenaje denotan, muchas veces, la incidencia de los elementos morfoestructurales en el control de su diseño (Fig. 2).

Figura 4. El paisaje típico de la región central del departamento de Tacuarembó que exhibe el desarrollo de mesetas basálticas en el región próxima a Bañado de Rocha, constituyendo formas altas aplanadas y delimitadas

por fuertes lineamientos NW, que contrasta con las suaves lomadas labradas sobre las areniscas (ver ubicación 4a en la Fig. 2); b) región de Manuel Díaz, donde se observan algunos cerros chatos y, al frente, la terraza aluvial y la planicie del río Tacuarembó (ver ubicación 4b en la Fig. 2); c) relieve mesetiforme asociado a cerros testigos sobre la ruta 29, en estos casos, coronados por areniscas resistentes (ubicación 4c en la Fig. 2).

Geológicamente, el área de estudio corresponde con la región central de la Cuenca Norte, denominación local consagrada en Uruguay para la porción austral de 90000 km² que forma parte de la extensa Cuenca Chaco - Paraná (Fig. 1). Su relleno rocoso está compuesto por rocas sedimentarias e ígneas acumuladas desde el Devónico al Cretácico Temprano (Fig. 5). Este registro puede ser subdividido en tres megasecuencias paleozoicas (Veroslavsky et al. 2021): Devónica (Pragian–Emsiana); Carbonífera Superior; y Pérmica (Asseliana–Wuchiapingiana) mientras que la megasecuencia Jurocretácica, de la que son parte las formaciones Tacuarembó y Rivera, cierra la historia evolutiva de esta cuenca. Los registros magmáticos y sedimentarios que ocurren luego de los derrames de basaltos eocretácicos forman parte de otro contexto geológico y se suman a la columna para visualizar el posicionamiento de algunas unidades a las que se refiere en el texto (Fig. 5).

Figura 5. Cuadro litoestratigráfico de la Cuenca Norte adoptado en este trabajo (fuentes: de Santa Ana et al. 2004, Veroslavsky et al. 2021, Muzio et al. 2022, Scherer et al. 2023).

Estratigráficamente, las areniscas que reúnen las formaciones Tacuarembó y Rivera infrayacen indistintamente a los basaltos eocretácicos y a unidades sedimentarias cenozoicas (Fig. 6). La Formación Rivera se apoya exclusivamente sobre la Formación Tacuarembó mientras que esta lo hace sobre unidades neopaleozoicas o el basamento cristalino (Bossi 1966, de Santa Ana 2004). Los espesores asignados a ambas formaciones en el área de estudio han sido motivo de propuestas disímiles (e.g. de Santa Ana 2004, PyT Consultora 2007, SNC-Lavalin 2008, Collazo et al. 2022), aspectos que se discuten aquí por su significación geológica e hidrogeológica.

Figura 6. a) Exposiciones de areniscas blancas, finas a muy finas de la Formación Tacuarembó (FT) que infrayacen a las areniscas marrones a rojizas con estratificación cruzada de alto ángulo de la Formación Rivera (FR) a lo largo de la ruta 5 entre las ciudades de Tacuarembó y Rivera. Las superficies de contacto entre las unidades son netas, horizontales a suavemente onduladas, con un notorio contraste litológico; b) afloramiento estudiado en detalle por

do Amarante et al. (2019) quienes describen un nivel graviloso hacia la base de la Formación Rivera en contacto con la Formación Tacuarembó. En a), c) y d) se muestra el fuerte contraste litológico entre las areniscas blanquecinas (Tacuarembó) y marrones a rojizas (Rivera), punto d) en ruta 5, km 480,2 (FLA= areniscas pleistocénicas de la Formación Las Arenas).

Los principales rasgos estructurales que afectan a las formaciones Tacuarembó y Rivera se expresan como lineamientos y fracturas con direcciones NW y NE, subordinadamente N-S y E-W. A estos rasgos estructurales sobresalientes, los mapas regionales antecedentes no los han considerado (e.g. Preciozzi et al.1985, Bossi y Ferrando 2001). Por ejemplo, en lo que refiere al área de estudio, esas contribuciones sólo representan una corrida de diques básicos eocretácicos situada al Sur de la ciudad de Tacuarembó. Por otra parte, las importantes fallas que aquí se reconocen afectando a las unidades del SAG en el extremo oriental de la Cuesta Basáltica no fueron representadas en cortes geológicos (e.g. SNC-Lavalin 2008, do Amarante et al. 2019, do Reis et al. 2019).

ANTECEDENTES ESTRATIGRAFICOS

La sucesión sedimentaria que aflora en la región centro-norte de Uruguay fue motivo de estudios sedimentológicos, estratigráficos y paleontológicos desde el inicio del Siglo XIX. Las primeras menciones corresponden a las “Areniscas de Botucatu” (Walther 1919) y luego “Areniscas de Tacuarembó” (Falconer 1931). Falconer (1937) limitó el alcance estratigráfico de sus “Areniscas de Tacuarembó” al separar y cartografiar a sus infrayacentes pérmicas que denominó “Areniscas de Buena Vista”, a las que a su vez correlacionó con sus equivalentes pérmicos situados en la región sur de Rio Grande do Sul, Brasil. Falconer (1937) también estableció que las relaciones estratigráficas eran de discordancia entre las “Areniscas de Buena Vista” y las “Areniscas de Tacuarembó”.

Bossi (1966) otorgó el rango de Formación Tacuarembó a las “Areniscas de Tacuarembó” de Falconer (1931). Bossi et al. (1975), sobre la base de Carballo y Medina (1972), separaron a la Formación Tacuarembó en dos miembros: el Miembro Inferior y el Miembro Superior. Perea et al. (2009) y do Amarante et al. (2019) refirieron a esos miembros como Miembro Batoví y Miembro Rivera.

Ferrando et al. (1987) elevaron al Miembro Superior de la Formación Tacuarembó a la categoría de Formación Rivera, proponiendo a la ciudad homónima como área tipo. Esos autores también separaron depósitos eólicos de la base de la Formación Tacuarembó, los que reunieron en la Formación Cuchilla Ombú, a la que asignaron una edad Triásico y correlacionaron con la Formación "Piramboia" de Rio Grande do Sul. Esa propuesta y las correlaciones establecidas fueron motivo de discusión y controversias (e.g. de Santa Ana y Veroslavsky 2004, Soares et al. 2009). Algunos trabajos separan a la Formación Cuchilla Ombú y la asignan al Jurásico (Bossi y Ferrando 2001, Collazo et al. 2022). Recientemente, Scherer et al. (2021, 2023) propusieron eliminar el término "Pirambóia" (en el sentido de Lavina et al. 1993) en la geología del extremo sur de Brasil y denominar a esas areniscas con la denominación uruguaya de Formación Buena Vista con el mismo alcance litoestratigráfico dado por de Santa Ana et al. (2006) en la Cuenca Norte. A su vez, Scherer et al. (2023) sugieren que la Formación Sanga do Cabral del Triásico Inferior (Andreis et al. 1980) pueda extenderse en el subsuelo de la Cuenca Norte como, por ejemplo, en el pozo Artigas.

El Cuadro 1 muestra las diferentes propuestas litoestratigráficas que existen para agrupar al conjunto de areniscas mesozoicas que se desarrollan por debajo de los basaltos y por encima de la discordancia pérmica.

Cuadro 1. Distintas propuestas litoestratigráficas para la sucesión sedimentaria comprendida entre la discordancia pérmica (formaciones *Yaguari* / Buena Vista) y los basaltos eocretácicos (Formación *Arapey*). En negrita las formaciones y en *itálica* los miembros.

METODOLOGÍA Y BASE DE DATOS

La metodología de trabajo se desarrolló en tres etapas. En la primera, se realizaron estudios de gabinete orientados a la construcción de un mapa geológico preliminar sobre una imagen digital de terreno y a partir del análisis de la cartografía geológica antecedente (Preciozzi et al. 1985, Montaña 1992, Bossi y Ferrando 2001, CGMW-ASGMI 2011, Benvenuto 2016, Pochintesta 2018). Se incluyó el mapa de anomalías Bouguer de Rodríguez et al. (2015) a efectos de analizar e interpretar los rasgos geológicos del subsuelo en áreas desprovistas de información, los que contribuyeron a la elaboración de los cortes geológicos. La

fotointerpretación se hizo sobre fotos aéreas 1:40000 del Instituto Geográfico Militar (<https://igm.gub.uy>) con auxilio parcial de imágenes satelitales LANDSAT disponibles en Infraestructura de Datos Espaciales (www.gub.uy/infraestructura-datos-espaciales) para la caracterización de los rasgos morfoestructurales (lineamientos de drenaje, relieve y fractura). Se optó por cartografiar las formaciones Tacuarembó y Rivera con el alcance dado por las unidades en Ferrando et al. (1987) y discutido en Veroslavsky y Manganelli (2018). Fueron recopilados y analizados los perfiles litológicos de PyT Consultora (2007), Perea et al. (2009), Mesa (2016) y do Amarante et al. (2019) que orientaron la descripción e interpretación del trabajo realizado.

En la segunda etapa, se accedió a los registros de pozos (descripción de perfiles, *cutting*, coronas) de la Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE), la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA), la Administración Nacional de Combustibles, Alcoholes y Portland (ANCAP) y de Obras Sanitarias del Estado (OSE). Esto permitió definir, revisar y ajustar algunos de los pases formacionales de las unidades litoestratigráficas en un conjunto importante de pozos. A efectos de la confección de los cortes geológicos fueron seleccionados 27 pozos del conjunto analizado, teniendo en cuenta aquellos más profundos, priorizando los que alcanzaban el basamento cristalino y contemplando la distribución geográfica apropiada (Cuadro 2).

Cuadro 2. Perforaciones objeto de revisión y descripción seleccionadas para la construcción de los cortes geológicos. En algunos casos, no fue posible separar las formaciones Tacuarembó y Rivera por falta de muestras (recorte de roca/testigos) en los primeros metros de las perforaciones, situaciones en que se consideró todo como correspondiendo a la Formación Tacuarembó.

Considerando el conocimiento previo sobre la naturaleza genética de los depósitos estudiados (esencialmente fluviales y eólicos), fueron utilizados para la confección de los perfiles e interpretación de las litofacies (Cuadro 3) los aportes de Tripaldi (2002), Tripaldi y Limarino (2008) y do Amarante et al. (2019).

Cuadro 3. Litofacies utilizadas para el levantamiento de perfiles de las formaciones Tacuarembó y Rivera. Tomado y simplificado de Miall (1996), Tripaldi (2002), Tripaldi y Limarino (2018) y do Amarante et al. (2019). NA=no alcanzado.

La tercera etapa consistió en el análisis e interpretación de los resultados alcanzados que, sumados a toda la información disponible, permitió la conclusión del mapa geológico, la revisión litoestratigráfica de las unidades, la confección/revisión de 15 perfiles litológicos y la elaboración de cinco cortes geológicos regionales (Fig. 7). Se incluye en la discusión parte de los resultados, en su mayoría inéditos, de los estudios mineralógicos y sedimentológicos realizados en muestras de las formaciones Tacuarembó y Rivera.

Figura 7. Ubicación de los perfiles y cortes geológicos levantados en el área de estudio y de algunos accidentes geográficos a los que se hace referencia el texto.

RESULTADOS

El mapa geológico del área de estudio (7330 km²), a escala 1:100000, se presenta simplificado en la Figura 8a, resultando que 4864 km² corresponden a los afloramientos de las unidades constituyentes del SAG y otros 2466 km² a la región basáltica situada al Oeste (Fig. 2). Los rasgos sedimentológicos, estratigráficos y estructurales reconocidos permitieron establecer tres grandes dominios que facilitan la caracterización del área de estudio: Dominio Norte, Dominio Central y Dominio Sur. Los lineamientos Laureles y Tacuarembó Chico establecen los límites del Dominio Central de los dominios Norte y Sur (Fig. 8).

Figura 8. Mapa geológico simplificado del área de estudio (mapa a escala en: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/34816>) y mapa de anomalías de Bouguer de Rodríguez et al. (2015). LTC = Lineamiento Tacuarembó Chico; LL = Lineamiento Laureles

Sedimentología y estratigrafía de las unidades del SAG

Se describen a continuación, las principales características sedimentológicas y estratigráficas de las unidades constituyentes del SAG en el área de estudio.

Formación Tacuarembó: reúne a una sucesión de areniscas finas a muy finas, subordinadamente más gruesas, a veces con intraclastos de pelitas y areniscas, blancas a blanquecinas, a veces rojizas, esencialmente cuarzo-feldespáticas (subfeldespáticas), ocasionalmente cuarzosas. Se disponen intercalados lentes y estratos de pelitas arenosas ocre, rojizas y verdosas, de potencias variables, aunque oscilan entre 0.5 a 1.5 m (Figs. 9 y 10).

Las estratificaciones horizontales, subhorizontales y cruzadas, de pequeño a mediano porte, son las estructuras sedimentarias predominantes de la unidad. Suelen ocurrir que los términos pelíticos se suceden interlaminados a interestratificados con delgados estratos de areniscas finas y muy finas, donde la presencia de óndulas, estructuras de deformación, grietas de desecación, estructuras de escapes de fluido y bioturbación son relativamente comunes.

El máximo espesor de la Formación Tacuarembó no supera los 120 m y ocurre en el extremo norte del Dominio Norte. En promedio, la unidad posee espesores entre 90 a 100 m mientras que, hacia el Sur, la sucesión se adelgaza progresivamente hasta desaparecer bajo el subsuelo cubierta por basaltos, próximo al Lineamiento arroyo Malo.

Las mejores exposiciones de la unidad se encuentran en la ciudad de Tacuarembó y alrededores, particularmente, sobre las rutas 5, 26 y 30. También, algunos de los cerros testigo que caracterizan el paisaje del área exhiben diferentes secciones estratigráficas de la unidad.

Las relaciones estratigráficas de la Formación Tacuarembó son, en la base, de discordancia con las unidades pérmicas (formaciones Yaguarí y Buena Vista) y el basamento cristalino (Fig. 7). En la región infrabasáltica, la unidad muestra las mismas relaciones con la Formación Buena Vista y también se apoya directamente sobre las rocas sedimentarias de la Formación San Gregorio (e.g. pozos Quintana E-1 y E-2). Hacia el techo, sus relaciones estratigráficas con la Formación Rivera se expresan a través de una disconformidad (Mesa 2016, do Amarante et al. 2019), exhibiendo contactos netos horizontales a subhorizontales y otras veces a través de superficies suavemente onduladas. La Formación Tacuarembó muestra relaciones de discordancia con los basaltos de la Formación Arapey y las unidades sedimentarias cenozoicas.

Figura 9. Facies y asociaciones de facies representativas de la Formación Tacuarembó: a) sucesión fluvial donde se intercalan estratos de areniscas finas a medias con estratificación horizontal y cruzada acanalada, con cuerpos lentiformes (depósitos de canal y barras de canal) y estratos tabulariformes de areniscas finas y pelitas con laminación horizontal, algunas óndulas y bioturbación (depósitos de planicies) en los alrededores de la ciudad de Tacuarembó (597060;649301); b) areniscas finas a gruesas con estratificación cruzada y horizontal, con figuras

de canal e intraclastos, interpretados como depósitos fluviales de la base de la unidad presentes en el cerro Batovi Dorado (649922;6561355); c) figuras de canal relleno de areniscas finas a medias, ocasionales intraclastos, y areniscas con estratificación cruzada, depósitos fluviales de la ruta 26 km211; d) areniscas finas y pelitas arenosas, de tonalidades rojizas, con laminación horizontal, óndulas y niveles bioturbados, interpretados como depósitos de planicies de inundación fluvial; e y f) dunas eólicas de tipo barjanoide de areniscas finas y muy finas, blanquecinas, cuarzosas, con estratificación cruzada asociadas a la parte superior de la unidad (e – al este de Valle Edén, 582677;6476156)) y a la parte basal de la unidad (f) próximo a la localidad fosilífera de Cuchilla del Ombú (623422;6485215); g) barras arenosas fluviales intercaladas a estratos eólicos (sábanas de arena) de la Formación Tacuarembó en el camino de frontera entre Uruguay y Brasil, al Este de las ciudades de Santana do Livramento - Rivera; h) sucesión de estratos de areniscas muy finas a finas, blancas, con estratificación subhorizontal de largo trecho y estratos de areniscas finas a medias con estratificación cruzada acanalada interpretada como depósitos eólicos de sabana de arena asociados a pequeños canales fluviales ruta 27 próximo a la localidad de Tranqueras.

Figura 10. Algunos rasgos litológicos de detalle y estructuras sedimentarias representativas de la Formación Tacuarembó en los testigos del pozo Cerro Padilla (ver ubicación en Fig. 1): a. Estratificación horizontal y cruzada de bajo ángulo; b. nivel de paleosuelo con marcas de raíces; c. bioturbación.; d. intraclastos pelíticos; e. Estratificación cruzada; f. Grietas de desecación.

El Cuadro 4 resume las principales características sedimentológicas y estratigráficas de la Formación Tacuarembó.

Cuadro 4. Resumen de las principales características geológicas de la Formación Tacuarembó. La información sobre porcentajes de los elementos constituyentes de las areniscas y tipos de arcillas predominante se base en Aguirre et al. (2008).

Los depósitos que reúne la Formación Tacuarembó resultan de la actuación de procesos fluviales y eólicos. Se reconocen facies y asociaciones de facies depositadas en condiciones subacuáticas e interpretadas como canales efímeros, canales *braided* de carácter permanente, depósitos de flujos no encausados y el desarrollo de extensas planicies arenosas someras (do Amarante et al. 2019).

Los depósitos fluviales se interestratifican con depósitos eólicos a lo largo de todo el desarrollo de la unidad, mayoritariamente dunas y sábanas de arena, reconociéndose también la existencia de depósitos de interduna. Las paleocorrientes fluviales medidas en estratos

cruzados, así como la disposición de los ejes de canal muestran direcciones de flujo el WSW, mientras que las eólicas indican vientos en la dirección NE – NNE.

La Formación Tacuarembó se asigna al Jurásico Tardío por su contenido fosilífero (Cuadro 5) en moluscos, conchostrácos, peces, tortugas, cocodrilos, dinosaurios y pterosaurios (Shen et al. 2004, Perea et al. 2001, 2009, Soto et al. 2020a, 2020b, 2021). Según Soto (2016), la ictiofauna comparte varias especies con unidades del Jurásico Tardío - Cretácico medio de Brasil y el norte de África, mientras que la herpetofauna muestra similitudes con el registro fosilíferos del Jurásico Tardío de Estados Unidos, Europa occidental y Tanzania. La edad más probable de los horizontes portadores es Kimmeridgiano-Tithoniano (Soto et al., 2020a, 2020b, 2021), intervalo que es considerado aquí la edad de la formación.

Cuadro 5. Principales fósiles y asignación temporal de las unidades componentes del SAG (fuente; Perea et al. 2009, Janasi et al. 2011, Francischini et al. 2015, Soto et al. 2020a, 2020b, 2021).

Los depósitos de la Formación Tacuarembó revelan la existencia de un ambiente de tipo desértico, pero donde la presencia de agua en las planicies arenosas distales, la preservación de depósitos eólicos (ámbitos de interduna) debió ser lo suficientemente permanente como para permitir el desarrollo de una significativa fauna acuícola que favoreció el desarrollo de organismos de tamaño considerable.

La Formación Tacuarembó como aquí definida se correlaciona con la Formación Guará de Brasil tal como propuesto por Lavina y Scherer (2006), Perea et al. (2009) y do Reis et al. (2020). Al igual que la Formación Tacuarembó, la edad de la Formación Guará es considerada también Kimmeridgiano-Tithoniano por Francischini et al. (2015).

Formación Rivera: reúne areniscas finas a medias, marrones a rojizas, cuarzo-feldespáticas a cuarzosas, con estratificación cruzada de gran porte y alto ángulo como característica distintiva de la unidad (Fig. 11). Es notable la marcada bimodalidad del tamaño de los granos que componen la arenisca. Es relativamente común observar gradación inversa intraláminas de los estratos cruzados, así como óndulas que retrabajan sus caras frontales. Suelen aparecer niveles métricos de la unidad fuertemente silicificados, mientras que la superficie de

los granos está recubierta por parches de óxido de hierro y otras veces por arcillas. Las características generales de la unidad se sintetizan en el Cuadro 6.

Figura 11.- Formación Rivera: a) estratificación cruzada de gran porte y alto ángulo como rasgo distintivo de la unidad en la “Subida de Pena” ruta 30; b), c) y d) areniscas con estratificación cruzada en la ciudad de Rivera; e) cantera de areniscas silicificadas que se explotan para ladrillos y material de revestimiento aprovechando la laminación de las dunas eólicas al suroeste de la ciudad de Rivera; f) detalle de la laminación observada en corte perpendicular a la cara frontal de duna, con desarrollo de pequeñas óndulas y láminas con gradación inversa; g) y h) Formación Arapey, estratos de areniscas silicificadas, con estratificación cruzada, que se intercalan a los basaltos hacia la base de la unidad (areniscas de *intertrapp*).

Cuadro 6. Resumen de las principales características de la Formación Rivera en cada uno de los dominios morfoestructurales definidos en el área de afloramiento. La información sobre porcentajes de los elementos constituyentes de las areniscas y tipos de arcillas predominantes según Aguirre et al. (2007).

Muy ocasionalmente, en la base de algunos estratos de la unidad pueden aparecer niveles centimétricos con clastos arenosos gruesos a gravillosos y/o intraclastos (Mesa 2016, do Amarante et al. 2019) así como en otros, delgados niveles pelíticos arenosos masivos a muy finamente laminados.

El área tipo de la unidad es la ciudad de Rivera y sus alrededores, donde alcanza la potencia máxima de 50 m tal como descrito originalmente por Ferrando et al. (1987), coincidiendo con lo observado por Lavina y Scherer (2006) en la ciudad vecina de Santana do Livramento. Los espesores de la Formación Rivera son significativamente menores en los dominios Central y Sur donde oscilan entre los pocos metros a 20 m.

Otras exposiciones naturales se encuentran asociadas a las rutas departamentales y caminos vecinales que cortan el frente de retroceso en forma perpendicular, por ejemplo, la “Subida de Pena” sobre la ruta 30 en el departamento de Rivera y, en el departamento de Tacuarembó, los “Paredones” de los alrededores de Pueblo Treinta y Tres y los afloramientos en el Campo Militar de Zaporá (camino de los Helechos).

La Formación Rivera se apoya sobre la Formación Tacuarembó, exhibiendo contactos netos horizontales a subhorizontales, a veces ondulado, aspecto que, sumado al contraste litológico,

denotan erosión del techo de la Formación Tacuarembó (Ferrando et al. 1987) y posibles cambios en áreas fuentes. Do Amarante et al. (2019) describen la presencia de niveles de cantos cuarzosos asociados a la base de la Formación Rivera, hacia el contacto con la Formación Tacuarembó. Su lindero estratigráfico superior está dado por la aparición del primer derrame basáltico (Bossi 1966), con contactos que pueden ser horizontales hasta suavemente ondulados y donde la lava puede incluso copiar la superficie de la paleoduna (PyT Consultora 2007).

Sus depósitos son interpretados como campos de dunas eólicas, de tipo barjanoide, acumuladas bajo condiciones climáticas cálidas y áridas (Ferrando *et al.* 1987, Veroslavsky y de Santa Ana 2004, do Amarante et al. 2019). Las paleocorrientes indican vientos predominantes y persistentes hacia el NE (PyT Consultora 2007, Perea et al. 2009, do Amarante et al. 2019).

La Formación Rivera no aportó hasta el momento fósiles en territorio uruguayo. Por sus relaciones estratigráficas con la Formación Tacuarembó, así como las areniscas eólicas que se intercalan a los basaltos, incluidas estas en la Formación Arapey (Bossi 1966), se le asigna a esta unidad una edad Cretácico Temprano. Cabe señalar que la edad del magmatismo basáltico se ubica entre 133 a 129 Ma (Féraud et al. 1999). Se correlaciona con la Formación Botucatu en Brasil (Ferrando et al. 1987, Lavina y Scherer 2006, Perea et al. 2009).

Perfiles seleccionados: trece perfiles (Figs. 12 y 13) exponen las relaciones estratigráficas de las formaciones Tacuarembó y Rivera en el área de estudio, así como muestran sus espesores, facies y asociaciones de facies más típicas reconocidas para estas unidades.

Las facies y asociaciones de facies de la Formación Tacuarembó corresponden a la actuación de procesos fluviales y eólicos, cuyos depósitos aparecen interestratificados recurrentemente. Los primeros corresponden a sistemas fluviales efímeros y permanentes, de tipo *braided* arenoso, donde estratificaciones cruzadas correspondientes a barras de canal y ejes de canal muestran paleocorrientes hacia el suroeste y sur. Sólo se observa una mayor dispersión de

las paleocorrientes hacia la base de la unidad en la región próxima a la frontera con Brasil (perfiles 13, 14 y 15 en Fig. 13).

Los depósitos eólicos de la Formación Tacuarembó, fundamentalmente representados por dunas de mediano porte y sábanas de arena, subordinadamente de interduna, cubren en estratos no muy potentes las facies de canal y de planicie fluvial. En estas últimas, se observan muchas veces una marcada bioturbación, pequeñas óndulas, estructuras de deformación, grietas de desecación, y subordinadamente, de escape de agua.

Figura 12. Conjunto de perfiles del área de afloramiento del Sistema Acuífero Guaraní. La ubicación geográfica de cada perfil se incluyó en la Fig. 7 y la nomenclatura de las facies y su interpretación genética en la Tabla 3. Los perfiles 1, 2 y 5 corresponden a los realizados por PyT Consultora (2007) con modificaciones.

Figura 13.- Perfiles del área de afloramiento del Sistema Acuífero Guaraní (ver ubicación en Fig. 7). Los perfiles 13 y 14 corresponden a PyT Consultora (2007) con modificaciones.

Configuración geológica del subsuelo: a partir de los pozos profundos seleccionados (Cuadro 2), los trabajos de cartografía geológica, análisis estratigráfico y estructural se realizaron cinco cortes geológicos que muestran la configuración, distribución espacial y relaciones estratigráficas de las unidades constituyentes del SAG, así como su afectación por los principales rasgos estructurales del área (Figs. 14, 15 y 16).

Figura 14.- Cortes geológicos del área de afloramiento de las unidades constituyentes del SAG en la dirección N-S que exhiben los principales rasgos estratigráficos y estructurales de la región central de la Cuenca Norte. Se observa la distribución espacial del SAG y su afectación menor por las estructuras NW. Ubicación de los cortes también referidos en la Fig. 7.

Figura 15.- Cortes geológicos de dirección W-E que muestran la configuración estratigráfica y estructural de cada uno de los tres dominios. La afectación estructural del SAG por fallas NE y N-S asociadas al área de desarrollo del frente de la escarpa basáltica, que, a pesar de tener en algunos casos rechazos que superan los 100 m, no logran una compartimentación total del acuífero. Ubicación de los cortes también referidos en la Fig. 7.

Figura 16.- Corte geológico del área basáltica en el Dominio Central, al Oeste de la Cuchilla de Haedo, en el cual se la reactivación recurrente de fallas NW durante el Cretácico Inferior y luego de la salida de los basaltos, afectando parcialmente la distribución y espesores del SAG. Referencias: cB = cerro Bonito; cV= cerro de la Virgen (magmatismo alcalino paleoceno). Ubicación del corte en Fig. 7.

El corte geológico regional subparalelo al rumbo de los estratos, con dirección NE y NNE (Fig. 14) muestra la continuidad física de las unidades constituyentes del SAG a través de más de

150 km de extensión, donde la afectación por las fallas NW es de muy escasa significación vertical, así como su continuidad al sur se ve interrumpida bajo los basaltos por la falla Arroyo Malo. En el extremo norte, donde tiene significativa expresión la Formación Rivera, el SAG alcanza los 140 - 160 m de espesor (≥ 120 m Tacuarembó y ~ 50 m Rivera) para, progresivamente, ir adelgazándose hacia el sur donde, en la ciudad de Tacuarembó posee 100 m de espesor y, algo más al sur en la localidad de Los Cuadrados, registra 65 m.

Los tres cortes geológicos de dirección E-W muestran un aumento del espesor del SAG hacia el oeste y, con diferente magnitud en los dominios Sur y Norte, el SAG es afectado por fallamientos verticales y subverticales de dirección NE, y NNE. Estas fallas NE a NNE, están asociadas al borde oriental de la cuesta basáltica y controlan a su vez el frente de retroceso por erosión. En todos los casos analizados, los rechazos de falla exhiben desplazamientos de varias decenas de metros sin lograr superar, en ninguno de los tres dominios, el espesor total del SAG. Por lo tanto, la afectación de la continuidad de las areniscas del SAG es parcial por lo que no logra una compartimentación geológica. Esto no descarta la posibilidad que fallas con desplazamientos significativos puedan implicar, localmente, una significativa reducción de la circulación hidrogeológica. Como ejemplo, en el extremo norte del SAG y próximo a la frontera con Brasil, el acuífero posee 150 - 160 m de espesor y los pozos de agua profundos que se disponen a ambos lados de una falla NE revelan un rechazo vertical de 110 a 120 m pero sin una afectación en la circulación del agua del SAG.

DISCUSIÓN

Las formaciones Tacuarembó y Rivera, unidades que componen el SAG en el área de estudio, constituyen una sucesión sedimentaria siliciclástica, de relativa homogeneidad, esencialmente arenosa, que aflora en una franja con rumbo general NE a NNE en la región central de la Cuenca Norte. Esta sucesión posee en el área aflorante un espesor promedio de 100 m, formando parte de una estructura homoclinal, levemente basculada hacia el Oeste, que se apoya en discordancia sobre rocas paleozoicas y precámbricas, y siendo afectada por fracturas de orientación NE y NW, y subordinadas NNE y E-W.

Los relevamientos geológicos permitieron constatar que las formaciones Tacuarembó y Rivera están separadas por una discontinuidad estratigráfica, tal como propuesto por Mesa (2016) y do Amarante et al. (2019), la que representa un hiato, en la acepción de un intervalo de tiempo sin depósito o sin depósito con erosión (Bates y Jackson, 1987). Cabe señalar que estas relaciones estratigráficas fueron sugeridas por Ferrando et al. (1987) como argumento para la definición de la Formación Rivera y, por lo tanto, abandonar la separación en miembros de la Formación Tacuarembó de Bossi et al. (1975).

La Formación Tacuarembó constituye una secuencia depositacional neojurásica limitada, por techo y base, por discontinuidades de jerarquías estratigráficas diferentes. Hacia la base, se apoya sobre la Formación Buena Vista sobre una superficie de discordancia labrada durante el Triásico y parte del Jurásico. Hacia el tope, está limitada por la superficie suavemente erosiva que pone en contacto a la unidad con las areniscas de la Formación Rivera y, otras veces, directamente con los basaltos de la Formación Arapey.

Los trabajos paleontológicos, particularmente aquellos que señalan la presencia conjunta de *Ceratosaurus* y pterosaurios "Gnathosaurini" (*vide*, Soto et al. 2020a, 2021) y las relaciones estratigráficas con las unidades suprayacentes permiten asignar a esta unidad en el Jurásico Superior.

Los depósitos de la Formación Tacuarembó corresponden a la interacción eólica-fluvial, que se verifica por la interestratificación de estos estratos, de pequeño a mediano porte (orden métrico), tal como propuesto en las contribuciones más recientes. Esta unidad resulta de la sobreimposición de depósitos fluviales de ríos entrelazados y efímeros, con amplias planicies arenosas asociadas, donde recurrentemente se intercalan depósitos eólicos (Mesa 2016, do Amarante et al. 2019). Las facies fluviales observadas distinguen a depósitos de canal y planicies intercanales arenosas sumados al desarrollo de planicies distales, de composición areno-pelíticas. Las facies eólicas de la Formación Tacuarembó son mayoritariamente depósitos de sábanas de arena y dunas de mediano porte (do Amarante et al. 2019) resultando, subordinados, los depósitos de interdunas húmedas (Mesa 2016). Un ejemplo de estos últimos son los que se asocian a las pisadas de dinosaurios de la localidad de Cuchilla del Ombú (Mesa 2016).

Se verifica la tendencia granodecreciente de la Formación Tacuarembó de Norte a Sur, a lo que se suma también una mayor presencia de estratos métricos de pelitas y pelitas arenosas intercaladas a los términos arenosos en los dominios Centro y Sur del área de afloramiento. Esta tendencia observada en perfiles, paleocorrientes y asociaciones de facies coinciden con la interpretación de los sistemas fluviales distributivos con un nivel de base hacia el sur y suroeste (do Amarante et al. 2019), consistente con lo que se describe para la Formación Guará en territorio brasileño (Reis et al. 2019). Esto puede explicar, en parte, el diferente comportamiento hidrogeológico en el área de afloramiento del SAG en los dominios Sur y Central cuando se compara con el Dominio Norte, por ejemplo, en el rendimiento de los caudales de las perforaciones (ANII 2022).

La Formación Tacuarembó exhibe potencias medias entre 80 – 100m a lo largo del área de afloramiento, alcanzando en el extremo del Dominio Norte, en la ciudad de Rivera y áreas adyacentes, espesores máximos de ~140 m. Si se analiza el espesor de la Formación Tacuarembó hacia el Sur, el mismo muestra un suave adelgazamiento donde, por ejemplo, en la ciudad de Tacuarembó alcanza 90 m de espesor (Cuadro 2), valor muy superior al descrito por de Santa Ana (2004). En el Dominio Sur, al Sur del Lineamiento Tacuarembó Chico, se adelgaza hasta los 60 m en el pozo Los Cuadrados. El límite sur de la Formación Tacuarembó está asociado a un *trends* de fallas NW que se expresa en el Lineamiento Arroyo Malo y encuentra continuidad en las fallas regionales Arerunguá – Arapey Grande descritas por Marmisolle et al. (2016). En definitiva, ese lineamiento controla el límite del SAG y coincide con el propuesto por LEBAC (2008) y Techera et al. (2017). Cabe señalar que pequeños asomos de las areniscas de la Formación Tacuarembó aún ocurren próximo a la margen derecha del arroyo Malo, afectadas por fallas subverticales (Benvenuto, 2016).

En el área de estudio, los espesores que alcanza la Formación Rivera han merecido disímiles valores. En algunos casos, superando los 50 m (SNC-Lavalin 2008, Collazo et al. 2022). Se sostiene aquí que los espesores máximos de esta unidad sólo alcanzan 50 m en la propia ciudad homónima y la ciudad vecina de Santana do Livramento tal como propuesto por Ferrando et al. (1987) y Scherer y Lavina (2006), respectivamente. Asimismo, los trabajos de cartografía geológica demostraron que sólo en el Dominio Norte, al norte del arroyo

Curticeiras, la Formación Rivera muestra una continuidad física expresiva. En el resto del área de estudio, los espesores no sólo son muy inferiores (~10 m o menos) si no que la unidad se distribuye en forma saltuaria. Se expresa como pequeños relictos, comúnmente silicificados, que coronan algunas elevaciones resistentes a la erosión u, otras veces, protegidos por basaltos. Asimismo, se verificó que muchas de las areniscas cartografiadas en los antecedentes como asomos del SAG entre basaltos, en realidad corresponden a areniscas de *intertrapp* y, por lo tanto, forman parte de la Formación Arapey. Este aspecto tiene una fuerte implicancia en los aspectos hidrogeológicos de esas áreas.

Los principales rasgos morfoestructurales de la Cuenca Norte, y que se reflejan con nitidez en el área de estudio, se disponen fundamentalmente a través de dos direcciones preferenciales orientadas NNE-SSW y NW-SE y de modo subordinado en direcciones E-W y N-S. Estos se expresan frecuentemente a través de grandes lineamientos coincidentes con la ubicación de anomalías magnéticas y gravimétricas vinculadas con antiguas estructuras de debilidad del basamento, tales como zonas de cizallas y grandes fracturas (de Santa Ana et al. 2006, Veroslavsky et al. 2021). La integración de datos de subsuelo provistos por pozos, relevamientos sísmicos, gravimétricos y magnetoteléuricos demuestra que, buena parte de esos lineamientos NW y NNE, constituyen fallamientos de carácter regional que se reconocen en la Cuenca Norte, así como también en extensas áreas de la Cuenca de Paraná, la mayoría de estos reactivados durante el Paleozoico y Mesozoico (Fúlfaro et al. 1982, Zalán et al. 1990, Rostirolla et al., 2000).

La reactivación recurrente de esas discontinuidades corticales heredadas del basamento precámbrico jugó un rol importante en la evolución tectónica, sedimentaria y magmática de la cuenca (de Santa Ana et al. 2006). La incidencia de estos rasgos en la configuración y distribución del SAG en el área de estudio fueron reconocidas en los cortes geológicos. Los resultados presentados muestran que también las direcciones NNE y N-S tuvieron control sobre la deformación de las unidades mesozoicas en la región central de la Cuenca Norte. En particular, en el Dominio Central, importantes fracturas de dirección casi E-W afectaron a los basaltos que coronan las mesetas estructurales limitadas por lineamientos NW.

Asimismo, los lineamientos NW (Malo, Tacuarembó Chico, Tres Cruces, Bañado Medina, Laureles, Lunarejo, Curticeiras, entre otros) se expresan en el área de estudio como importantes rasgos morfoestructurales que controlan el drenaje de los principales cursos de agua que tienen como nivel de base al río Tacuarembó. Estos lineamientos responden a grandes fracturas y, en otros casos, a fallas que poseen escasos desplazamientos. Los lineamientos NW en la Cuenca Norte se asocian a la actuación de esfuerzos compresivos de intraplaca que provocaron el levantamiento tectónico de áreas del basamento hacia finales del Pérmico Tardío - Triásico como reflejo de la Orogenia Tardiherciniana en el borde Sur de Gondwana Occidental (Cobbold et al. 1986, Milani 1997, de Santa Ana et al. 2001). La deformación recurrente de las estructuras NW se verifica en la deformación de las rocas paleozoicas y mesozoicas de esta región de la cuenca, controlando el desarrollo de pequeños altos internos y suaves alabeos del relleno sedimentario. El levantamiento del Alto de Rivera, que controla el límite norte del Dominio Central (fallas de Laureles y Lunarejo), es reflejo de esa tectónica finipérmica (de Santa Ana et al. 2006) y puede asociarse a la reactivación de las otras estructuras NW de menor significación en el área. Las direcciones NW también controlaron el emplazamiento de diques y filones capa relacionados al evento de desagregación de Gondwana durante el Cretácico Inferior (Milani 1997, de Santa Ana et al. 2006). Por último, las estructuras NW, asociadas a las direcciones de falla NE, fueron también activas durante el desarrollo un magmatismo alcalino paleoceno que se expresa como *plugs* y diques en el borde oriental de la cuesta basáltica (Muzio et al., 2022).

Los lineamientos NE, subordinadamente a NNE, corresponden a fallas normales a subverticales, que controlan la profundización de la cuenca hacia el Oeste (de Santa Ana et al 2006, Veroslavsky et al. 2021). Algunos autores consideran que estas direcciones NE se asocian a la reactivación de discontinuidades regionales generadas hacia finales del Ciclo Brasiliano y que, además, permitieron durante el Paleozoico tardío movimientos transcurrentes (Soares et al. 1996, Rostirolla et al. 2000, Holz et al. 2010). En el área de estudio, esas direcciones controlaron los fallamientos posbasálticos que poseen los dislocamientos más expresivos. En particular, las fallas NE a NNE que controlan el sistema de cuchillas donde los rechazos de falla NE, en la Cuchilla Negra, son del orden de 100 - 120

m, situación que no había sido descrita en trabajos antecedentes. Hacia la región este del Dominio Norte, también se verifica que fallas NE, con rechazos algo menores, afectaron a las unidades del SAG (e.g. control del arroyo Cuñapirú). Un último caso a considerar es la fuerte inflexión que sufre la Cuchilla de Haedo al Sur del Lineamiento Tacuarembó Chico, donde pasa a una dirección casi N-S. Esta situación probablemente sea reflejo de una importante discontinuidad del basamento, siendo posible además que refleje la disposición de la traza de la Zona de Cizalla de Sarandí del Yí propuesta por algunos autores (e.g. Bossi y Campal 1992).

CONCLUSIONES

El SAG a lo largo de su franja de afloramiento en los departamentos de Rivera y Tacuarembó, constituye una sucesión sedimentaria siliciclástica que ocupa 4864 km², de relativa homogeneidad litológica, esencialmente arenosa, que se dispone con rumbo general NE a NNE y exhibe un espesor promedio de 100 m.

Esta sucesión sedimentaria, constituida por las formaciones Tacuarembó y Rivera, forma parte de una estructura homoclinal basculada hacia el oeste, afectada principalmente por fallas NE y NW, subordinadamente NNE a N-S, que se apoya sobre registros sedimentarios paleozoicos que forman parte de la Cuenca Norte y rocas metamórficas precámbricas. Los elementos morfoestructurales de dirección NW permitieron subdividir el área de estudio en tres dominios: Norte, Central y Sur, donde cada uno de los cuales posee rasgos morfológicos, estratigráficos y estructurales distintivos.

La Formación Tacuarembó por su distribución espacial (continuidad y espesor) es la unidad de mayor significación acuífera del SAG en la franja de afloramiento. Esta unidad exhibe, de norte a sur, un suave adelgazamiento y una tendencia granodecreciente, así como la mayor ocurrencia de estratos métricos pelíticos intercalados a las areniscas vinculados al desarrollo de planicies fluviales distales. Esta situación paleogeográfica y paleoambiental condiciona aspectos hidrogeológicos del SAG como, por ejemplo, la disminución de los caudales que registran las perforaciones.

La contribución de las areniscas de la Formación Rivera como unidad acuífera sólo posee relevancia en el extremo norte del área de afloramiento (ciudad de Rivera y alrededores). Al sur del arroyo Curticeiras, la distribución de estas sólo ocurre en forma saltuaria, ocupando cotas topográficas elevadas y con espesores métricos (~ 10 m a menores). Todos esos aspectos le confieren a la Formación Rivera una muy baja contribución como unidad acuífera del SAG en el área de afloramiento.

Los lineamientos NW constituyen rasgos morfológicos que se expresan a través de fracturas (principalmente diaclasas), asociadas a reactivación de antiguas fallas que afectaron los registros paleozoicos y que ejercen el control del drenaje de los principales cursos de agua que atraviesan el área. Algunos de estos rasgos son fallas con escaso desplazamiento vertical en el área de afloramiento del SAG (fallas Tacuarembó Chico y Laureles) y las que en el dominio basáltico adyacente controlan el levantamiento del Dominio Central con respecto a los dominios adyacentes. Los rasgos morfoestructurales NW no comprometen la continuidad geológica de las areniscas que conforman el acuífero.

Los lineamientos NE se asocian principalmente a fallamientos verticales a subverticales que, en sectores muestran rechazos expresivos (~ 80 - 120 m) pero sin afectar la continuidad física del acuífero, al no superar los espesores máximos del SAG en esas regiones. Las fallas verticales NE, a las que se asocian algunas N-S, y hasta NNW, que muestran un mayor desplazamiento se distribuyen a lo largo de la región basáltica, íntimamente relacionadas al desarrollo de la Cuchilla Negra y la Cuchilla de Haedo. Otras fallas NE se reconocen en el área de afloramiento de las unidades del SAG, pero con rechazos menores (~ 40 – 50 m).

Otros rasgos estructurales expresivos, pero localizados, están controlados por direcciones N-S y hasta NNW, como los que controlan el desarrollo de la Cuchilla de Haedo al sur del Lineamiento Tacuarembó Chico o inclusive, algunos tramos rectilíneos del río Tacuarembó en los dominios Norte y Central. Estas situaciones están relacionadas a fallas que reflejan fuertes discontinuidades corticales, la que a su vez podría estar relacionada a la traza de la Zona de Cizalla de Sarandí del Yí cubierta por las rocas paleozoicas y mesozoicas de la Cuenca Norte

Agradecimientos

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por la financiación parcial de este trabajo efectuado en el marco del proyecto “Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní en áreas de recarga en Uruguay” (ANII_FMV_1_2019_1_155736). A los colegas Natalie Aubet, Lautaro Pochintesta y Nahuel Lamas quienes contribuyeron significativamente en la elaboración del mapa geológico del área de estudio. A los editores y árbitros anónimos que contribuyeron con sugerencias y comentarios a mejorar la calidad del trabajo.

REFERENCIAS

- Aguirre, C., Ferraresi, P., Ibáñez, S.P. y Rodríguez Schelotto, M.L. 2008. Síntesis – Muestras de Subsuelos y Afloramientos (LCV). Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sustentable del Sistema Acuífero Guaraní, 23 p., Buenos Aires.
- Andreis, R.R., Bossi, G.E. y Montardo, D.K. 1980. O Grupo Rosário do sul (Triássico) no Rio Grande do Sul. XXXI Congresso Brasileiro de Geologia, Anais 2: 659-673, Camboriú.
- ANNI, 2022. “Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní en áreas de recarga en Uruguay”. FMV_1_2019_1_155736. Fondo María Viñas, Agencia Nacional de Investigación e Innovación, 250 p., Montevideo.
- Araújo L.M. de, França A.B. y Potter P.E. 1995. Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai; Mapas hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó. Mapas. UFPR-Petrobras, Texto Explicativo, 16 p., Curitiba.
- Bates, R.L. y Jackson, J.A. 1987. Glossary of Geology. 3rd Ed. American Geological Institute, 788 p., Alexandria.
- Benvenuto A., 2016. Geología de la región centro-sur del Departamento Tacuarembó Cuenca, Norte. Trabajo final de grado, Licenciatura en Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, 100 p., Montevideo.
- Bossi, J. 1966. Geología del Uruguay. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República, 469 p., Montevideo.
- Bossi, J. y Campal, N. 1992. Magmatismo y tectónica transcurrente durante el Paleozoico Inferior en Uruguay. En: Gutiérrez Marco, J., Saavedra, J. y Rábano, I. (eds). Paleozoico Inferior de Iberoamérica: Universidad de Extremadura: 343-356, Mérida.
- Bossi, J. y Ferrando, L. 2001. Carta geológica del Uruguay, escala 1:500.000. Edición Geoeditores SRL (CD-ROM), Montevideo
- Bossi, J., Ferrando, L.A., Fernández, A., Elizalde, G., Morales, H., Ledesma, J., Carballo, E., Medina, E., Ford, I. y Montaña, J. 1975. Carta geológica del Uruguay, escala 1/1.000.000, Montevideo.

Carballo, M. y Medina, E. 1972. Informe preliminar de la carta geológica del Sector XXV, a escala 1:50.000. Programa Basalto, Cátedra de Geología, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, 9 p. (inédito), Montevideo.

CGMW-ASGMI. 2011. Comisión para el Mapa Geológico del Mundo (CGMW) y Asociación de Servicios Geológicos y Mineros Iberoamericanos (ASGMI). Mapa Geológico y de Recursos Minerales de América del Sur (SIG - América del Sur, 1:1 M), Hoja SH21 Concordia-Uruguiana-Arapey Asunción (Ar, Br, Uy). 1 mapa. Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino, Servicio Geológico de Brasil. Compañía de Pesquisa de Recursos Minerales y Dirección Nacional de Minería y Geología de Uruguay.

Collazo, P. 2006. Investigación hidrogeológica de acuífero guaraní en el área aflorante de los departamentos de Rivera y Tacuarembó. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédita), 146 p., Buenos Aires.

Collazo, P., Pamoukaghlhian, K. y Chiglino, L. 2022. Guaraní Aquifer System sedimentary petrography of outcropping formations and hydrogeologic implications. *Agrociencia* 26 (NE1): e506.

de Santa Ana H, Rossello E, Fulfaro V.J. y Veroslavsky, G. 2001. Evidencias de deformación compresiva permotriásica en la Cuenca Norte (Uruguay). XI Congreso Latinoamericano de Geología – III Congreso Uruguayo de Geología (CD-Rom), Montevideo.

de Santa Ana, H. y Veroslavsky, G. 2004. La tectosecuencia volcanosedimentaria de la Cuenca Norte de Uruguay. Edad Jurásico-Cretácico Temprano. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S. (eds.), *Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales – Mesozoico*. DIRAC, Facultad de Ciencias: 51-74, Montevideo.

de Santa Ana, H., Veroslavsky, G., Fulfaro, V. y Rossello, E.A. 2006. Evolución tectónica y sedimentaria del Carbonífero – Pérmico de la Cuenca Norte. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S. (eds.), *Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales - Paleozoico*. DIRAC, Facultad de Ciencias: 209-256, Montevideo.

DINAMIGE, 2009. Estimación de la extracción de agua subterránea: principales acuíferos de Uruguay. Informe de Hidrogeología – DINAMIGE, <http://www.miem.gub.uy>

do Amarante, F.B., Scherer, C.M.S, Goso, C.A., dos Reis, A.D., Mesa, C. y Soto, M. 2019. Fluvial-eolian deposits of the Tacuarembó formation (Norte Basin – Uruguay): depositional models and stratigraphic succession. *Journal of South American Earth Sciences* 90: 355-376.

Falconer, J.D. 1931. Memoria explicativa del mapa geológico de la región sedimentaria del Departamento de Cerro Largo (Formación Gondwana). *Boletín del Instituto de Geología y Perforaciones* 12: 1-22.

Falconer, J.D. 1937. La Formación Gondwana en el Nordeste del Uruguay con especial referencia a los terrenos eogondwánicos. *Instituto de Geología y Perforaciones* 23: 1-113.

Féraud, G.H., Martínez, M., Ures, C., Schipilov, A. y Bossi, J. 1999. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and geochemistry of the southern extension of Paraná traps in Uruguay. II Simposio Sudamericano de Geología Isotópica. *Actas*: 57–59, Córdoba.

Ferrando, L., Andreis, R.R. y Montaña, J.R. 1987. Estratigrafía del Triásico – Jurásico uruguayo en la Cuenca de Paraná. Atas do III Simposio Sul-Brasileiro de Geologia, v1: 373-378, Curitiba.

Francischini, H., Dentzien–Dias, P.C., Fernandes, M.A. y Schultz, C.L. 2015. Dinosaur ichnofauna of the Upper Jurassic/Lower Cretaceous of the Paraná Basin (Brazil and Uruguay). *Journal of South American Earth Sciences* 63: 180-190.

Fúlfaro, V.J., Saad, A.R., Santos M.V. y Vianna, R.B. 1982. Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira Geociências* 12 (4): 590-611.

Gastmans D., Veroslavsky G., Chang H.K., Caetano-Chang M. R. y Nogueira Pressinotti M. M. 2012. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. *Boletín Geológico y Minero* 123 (3): 249-265.

Gastmans, D., Veroslavsky, G., Santarosa, L., Manganelli, A., Samaniego, L. y Carrión, R. 2022. Áreas de afloramento e áreas de recarga do Sistema Aquífero Guarani são as mesmas? O paradigma do território uruguaio. XXII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Atas, 2022, São Paulo.

Holz, M., França, A.B., Souza, P.A., Iannuzzi, R. y Rohn, R. 2010. A stratigraphic chart of the late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America. *Journal of South American Earth Sciences* 29: 381–399.

Janasi, V.A., de Freitas, V.A. y Heaman, L.H. 2011. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: A precise U–Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó type dacite. *Earth Planetary Science Letters* 302: 147–153.

Lavina E., Faccini U.F. y Ribeiro H.J.P. 1993. A Formação Pirambóia (PermoTriássico) no Estado do Rio Grande do Sul. *Acta Geologica Leopoldensia* 16 (38): 179 - 197.

LEBAC. 2008. Informe Final de Hidrogeologia do Projeto Acuífero Guarani. Coord.: Gastmans D., Chang H.K. Equipe: Paula e Silva, F., Correa, S.F., Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro, 172 p. OEA, 2009. Acuífero Guarani: Programa Estratégico de Ações/ Acuífero Guaraní: Programa Estratégico de Acción - Edición español / portugués. Organización de Estados Americanos - OEA, Brasil, Argentina, Paraguay, Uruguay, 424 p., Montevideo.

Manganelli, A., Gastmans, D., Veroslavsky, G., Santarosa, L., Aubet, N.R., L. Samaniego, Carrión, R., Pochintesta, L., Arteaga, J. y Pedro, A. 2021. A review of regional groundwater flow model in Guarani Aquifer System outcrop region in Uruguay: consequences for integrated surface and groundwater management. 2021. SARM 2021 - International Conference on Transboundary Aquifers, 66, Paris.

Marmisolle, J., Veroslavsky, G. y de Santa Ana, H. 2016. Depocenters with Potential Preservation of Pre-carboniferous Rocks in Norte Basin (Uruguay). International Conference and Exhibition, 18–20, Barcelona.

Mesa V. 2016. Caracterización litofaciológica y análisis paleoambiental del Miembro Batoví de la Formación Tacuarembó (Jurásico Tardío – Cretácico Temprano) en los alrededores de la ciudad de Tacuarembó. Trabajo final de grado en Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de la República (inédita), 118 p., Montevideo.

- Miall, A.D. 1996. *The Geology of Fluvial Deposits Sedimentary Facies, Basin analysis, and Petroleum geology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 582 p., Berlin.
- Milani, E.J. 1997. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-ocidental*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (inérita), 225 p., Porto Alegre.
- Mira, A., Vives, L., Rodríguez, L. y Veroslavsky, G. 2018. Modelo hidrogeológico conceptual y numérico del Sistema Acuífero Guaraní (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay). *Geogaceta* 64: 67-70
- Montaña, J. 1992. *Carta geológica del Uruguay, a escala 1:100.00, Hoja H-13 Los Novillos*. Convenio Facultad de Agronomía, Facultad de Humanidades y Ciencias, Dirección Nacional de Minería y Geología, Montevideo.
- Montaño, J. 2004. Recursos hídricos subterráneos. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S. (eds.), *Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales - Paleozoico*. DIRAC - Facultad de Ciencias: 191-212, Montevideo.
- Muzio, R., Olivera, L., Fort, S. y Peel, E. 2022 Petrological features of the first Cenozoic alkaline magmatic event recorded in northwestern Uruguay, southern extreme of the Paraná basin. *Journal of South American Earth Sciences* 116(3): 103796.
- Pacheco, F. 2004. *Estudio hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní en la zona de Rivera y Santana do Livramento*. Trabajo Final, II Curso Internacional de Hidrología Subterránea, Universidad de Barcelona (inérito), 95 p., Barcelona.
- Panario, D. 1988. *Geomorfología del Uruguay: propuesta de un marco estructural y un esquema de evolución del modelado del relieve uruguayo*. Departamento Publicaciones. Facultad de Humanidades y Ciencias, Universidad de la República, 32 p., Montevideo.
- PEA, 2009. *Aquífero Guaraní: Programa Estratégico de Ações/Aquífero Guaraní: Plan Estratégico de Acción - Edición español / portugués*. Organización de Estados Americanos - OEA, Brasil, Argentina, Paraguay, Uruguay, 424 p.
- Perea, D., Soto, M., Veroslavsky, G, Martínez, S. y Ubilla, M. 2009. A Late Jurassic fossil assemblage in Gondwana: Biostratigraphy and correlations of the Tacuarembó Formation, Parana Basin, Uruguay. *Journal of South American Earth Sciences* 28: 168-179.
- Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W. y Rossi, P. 1985. *Carta geológica del Uruguay, 1:500.000*. Dirección Nacional de Minería y Geología, 90 p., Montevideo.
- Pochintesta, L. 2018. *Importancia del conocimiento del medio físico en el ordenamiento territorial: estudio de caso Ciudad de Tacuarembó y alrededores*. Trabajo final de grado en Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de la República (inérita), 164 p., Montevideo.
- P y T Consultora. 2007. *Informe Final de Relevamientos Geológicos, Relatorio Técnico, Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní*, 93 p., Buenos Aires.

Reis, A.D., Scherer, C.M.S., Amarante, F.B., Rossetti, M.M.M., Kifumbi, C., Souza, E.G., Ferronato, J.P.F. y Owen, A. 2019. Sedimentology of the proximal portion of a large-scale, Upper Jurassic fluvial-aeolian system in Paraná Basin, southwestern Gondwana. *Journal of South American Earth Sciences* 95: 102248.

Rodríguez, L., Gómez, A., Oleaga, A., Pacheco, F., Roullier, G., Seoane, N., Silva Busso, A. y Vives, L. 2008. Comportamiento del Sistema Acuífero Guaraní en la frontera uruguayo-brasilera. *Boletín Geológico y Minero* 119 (1): 161-170.

Rodríguez, P., Veroslavsky, G., Soto, M., Marmisolle, J., Gristo, P. y de Santa Ana, H. 2015. New integrated Bouguer gravity anomaly map inshore Uruguay: preliminary implications for the recognition of crustal domains. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*: 1515-1519, Tulsa.

Rostirolla, S.O., Assine, M.L., Fernandes, L.A. y Artur, P.C. 2000. Reativação de paleolineamentos durante a evolução da Bacia do Paraná – o exemplo do Alto Estrutural de Quatiguá. *Revista Brasileira de Geociências* 30 (4): 639-648.

Scherer, C.M.S. y Lavina, E.L. 2006. Stratigraphic evolution of a fluvial–eolian succession: the example of the upper Jurassic - lower cretaceous Guarú and Botucatu formations, Paraná Basin, southernmost Brazil. *Gondwana Research* 9 (4): 475-484.

Scherer C.M.S, Lavina E.L., dos Reis A. y Horn B.L. 2021. Estratigrafia da sucessão sedimentar mesozoica da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. En: Ritter, A., Jelinek, C. y Sommer, C.A. (eds.), *Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. Sociedade Brasileira de Geologia, Compasso Lugar-Cultura: 289-304, Porto Alegre.

Scherer, C. M.S, do Reis, A., Horn, B.L.D., Bertolini, G., Lavina, E.L.C., Kifumbi, C. y Goso, C. 2023. The stratigraphic puzzle of the permo-mesozoic southwestern Gondwana: The Paraná Basin record in geotectonic and palaeoclimatic context. *Earth-Science Reviews* 240: 104397.

SNC–Lavalin. 2008. Hidrogeología local del área piloto Rivera – Santana do Livramento. En: *Avances en el conocimiento del Sistema Acuífero Guaraní, Proyecto para la protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní*, T 3, 123 p., Montevideo.

Soares, P.C., Rostirolla, S.P., Ferreira, F.J.F. y Stevanato, R. 1996. O alto estrutural Pitanga-Quatiguá-Jacutinga na Bacia do Paraná: Uma estrutura litosférica. *39 Congresso Brasileiro Geologia, Anais* 5: 411-414, Salvador.

Soares, A.P., Soares, P.C., Holz, M. 2008. Correlações estratigráficas conflitantes no limite Permo-Triássico no Sul da Bacia do Paraná: o Contato entre duas seqüências e implicações na configuração espacial do Aqüífero Guaraní. *Revista Pesquisas em Geociências* 35 (2): 115-133.

Soto, M. 2014. Geología, geofísica y geoquímica de la región de Pepe Núñez, Cuenca Norte (Uruguay). Tesis de Maestría, PEDECIBA – Universidad de la República (inédita), 381 p., Montevideo.

Soto, M., Toriño, P. y Perea, D. 2020a. A large sized megalosaurid (Theropoda, Tetanurae) from the late Jurassic of Uruguay and Tanzania. *Journal of South American Earth Sciences* 98: 102458.

- Soto, M., Toriño, P. y Perea, D. 2020b. *Ceratosaurus* (Theropoda, Ceratosauria) teeth from the Tacuarembó Formation (Late Jurassic, Uruguay). *Journal of South American Earth Sciences* 103: 102781.
- Soto, M., Montenegro, F., Toriño, P., Mesa, V. y Perea, D. 2021. A new ctenochasmatid (Pterosauria, Pterodactyloidea) from the late Jurassic of Uruguay. *Journal of South American Earth Sciences* 111: 103472.
- Sprechmann, P., Bossi, J. y Da Silva, J. 1981. Cuencas del Jurásico y Cretácico del Uruguay. En: de Volkheimer, W. y Musacchio, E.A. (eds.), *Cuencas sedimentarias del Jurásico y Cretácico de América del Sur*. Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico 1: 239-270, Buenos Aires.
- Techera, J., Massa, E., Izquierdo, D. y Pérez, S. 2017. Mapa del Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay. Dirección Nacional de Minería y Geología, Montevideo, <http://www.dinamige.gub.uy>
- Tripaldi, A. 2022. Análisis sedimentológico de depósitos eólicos de valles intermontanos, su aplicación al estudio de secuencias terciarias del noroeste argentino. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 363 p., Buenos Aires.
- Tripaldi A. y Limarino C.O. 2008. Ambientes de interacción eólica-fluvial en valles intermontanos: ejemplos actuales y antiguos. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 15 (1): 43-66.
- Veroslavsky, G. y Manganeli, A. 2018. Zonificación del Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay: una guía orientativa para su gestión y protección ambiental. *Revista Aqua-LAC* 10 (2): 61-80.
- Veroslavsky, G., Rossello, E.A., López-Gamundí, O., de Santa Ana, H., Assine, M.L., Marmisolle, J. y Perinotto, A.J. 2021. Late Paleozoic tectono-sedimentary evolution of eastern Chaco-Paraná Basin (Uruguay, Brazil, Argentina and Paraguay). *Journal of South American Earth Sciences* 106: 102991.
- Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C.J., Marques, A., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Appi, V.T. y Zanotto, G.A., 1990. Bacia do Paraná. In: Raja-Gabaglia, G.P., Milani, E.J. (eds.) *Origem e Evolução das Bacias Sedimentares*. Cnpes-PETROBRAS: 135-168, Rio de Janeiro.

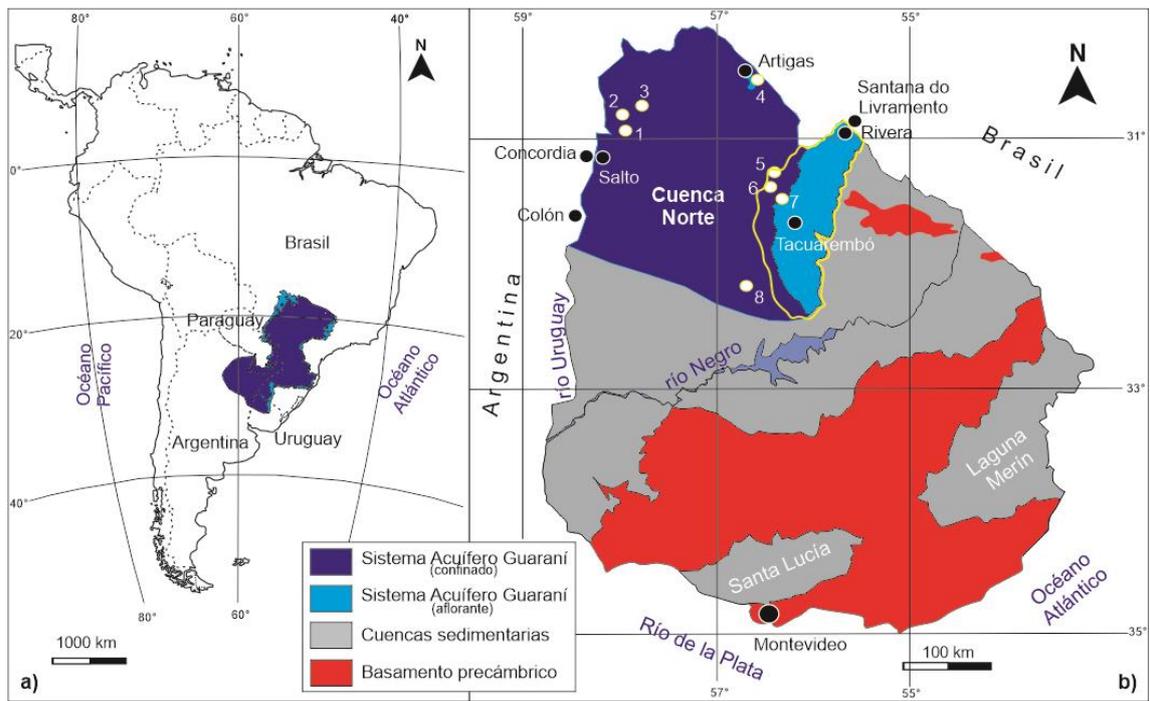


FIG. 1



Fig. 3



Fig. 4

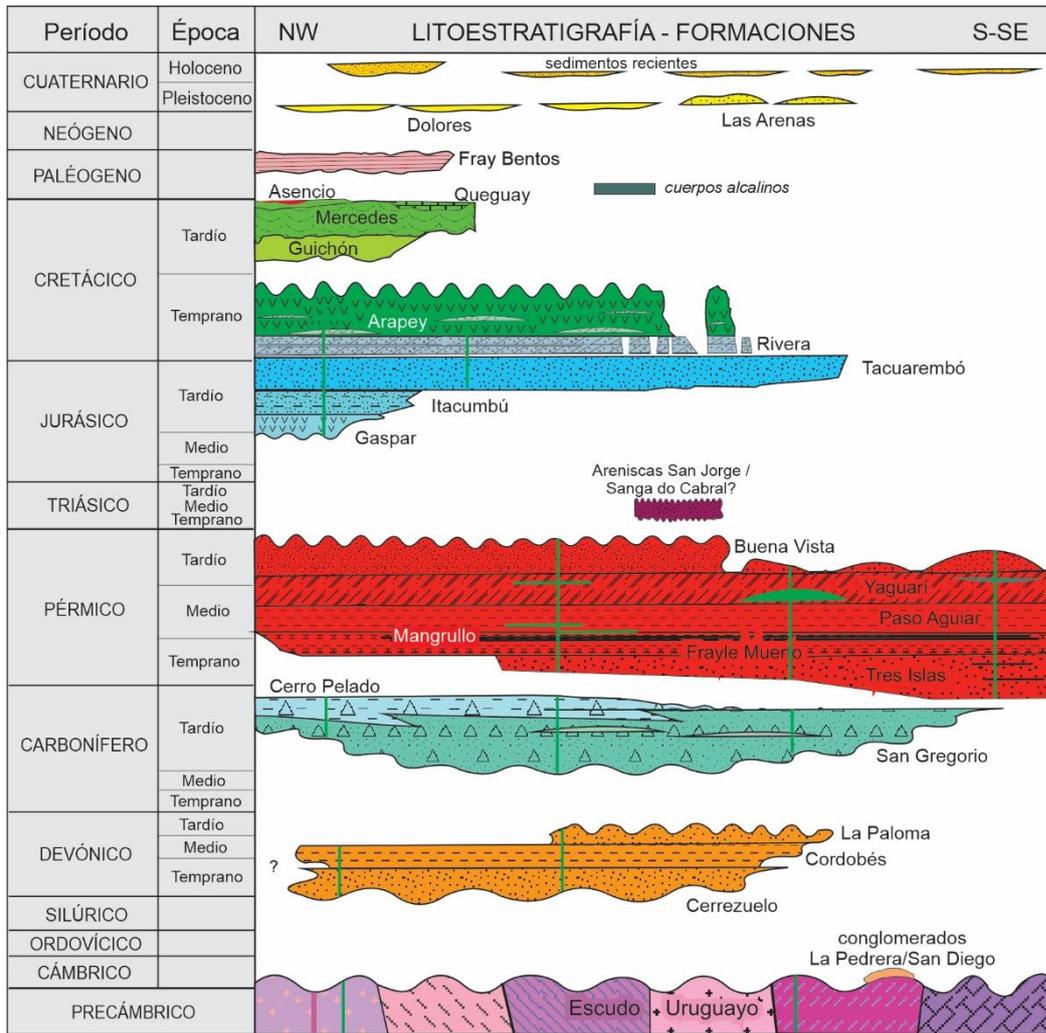


Fig. 5

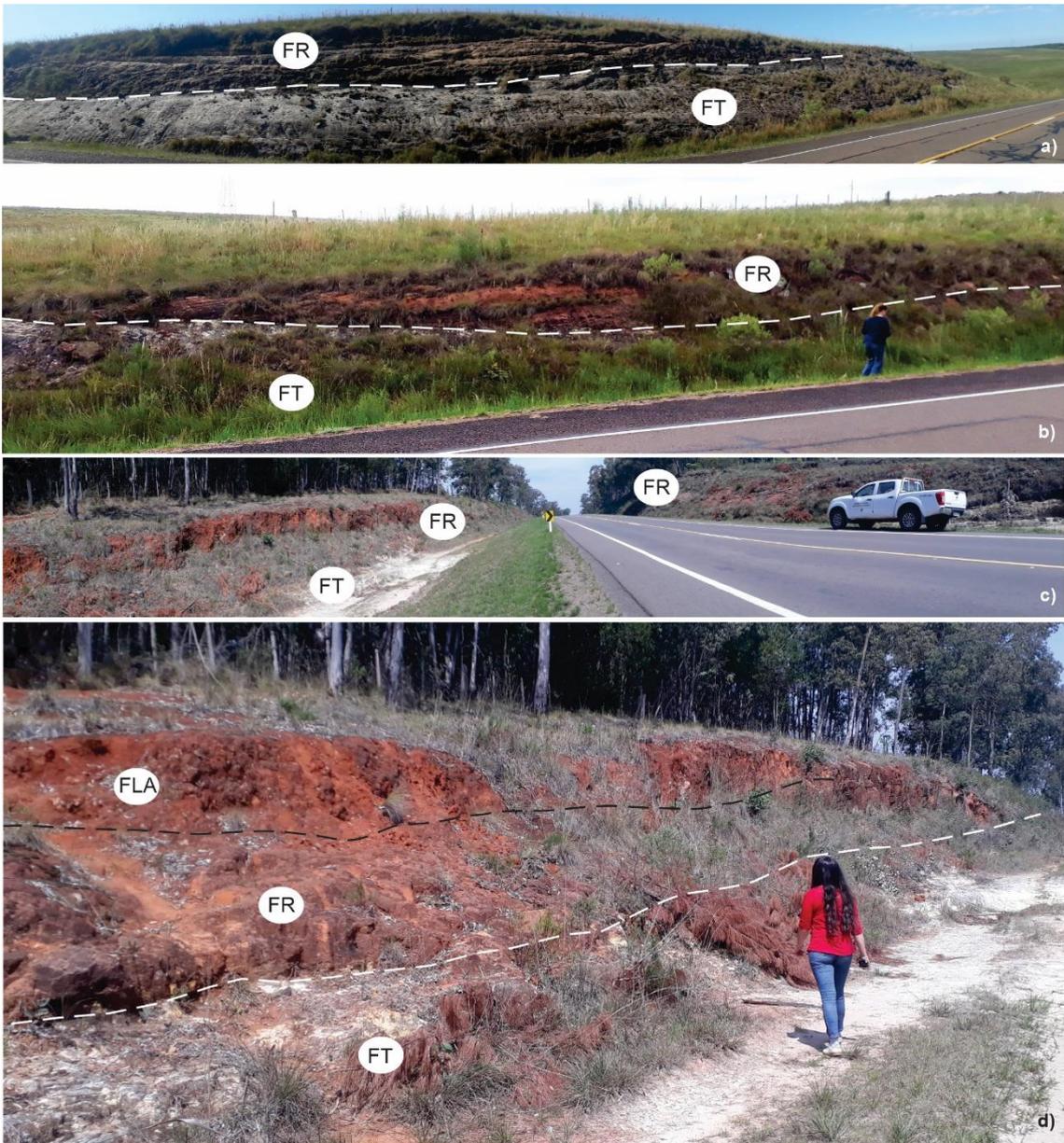


Fig. 6

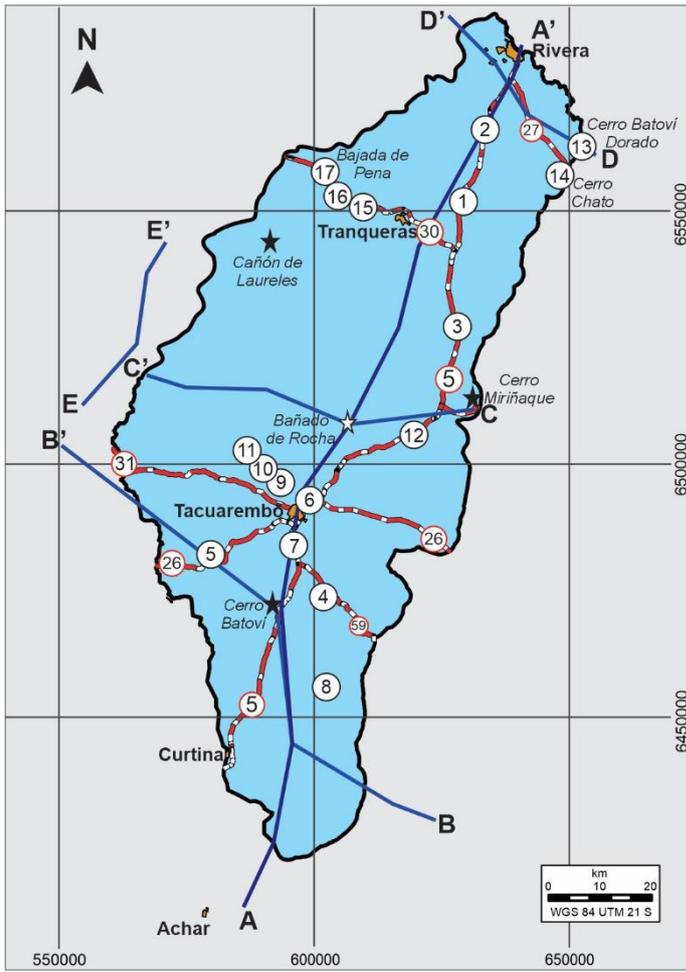


Fig. 7

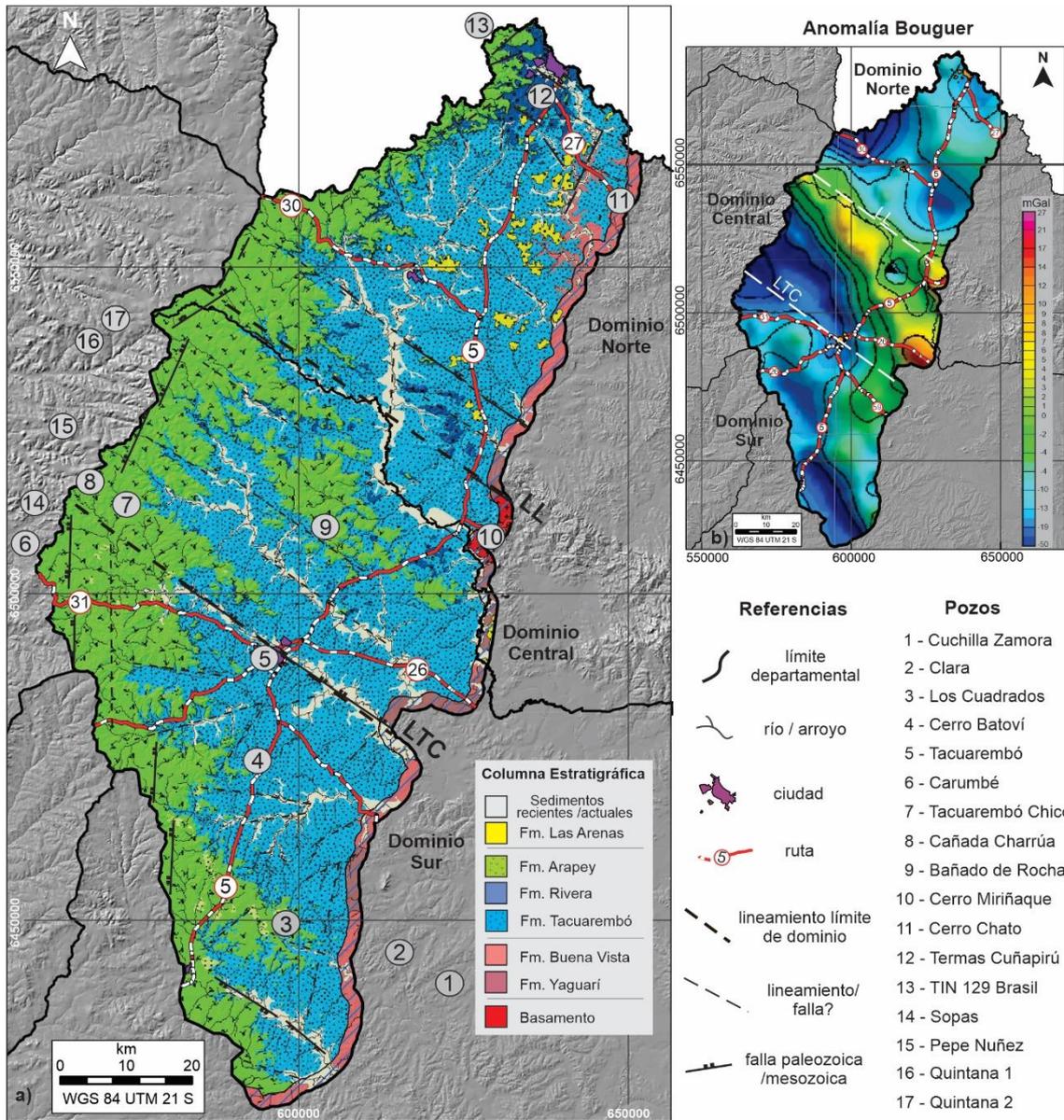


Fig. 8



Fig. 9

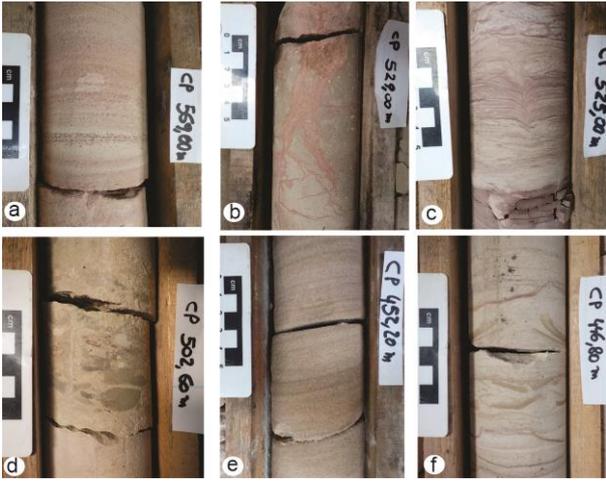


Fig. 10



Fig. 11

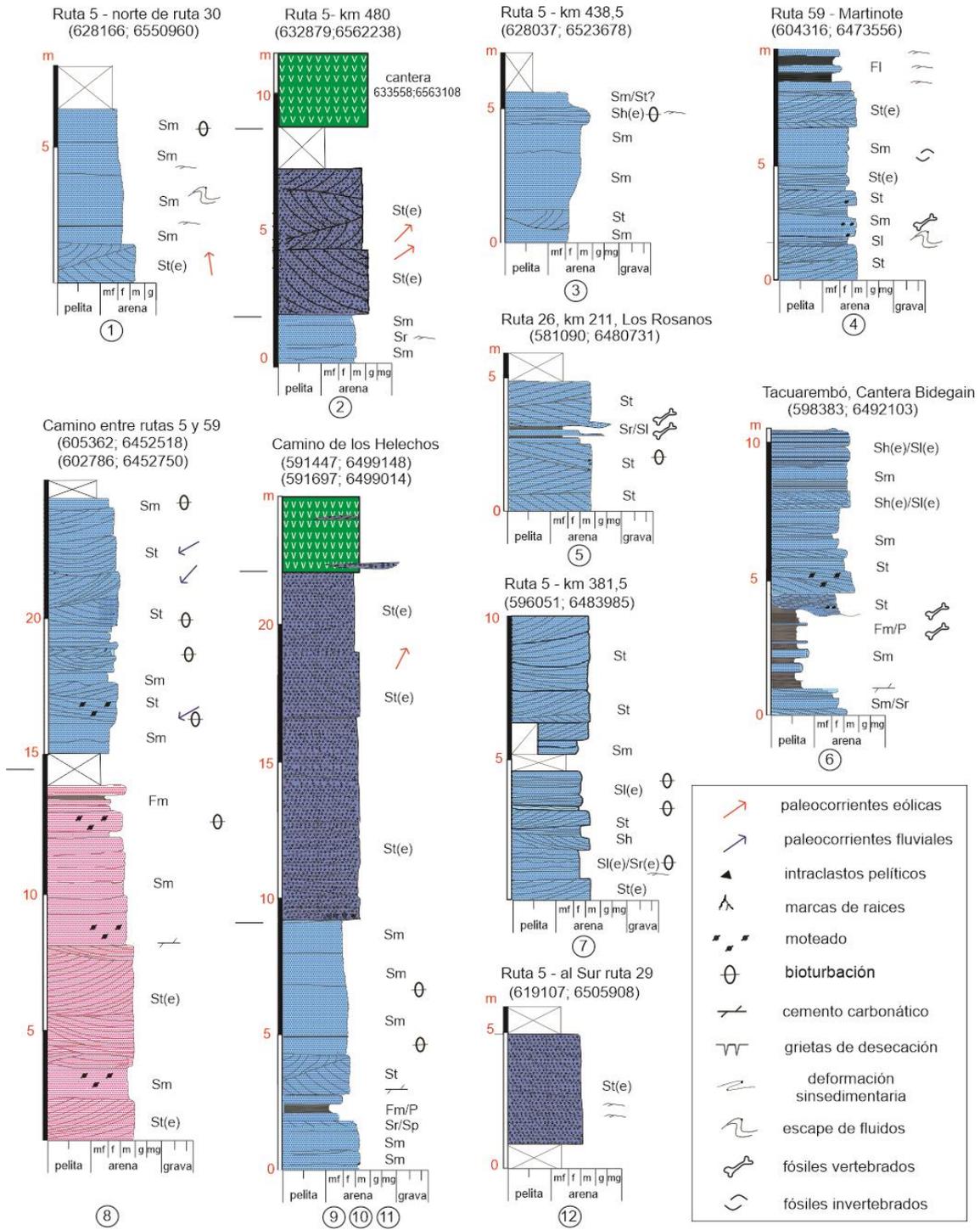


Fig. 12

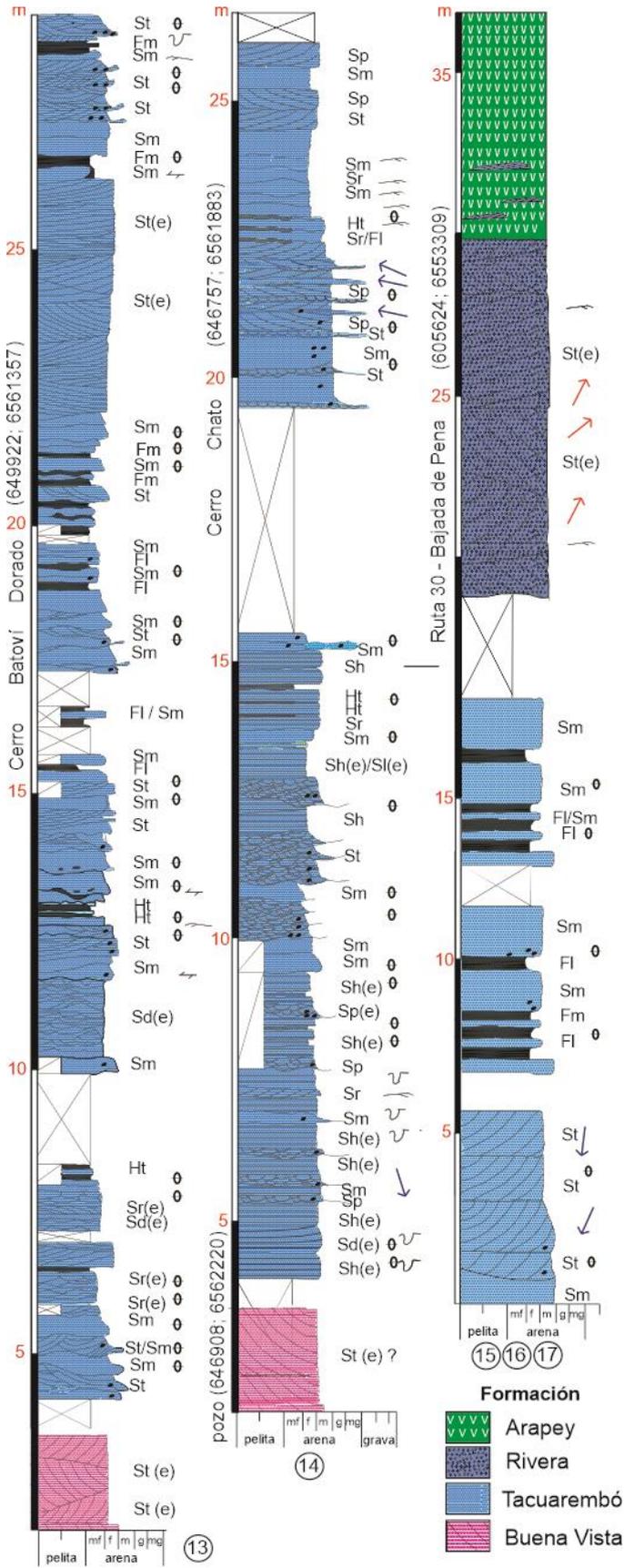


Fig. 13

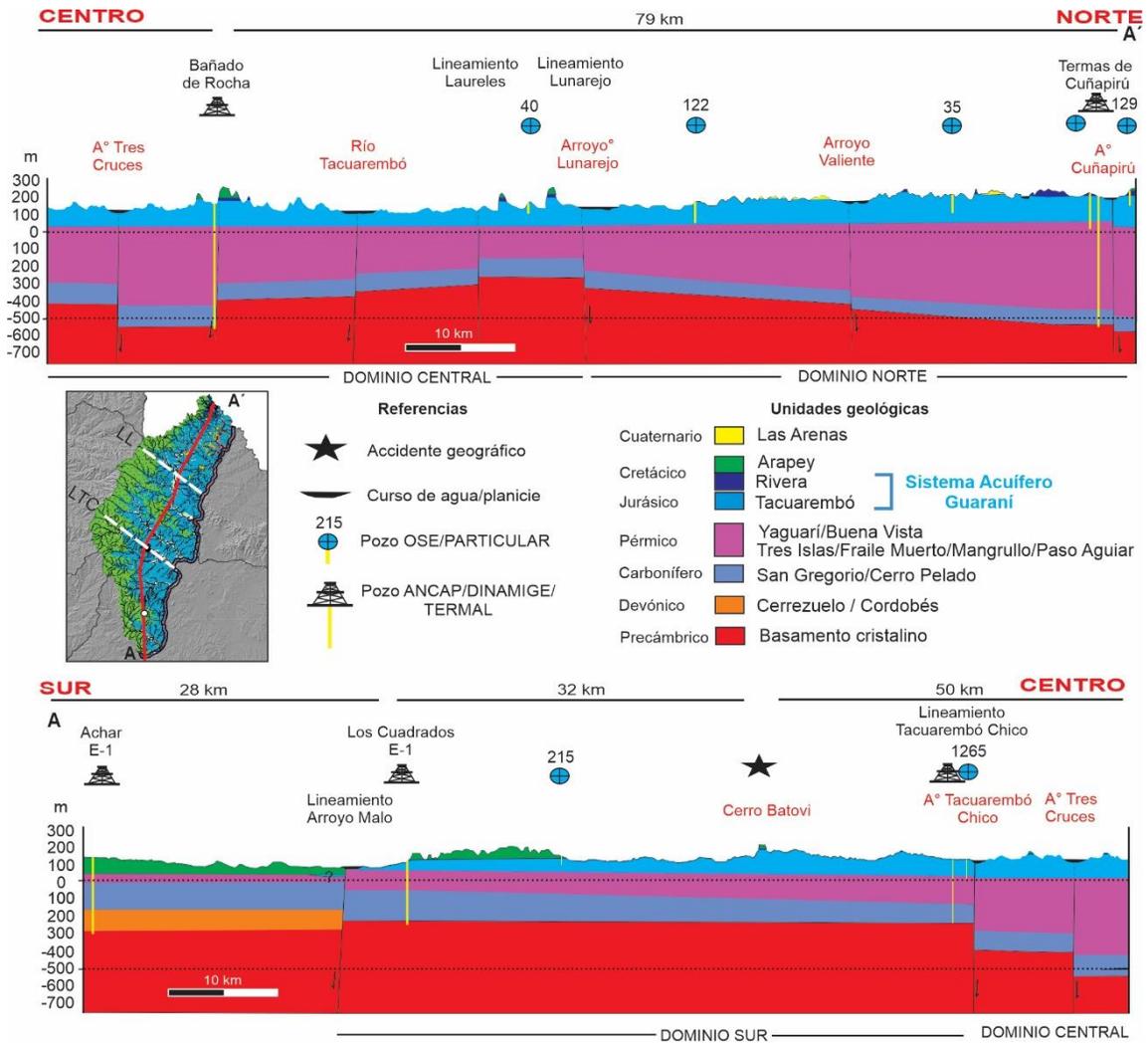


Fig. 14

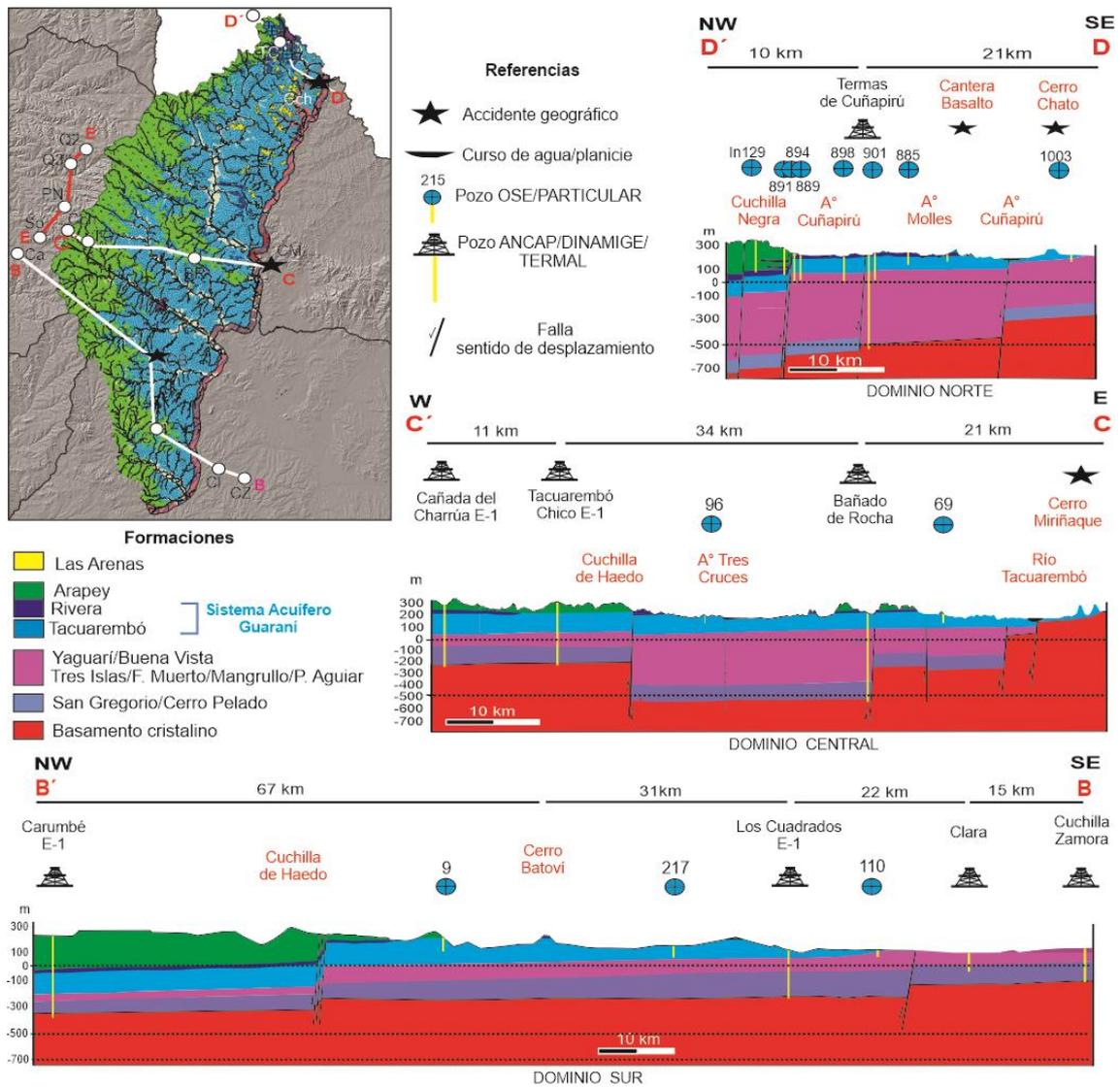


Fig. 15

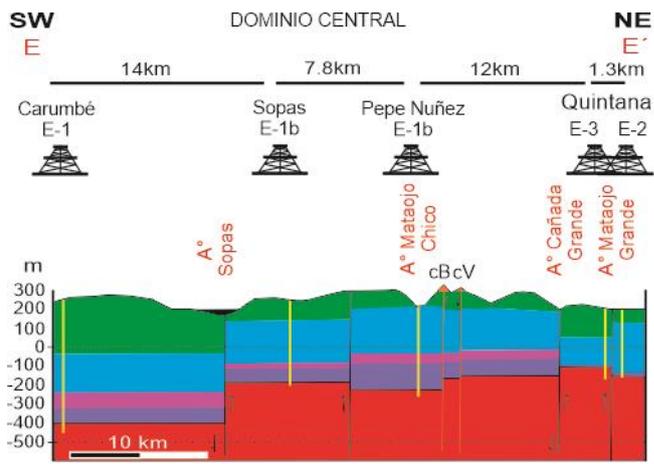


Fig. 16

Walther (1919) Falconer (1937) Caorsi y Goñi (1958)	Bossi (1966)	Carballo y Medina (1972) Bossi et al. (1975) Preciozzi et al. (1985)	Ferrando et al. (1987) Bossi y Ferrando (2001)	de Santa Ana y Veroslavsky (2004)	Perea et al. (2009) do Amarante et al. (2019)	Este trabajo		
Serra Geral	Arapey	Arapey	Arapey	Arapey	Arapey	Arapey		
Areniscas de Tacuarembó	Tacuarembó	Tacuarembó	<i>Superior</i>	Rivera	Tacuarembó	<i>Superior</i>	<i>Rivera</i>	Rivera
			<i>Inferior</i>	Tacuarembó		<i>Inferior</i>	<i>Batoví</i>	Tacuarembó
			Cuchilla Ombú					
Areniscas de Buena Vista	Yaguari	Yaguari	Buena Vista	Buena Vista	Buena Vista	Buena Vista		

Cuadro 1

Pozo	Coordenadas		Z (m)	Pre SAG	SAG		Pos SAG	Profundidad basamento
	x UTM	y UTM			Rivera	Tacuarembó		
Tacuarembó Chico E-1	574108	6511239	284	260	0	155	87	502
Sopas E-1	553384	6513205	217	134	0	225	108	468
Carumbé E-1	538762	6511419	230	131	8,5	179,5	276	595
Achar E-1	592655	6413054	150	330	0		100	430
Cañada del Charrúa E-1	563343	6514840	250	218.5		212	37.5	467.5
Cañada del Charrúa E-2	562258	6514104	296	216.5	54	204	41	515.5
Pepe Núñez E-1	557990	6519776	219	218	0	247	0	465
Quintana E - 1	556027	6529736	200	10.5		188.5	99	298
Quintana E - 2	555825	6531309	184	42.5	0	232	78.5	353
Tacuarembó 1 IGU	596696	6489724	135	215		90	0	350
Bañado de Rocha IGU	607998	6505352	177	567	0	129	0	696
Clara IGU	619011	6433869	105		0			NA
Termas de Cuñapirú	637685	6578604	200		SD	SD	0	730
Los Cuadrados	597459	6441128	135	290	0	60	0	350
Cuchilla Zamora IGU	632586	6427044	138	244	0	0		244
Reductora UTE 1301	594678	6491556	147	47	0	92		NA
Pol.Cam. Tacuarembó 1314	596247	6487806	155	35	0	89		NA
Tranqueras 705	617392	6548536		9	20	48		NA
OSE - Rivera 1226/1	640085	6579807	224		19	88		NA
OSE - P.G. Bretaña 891	632219	6584472					160	NA
OSE - P.G. Bretaña 894	633073	6583252		48		200	50	NA
OSE - P. G. Bretaña 889	633412	6583252			45	84	7	NA
Rivera 989	636152	6578309		69		135		NA
SIAGAS - Santana Br IN129	632182	6584472	330		42		154	NA
Tecnoagua 885	638992	6575849		8	26	48	6 (s)	NA
Tecnoagua 1003	648258	6561107		8		42		NA
OSE - Cerro Travieso	570952	6519653	334		3		119	NA

Cuadro 2

cf	Facies	Descripción	Interpretación
Sm	Areniscas masivas	Bancos tabulares de 0.2-1.5m compuestos por areniscas muy finas a medias, ocasionalmente gruesas, con moderada a buena selección, ocasionales estructuras de fluidización y/o bioturbación	Flujos de granos hiperconcentrados no cohesivos
Sl	Areniscas con laminación cruzada de bajo ángulo	Bancos tabulariformes a tabulares en espesores 0.2 – 4 m compuestos por areniscas finas a medias, de moderada a buena selección	Depósitos formados en los estadios de régimen de flujo intermedio,
Sh	Areniscas con laminación horizontal	Bancos tabulares horizontales, de espesores variables 0.1 – 1.3 m compuesto por areniscas finas a medias, laminación horizontal	Depósitos de alto régimen de flujo, flujo crítico, corrientes unidireccionales
St	Areniscas con estratificación cruzada en artesa	Bancos tabulares, de espesores variables (0.2 – 2.5m), compuestos por areniscas muy finas a medias, con ocasionales clastos de cuarzo e intraclastos pelíticos en la base de los sets.	Depósitos en respuesta a flujos de intermedio a bajo régimen, dunas de crestas sinuosas generadas por corrientes unidireccionales canalizadas
Sr	Areniscas con laminación ondulítica de corriente	Sets tabulares de pocos centímetros de espesor dispuestas formando parte de cosets métricos (2-4m), compuesta por areniscas muy finas a finas	Depósitos en condiciones de bajo régimen de flujo
Sp	Areniscas con estratificación cruzada planar	Se disponen en cuerpos tabulares, de espesores de orden métrico (0.2 – 1.5m), compuestos por areniscas muy finas a finas, moderada a buena selección	Flujos de intermedio a bajo régimen de flujo. Dunas transversales, óndulas de arena.
Sd (e)	Areniscas muy finas a finas con deformación	Se disponen en sucesiones arenosas de espesores centimétricos e intercalaciones de pelitas arenosas, con estructuras de adhesión y de escape de agua.	Depósitos de interduna húmeda y de sábanas de arena afectadas por fluidización
Fm	Pelitas macizas	Estratos de espesores centimétricos (5 – 60 cm) conformado por pelitas y pelitas arenosas, a veces con vestigios de bioturbación.	Depósitos de decantación subácuea, aspecto macizo probablemente debido a fluidización, bioturbación o floculación de arcillas
Fl	Pelitas a pelitas arenosas, con delgada laminación	Bancos tabulares de espesores centimétricos, entre 5 – 70 cm, compuesto por pelitas, limolitas y pelitas arenosas, finamente laminadas, a veces bioturbados.	Depósitos de flujos suspensivos en la etapa final de la inundación
Ht	Intercalaciones heterolíticas de areniscas muy finas a finas y pelitas, con laminaciones lenticulares a ondulantes	Sucesiones de areniscas y pelitas interlaminadas, en estratos desde pocos centímetros a 1.5 m, masivas, a veces con óndulas, comúnmente presentan estructuras de deformación y/o bioturbación	Depósitos asociados a las planicies de inundación fluviales, con la alternancia de procesos de decantación (suspensión) y tractivos en bajo régimen de flujo. Deformación asociada a sobrecarga o escape de fluidos
Sl(e)	Areniscas muy finas a medias con estratificación de bajo ángulo compuesta por laminación con gradación inversa	Se disponen en sucesiones arenosas finas a muy finas, tabulariformes, en bancos entre 10 a 60 cm, presentes en la Formación Tacuarembó.	Estratos generados por migración de óndulas eólicas bajo régimen subcrítico, a veces asociado a la base de dunas y otras veces constituyendo sábanas de arena
St (e)	Areniscas finas a medias con estratificación cruzada en artesa	Areniscas finas a medias, con estratificación cruzada en artesa de alto ángulo y gran porte, moderada a buena selección, clastos redondeados a subredondeados, con gradación inversa intralaminas y óndulas asociadas	Depósitos de dunas eólicas, con buen desarrollo de las caras frontales.
Sr (e)	Areniscas con laminación ondulítica con capas frontales preservadas	Areniscas finas a medias con estratificación cruzada que presentan laminación ondulítica en las capas frontales. Se observa en las formaciones Tacuarembó y Rivera	Migración de óndulas de arena
Spe	Areniscas con laminación entrecruzada tabular planar	Areniscas muy finas a finas, ocasionalmente medias, en estratos de espesores centimétricos (hasta 1 m). Presente en la Formación Tacuarembó	Migración de dunas eólicas de crestas rectas
P	Pelitas y areniscas muy finas, moteadas, con marcas de raíces, grietas de desecación	Pelitas y areniscas finas, rojizas a verdosas, a veces endurecidas, en niveles centimétricos a métrico presentes en la Formación Tacuarembó	Depósitos suspensivos sujetos a procesos edáficos, oxidación, desecación

Formación	Atributo	Dominio Sur	Dominio Central	Dominio Norte
Tacuarembó	Espesor (m)	60 - 90	90 - 100	100 - 110
	Litologías predominantes	Arenita cuarzosa, fina a muy fina En sectores, bancos con fuerte cementación (carbonática y silícea)	Arenita cuarzosa fina (70% clastos; 27% poros; 3% matriz) Clastos cuarzo (>80%), feldespatos (13%) y líticos En sectores fuertemente cementadas (silíceo)	Arenita cuarzosa, fina a media (72% clastos; 26% poros; 2% matriz) Clastos cuarzo (>84%), feldespatos (12%) y, muy subordinadamente, líticos
	Composición de las arcillas de la matriz	Sin análisis de laboratorio	Esmectita (72%), Illita (21 %), Illita (3%) Illita – Esmectita (3%) y otras (clorita)	Illita (35%), Esmectita (30%) Caolinita (14%), y otras (illita-esmectita, clorita, clorita – esmectita)
	Relaciones estratigráficas en techo	Cobertura reciente/actual Formación Arapey Formación Rivera	Cobertura reciente/actual Formación Las Arenas Formación Arapey Formación Rivera	Cobertura reciente/actual Formación Las Arenas Formación Arapey Formación Rivera
	Relaciones estratigráficas en base	Formación Buena Vista Formación Yaguarí	Formación Buena Vista Formación Yaguarí Basamento Cristalino	Formación Buena Vista Formación Yaguarí
	Geometrías de los estratos	Tabulariformes y lentiformes	Tabulariformes y lentiformes	Tabulariformes y lentiformes
	Principales asociaciones de facies	Canales efímeros Canales <i>braided</i> Planicies distales pelíticas -arenosas Depósitos no encauzados Dunas eólicas Sábanas de arena	Canales efímeros Canales <i>braided</i> Planicies arenosas Depósitos no encauzados Dunas eólicas Sábanas de arena Interdunas	Canales <i>braided</i> Canales efímeros Planicies arenosas intercanal Dunas eólicas Sábanas de arena

Cuadro 4

Formación	Contenido paleontológico / posición estratigráfica / localidades	Edad
<p>Tacuarembó</p>	<p>Moluscos: moldes de gasterópodos acuáticos; bivalvos pequeños (<i>Diplodon batoviensis</i> y <i>Diplodon dasilvai</i>) y grandes (<i>Tacuaremba caorsii</i>). Localidades: Camino a Rincón de Giloca, Ruta 59 ('<i>Tacuaremba</i>'), Martinote.</p> <p>Crustáceos: ostrácodos (indeterminados) y conostráceos <i>Orthesheria (Migransia) ferrandoi</i>. Localidades: Ruta 5 km, Cerro Batoví Dorado.</p> <p>Peces cartilagosos: dientes y espinas de tiburón (<i>Priohyodus arambourgi</i>). Localidad: Martinote</p> <p>Peces óseos actinoptergios: escamas y dientes de peces ganoides en más de treinta localidades.</p> <p>Peces óseos sarcoptergios: huesos de celacantos (<i>Mawsonia gigas</i>) y placas dentarias de dipnoos (<i>Arganodus tiguidiensis</i>). Localidades: Cantera Bidegain, Los Rosanos, Martinote, camino a Cerro Aldea.</p> <p>Reptiles: tortugas (<i>Tacuarembemys kusteræ</i>), crocodiliformes (<i>Meridiosaurus vallisparadis</i>), pterosaurios (<i>Tacuadactylus luciae</i>), dientes de dinosaurios carnívoros (<i>Ceratosaurus</i>, <i>Torvosaurus</i>, abelisáuridos). Localidades: Cantera Bidegain, Martinote, Los Rosanos. camino a Rincón de Giloca, camino a Cantera Batoví Ruta 59 ('<i>Tacuaremba</i>').</p> <p>Iconofósiles: trazas tubulares <i>Ancorichnus</i> y coprolitos. Huellas de dinosaurios (saurópodos, terópodos y ornitópodos). Localidad: Cañada del Ombú.</p>	<p>Jurásico Tardío (Kimmeridgiano-Tithoniano)</p> <p>por la presencia conjunta de <i>Ceratosaurus</i> y un pterosaurio <i>Gnathosaurin</i>, las similitudes de la fauna de conostráceos, y las relaciones de disconformidad con la Formación Rivera</p>

Cuadro 5

Formación	Atributo	Dominio Sur	Dominio Central	Dominio Norte
Rivera	Espesor (m)	1 – 10	1 – 20	1 - 50
	Litologías predominantes	Arenita fina a media, cuarzosa marrón a rojiza, con muy escasa matriz arcillosa como recubrimiento de grano y óxidos de hierro En sectores, bancos con fuerte cementación (silíceo) en contacto con base de basaltos	Arenita fina a media, subfeldespática marrón a rojiza, con muy escasa matriz arcillosa como recubrimiento de grano y óxidos de hierro. En sectores fuertemente cementadas (silíceo) en contacto o cerca de los basaltos.	Arenita subfeldespática, fina a media con muy escasa matriz arcillosa en forma de recubrimiento de grano y óxidos de hierro (67% clastos; 30% poros; 2% matriz: 1% cemento) Clastos cuarzo (87%), feldespatos (9%) y, subordinadamente, líticos
	Arcillas predominantes de la matriz	Sin datos cualitativos y cuantitativos	Sin datos cualitativos y cuantitativos	Esmectita (41%), Caolinita (32%), Illita (18%), Clorita – esmectita (6%) y lillita-esmectita (3%)
	Relaciones estratigráficas hacia el techo	Cobertura reciente/actual Formación Arapey	Cobertura reciente/actual Formación Las Arenas Formación Arapey	Cobertura reciente/actual Formación Las Arenas Formación Arapey
	Relaciones estratigráficas hacia la base	Formación Tacuarembó	Formación Tacuarembó	Formación Tacuarembó
	Principales asociaciones de facies	Dunas eólicas de tipo barján	Dunas eólicas de tipo barján	Dunas eólicas de tipo barján

Cuadro 6

Pozo	Coordenadas		Z (m)	Pre SAG	SAG		Pos SAG	Profundidad basamento
	x UTM	y UTM			Rivera	Tacuarembó		
Tacuarembó Chico E-1	574108	6511239	284	260	0	155	87	502
Sopas E-1	553384	6513205	217	134	0	225	108	468
Carumbé E-1	538762	6511419	230	131	8,5	179,5	276	595
Achar E-1	592655	6413054	150	330	0		100	430
Cañada del Charrúa E-1	563343	6514840	250	218.5		212	37.5	467.5
Cañada del Charrúa E-2	562258	6514104	296	216.5	54	204	41	515.5
Pepe Núñez E-1	557990	6519776	219	218	0	247	0	465
Quintana E - 1	556027	6529736	200	10.5		188.5	99	298
Quintana E - 2	555825	6531309	184	42.5	0	232	78.5	353
Tacuarembó 1 IGU	596696	6489724	135	215		90	0	350
Bañado de Rocha IGU	607998	6505352	177	567	0	129	0	696
Clara IGU	619011	6433869	105		0			NA
Termas de Cuñapirú	637685	6578604	200		SD	SD	0	730
Los Cuadrados	597459	6441128	135	290	0	60	0	350
Cuchilla Zamora IGU	632586	6427044	138	244	0	0		244
Reductora UTE 1301	594678	6491556	147	47	0	92		NA
Po. Cam. Tacuarembó 1314	596247	6487806	155	35	0	89		NA
Tranqueras 705	617392	6548536		9	20	48		NA
OSE - Rivera 1226/1	640085	6579807	224		19	88		NA
OSE - P.G. Bretaña 891	632219	6584472					160	NA
OSE - P.G. Bretaña 894	633073	6583252		48		200	50	NA
OSE - P.G. Bretaña 889	633412	6583252			45	84	7	NA
Rivera 989	636152	6578309		69		135		NA
SIAGAS - Santana Br IN129	632182	6584472	330		42		154	NA
Tecnoagua 885	638992	6575849		8	26	48	6 (s)	NA
Tecnoagua 1003	648258	6561107		8		42		NA
OSE - Cerro Travieso	570952	6519653	334		3		119	NA

Cuadro 7