

GEOMORFOLOGIA Y SEDIMENTOLOGIA DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO SALADO (SUR DE SANTA FE Y NOROESTE DE BUENOS AIRES, ARGENTINA)

Martín IRIONDO y Daniela KRÖHLING

CONICET - Universidad Nacional del Litoral; CC 217 (3000) Santa Fe, Argentina

Resumen: El S de la provincia de Santa Fe y el NO de la provincia de Buenos Aires forman parte del Mar de Arena Pampeano (Sistema Eólico Pampeano), que ha sufrido una secuencia de episodios áridos y húmedos a lo largo de los últimos períodos del Pleistoceno. El paisaje actual resulta fundamentalmente de la influencia del período húmedo del Estadio Isotópico 3 (EIO 3; 64-36 ka) y de la actividad eólica durante un clima seco del Holoceno tardío (3,5-1,4 ka).

La secuencia de eventos sedimentológicos y geomorfológicos fue la siguiente: Durante el período húmedo del EIO 3 se desarrolló una red fluvial de llanura, que actualmente forma la alta cuenca del Río Salado de Buenos Aires, labrada sobre sedimentos de la Fm Carcarañá. Posteriormente se depositó la Formación Teodelina, por sedimentación eólica. Esta tiene 10 a 12 m de espesor típico y unos 5 m en áreas sometidas a erosión; está compuesta por limo grueso arenoso y arena fina limosa, con modas principales entre 125-250 y 53-62 μm , color 10YR 6/4 (marrón amarillento) y similares. La composición mineralógica de la fracción entre 53 y 62 μm está dominada por vidrio volcánico, con feldespato, cuarzo y alteritas como accesorios. La redondez y esfericidad de los granos varían entre bajas y moderadas, con dos poblaciones.

En el Pleistoceno final ocurrió un episodio eólico predominantemente erosivo, dominado por vientos del oeste que labraron cientos de depresiones de miles de metros de extensión. Ocurrió una sedimentación discontinua de loess arenoso de hasta 2 m de espesor con granulometría bimodal. El período Hypsithermal del Holoceno Medio (8,5-3,5 ka) estuvo caracterizado por un clima cálido y húmedo con régimen údico, que generó un suelo en los terrenos loésicos y produjo el ascenso del nivel del agua en las lagunas y pantanos.

El Holoceno tardío, entre 3,5 y 1,4 ka, estuvo dominado por un clima seco, con formación de campos de dunas denominadas aquí Formación San Gregorio. Está formada por arena muy fina a fina, suelta, masiva, color marrón amarillento, y compuesta por trizas vítreas, alteritas y feldespatos como componentes principales y cuarzo como componente secundario; los minerales pesados son de procedencia serrana.

La época actual está caracterizada por un exceso de agua en el paisaje; el proceso sedimentológico más relevante es la movilización de grandes volúmenes de sales disueltas, particularmente cloruros y sulfatos.

EXTENDED ABSTRACT

Geomorphology and sedimentology of the upper basin of the Salado River (Southern Santa Fe and NW Buenos Aires provinces; Argentina)

The geomorphology, Late Quaternary stratigraphy, sedimentology and hydrology of the upper basin of the Salado River were investigated. The study area is located in S Santa Fe and NW Buenos Aires provinces (11.000 km²) and comprises the NE sector of the Pam-

pean Sand Sea (defined by Iriondo and Kröhling, 1995; Figures 1 and 2). The methodology applied in this study produced conclusions of stratigraphic and paleoclimatic nature. Works were performed in photographic and images cabinet, in the field and laboratory. In cabinet, the geological cartography produced by the first author in former projects was issued, particularly the geological map of Santa Fe province, in 1:500.000 scale (Iriondo, 1987; Figure 3), the map of the South American plains (Iriondo, 1990a; Petit Maire *et al.*, 1999) and the map of the Pampean Sand Sea in scale 1:1.000.000 (Iriondo, 1992). That was complemented with satellite images and photomosaic analyses, integrated with classical topographic quadrangles of IGM.

Field works made in the region covered a period of two decades. The first expedition was done in the year 1985, during a dry inter-annual period which favored the description of geological profiles and collection of fossils in the bottom of channels. Further expeditions were made in the 1990's, resulting in the elaboration of the regional stratigraphy (Figure 4; Kröhling, 1998; Iriondo and Kröhling, 1995). The last three field surveys, between the years 2001 and 2004 (during the present humid period), were focused on the studies of dune fields, with areal sampling (about 50 samples) and the recovering of sedimentary cores (41 m drilled). Four stratigraphic boreholes were made in the study area and a complementary one outside it, with recovering of undisturbed samples and complemented with geotechnical S.P.T. tests. The main boreholes were drilled in Teodelina (34°11' lat. S; 61°31' long. W; 88 m a.s.l.; Santa Fe; Figure 5) and in San Gregorio (34°17' lat. S y 61°55' long. W; 102 m a.s.l, Santa Fe). Laboratory analyses comprises grain size analysis by sieving at intervals of $\frac{1}{4} \phi$ between 125 and 37 μm . For mineralogical determinations were applied loose grain techniques (in the very fine sand fraction) and X-ray diffractometry (on total samples; Figure 6). Complementary, morphoscopic determinations were carried out in the 74 μm fraction.

Two geological formations of eolian origins are widespread in the region, Teodelina Fm (Late Pleistocene) and San Gregorio Fm (Late Holocene), which are formally defined here. The Teodelina Fm has a typical thickness of 10 to 12 m and has been eroded up to 5 m in some areas; it is composed of sandy coarse silt and silty fine sand, with main modes at 125-250 μm and 53-62 μm ; the colour is yellowish brown and similar ones. The mineral composition of the 53-62 μm fraction is dominated by volcanic glass, with feldspars,

quartz and alterites as accessory minerals. Roundness and sphericity of the grains vary from low to moderate, with two populations. The San Gregorio Fm is more than 7 m thick. It is composed of loose, massive, yellowish brown in color, very fine to fine sand (Figures 7a and 7b). The mineral composition is dominated by vitreous shards, alterites and feldspars as its main components and quartz as a secondary component; main heavy minerals were originated in the Pampean Ranges.

The geomorphology of the area and the present hydric dynamics are controlled by eolian geofoms generated during the Late Quaternary. The exception is the fluvial collector in S Santa Fe which is a paleochannel of the Tercero river, controlled by tectonics (Figure 8).

The study area underwent a sequence of dry and humid episodes during the Late Quaternary. Basically, the present landscape is the result of the influence of a humid climate which took place in the Oxygen Isotopic Stage 3 (OIS 3; 64-36 ka) and the eolian activity produced by a dry climate in the Late Holocene (3.5-1.4 ka). The sequence of sedimentary and geomorphic events deduced from the data of this research was the following: during the humid OIS 3, a fluvial net developed; it forms at present the upper basin of the Salado River of Buenos Aires, and is carved in the Carcarañá Formation (OIS 3; Kröhling, 1999). In a subsequent dry episode (Late Pleistocene), the Teodelina Formation was sedimented by eolian and associated processes. A largely erosive eolian phase occurred after Teodelina Fm accumulation; it was characterized by Western winds that carved hundreds of large deflation hollows. A discontinuous sedimentation of a sandy loess up to 2 m thick with bimodal grain size distribution covered the minor accidents of the landscape. The humid period of the Middle Holocene (8.5-3.5 ka) was characterized by a warm and humid climate with an udic soil regime, which generated a soil profile on the loessic terrains and provoked the water level rising in lakes and swamps. The Late Holocene, from 3.5 to 1.4 ka BP, was characterized by a dry climate that produced the development of parabolic dune fields, named here as the San Gregorio Formation. An interesting geomorphological feature of the study area is represented by numerous shallow lakes occupying large deflation hollows generated by W winds. That indicates a shift of the Westerlies to the N up to 34° lat. S at the Upper Pleistocene-Lower Holocene interval (Figure 9). During the Little Ice Age the studied area underwent an

arid climate with dominance of SW winds that produced a general mobilization of sand to the NE (Figure 10); the inherited shallow lakes were transformed in playas (Dangavs and Mormeneo, 2006).

The present dynamics is dominated by an excess of water in the landscape as a consequence of the Present humid climate and the morphosedimentological control referred above. The significant sedimentological process is the mobilization of large volumes of dissolved salts, mainly chlorides and sulphates.

Palabras clave: Cuaternario, Geomorfología, Mar de Arena Pampeano, Río Salado, Hidrología.

Keywords: Quaternary, Geomorphology, Pampean Sand Sea, Salado River, Hydrology.

INTRODUCCION

En este trabajo se describen las características fundamentales del sector superior de la cuenca del Río Salado. Mide aproximadamente 130 km de longitud, con 80 km dentro de la provincia de Santa Fe y el resto pertenece a la provincia de Buenos Aires. La superficie del área de estudio abarca 11.000 km². Su límite norte coincide aproximadamente con la faja de contacto entre los subsistemas geomorfológicos: *Mar de Arena Pampeano* (MAP) y *Faja Periférica de Loess* (FPL; Iriondo, 1990a; Iriondo y Kröhling, 1995; Figura 1). El límite de sotavento del MAP es una traza irregular de rumbo SSE-NNO a través del N de Buenos Aires, S de Santa Fe y SE de Córdoba (Figura 2).

La delimitación y visualización de esta cuenca es sumamente difícil en el terreno, pero relativamente sencilla si se utilizan imágenes satelitales, especialmente las obtenidas durante épocas de grandes lluvias. Durante dichos períodos puede comprobarse claramente que se trata de una cuenca fluvial activa, con flujo generalizado de decímetros por segundo en cañadas, confluencias, tributarios y colectores cubriendo todo el territorio.

El transporte de sedimentos en arrastre y suspensión es insignificante, aunque la movilización de sales disueltas es alta, especialmente cloruros. Se trata de una red fluvial intermitente, que moviliza unos 200 millones de m³ de agua y alrededor de 100.000 toneladas de sales en cada período de actividad, algo que *per se* la califica como un interesante sistema sedimentario.

La geomorfología de este sector de la llanura pampeana es el resultado directo de la sucesión de procesos sedimentarios, fundamentalmente eólicos, ocurridos en

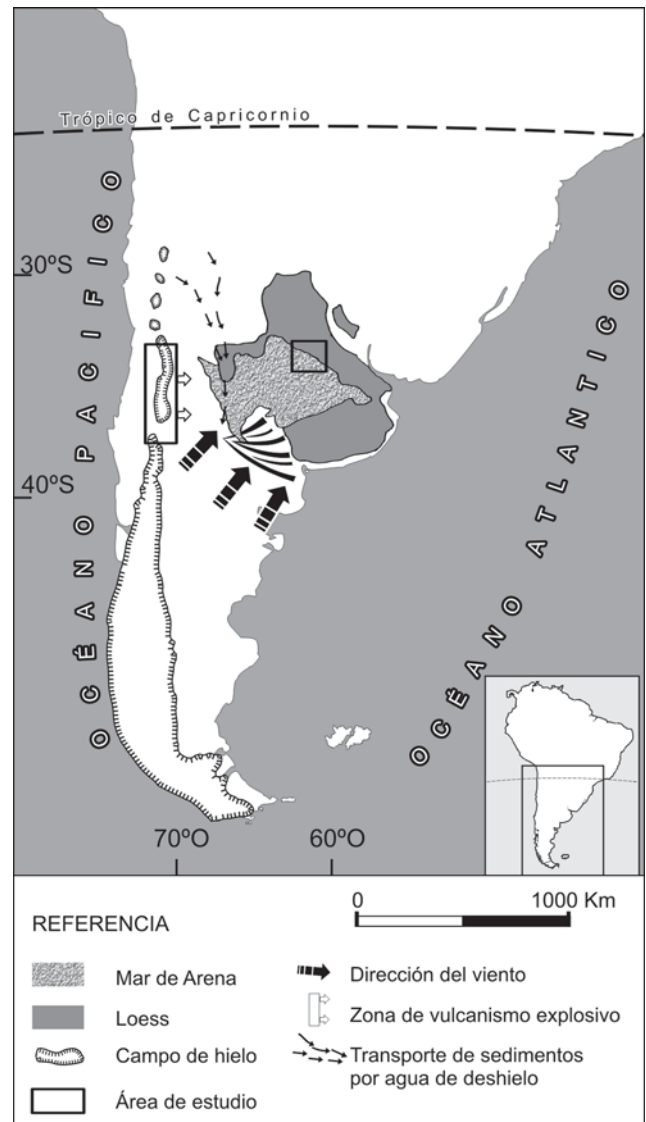


Figura 1. Esquema del Sistema Eólico Pampeano durante el EIO 2, modificado de Iriondo, 1990a.

Figure 1. Sketch of the Pampean Aeolian System during the OIS 2, modified from Iriondo, 1990a.

los últimos 80.000-90.000 años, particularmente los desarrollados durante el Último Máximo Glacial y el Holoceno Tardío (Petit-Maire *et al.*, 1999).

METODOLOGIA

La metodología utilizada en esta contribución integra varias disciplinas de la Sedimentología y algunas de la Geomorfología, produciendo resultados fundamentalmente estratigráficos, ya que se definen dos nuevas formaciones geológicas, y paleoclimáticos.

Los métodos de trabajo incluyeron técnicas de gabi-

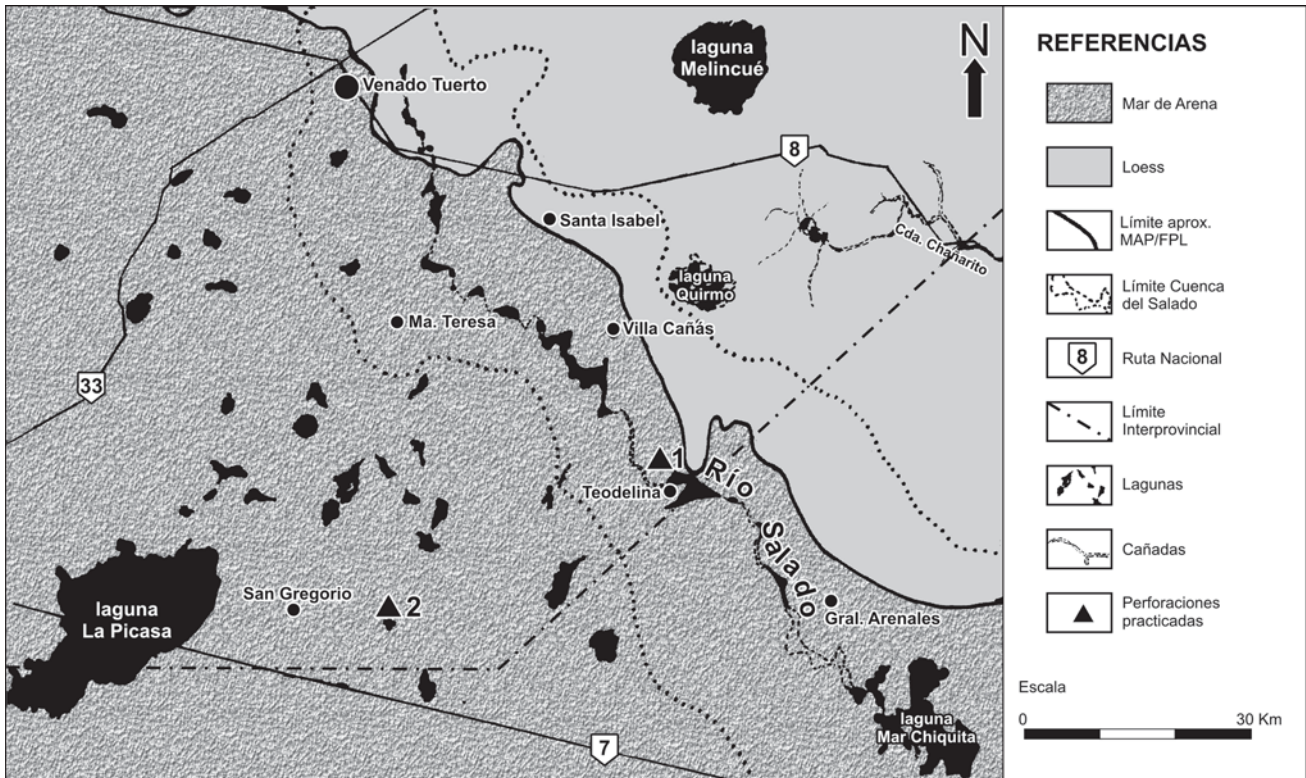


Figura 2. Ubicación de la cuenca superior del río Salado en el Mar de Arena Pampeano y en la transición con la Faja Periférica de Loess (1: perforación Teodelina; 2: perforación San Gregorio).

Figure 2. Location of the upper basin of the Salado river inside the Pampean Sand Sea and transition to the Peripheral Loessic Belt (1: research borehole Teodelina; 2: research borehole San Gregorio).

nete, trabajos de campo y análisis de laboratorio. En gabinete se trabajó con cartografía geológica propia, especialmente con el Mapa Geomorfológico de la Provincia de Santa Fe a escala 1:500.000 (Iriondo, 1987; Figura 3), el Mapa de Llanuras de América del Sur (Iriondo, 1990a; 1992; Petit-Maire *et al.*, 1999) y el mapa del Mar de Arena Pampeano en escala 1:1.000.000 (Iriondo, 1992). Esto se complementó con imágenes satelitales y fотомosaicos, integrados muy ventajosamente con clásicas cartas topográficas en escala 1:50.000 del IGM.

Los trabajos de campo en esta cuenca cubren un período de dos décadas. En 1985 se realizó la primera campaña durante un período seco, lo que permitió describir perfiles de barrancas, lunetas y lechos de cañadas (donde aparecieron los fósiles referidos en este trabajo) y otros fenómenos de esas épocas. En 1994 (Iriondo, 1994) se estableció el esquema estratigráfico del Mar de Arena Pampeano con dos campañas que cubrieron la cuenca y una amplia zona vecina. El estudio sistemático de la fase húmeda actual comenzó en 2002, rea-

lizándose tres campañas dedicadas a estudio de los campos de dunas, con muestreos sedimentológicos areales (unas 50 muestras) y ejecución de perforaciones, con un total de 41 m perforados.

Se realizaron cuatro perforaciones estratigráficas en el área de estudio de este trabajo y una auxiliar fuera de ella. En el extremo sur de la provincia de Santa Fe se ejecutaron dos perforaciones rotativas, con ensayos geotécnicos normalizados de tipo SPT y obtención de muestras inalteradas cada 0,70 m de avance, utilizando toma-muestra Standard o Terzaghi, de 35 mm de diámetro con contenedor plástico con tapas. Se registró la velocidad de avance de la herramienta y el número de golpes en cada SPT.

La perforación principal se llevó a cabo en el área de la localidad de Teodelina (34°11' lat. S; 61°31' long. O; 88 m s.n.m.; Figura 2). El punto perforado se ubica en el piso de un préstamo, que se halla a 3 m por debajo de la superficie del terreno. En dicha perforación resultaron 17 determinaciones y 15 muestras alcanzando 12,15 m b.b.p.

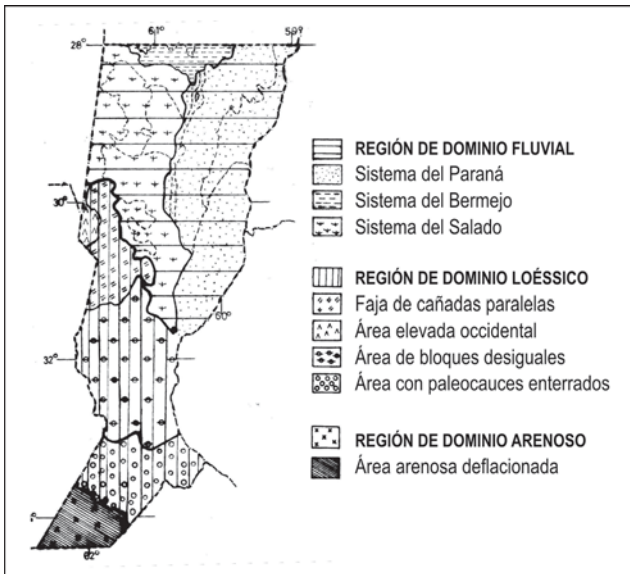


Figura 3. Mapa del Cuaternario de la provincia de Santa Fe, simplificado de Iriondo (1987).

Figure 3. Map of the Quaternary of the Santa Fe province, simplified from Iriondo (1987).

La perforación accesoria se ejecutó a unos 2 km al este del punto donde la ruta nacional 7 intersecta el borde oriental de la laguna La Picasa (a 5 km al oeste del acceso a Diego de Alvear). El punto de la perforación se halla en el piso de una cantera en explotación, ubicado a 2 m por debajo del nivel general del terreno (34°23' lat. S; 62°08' long. O; 113 m s.n.m.). Se obtuvieron 18 muestras hasta una profundidad de 15,15 m b.b.p.

Las restantes perforaciones se ejecutaron mediante barreno manual, una de ellas, ubicada a 13 km al NE de San Gregorio (34°17' lat. S y 61°55' long. O; 102 m s.n.m.; Figura 2, Santa Fe) en el cuerpo de una duna parabólica bien preservada, resultando 4,80 m atravesados (9 muestras); la otra perforación fue practicada en el piso de un canal artificial próximo a Venado Tuerto (33°45' lat. S; 61°55' long. O; 103 m s.n.m.; Santa Fe), con 4,60 m perforados. Una perforación auxiliar fue practicada en una duna poco disipada de unos 6 m de altura relativa respecto a un paleocauce ubicado al E de la geoforma, de varios cientos de m de longitud. La duna se halla a 8 km al NO de la localidad de Canals, junto a la ruta nacional 8 (33°32' lat. S; 62°57' long. O; 124 m s.n.m.; Córdoba), con 4 m perforados (9 muestras).

La compacción es un parámetro utilizado frecuentemente para describir o discriminar formaciones

cuaternarias; dichas descripciones son normalmente realizadas con criterio libre y en forma cualitativa, lo que depende de la habilidad observacional del geólogo de campo y aunque muy útiles resultan poco comparables con otras. Por ello, en dos perforaciones se realizaron "ensayos normales de penetración" geotécnicos tipo SPT. Se lograron resultados verdaderamente significativos.

Los sedimentos superficiales de la región varían entre arena muy fina limosa y limo grueso arenoso, con una media cercana al valor de 4ϕ y frecuentemente algo menor. Considerando que los perfiles estudiados atraviesan cuerpos de dunas típicas, surge una característica sedimentológica poco común, dunas formadas por más del 50 % de sus clastos con diámetros inferiores a $62 \mu\text{m}$. Esto es un tema de alto interés teórico, acerca de cuál es el límite real entre arena y limo. Wentworth (1922) lo coloca en $62 \mu\text{m}$ debido muy probablemente a las propiedades matemáticas de su serie ϕ ; en la Ciencia del Suelo este límite está en $50 \mu\text{m}$, algo que suena tan arbitrario como el anterior. Por otro lado, experimentos en túneles de viento muestran que el arrastre de granos individuales de arena por el viento comienza con diámetros de $70 \mu\text{m}$, por debajo de los cuales el flujo del aire forma una película laminar, semi-viscosa, que requiere mayor fuerza del viento para producir deflación (Bagnold, 1965). Este autor, en base a las propiedades aerodinámicas de las diferentes clases granulométricas, sugiere un límite inferior de $80 \mu\text{m}$ para las arenas.

Para este caso, considerando que las dunas son estructuras sedimentarias formadas por el transporte de granos en arrastre y saltación, el pequeño diámetro de sus granos es coherente con la clasificación utilizada comúnmente en Alemania, que incluye la clase de "arenas pulverulentas" (staubsand) entre 62 y $20 \mu\text{m}$. También la clasificación de Hopkins, actualmente en desuso, es de utilidad pues coloca el límite arena-limo en $32 \mu\text{m}$ (Muller, 1967). A fin de analizar en detalle esta característica sedimentológica se realizaron análisis granulométricos por tamizado en intervalos de $1/4$ de ϕ entre las fracciones 125 y $37 \mu\text{m}$ en las submuestras de los 51 testigos obtenidos en las perforaciones y en las restantes muestras extraídas de perfiles. En la caracterización granulométrica inicial de este trabajo se siguió la escala de Udden-Wentworth.

El análisis de las especies minerales fue realizado siguiendo la técnica de grano suelto, por microscopía óptica. Previamente se atacaron las pátinas de óxidos de hierro que recubren los granos para su identificación.

Además se realizó el análisis mineralógico sobre muestra total mediante difracción de Rayos X (radiación CuK α). Como complemento, se realizó una somera descripción de los atributos geométricos de los granos. La forma (redondez y esfericidad) fue estudiada en la fracción de 74 μ m, mediante comparación visual con la “Chart of Visual Estimation of Roundness and Sphericity” de Krumbein y Sloss (1955). Se trata de un método simple, pero robusto y fácilmente accesible. Las texturas superficiales de los granos fueron estudiadas también en la fracción de 74 μ m, siguiendo en general a Krinsley y Margolis (en Carver, 1971). Tanto forma de granos como texturas superficiales son en este trabajo complementos menores de la granulometría y mineralogía de las arenas.

ESTRATIGRAFIA

El esquema estratigráfico general de la región estudiada está representado en la Figura 4. (Iriondo y Kröhling, 1995). Se trata de una típica secuencia de sedimentos eólicos intercalados con paleosuelos.

Los sedimentos más antiguos alcanzados en este estudio corresponden a la Fm Carcarañá, de edad Pleistoceno Superior. Tomando como referencia a la columna estratigráfica reconstruida a los 34° S de la Figura 2, la secuencia estratigráfica elaborada para el área del presente estudio es la siguiente:

Formación Carcarañá

Esta unidad de principal origen eólico es el resultado del retrabajo por disipación de un campo de dunas del MAP. Corresponde al nivel D5 de la Figura 4. Fue definida formalmente por Kröhling (1998,1999) en la barranca del Río Carcarañá, en la ciudad del mismo nombre. En el área de estudio de este trabajo aflora en la parte inferior de perfiles artificiales de pocos metros de altura, constituyendo taludes subverticales. Esta unidad fue alcanzada por la perforación practicada en Teodelina (entre los 15,15 y 13,85 m de profundidad; Figura 5).

La Fm Carcarañá está formada por arena muy fina a fina limosa con escasa participación de arcillas, de color marrón rojizo brillante en húmedo (5YR 5/6) y marrón amarillento oscuro (10YR 3/6) en seco. Está organizada en estratos muy gruesos horizontales y poco definidos, en general con contactos concordantes y sin estructuras internas visibles. Presenta moderado grado de compactación y estructuración débil en bloques mal definidos,

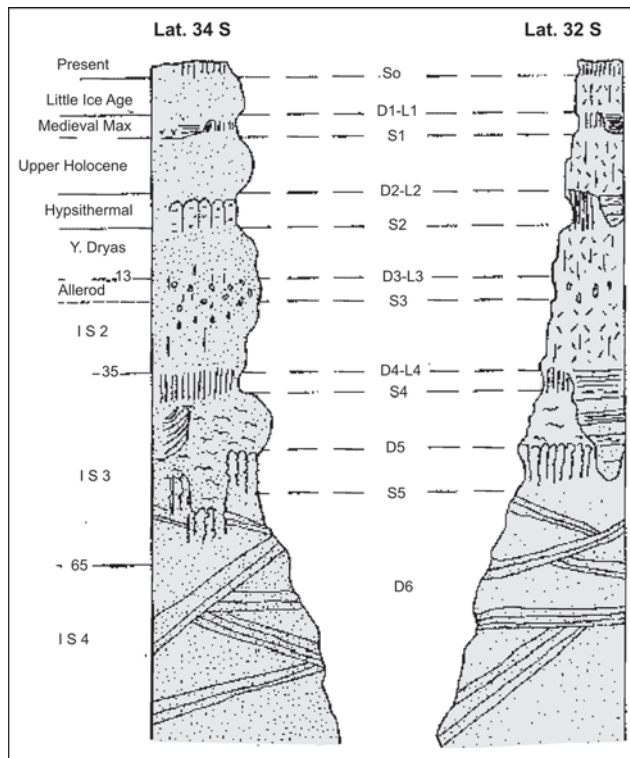


Figura 4. Columnas estratigráficas generales del Mar de Arena Pampeano (34°S) y de la Faja Periférica de Loess (32°S), según Iriondo y Kröhling (1995).

Figure 4. General stratigraphic columns of the Pampean Sand Sea (34°S) and Peripheral Loessic Belt (32°S), according to Iriondo y Kröhling (1995).

finos a medios, resistentes. El sedimento es no calcáreo en general. Localmente se presenta bioturbado (moldes de raíces y crotovinas). Su contacto inferior no es visible, el contacto superior está marcado por una discordancia erosiva, que en el área de estudio, la separa de la Fm Teodelina.

La facies eólica principal conserva localmente estructuras sedimentarias de disipación, caracterizadas por un patrón irregular ondulado continuo y de pocas decenas de centímetros de espesor, marcado por diferencias en la concentración de materiales coloidales (Kröhling, 1999). Este tipo de estructura sedimentaria fue estudiado por Bigarella (1979) en dunas litorales del SE de Brasil. Según este autor, las condiciones de disipación se establecen cuando se incrementa la cantidad de agua en el sistema (lluvias torrenciales). Se trata de movimientos en masa periódicos afectando dunas, del tipo “avalanchas en húmedo” La acción del flujo de la arena y del lavado por acción pluvial puede redistribuir completamente el cuerpo de la duna produ-

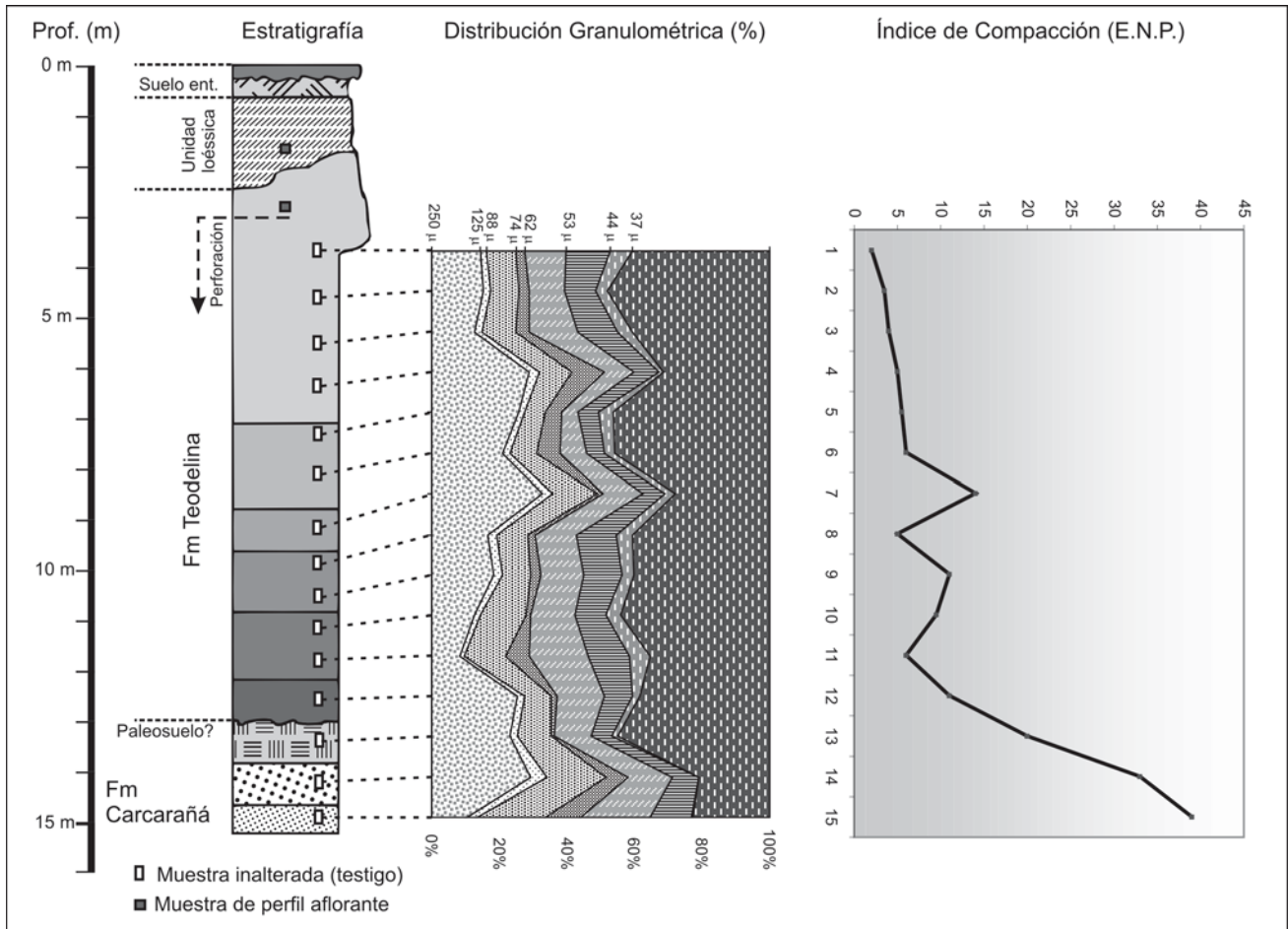


Figura 5. Perfil tipo de la Formación Teodelina.
Figure 5. Type profile of the Teodelina Formation.

ciendo su disipación, cambiando el patrón interno y su morfología original y generando cambios texturales en las arenas disipadas (Bigarella, 1979). En las depresiones mayores del área, particularmente en la red de paleovalles del Río Salado, afloran además la facies aluvial y la facies palustre de la Fm Carcarañá.

Frenguelli (1928) halló restos de megafauna extinguida en un sector de la barranca del tramo inferior del río Carcarañá, al norte de esta área de estudio y que se interpreta como perteneciente a esta formación (muelas de *Mastodon sp.* y de *Hippidium principale*).

Los resultados granulométricos de los dos testigos inferiores de la perforación practicada en Teodelina indican una composición areno limosa (en promedio: 51% de arenas), con modas entre 250-125 μm y 88-74 μm (Figura 5).

Según Kröhling (1998), la formación está integrada por materiales volcánoclasticos de procedencia andina (vidrio volcánico ácido, con cuarzo policristalino, pla-

gioclasas y fragmentos líticos subordinados), con escasa participación de minerales de procedencia serrana (cuarzo y ortoclasa). Los minerales pesados ocupan menos del 3% del total de la fracción modal de arenas (piroxenos, hornblenda, turmalina, micas y magnetita, entre otros).

La fracción modal de arenas (74-88 μm) del testigo más profundo de la perforación practicada en Teodelina (14,75 m por debajo de la superficie del terreno) presenta alto contenido en vitroclastos (51,6%), acompañados por alteritas (20,8%; algunas correspondientes a litoclastos muy alterados) y feldespatos (18,4%); con escasa participación de cuarzo (4,3%), litoclastos (3,8%) y otros minerales (0,3%). Los componentes pesados alcanzan el 0,8% del total de la fracción. Teniendo en cuenta el resultado del análisis de las texturas superficiales de los vitroclastos se discriminaron las siguientes poblaciones, por orden de abundancia: a) trizas incoloras con textura fluidal parcialmente afectada por

devitrificación o presentando alta birrefringencia a lo largo de canalículos y paredes de vacuolas. (17,9% del total de la fracción modal), b) Láminas muy alteradas, en general con alto grado de sericitización (12,8%), c) bloques incoloros con superficies lisas y leve devitrificación en su parte central (9,8%), d) trizas triangulares a tubulares, parcialmente devitrificadas, especialmente a lo largo de microcanales (9,8%), e) bloques incoloros con superficies lisas (0,9%) y f) trizas castañas (0,4%). Los feldespatos se discriminaron en: a) plagioclasas frescas, de hábito tabular, con maclado polisintético; algunas presentando zonación (7,2%), b) feldespatos indiferenciados no maclados y poco alterados, en general subredondeados (5,2%), c) plagioclasas no macladas, parcialmente alteradas, subangulares a subredondeadas (4,7%), feldespatos potásicos parcialmente alterados, en general con moderado a alto índice de redondez (1,3%). El cuarzo se presenta en granos ecuanes; bajo lupa algunos se muestran esmerilados y con moderada redondez. Los litoclastos corresponden a plagioclasas con adherencias vítreas y a opacos adheridos a pasta vítrea.

Relictos de un paleosuelo intraformacional (S5) afloran en el piso de cárcavas ubicadas en el fondo de paleovalles fluviales de la cuenca del Río Carcarañá, al N del área de estudio (Kröhling, 1999). De acuerdo con Kröhling (1999), una datación por TL de la parte media del depósito de disipación aflorante en el área tipo de la Fm Carcarañá arrojó una edad de 52.310 ± 1.200 años, correspondiente al Estadio Isotópico del Oxígeno 3 (EIO 3).

Paleosuperficie desarrollada durante el EIO 3

Un nivel caracterizado por sedimentos finos, segregación de CaCO_3 , depósitos aluviales y un suelo desarrollado en el tope de la Fm Carcarañá indican la existencia de una superficie estable generada durante un evento húmedo dentro del EIO 3.

El suelo que aparece en el techo de la Fm Carcarañá (S4, Figura 4) forma relictos de pocos metros de extensión y ubicados a cotas variables. Al N del área de este estudio, el horizonte diagnóstico es de color marrón rojizo claro y está moderadamente estructurado en bloques finos, muy firmes, que hacia abajo pasan a agregados de tipo placa. Presenta moldes de raíces revestidas por películas negras y macroporos finos. Por debajo hay rizoconcreciones.

En ciertas áreas deprimidas se formó una costra carbonática, que localmente forma una tosca dura com-

puesta por una red de venillas de extensión predominantemente horizontal, lo que indica segregación de origen freático. Su espesor típico oscila entre 40 y 80 cm. Está estructurada en bloques subangulares de 2 a 3 cm de largo. El color general es marrón con sectores verde oliva, posiblemente compuestos por ceniza volcánica alterada.

Los depósitos aluviales forman el fondo del colector de la cuenca y afloran entre las lagunas Las Encadenadas en el área de Villa Cañás. Se trata de un sedimento areno arcilloso, de color marrón. Este incluye nódulos de CaCO_3 , que en algunos sectores conforman verdaderos planchones de "tosca" compacta. En el camino que atraviesa Las Encadenadas, dicha "tosca" es una arenisca de grano muy fino, bien seleccionada, color amarillo a castaño pálido, con cemento carbonático. Los granos contienen un porcentaje apreciable de laminillas de mica menores a 1 mm. La cementación ha producido un conjunto de polígonos más o menos regulares, de 40 a 50 cm de diámetro, separados por tabiques verticales de CaCO_3 . Se observan tubos finos rellenos con óxidos de manganeso, precipitados posteriormente. Estos sedimentos contienen fauna extinguida de Edad Mamífero Lujanense, en su mayor parte corazas de gliptodóntidos (*Panochtus* y *Doedicurus*), también *Sclerocaliptus*, *Scelidotherium*, *Lestodon*, *Equus* y *Ctenomys*. Están generalmente cubiertos por sedimentos palustres.

Formación Teodelina

La perforación ejecutada en la localidad de Teodelina atravesó en su totalidad los sedimentos depositados durante el EIO 2 (D4 de la Figura 4).

Se propone aquí el nombre de Formación Teodelina; el perfil tipo está ubicado en el área S de la cantera vial situada junto a la ruta provincial 94, 5 km al N de la localidad de Teodelina ($34^{\circ}11' \text{ lat.S}$; $61^{\circ}31' \text{ long.O}$; 88 m s.n.m.). La descripción del perfil tipo de la Fm Teodelina, compuesto por una parte aflorante (1,30 m) y otra mayor, perforada en esta investigación (10 m), y sus formaciones limitantes, es la siguiente (Figura 5):

a) Perfil de la perforación desde abajo hacia arriba (m: profundidades indicadas en metros por debajo de la superficie del terreno; m b.b.p: profundidades expresadas en metros bajo boca de pozo):

15,15 - 13,85 m. Fm Carcarañá (sin ver base), diferenciada en:

15,15 - 14,70 m (12,15 - 11,70 m b.b.p.): Limo arenoso bien seleccionado, de color 10YR 3/6 (marrón amari-

lento oscuro), bimodal (modas entre 53-62 μm y entre 74-88 μm). La mineralogía de la fracción arena está dominada por vitroclastos, con feldespatos y alteritas como componentes subordinados y escaso cuarzo y litoclastos. Alta compacción (E.N.P.: 39).

14,70 - 13,85 m (11,70 - 10,85 m b.b.p.): Arena muy fina a fina limosa de color 10YR 5/4 (marrón amarillento), con moda principal en 125 y 250 μm y moda secundaria en 74-88 μm , con alta compacción (E.N.P.: 33).

13,85 - 13,00 m (10,85 - 10,00 m b.b.p.): Limo arcilloso con 36% de arena fina a muy fina, de color 10YR 5/4 (marrón amarillento) La moda principal se halla entre 125 y 250 μm y la moda secundaria entre 53 y 62 μm . Presenta menor compacción que la del sedimento infrayacente (E.N.P.: 20). Se interpreta como probable paleosuelo desarrollado en el techo de la Fm Carcarañá. 13,00 m (10,00 m b.b.p.): Discordancia resaltada por un cambio litológico y por una disminución importante de la compacción, que baja al 20% de los valores anteriores.

13,00 - 3,00 (10,00 - 0,00 m b.b.p.). **Fm Teodelina:**

13,00 - 12,15 m (10,00 - 9,15 m b.b.p.): Limo con importante contribución de arena fina a muy fina (37-40%), de color 10YR 5/4 (marrón amarillento -en húmedo-, con moda principal entre 125 y 250 μm y moda secundaria en 53-62 μm , con moderada compacción (E.N.P.: 11).

12,15 - 10,85 m (9,15 - 7,85 m b.b.p.): Limo arenoso (29% de arena), de color 10YR 6/4 (marrón amarillento claro), con moda principal en 53-62 μm y moda secundaria entre 74 y 88 μm , con moderada compacción (E.N.P.: 6-9).

10,85 - 9,55 m (7,85 - 6,55 m b.b.p.): Limo arenoso (30-32% de arena fina a muy fina), de color 10YR 6/4 (marrón amarillento claro), con segregaciones de óxido férrico (que otorgan color marrón fuerte a partes del sedimento, 7,5YR 5/8). Presenta moda principal entre 125 y 250 μm y moda secundaria en 53-62 μm , con moderada compacción (E.N.P.: 8).

9,55 - 8,80 m (6,55 - 5,80 m b.b.p.): Arena fina limosa, de color 10YR 6/4 (marrón amarillento claro), con moda principal entre 125 y 250 μm y moda secundaria en 74 y 88 μm , con moderada compacción (E.N.P.: 14).

8,80 - 7,10 m (5,80 - 4,10 m b.b.p.): Arena limosa a limo arenoso (38-51% de arena fina), 10YR 6/4 (marrón amarillento claro), con moda principal en 125-250 μm y secundaria en 44-53 μm , con moderada compacción (E.N.P.: 6).

7,10 - 6,20 m (4,10 - 3,20 m b.b.p.): Limo arenoso

(29% de arena fina a muy fina), de color 10YR 6/4 (marrón amarillento claro), con moda principal entre 53 y 62 μm y moda secundaria entre 250 y 125 μm , con baja compacción (E.N.P.: 4).

6,20 - 3,00 m (2,90 - 0,00 m b.b.p.): Limo arenoso (27-28% de arena fina a muy fina), de color 10YR 6/4 (marrón amarillento claro), con moda principal entre 125 y 250 μm y moda secundaria en 53-62 μm , con baja compacción (E.N.P.: 3). *Techo de la perforación.*

b) Sector aflorante, de abajo hacia arriba:

0 - 1,30 m. **Fm Teodelina** (continuación de lo perforado). Arena fina a muy fina limosa, con moda principal entre 74 y 88 μm y moda secundaria entre 53 y 62 μm . Color marrón fuerte en húmedo (7,5 YR 4/6), friable. No calcárea. Contacto superior discordante (la discordancia tiene un relieve marcado, de hasta 1,50 m a lo largo de 45 m; Figura 5). *Techo de la Fm Teodelina.*

1,30 - 2,85 m (espesor variable entre 1 y 2 m). Loess arenoso, compuesto por arena fina a muy fina limosa, con moda principal entre 74 y 88 μm y moda secundaria entre 53 y 62 μm , de color marrón amarillento (10 YR 5/4). Presenta una leve mayor compacción que la de la unidad infrayacente (especialmente en su parte inferior) y disyunción columnar. Sin segregaciones de CaCO_3 .

2,85 - 3,10 m. Suelo enterrado débilmente desarrollado, representado por el horizonte Bw, poco estructurado y de color marrón oscuro en húmedo (7,5 YR 3/3). Está sujeto a pedogénesis actual.

3,10 - 3,45 m. Estrato formado por arena muy fina limosa marrón grisácea en húmedo (7,5YR 3/1), débilmente estructurada en bloques gruesos resistentes. Está afectado por pedogénesis actual (horizonte A del suelo actual). *Fin del perfil tipo.*

Una perforación practicada en María Teresa (34° 00' lat.S; 61°54' long.O; Santa Fe; C. Manavella, *com. pers.*) se interpreta como perfil accesorio de la Fm Teodelina (de abajo hacia arriba):

0,00 - 36,00 m. Fm Carcarañá:

0,00 - 14,00 m. Limo de estructura poliédrica, con abundante arena fina subordinada.

14,00 - 25,00 m. Limo con arena fina subordinada, friable, marrón amarillento.

25,00 - 28,00 m. Limo palustre, estructurado en poliedros angulares, con abundantes concreciones de CaCO_3 y nódulos de óxidos de Mn.

28,00 - 29,00 m. Limo eólico friable de textura migajosa, de color marrón amarillento claro.

29,00 - 35,00 m. Limo palustre, estructurado en po-

lledros angulares, con abundantes concreciones de CaCO_3 y nódulos de óxidos de Mn.

35,00 - 36,00 m. Limo eólico, de textura migajosa, suave.

36,00 - 47,00 m. **Fm Teodelina.** Limo muy arenoso a arena muy fina limosa, de color marrón claro.

47,00 - 50,00 m. Unidad loésica superficial. Arena muy fina limosa, de color marrón claro.

En la zona de Villa Cañas la Fm Teodelina contiene concreciones ramificadas de CaCO_3 . Una perforación realizada en dicha localidad ($34^{\circ}00'$ lat.S; $61^{\circ}36'$ long.O; 101 m s.n.m.; Manavella, *com. pers.*) atravesó dicha unidad entre 5,50 y 14 m b.b.p.

Un perfil aflorante descrito en el canal de desagüe del área de cabeceras de la cuenca (camino Venado Tuerto - Carmen) revela la persistencia regional de la columna estratigráfica estudiada. De abajo a arriba:

0,00 - 4,00 m. Fm Carcarañá. Arena muy fina eólica de color marrón rojizo claro, consolidada. Localmente aflora una facies de retrabajo fluvial.

4,00 - 4,60 m. Probable suelo enterrado formado por arena muy fina de color marrón claro masiva, de menor consolidación que la anterior, con abundantes microporos. Contactos superior e inferior erosivos.

4,60 - 9,20 m. **Fm Teodelina.** Arena muy fina limosa de color marrón claro, masiva y friable, no calcárea. En su masa se hallaron dos gliptodontes bien preservados.

9,20 - 9,70 m. Fm San Guillermo. Limo arenoso gris.

En las márgenes de la Laguna Sastre (23 km al SO de Venado Tuerto) se encontraron en la Fm Teodelina restos de *Lama guanicoe*, *Ctenomys sp.* y otros indeterminados.

En base a correlaciones estratigráficas y mapeo se deduce que la Fm Teodelina ha sido depositada durante el Último Máximo Glacial (EIO 2) en forma de dunas posteriormente disipadas en uno o más episodios subhúmedos, resultando actualmente en amplias superficies planas y relativamente altas que dominan el paisaje de la región.

Granulometría: Las muestras representativas del sector aflorante de la unidad en el perfil tipo se clasifican como arena limosa (57,5% correspondiente a la fracción $> 62 \mu\text{m}$, con moda principal entre 88 y $74 \mu\text{m}$ y moda secundaria entre 62 y $53 \mu\text{m}$). El cuerpo principal de la formación en el perfil tipo está compuesto por un sedimento franco en primera aproximación (Figura 5), que distribuido en fracciones de $\frac{1}{4}$ de ϕ muestra la existencia de tres poblaciones definidas, que responden claramente a diferentes mecanismos de transporte

eólico. Las modas principal y secundaria aparecen persistentemente en los intervalos: 250-125 μm y 62-53 μm . Las fracciones menores a 37 μm tienen una alta participación en el total del sedimento (41% en promedio).

Es notable la baja participación de las fracciones granulométricas intermedias en todo el sedimento. Las poblaciones detectadas corresponden a tres de los tipos de mecánica de transporte eólico propuestos por Nickling (1994): saltación pura, suspensión breve y suspensión prolongada. Se estima que la sedimentación original en campos de dunas es responsable de los dos primeros mecanismos citados y que la suspensión prolongada incorporó volúmenes de finos durante el proceso subsiguiente de disipación.

Mineralogía: La composición mineralógica de la fracción modal entre 53 y 62 μm está dominada por trizas de vidrio volcánico (64,1%), con baja participación de feldespatos (18,1%), escaso cuarzo (6,6%) y alteritas (6,6%) -con 0,3% de litoclastos y 0,6% de otros minerales indiferenciados-. El contenido de minerales pesados alcanza el 3,7% (en su mayor parte correspondientes a anfíboles y piroxenos).

La redondez y la esfericidad varían entre bajas y moderadas, con algunos casos de alta esfericidad. Se diferenció una población mayoritaria de origen volcánico formado fundamentalmente por vidrio volcánico, con albita y cuarzo accesorios con valores típicos de S (esfericidad) entre 0,2 y 0,4 y de R (redondez) entre 0,3 y 0,5. La población subordinada es de origen serrano; está formada por cuarzo, feldespatos potásicos, microaglomerados y líticos y registra valores de S entre 0,6 y 0,9 y de R entre 0,3 y 0,8. Las texturas superficiales presentan también las características de dos poblaciones mezcladas.

Las poblaciones de vitroclastos identificadas en dicha fracción se discriminaron según el grado de alteración superficial y desgaste presentes: 1) Vidrio volcánico fresco: a) Trizas incoloras de formas triangulares y rectangulares, presentando bordes curvos y vértices marcados y algunas con cavidades tubulares y fracturas a lo largo de vacuolas; escasas trizas incluyen microfeno-cristales (16,3%). b) Placas planas incoloras, con muy escasa alteración en su parte central y el resto de la superficie límpida (0,6%). 2) Vidrio parcialmente alterado: a) trizas angulosas incoloras con textura fluidal afectada por procesos de devitrificación, presentando birrefringencia moderada a alta a lo largo de canales y paredes de vacuolas (27,6%). b) Fragmentos

subredondeados y con regular a alta esfericidad, devitrificados en su mayor parte (5,6%). c) Trizas alteradas, algunas con inclusiones de microlitos y cristales prismáticos verdes (14%).

Una descripción morfológica detallada del vidrio volcánico indica: fracturas concoides de vulcanismo explosivo, formas angulares (poliedros de 3 a 6 caras), superficies suaves, aristas afiladas y vértices con escaso redondeamiento. En general, el vidrio es transparente a translúcido con leve sericitización. Algunos clastos poseen textura fluidal, con burbujas y vacuolas, alteración frecuentemente concentrada en zonas menores y líneas y escasas fracturas de choque.

En el grupo de feldespatos se reconocieron las siguientes poblaciones: a) granos de hábito tabular pertenecientes a plagioclasas ácidas bastante frescas (albita), algunas presentando zonalidad y maclado polisintético (3,1%), otras con inclusiones. b) granos subredondeados no maclados y en general con alto grado de alteración que produce superficies de color pardo, pertenecientes muy probablemente a ortoclasas, con esfericidad y redondez intermedias (S 0,7-0,5 y R 0,4-0,6). Presentan superficies muy alteradas por corrosión, que en ciertos granos aparecen formando surcos paralelos por unión y crecimiento de cavidades adyacentes dentro de estrías anteriores. Los huecos miden de 3 a 5 μm de diámetro, existen huecos aislados más grandes, de 8 a 10 μm de diámetro, redondeados, rellenos de un material opaco. Alteración a material amarillo brillante, frecuentemente eliminado por abrasión (14,7%). c) granos subredondeados correspondientes a microclino (0,3%). Los granos de plagioclasas ácidas presentan escasas picaduras y alteración en zonas menores, de hasta 10% de la superficie total. Formas determinadas por clivaje y por escasas fracturas de choque (S 0,6-0,8 y R 0,3-0,5) de 20 a 40 μm de ancho. Algunos granos tienen placas completamente alteradas, intercaladas con otras completamente limpias.

El cuarzo se presenta en granos ecuanes (S 0,7-0,9 y R 0,3). En la mayoría de los granos, numerosas fracturas concoides e irregulares de choque, frescas, de 20 a 40 μm de ancho. Corrosión variable, desde escasas picaduras muy pequeñas a corrosión generalizada en estrías paralelas anteriores. En algunos casos posee extinción ondulosa marcando zonas soldadas de tamaño limo. Algunos granos tienen escaleras, estrías y bloques imbricados. En menor proporción sus clastos están menos desgastados y redondeados, aunque también hay en éstos picaduras y fracturas de choque.

Los litoclastos corresponden a plagioclasas con

adherencias vítreas. Los microaglomerados están formados por partículas de limo y arcilla fuertemente cohesionados; engloban fibras vegetales y espículas de diferentes tamaños. Poseen redondez y esfericidad altas (R 0,8-0,9 y S 0,6-0,8). Sus partículas componentes poseen el mismo tipo de alteración que el vidrio y los feldespatos. Algunos granos están compuestos completamente por fibras, casi sin partículas minerales. Fracturas concoides de 15 a 25 μm de largo.

La sílice biogénica correspondiente a fragmentos de espinas y otros fitolitos forma entre el 5 y el 10% del total de la fracción.

La mineralogía obtenida a partir de la interpretación de los difractogramas de RX de la fracción entre 125 y 250 μm (moda principal) y de la fracción entre 74 y 88 μm (moda secundaria) indica alta relación cuarzo/feldespatos, con predominio de plagioclasas ácidas entre los feldespatos, y muscovita y calcita como minoritarios. En la fracción 52-62 μm se detectó la presencia de cristobalita (Figura 6).

Loess del Pleistoceno Final

La columna estratigráfica del área de estudio finaliza con una unidad de apariencia loésica de espesor variable entre 1 y 2 m, correspondiente a L3 de la Figura 4. Teniendo en cuenta el criterio de campo, se trata de un loess arenoso, de color marrón amarillento (10 YR 5/4) que forma perfiles verticales afectados en parte por disyunción columnar. El loess presenta una compacción levemente mayor que la de la Fm Teodelina infrayacente (especialmente en su parte inferior). La unidad loésica no tiene segregaciones de CaCO_3 . Descansa en discordancia erosiva sobre la Fm Teodelina y está coronada en su techo por un suelo moderadamente desarrollado (Figura 5).

Los resultados granulométricos permitieron clasificar al sedimento como arena fina a muy fina limosa (56,6% de la fracción > a 62 μm), con moda principal entre 74 y 88 μm y moda secundaria entre 53 y 62 μm .

Dicha unidad aparece en otras localidades de la cuenca, ubicadas a decenas de km de distancia de Teodelina. En una cantera localizada a 2 km al NE de María Teresa (Santa Fe), se describió el siguiente perfil, de arriba hacia abajo: 1,30 m de la unidad loésica arenosa (arena muy fina a limo marrón amarillento, friable, presentando disyunción vertical y no calcárea), coronada por un estrato (30 a 50 cm de espesor) de arena muy fina limosa, marrón grisáceo oscuro, estructurado en bloques resistentes.

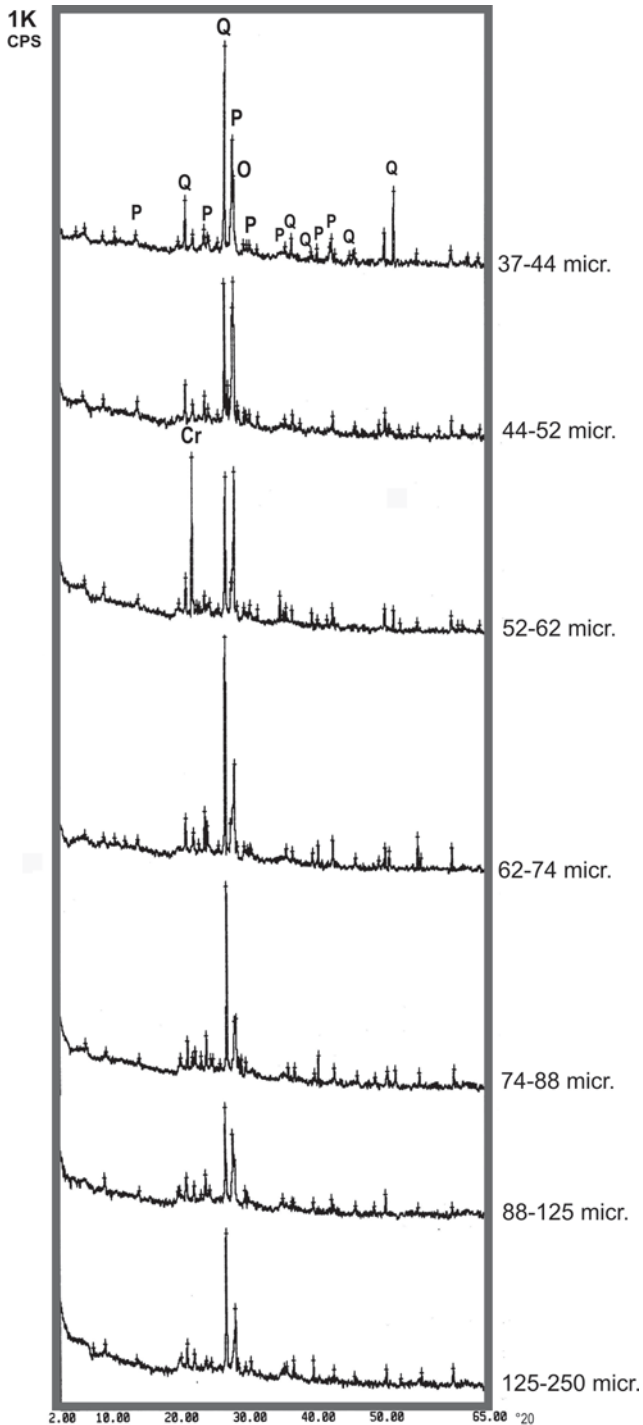


Figura 6. Difractogramas de Rayos X de diferentes fracciones de arena y limo de la Formación Teodelina (radiación $\text{CuK}\alpha$) –P: plagioclasas, Q: cuarzo, O: ortoclase, Cr: cristobalita.

Figure 6. X-ray diffractograms of different sand and silt fractions of the Teodelina Formation ($\text{CuK}\alpha$ radiation) –P: plagioclases, Q: quartz, O: orthoclase, Cr: cristobalite.

Esta unidad loésica se correlaciona tentativamente con el miembro superior de la Fm Tezanos Pinto, el cual fue depositado durante el período seco del Pleisto-

ceno tardío - Holoceno temprano -entre 14.000 y 8.000 años A.P.-, basado en dataciones por termoluminiscencia y C^{14} (Kröhling, 1999; Iriondo, 1999). Hacia el N, en el área central de la provincia de Santa Fe, esta formación es predominantemente limosa (Kröhling y Orfeo, 2002). Hacia el SE, Dangavs y Mormeneo (2006) diferenciaron en las barrancas de la Laguna Lacombe (cuenca inferior del Río Salado) un depósito loésico castaño amarillento claro, friable a levemente endurecido, de textura limo arenosa y estructura migajosa, con abundante bioturbación y muñecas de tosca, que asignan a la Fm Buenos Aires del Pleistoceno tardío. Esta correlaciona también con la unidad loésica descrita en este trabajo.

Formación San Gregorio

Se propone en esta publicación el nombre de Formación San Gregorio para una unidad formada por arena muy fina a fina, suelta, de color marrón amarillento, que constituye el cuerpo sedimentario de las dunas generadas durante el Holoceno tardío, con validez para los campos de dunas de esa edad en la región pampeana. Dichos campos de dunas se destacan en el paisaje de la región. El perfil tipo se ubica en el cruce del camino central San Gregorio - Colonia Morgan con el camino a Christophersen (Santa Fe); ambos intersectan una duna parabólica ubicada a 15 km al E de la localidad de San Gregorio ($34^{\circ}20' \text{ lat. S}$; $62^{\circ} \text{ long. O}$; 102 m s.n.m.). Se compone de un perfil aflorante de 3,90 m de altura y un sector perforado con barreno manual de 4,80 m s.v.b.

La descripción del perfil tipo es la siguiente, de abajo hacia arriba:

- 0,00 - Base no alcanzada en la perforación.
- 0,00 - 4,80 m. Arena muy fina a fina, suelta, marrón amarillenta, masiva.
- 4,80 - 7,30 m. Arena muy fina a fina, suelta, color marrón amarillento, masiva en general, incluyendo sectores con laminación difusa.
- 7,30 - 8,30 m. Arena similar a la anterior. Color marrón grisáceo debido a la evolución del suelo actual, que también resulta en un aumento en la consolidación del depósito.

Un perfil accesorio de esta unidad sedimentaria fue levantado en la barranca de la costa S de la Laguna Ancalú (Santa Fe), ubicada al este de San Gregorio. Allí la secuencia es la siguiente, de abajo hacia arriba:

- Fm Teodelina (0,40 m de espesor aflorante),
- Fm San Gregorio (de espesor variable entre 0,50 y 2

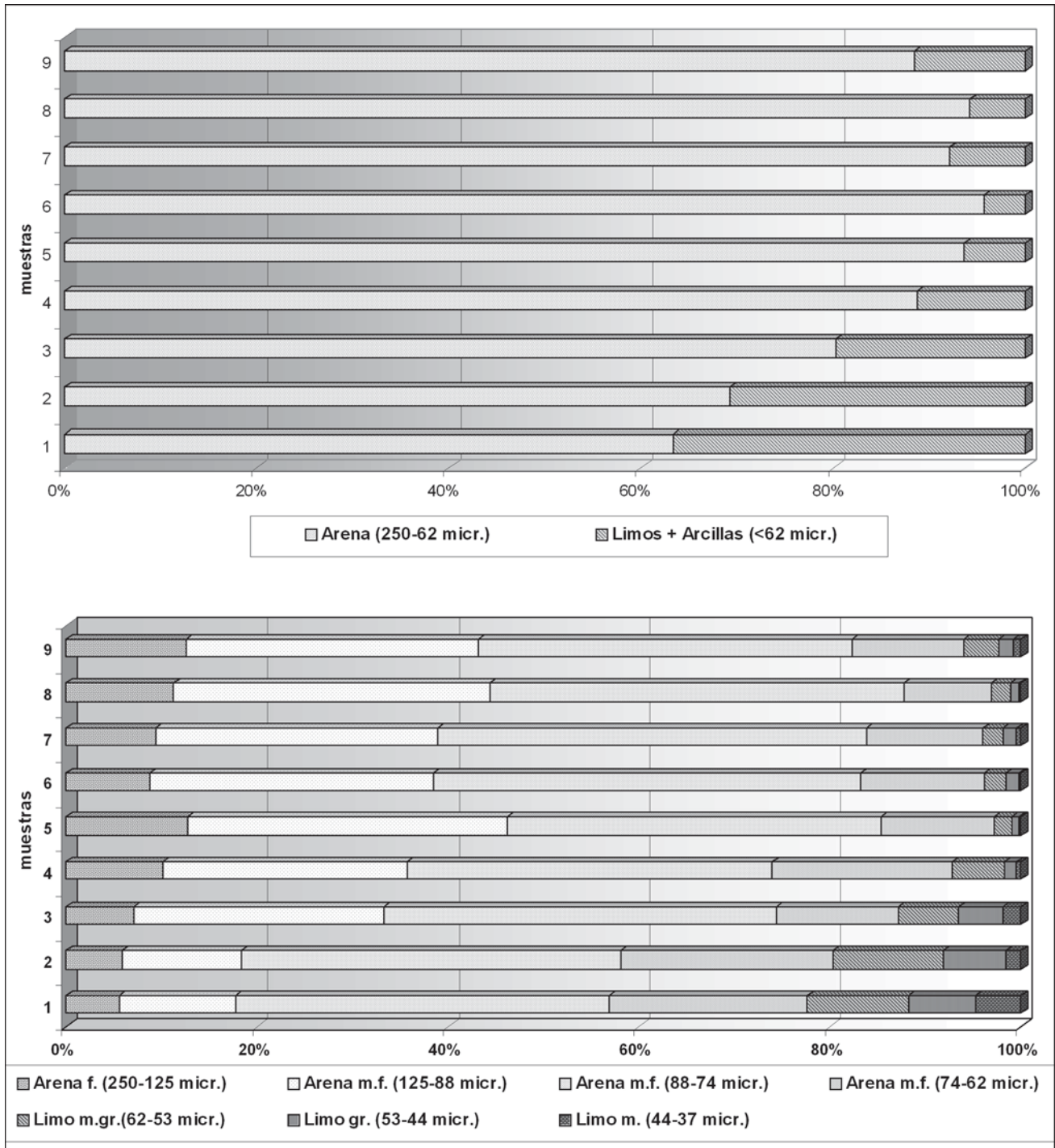


Figura 7a. Granulometría de la Formación San Gregorio. **7b.** Distribución granulométrica de las fracciones más gruesas a 37 μm en la Formación San Gregorio (numeración de las muestras de abajo hacia arriba, con equidistancia de 50 cm).

Figure 7a. Grain-size distribution of the San Gregorio Formation. **7b.** Grain-size distribution of the fractions coarser than 37 μm in the San Gregorio Formation (samples numerated upwards, with 50 cm equidistance).

m; se halló una lasca de cuarzo en su interior).

Arena eólica depositada durante la Pequeña Edad de Hielo (formando una duna de 2,50 m de altura).

En el área de General Arenales (Buenos Aires) esta

formación constituye un campo de dunas semejante al que aparece en el área de San Gregorio. En la parte baja de un perfil de 5,5 m de altura ubicado en el cuerpo de dichas dunas aparecen estructuras de disipación.

Esta unidad sedimentaria corresponde a D2 en la columna sedimentaria general (Figura 4). Está expresada en el terreno con formas de colinas suaves y extendidas, fijadas por la vegetación, con depresiones cerradas frecuentemente ocupadas por lagunas. La formación se correlaciona con la Fm San Guillermo (Iriondo, 1990a), una unidad eólica de amplia distribución regional al N del área de estudio del presente trabajo y cuya edad varía entre 3,5 y 1,4 ka A.P. Contiene restos de fauna actual sudamericana (*Lama glama guanicoe*, *Eudromia elegans*, *Lagostomus maximus*, *Ctenomys sp.*) sin fauna extinguida. Por otra parte, Dangavs y Mormeño (2006) refieren la existencia de un depósito de loess primario holoceno coronando las escasas elevaciones apenas perceptibles que marginan la Laguna Lacombe en el área de Chascomús. Se trata de un limo arenoso de color castaño muy claro, friable a levemente endurecido sin tosca y de hasta 0,80 m de espesor, que yace sobre la Fm Buenos Aires y es coronado por un paleosuelo de perfil truncado. Estos autores la correlacionan con la Fm, La Postrera III del Holoceno medio a tardío. Esta unidad está coronada por un depósito mantiforme limo arenoso, friable y de color castaño oscuro por pedogénesis actual y de hasta 0,50 m de potencia que correlacionan con la Fm La Postrera IV del Holoceno tardío.

Granulometría: La composición granulométrica de la Fm San Gregorio es arena muy fina que oscila entre pura y limosa, con contenido variable de limo que pasa gradualmente del 4% en la parte superior a 37% en el extremo inferior alcanzado (Figura 7a). La moda se halla en la fracción entre 74 y 88 μm . En la Figura 7b se observa que entre 125 y 74 μm se acumula el volumen dominante del sedimento, con predominio de limo grueso sobre limo medio.

Mineralogía: La mineralogía de la fracción modal (74-88 μm) de la Fm San Gregorio en su perfil tipo está integrada por: trizas vítreas (38,4%), alteritas (26,1%) y feldespatos (21,8%), con cuarzo como componente secundario (9,3%) -y 0,8 % de minerales indiferenciados-. La proporción de minerales pesados es significativa (3,8%), debido a la contribución de minerales de procedencia serrana (granate y hornblenda, entre otros).

El vidrio volcánico se presenta en varias poblaciones, con distinto grado de alteración superficial y desgaste: a) Placas incoloras planas y subangulares frescas, algunas con microfenocristales (5,2%). b) Placas incoloras devitrificadas en su parte central (2,8%). c) Trizas

incoloras devitrificadas a lo largo de canales y paredes de vacuolas; algunas con microlitos (17,8%). d) Trizas totalmente alteradas subredondeadas a redondeadas (11,8%). e) Vidrio de color castaño (0,8%). Las poblaciones pertenecientes al grupo de los feldespatos son: a) Plagioclasas ácidas macladas, con hábito tabular y zonación; algunas con inclusiones minerales (6,9%). b) Plagioclasas parcialmente alteradas, en granos subangulares a subredondeados (5,5%). c) Microclino (0,3%). d) Feldespatos indiferenciados no maclados, poco alterados (9,1%). El cuarzo se presenta en granos ecuanes con inclusiones de minerales prismáticos; otros granos son de cuarzo policristalino. Bajo lupa binocular se observó que la mayor parte de los granos de cuarzo y feldespatos se encuentran esmerilados, con alta esfericidad y redondez intermedia.

La composición mineralógica de la formación se mantiene en forma relativamente homogénea en largas distancias de la región, como en General Arenales hacia el SE (70 km) y Canals (Córdoba) hacia el NO (250 km).

EVOLUCION GEOMORFOLOGICA

La geomorfología de esta región está actualmente dominada por grandes dunas parabólicas y longitudinales del Holoceno tardío de orientación S-N y SSW-NNE (Formación San Gregorio) cubriendo en forma discontinua una superficie general sumamente horizontal, que es el tope de la Formación Teodelina parcialmente cubierta por el loess del Pleistoceno Final. El paisaje actual de la región refleja la secuencia de eventos climáticos mayores del Cuaternario Tardío descrita por los autores en 1995 (Iriondo y Kröhl, 1995). Dicho esquema evolutivo fue confirmado por Dangavs (2005) para el Cuaternario tardío de la cuenca del Río Salado en Buenos Aires. Este autor describió para los períodos secos deflación generalizada, excavación de cubetas y rejuvenecimiento de las más antiguas, acumulaciones arenosas eólicas, loésicas y de dunas de arcilla, salinización y precipitación de sales; en los ciclos húmedos predominó el aluvionamiento, la pedogénesis y en las cubetas eólicas funcionaron sucesivos ambientes acuáticos.

El paisaje de la región objeto del presente estudio ha sufrido la siguiente evolución:

Período Húmedo del EIO 3

Las geoformas más antiguas corresponden al EIO 3. Se trata de una red fluvial transformada actualmente

en series de cañadas y lagunas encadenadas. Dicha red fue generada con caudales alóctonos de las Sierras Pampeanas, siendo su colector un paleocauce del Río Tercero. Este recorre la cuenca en sentido NO-SE desde Venado Tuerto hasta salir de la provincia de Santa Fe en la localidad de Teodelina; éste se transforma en el Río Salado al entrar en Buenos Aires. Las evidencias geomorfológicas son la existencia de tramos de grandes paleocauces ubicados al NO del área de estudio, como los ocupados por las cañadas de las Totoras y de Santa Lucía y por el Arroyo de las Mojarras. Estos paleocauces se conectan con el valle actual del río Carcarañá (continuación del río Tercero en Santa Fe). El indicador sedimentológico principal es la presencia de minerales pesados de procedencia serrana en dichos paleocauces.

El colector tiene un fuerte control estructural y está formado por segmentos de 3 a 4 km de longitud con orientaciones NO-SE y NE-SO. El ancho original de la faja fluvial fue de 800 a 1.500 m; se depositaron sedimentos arenosos en su interior. Dicha faja presenta un ancho regular y definido hasta cerca de General Arenales (entre 350 y 800 m, aumentando en las confluencias, actualmente ocupadas por lagunas y pantanos). En el primer tramo en Buenos Aires, el valle del Río Salado alcanza un ancho típico de 2 km, con 7,5 a 10 m de profundidad; el cauce presenta tramos rectos de 15 km de longitud individual, unidos por curvas suaves o por lagunas de varios kilómetros de diámetro mayor.

Agua arriba de la Laguna El Chañar, el colector forma una red trenzada de cauces menores ocupando la faja deprimida y parcialmente anegada, con lagunas en las confluencias de dicha faja y paleocauces secundarios.

En los interfluvios se generaron extensas áreas planas debido a la disipación (Fm Carcarañá) casi total de las dunas del período anterior (EIO 4; Kröhling, 1999). Su superficie fue endurecida por procesos pedogénicos y epigenéticos, resultando en una base prácticamente impermeable para la infiltración de las aguas de lluvia. Este nivel aparece en extensas áreas al N y al E de la Laguna La Picasa, y al E de Venado Tuerto, cubierto por la Fm Teodelina.

Un perfil transversal típico del valle colector fue construido entre las localidades de Santa Isabel y María Teresa. El mismo tiene un ancho total de 2.300 m, 5 m de profundidad y fondo plano de 700 m (ocupado por la Laguna Sesenta y Seis; Figura 8). En la zona de cabececeras, el perfil del colector es más simple (1.000 m de ancho y 3 m de profundidad al atravesar la ruta nacional 8), debido a que ese segmento no estuvo sujeto a la dinámica fluvial del Holoceno Medio. El fondo está allí ocupado por bañados y pantanos. Los afluentes directos de dicho colector tuvieron un desarrollo considerable. Un afluente importante está ubicado entre las localidades de Santa Isabel y Villa Cañas y alcanza un ancho de 1.900 m y un desnivel de 6 m cerca de la confluencia. Su fondo está actualmente bien definido.

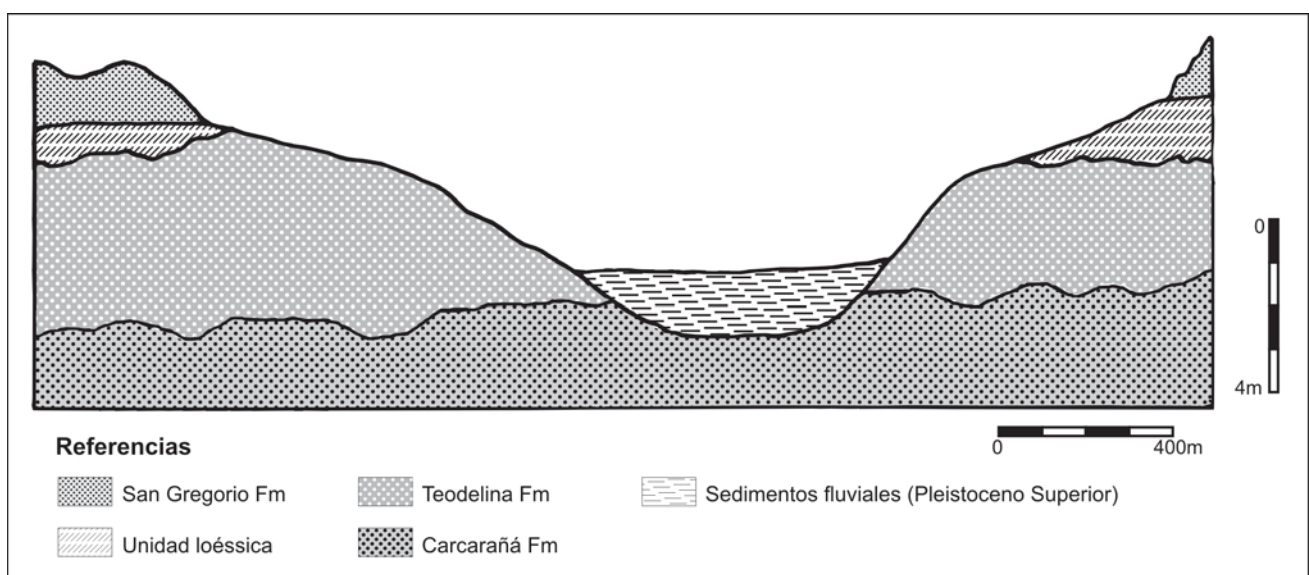


Figura 8. Perfil transversal del colector fluvial en la alta cuenca (área de Santa Isabel – María Teresa).

Figure 8. Transversal profile of the fluvial collector in the upper basin Santa Isabel – María Teresa area).

Período Seco del EIO 2

Durante el EIO 2 (entre 36.000 y 16.000 años A.P.), se generó la Fm Teodelina mediante complejos procesos eólicos. La arena colmató los paleocauces, aunque sin borrarlos completamente del paisaje. El paisaje general de las cabeceras (en el área de Venado Tuerto y en un radio de 50 km) es una expresión de ese fenómeno; está formado por lomas muy bajas y extensas (de varios km de longitud), que no se pueden definir a escala de campo. La faja deprimida al E de Venado Tuerto tiene 300 a 500 m de ancho, en general ocupada por bañados y lagunas alineadas con su radio mayor en dirección N-S.

Período Seco del Pleistoceno Final

En el Pleistoceno final, entre 14.000 y 8.500 años A.P. (Iriondo y Kröhling, 1995) la dinámica dominante fue erosiva. Se formaron numerosas hoyas de deflación dentro de las fajas fluviales y fuera de ellas. El material movilizado cubrió parcialmente las irregularidades menores del paisaje, bien expresadas en el área de Teodelina; también resultó en la colmatación parcial de depresiones extensas, como el bloque hundido de Quirno (al este de Villa Cañas) y la depresión actualmente ocupada por la Laguna La Picasa, vecina a la cuenca de estudio (Figura 2). También se depositó la capa discontinua del loess arenoso que remata la columna estratigráfica en el área de Teodelina y otros sectores.

Las depresiones tienen forma generalmente elíptica con clara orientación O-E; en menor cantidad son circulares, irregulares y compuestas, estas últimas generadas por la unión de dos o más depresiones en procesos limnológicos posteriores. En un estudio detallado se midieron 184 depresiones en el sur de Santa Fe (actualmente transformadas en lagunas). Dichas depresiones tienen una longitud promedio de 1,34 km; en su gran mayoría están comprendidas entre los 0,5 y los 2 km, lo que indica una notable regularidad en los vientos que provocaron la deflación. Además, dicha característica indica homogeneidad en la consistencia de los agregados superficiales y en la granulometría de los sedimentos superficiales. La profundidad típica de las lagunas en la actualidad oscila entre los 2 y los 3 m.

Para obtener resultados estadísticamente válidos de las dimensiones de las depresiones se midió el eje mayor, como indicador de la dirección del viento dominante, volcándose los resultados en forma gráfica en proyección circular para formar rosas de vientos (Figura

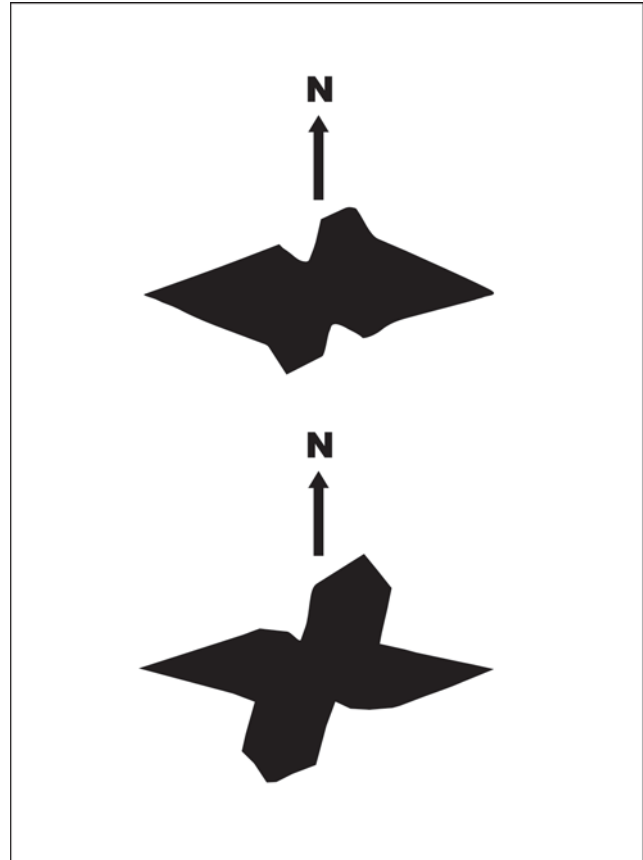


Figura 9. Rosa de los vientos, representativa de la circulación de la atmósfera durante el Pleistoceno final en el sur de la provincia de Santa Fe (tomado de Iriondo y Kröhling, 1995). Arriba: determinados a partir de la orientación de hoyas de deflación situadas fuera de las cañadas y paleocauces. Abajo: población total de hoyas analizadas.

Figure 9. Late Pleistocene paleowind directions in southern Santa Fe province (from Iriondo and Kröhling, 1995). Upper figure: eolian hollows not related to fluvial depressions. Lower figure: total population of eolian hollows.

9). Se destacan dos direcciones de viento bien definidas. La más importante de éstas tiene una moda bien marcada de dirección O-E con dispersión escasa hacia ambos costados. Esta dirección agrupa al 61% de las lagunas. La otra dirección presenta un máximo SSO-NNE (25 depresiones) y considerable dispersión hacia el S-N y el SO-NE; agrupa al 35% de las lagunas.

Evidentemente, la distribución de las depresiones indica dos regímenes de vientos dominantes: O-E y SSO-NNE. De acuerdo con las evidencias de campo, los vientos O-E soplaron en un período anterior a los de dirección SSO-NNE. Entre las evidencias figuran la preservación de lunetas, las pendientes de los bordes y el grado actual de colmatación. Las orillas E y O de

las lagunas son en general suaves, con algunas lunetas muy destruidas en su margen oriental. Los vientos del SSO dominaron visiblemente en un período posterior, muy probablemente en la Pequeña Edad del Hielo.

En las depresiones ubicadas erráticamente en el paisaje, fuera de los paleocauces, el predominio de los vientos del O es muy grande, casi de 3 a 1 con respecto a las otras direcciones. Esto indica que en los lugares en que no había paleoformas heredadas (que favorecen la deflación) la capacidad erosiva de los vientos del O del Pleistoceno final fue mucho mayor que las de los posteriores vientos del SSO. Un pequeño campo de dunas de dirección O-E generadas en este período (con distancias entre dunas de 200 a 500 m y un relieve heredado de 0,80 a 3 m) se ha preservado a pocos kilómetros al NO de San Gregorio. Dicho campo está parcialmente cubierto por dunas holocenas.

Actualmente los vientos del O son prácticamente inexistentes en la región. Ocurren muy raramente, cuando la faja de anticiclones del Océano Austral sube hacia el N. Vientos permanentes del O de 30 a 35 nudos de velocidad, con capacidad de erodar sedimentos finos, ocurren actualmente en Patagonia, al sur del paralelo 40°. Dicha característica indica que la circulación O-E estuvo ubicada unos 8 grados de latitud (900 km) hacia el N de su posición actual, produciéndose vientos fuertes y secos en el S de la provincia de Santa Fe.

Un elemento geomorfológico frecuente en la región son las lunetas, acumulaciones marginales a ciertas hoyas de deflación. Restos de estas geoformas se preservan en el borde de algunas lagunas, sobre las que la erosión hídrica labró barrancas (Laguna Las Encadenadas y Laguna La Amarga, entre otras). Una de las lagunas ubicadas al S de la localidad de Maggiolo (Santa Fe) presenta una luneta con forma de media luna ocupando todo su borde N, con una altura relativa de 5 m respecto al nivel de la planicie circundante. La luneta tiene 60 a 80 m de ancho y cientos de m de longitud. Esta geoforma está compuesta por estratos mal definidos de 5 a 40 cm de espesor, buzantes hacia fuera de la laguna. En la base de la barranca labrada en la luneta se hallaron huesos de ñandú (*Rhea americana*).

Las lunetas que marginan a las lagunas del área de San Eduardo (Santa Fe), tienen entre 2,5 y 4 m de altura máxima en su parte central, disminuyendo paulatinamente hacia los laterales hasta desaparecer en pocos cientos de m. Actualmente se hallan en proceso de erosión por oleaje, que ha generado una barranca subvertical en su frente. Se estudió una luneta repre-

sentativa de dicha área. La pendiente de sotavento de esa geoforma presenta bajo gradiente (5 a 10°) y 100 m de longitud. Esta se encuentra tapizada por vegetación herbácea y se conecta al N con un pantano. El cuerpo es sedimentológicamente poco homogéneo; en su parte central está formado por arena muy fina poco limosa, bien seleccionada, friable a suelta, de color marrón amarillento, en partes masiva. Incluye segregaciones puntuales de CaCO₃. En su techo aparece un suelo incipiente, identificable por su mayor cohesión y su contenido en materia orgánica; por debajo del suelo se ha formado una media caña. A unos 80 m hacia el este, la luneta está formada por estratos horizontales mal definidos, de 15 a 40 cm de espesor individual, con diferente grado de compactación. Localmente en la composición de los estratos participan arenas gruesas a guijas, en su mayor parte correspondientes a restos de concreciones calcáreas y a pequeños gasterópodos. El estrato que culmina la secuencia descansa en discordancia erosiva y presenta similar composición sedimentológica a la de los estratos infrayacentes.

Otra luneta bien definida margina por el N a la Laguna Sancti Spiritu (Santa Fe). La margen E de la Laguna de Grigera (Las Encadenadas) está representada por una luneta de hasta 5,5 km de longitud y de 1 a 3 m de altura, actualmente en erosión hídrica. Descripciones realizadas por los autores de este trabajo en 1985 diferenciaban una luneta de varias decenas de metros de extensión y que alcanzaba una altura máxima de 2,5 a 3 m en la margen sur de la laguna La Picasa Chica, compuesta por arena fina a muy fina, marrón amarillenta, cubierta por un estrato de 0,20 a 0,40 m de espesor formada por arena limosa gris. Actualmente se encuentra sumergida.

En la provincia de Buenos Aires, el área que presenta la mayor densidad de hoyas de deflación aparece en el NE de la provincia. Esta fue estudiada por Dangavs y Mormeneo (2006), quienes asignan también una edad Pleistocena tardía a dichas geoformas; se trata de cubetas y suaves depresiones situadas a barlovento de los montículos y lunetas de sus costas (ubicados preferentemente al NE de cada cubeta).

Período Húmedo del Holoceno Medio (*Hypsithermal*)

Este período marcó probablemente una fase de máxima extensión de las lagunas, ello puede deducirse de la existencia de un nivel de terraza lacustre de unos 2 m de altura por encima del nivel actual del agua en la Laguna del Chañar (área de Teodelina) y de una extensa

área similar, con 3 m de altura en la margen N de la Laguna La Picasa.

El tope de la unidad loésica que corona los perfiles del área ha sufrido pedogénesis durante este período, dicho suelo se correlaciona con el suelo enterrado del Holoceno Medio descrito por Iriondo y Kröhling (1995) en la faja loésica pampeana. Dangavs y Mormeneo (2006) también citan la presencia de un paleosuelo generado en esta fase húmeda en el tope de la unidad loésica que margina las lagunas del NE de la provincia de Buenos Aires.

Existen indicios de que también el colector fluvial fue reactivado, pues la Fm Teodelina ha sufrido erosión en las márgenes del mismo (ver Figura 8).

Período Seco del Holoceno Tardío

El episodio morfogenético más importante para el paisaje actual ocurrió durante el clima seco del Holoceno tardío, con formación de grandes dunas parabólicas y longitudinales de orientación S-N y SSO-NNE (Iriondo, 1987; Iriondo y Kröhling, 1995). Un área representativa en el S de Santa Fe se encuentra al NE de la Laguna La Picasa, entre las localidades de San Gregorio, Sancti Spiritu, Christophersen y Colonia Morgan (de aproximadamente 1.600 km²; Figura 2). La altura relativa de los campos de dunas alcanza 10-16 m respecto a la cota del plano horizontal que rodea por el N a la laguna. En general, las dunas alcanzan 1,5 a 3 m de altura relativa y 100 a 300 m de extensión. Estas modificaron la topografía preexistente (mucho más suave) a lo largo de las lagunas Bella Vista, Martín García y Morgan, entre otras localizadas al E de San Gregorio (Santa Fe).

La duna parabólica donde se ha descrito el perfil tipo de la Fm San Gregorio, situada al E de dicha localidad (localmente conocida como “médano La Morocha”) de dirección SO-NE, alcanza 4 m de altura relativa y tiene brazos de 2 km de longitud individual. Esta duna bordea por el NE una laguna de 2 km de diámetro.

Inmediatamente al E de Christophersen y San Gregorio, el campo de dunas se presenta poco disipado, integrado por lomas definidas, de orientación general S-N. Estas alcanzan hasta 250 m de longitud y 5 a 7 m de altura relativa (excepcionalmente hasta 9 m), respecto a las depresiones eólicas adyacentes. A pocos km al O de Christophersen se destaca en el paisaje una duna parabólica limitando por el SO una hoya de deflación. El cuerpo de la duna presenta micromorfología marcada; alcanza 6 m de altura relativa y brazos de más de

100 m de longitud y 35 m de ancho.

Pequeños campos de dunas se hallan al NE del área representativa citada. En la zona de San Eduardo se describieron dos dunas parabólicas con dirección S-N, de 3 a 5 km de ancho y alas de más de 10 km de longitud que se prolongan hacia el S. La altura total de las dunas es de 8 a 12 m sobre las áreas planas circundantes (de edad Holoceno medio). El relieve interno es irregular, con formas menores de 400 a 800 m de longitud y 3 a 5 m de desnivel. El interior de los grandes arcos parabólicos está ocupado por lagunas permanentes con barrancas bien definidas. En el área de María Teresa se formaron cuerpos de arena de 6 a 10 km de largo, 4 a 8 km de ancho con dirección SO-NE y 5 a 10 m de altura relativa; su relieve interno es suave, compuesto por geofomas de 800 a 1.200 m de extensión y 2 a 4 m de altura.

En el área NO de Buenos Aires entre General Pinto y Lincoln se encuentran pequeños campos de dunas del Holoceno tardío, constituyendo un paisaje representado por lomas cortas e irregulares de pocos metros de relieve. Otros campos de dunas parabólicas aparecen próximos al Río Salado, con características típicas en el área entre Vedia y General Arenales. Allí el paisaje está caracterizado por lomas alternantes con depresiones producidas por deflación (actualmente anegadas) y con desniveles relativos de 2 a 4 m. Uno de los cuerpos parabólicos descritos en dicha área presenta 7 m de altura relativa y 3 km de longitud entre extremos (limitando una laguna al SO de la acumulación). Inmediatamente al S de General Arenales aparecen dunas parabólicas de rumbo SO-NE y S-N, de 4 a 7 m de altura relativa y brazos de 1 km de longitud típica. En algunos puntos se presentan dunas adosadas lateralmente.

Las dunas del Holoceno tardío sufrieron un episodio menor de disipación durante el período húmedo medieval o Máximo Medieval (Iriondo y Kröhling, 1995).

Período Seco de la Pequeña Edad del Hielo

La Pequeña Edad del Hielo, coincidente con el período colonial en la Argentina, representa un clima seco dominado en la llanura pampeana por el viento Pampero (Parras, 1943). La actividad morfogenética del viento fue relativamente modesta, aunque se formaron campos de dunas en algunas áreas. En la alta cuenca del Río Salado en Buenos Aires, Hurtado *et al.* (1985) describieron deflación de arena, registrada como Miembro Seré de la Formación Las Lilas. En el sector santafesino de la cuenca, dicha capa de arena aparece hasta el

paralelo de 34°S (Figura 10). Tiene entre 10 y 30 cm de espesor; está formado por arena muy fina de color marrón claro, muy suelta. El depósito se va haciendo discontinuo hacia el NE; en el área de Villa Cañas aparece en manchones de varios cientos de m de extensión, preferentemente en las partes altas del terreno. Las acumulaciones de arena junto a las pendientes laterales del colector de la cuenca estudiada en este trabajo (entre María Teresa y Runciman) evidencian que la deflación estuvo concentrada en los bajos durante este período.

Datos previos (Iriondo y Kröhling, 1995) sugieren una dirección SO-NE para los vientos en un frente de 120 km en el S de Santa Fe (Figura 10). En algunos lugares se formaron campos de dunas de tamaño reducido; uno de éstos aparece en el O de Christophersen, tiene 3 km de longitud y 500 m de ancho, con 2,5 a 5 m de relieve interno y orientación S-N. Su micromorfología es sumamente irregular. Aparece en su máxima expresión en la Estancia Ancalú. Contiene fauna europea (*Bos taurus*, *Equus caballus*), *Ctenomys sp.* y *Lagostomus sp.* Otro campo de dunas se halla en el área de San Eduardo. Está formado por lomas irregulares y definidas, de 1 a 1,5 m de altura relativa y 200 a 250 m de longitud y 50 m de ancho típico, compuestas por arena fina marrón grisácea a marrón anaranjado, suelta.

En el sector SO de la localidad de Sancti Spiritu el paisaje está integrado por varias de las unidades descritas en este trabajo. Allí aflora la Fm Teodelina, representativa de las dunas disipadas del Pleistoceno tardío, la Fm San Gregorio y dunas bien conservadas de arena muy suelta generadas en la Pequeña Edad del Hielo.

Dangavs y Mormeneo (2006) asignan a este período seco la desecación, deflación, precipitación de yeso en ambiente de sabkha en lagos salados, rejuvenecimiento de cubetas, decapitación de suelos y acumulación de los sedimentos loésicos más recientes en el NE de la provincia de Buenos Aires.

ESQUEMA HIDROLOGICO ACTUAL

En el paisaje generado por la secuencia de eventos descritos más arriba, las cabeceras del Río Salado conforman una típica cuenca de llanura, caracterizada por divisorias amplias y bajas (campos de arena holocenos, en este caso), numerosas lagunas y pantanos y una red hidrográfica formada por cañadas interconectadas (Iriondo, 2004). La dinámica hídrica actual está así definida por factores geológicos y climáticos. Desde el punto de vista hidrológico la zona de estudio es una

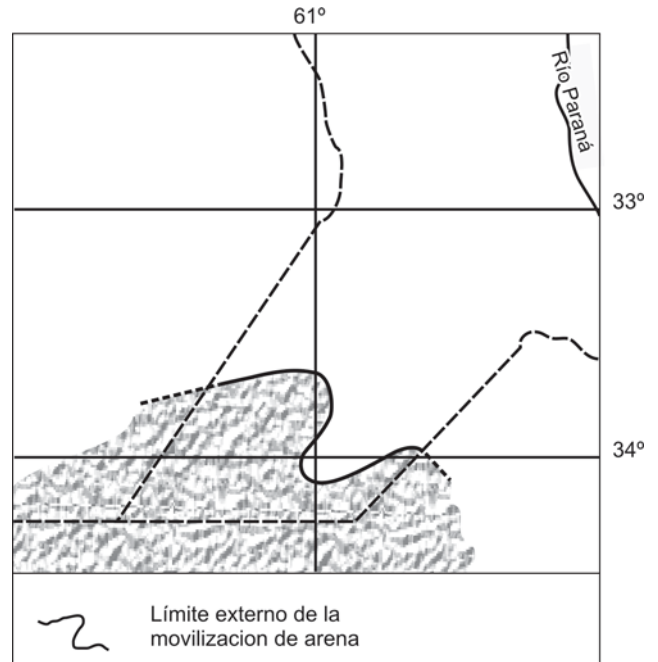


Figura 10. Deflación de arena durante la Pequeña Edad del Hielo, indicando un régimen de vientos similar al del Último Máximo Glacial (tomado de Iriondo y Kröhling, 1995).

Figure 10. Sand deflation during the Little Ice Age indicating a wind regime similar to that of the Last Glacial Maximum (from Iriondo and Kröhling, 1995).

cuenca de llanura. El tema de las divisorias de cuencas de llanura es realmente complejo; una racionalización de este problema ha sido tratado en otras publicaciones (Iriondo, 2004; Iriondo y Drago, 2004). Uno de los resultados obtenidos en este trabajo (utilizando los métodos referidos en ellas) fue el alargamiento y expansión de la superficie de la cuenca del Salado hacia el NO, en comparación con la cartografía existente en los libros de Geografía Argentina.

Entre los factores geológicos son de importancia inmediata la geomorfología eólica y la alta permeabilidad de los sedimentos superficiales (Iriondo, 1986). El primer factor importante es el estilo tectónico, caracterizado por lineamientos de rumbo NE-SO y NO-SE y por pequeños bloques hundidos con dimensiones entre 15 y 70 km². El mayor de éstos es el bloque de Quirno, situado al NE de Villa Cañas. La Laguna Melincué (Santa Fe) es un ejemplo de otro bloque hundido cercano a la cuenca. El segundo factor fue la impronta climática de modelación fluvial del período húmedo y cálido ocurrido en el EIO 3, entre aproximadamente 65.000 y 36.000 años A.P. (Iriondo y Kröhling, 1995; Iriondo, 1999), durante el cual, además de recibirse caudales

alóctonos de las Sierras de Córdoba, la dinámica hídrica formó una red fluvial bien integrada y un nivel de suelo en un paisaje muy plano. Dicho suelo y precipitados posteriores de carbonatos en el mismo nivel forman hoy la base impermeable del agua superficial y freática, limitando el actual sistema hidrológico vinculado directamente con la atmósfera.

La característica fundamental del factor climático en la Pampa es que está formado por ciclos hidrológicos interanuales, es decir que varios años secos sucesivos son seguidos por otros húmedos, en un patrón irregular. Durante los períodos hídricos normales y secos, el escurrimiento superficial en la región es de tipo endorreico hacia bajos y lagunas locales y el agua se evapora e infiltra desde estos cuerpos de agua. En estas condiciones predominan los procesos de transferencia de agua verticales sobre el escurrimiento (Paoli *et al.*, 2005). En los períodos húmedos se produce una elevación generalizada del nivel freático que alcanza la superficie en los lugares más bajos, provocando surgencia y formando bañados. Si los excesos hídricos superan la capacidad de almacenamiento de los bajos y lagunas, éstos desbordan y se concatenan formando líneas temporarias de flujo superficial relativamente concentrado.

El incremento de precipitaciones a partir del 1970-1971 ha producido anegamientos de gran magnitud y permanencia en la región. La proximidad de la freática a la superficie del terreno origina un aumento significativo del potencial de escurrimiento del terreno. Cuando la precipitación cae sobre un sistema saturado el porcentaje de la misma que se transforma en escurrimiento es mayor que el correspondiente a una condición de humedad antecedente normal. En consecuencia, el aumento del nivel freático, además de ser un efecto de la mayor generación de excesos hídricos, se ha convertido en una causa que potencia dicho aumento (Paoli *et al.*, 2005).

Los cuerpos de agua en el S de la provincia de Santa Fe son numerosos y pueden agruparse en leníticos (lagunas y pantanos) y lóticos (cañadas). Estos últimos forman una red integrada, que da origen al cauce fluvial normal del Río Salado precisamente en el límite Santa Fe - Buenos Aires. La cañada más importante comienza junto a Venado Tuerto (33°45' lat. S y 61°55' long. O) y recorre unos 90 km hacia el SE, desembocando en la Laguna del Chañar (Teodelina), situada en el límite interprovincial. Tiene un ancho típico de 900 m y en la misma se han formado varias lagunas de gran tamaño, como Grigera y Las Encadenadas (junto a Villa Cañas). Esta cañada recibe como afluente princi-

pal en su margen izquierda a otra línea de depresiones.

Los *bañados* son cuerpos de agua transitorios que ocupan áreas normalmente subaéreas. Pueden abarcar superficies considerables, de hasta cientos de kilómetros cuadrados; fluyen lentamente pendiente abajo en forma de flujo no encauzado sumamente lento, sin transportar sedimentos ni dejar rastros ulteriores en el paisaje (Iriondo y Drago, 2004). La profundidad típica es de algunos centímetros. En la fase siguiente el agua se concentra lentamente en *cañadas*, depresiones lineales someras y muy anchas, cubiertas normalmente por pajonal y vegetación palustre, donde el agua alcanza una profundidad del orden de 1 m y fluye en régimen laminar. No hay transporte de sedimentos, aunque el caudal de sales disueltas (principalmente cloruros) es considerable. Las cañadas se extienden a lo largo de lineamientos tectónicos, parcialmente modificados por la dinámica fluvial del EIO 3.

Los *pantanos* son cuerpos de agua somera caracterizados por una cubierta continua de vegetación palustre enraizada en el substrato, con parte de la planta dentro del agua y parte emergida. Pueden desecarse en períodos muy secos y sufrir inundaciones generalizadas en los extremos climáticos húmedos, transformándose en lagunas. El mayor pantano de la cuenca está ubicado en la depresión de Quirno, un área rectangular de 70 km², formada en períodos normales por una superficie palustre general con numerosas lagunas de formas redondeadas y botroidales desconectadas entre sí, con diámetros que varían entre 300 y 1.100 m. Estas ocupan de 20 a 30% de la superficie del pantano. Las formas botroidales resultan de la unión de dos o más cuerpos de agua simples (originalmente redondos o elípticos) por la erosión de oleaje; de manera que se trata de una dinámica hídrica avanzada. Varias depresiones similares se encuentran en esta zona, con semejantes elementos geomorfológicos aunque cubriendo superficies menores. Existen rasgos geomorfológicos que indican que Quirno tuvo una fase lagunar durante alguna época del Holoceno.

Una característica frecuente en la hidrología de llanuras es la transfluencia temporaria entre cuencas vecinas en períodos húmedos (Iriondo, 1987). Este caso ocurre aquí en períodos extraordinarios, en los que la cuenca del Río Salado recibe agua de cuencas endorreicas adyacentes (Figura 2).

Desde el punto de vista geomorfológico, y atendiendo fundamentalmente a los procesos genéticos, las lagunas de la región de estudio pueden clasificarse en cuatro grupos:

a) Lagunas originadas por simple surgencia de la

lluvia infiltrada en las dunas vecinas hasta depresiones interduna. No poseen rasgos de acción hídrica. Son indicadoras del cambio climático de las últimas décadas, de subhúmedo a húmedo. Ejemplos: lagunas Gualicó, Martín García y otras sin nombre (lo que precisamente podría indicar un origen muy reciente) al S de Venado Tuerto.

b) Lagunas que ocupan antiguas hoyas de deflación, con lunetas arenosas ubicadas al E y NE, indicando la dirección de los vientos dominantes del O y SO en la época de su formación. Algunas presentan evidencias de erosión por oleaje, con barrancas bien recortadas. Ejemplos: lagunas San Eduardo, Birocco, La Amarga.

c) Lagunas ubicadas en cuencas cerradas formadas en bloques hundidos de origen tectónico. Ejemplos: lagunas La Picasa y Las Tunas (ambas fuera de la cuenca del Río Salado).

d) Lagunas ubicadas en paleocauces. Son un tipo particular de hoyas de deflación excavadas en esas geoforras. Ejemplos: Las Encadenadas y Grigera.

Debido a su escasa profundidad, la dinámica biogeoquímica de las lagunas pampeanas está intrínsecamente unida a las condiciones climáticas. Las sales disueltas presentan concentraciones sumamente variables debido al régimen hidrológico interanual de las mismas. Son en general sistemas alcalinos, con patrones de circulación polimícticos (Fernández Cirelli y Miretzky, 2004). En los períodos secos se produce precipitación de halita y yeso en cristales milimétricos, que son arrastrados por el viento a los terrenos circundantes en aureolas de pocos cientos de metros y redisueltos posteriormente. Los sedimentos químicos más estables son los carbonatos que precipitan en el subsuelo.

De acuerdo con Dangavs y Mormeneo (2006), en las etapas secas del Cuaternario tardío, las lagunas de la cuenca del Río Salado en Buenos Aires funcionaron como lagos salados de tipo playa o sabkha continental, en cuyo seno se produjo la agregación de pelitas como clastos de arcilla, la precipitación intrasedimentaria de yeso y la dolomitización (como en la Laguna Lacombe, Chascomús). Dichos autores diferenciaron cinco depósitos superpuestos de relleno en el fondo de la citada laguna (4 m de espesor), que denominaron Fm Aluvial, asignándole unos 200 años de antigüedad. En un estudio referido a la dinámica de la sílice en la Laguna Chascomús ("Sistema de las Encadenadas de Chascomús"), Miretzky y Fernández Cirelli (2004) concluyen que el 70% de la sílice disuelta ingresa a la laguna con el agua subterránea. Las altas concentraciones de sílice disuelta en el agua subterránea (valor medio de 63

p.p.m.) son controladas, según las autoras, por la disolución de la sílice amorfa, cuyas fuentes son el vidrio volcánico y la sílice biogénica presentes en los sedimentos eólicos pampeanos. La estacionalidad de las mayores contribuciones de sílice disuelta al sistema (por afluentes y por descarga de agua subterránea) no coincide con el tiempo de mayor demanda de producción de diatomeas. La disolución de sílice mineral o la sílice liberada de la superficie de óxidos metálicos podría aportar la sílice disuelta necesaria para el incremento estacional de diatomeas.

De acuerdo con Conzonno y Fernández Cirelli (1988), la prácticamente continua mezcla vertical en las lagunas pampeanas promueve una alta concentración de materia particulada suspendida y baja transparencia. La columna de agua es casi siempre termalmente homogénea, saturada con oxígeno disuelto (OD) y con un alto contenido de materia orgánica disuelta, principalmente sustancias húmicas. Estudios limnológicos (Bustamante *et al.*, 2005) de las lagunas: La Picasa, La Larga, La Infinita, Martín García, Los Patos (ubicadas inmediatamente al SO de la cuenca en estudio) y del pantano de Quirno indican para noviembre del 2002 los siguientes rangos de valores de los parámetros medidos: temperatura del agua: 20.4-27.2°C; OD: 6.8-10.8 mg/l; demanda bioquímica de oxígeno (DBO): 5.1-11.4 mg/l; sólidos totales disueltos (STD): 4622 mg/l (Laguna La Picasa, a 6 m de profundidad) - 1027 mg/l (Quirno, a 4 m de profundidad), pH: 9-9.9. La elevada salinidad registrada en todas las lagunas está asociada a mecanismos de mineralización que se dan como resultado de la interacción agua-suelo y al fenómeno de concentración en las lagunas (Bustamante *et al.*, 2005). Siguiendo a los autores, los parámetros relevados no presentan grandes variaciones de concentración en el tiempo. Los valores de OD son altos debido a la capacidad de reaireación de las lagunas que ocupan gran superficie pero que registran poca profundidad (con velocidad media del viento en la zona de 3 m/s, lo que genera alta turbulencia).

CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones principales surgen del presente estudio:

- Tomando en cuenta la historia geológica cuaternaria reciente de la región, deducida de los datos geomorfológicos y sedimentológicos del presente estudio, las cabeceras de la cuenca del Río Salado de Buenos Aires deben ubicarse en la provincia de Santa Fe, a 80 km de

distancia del límite interprovincial.

- El colector de dicha red es un paleocauce del Río Tercero del Pleistoceno tardío, transformado actualmente en una gran cañada con lagunas interconectadas.

- El paisaje de la región está dominado por geoformas de acumulación eólica, dichas geoformas controlaron su dinámica hídrica durante el Cuaternario tardío.

- Dos unidades sedimentarias eólicas arenosas dominan en la región, las que se definen formalmente en el presente trabajo: Formación Teodelina (parte superior aflorante en perfiles naturales y artificiales) y Formación San Gregorio (en superficie).

- La Fm Teodelina (Pleistoceno tardío) tiene 10 a 12 m de espesor. Está compuesta por limo grueso arenoso y arena muy fina limosa, con modas en 125-250 μm y 53-62 μm . La composición mineralógica de la fracción modal de arenas está dominada por vidrio volcánico, con baja proporción de feldespatos (plagioclasas ácidas), con cuarzo y alteritas subordinados, en su mayor parte de procedencia andina.

- La Fm San Gregorio (Holoceno tardío), está compuesta por más de 7 m de arena muy fina a fina, suelta y de color marrón amarillento. La mineralogía de la fracción modal de arenas está representada por vidrio volcánico, alteritas y feldespatos, con escaso cuarzo. Entre los minerales pesados es notable el porcentaje de especies de procedencia serrana.

- La forma y la distribución de las hoyas de deflación en la región de estudio sugieren dos regímenes de vientos dominantes: O-E (Pleistoceno final) y SSO-NNE (Pequeña Edad del Hielo). Los datos indican un corrimiento hacia el norte de su posición actual (unos 900 km) de la faja de Westerlies durante el Pleistoceno tardío, produciéndose vientos fuertes y secos en el S de la provincia de Santa Fe y NO de la de Buenos Aires capaces de generar las geoformas erosivas y acumulativas descritas para dicho período.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por la *Agencia Nacional de Promoción Científica* (Proyecto N° 7-13513 PICT´ 2003 y Proyecto N° 74 PID´99). Se agradece a los árbitros (Dr. J. Rabassa y Dr. F. Colombo Piñol) por sus sugerencias y comentarios que contribuyeron a mejorar el manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Bagnold, R. A., 1965. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*.

Methuen and Co.Ltd., London, 265 pp.

Bigarella, J., 1979. Dissipation of dunes, Lagoa, Brazil. En: E.D. Mc Kee (Ed.): *A Study of Global Sand Seas*. Geological Survey Professional Paper 1052, Chapter E, 124-134. Washington.

Bustamante, M.A., L. Tarrab, L. di Paolo, J. Weber, J. Haspert y C.M. Angelaccio, 2005. Modelación de la descarga de la laguna La Picasa al río Paraná. *XX Congreso Nacional del Agua Conagua 2005*, Trabajo Extendido en CD (16 pp.). Mendoza.

Carver, R., 1971. *Procedures in Sedimentary Petrology*. Wiley Interscience, New York, 653 pp.

Conzonno, V. y A. Fernández Cirelli, 1988. Soluble humic substances from Chascomús Pond (Argentina). Factors influencing distribution and dynamics. *Archiv für Hydrobiologie*, 111:467-473. E. Schweizer Sc. Publ.

Dangavs, N., 2005. La Formación La Postrera I, II, III y IV de la Laguna Las Barrancas de Chascomús, Provincia de Buenos Aires. *XVI Congreso Geológico Argentino*, Actas 4:115-122. La Plata.

Dangavs, N. y Mormeneo, M., 2006. Geolimnología y paleolimnología de la Laguna Lecombe, Chascomús, provincia de Buenos Aires. *III Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología*, Actas de Trabajos Extendidos, 919-931. Córdoba.

Fernández Cirelli, A. y P. Miretzki, 2004. Ionic relations: a tool for studying hydrogeochemical processes in Pampean shallow lakes (Buenos Aires, Argentina). En M. Iriondo, D. Kröhling y J. Stevaux (Eds.), *Advances in the Quaternary of the De la Plata river basin, South America*. *Quaternary International* 114:113-121.

Hurtado, M., A. Dillon y R. Castillo, 1985. Incidencia de factores pedogenéticos en suelos del partido de Carlos Tejedor. *Primeras Jornadas Geológicas de la provincia de Buenos Aires*, Actas I:23-35, Tandil.

Iriondo, M., 1980. El Cuaternario de Entre Ríos. *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral* 11:125-141. Santo Tomé.

Iriondo, M., 1986. Modelos sedimentarios de cuencas continentales: las llanuras de agradación. *Primer Congreso Latinoamericano de Hidrocarburos Conexpo/Arpel*, Actas I:81-98, Bs. As.

Iriondo, M., 1987. Geomorfología y Cuaternario de la provincia Santa Fe (Argentina). *D'Orbignyana* 4:1-54. Corrientes.

Iriondo, M., 1990a. Map of the South American plains – Its present state. En J. Rabassa (Ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 6:297-308. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam.

Iriondo, M., 1990b. A late Holocene dry period in the Argentine plains. En J. Rabassa (Ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 7:197-218. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam.

Iriondo, M., 1992. Geomorphological Map of South American Plains, Mapa a Escala 1:5.000.000. Grant No. 4127/88 National Geographic Society and PID 95100/88 CONICET, (inédito).

Iriondo, M., 1994. Los climas cuaternarios de la región pampeana. *Comunicaciones del Museo Provincial de Ciencias Naturales «Florentino Ameghino»(N: S)* 4(2):1-48. Santa Fe.

Iriondo, M., 1999. Climatic changes in the South American plains: Records of a continent-scale oscillation. *Quaternary International* 57/58:93-112.

Iriondo, M., 2004. Large wetlands of South America: a model for Quaternary humid environments. En M. Iriondo, D. Kröhling y J. Stevaux (Eds.), *Advances in the Quaternary of the De la Plata river basin, South America*. *Quaternary International* 114:3-9.

Iriondo, M. y E. Drago, 2004. The headwater hydrographic characteristics of large plains: the Pampa case. *Ecology & Hydrobiology* 4(1):7-16.

- Iriondo, M. y D. Kröhling**, 1995. El Sistema Eólico Pampeano. *Comunicaciones del Museo Provincial de Ciencias Naturales «Florentino Ameghino» (N.S.)* 5(1):1-68. Santa Fe.
- Iriondo, M. y D. Kröhling**, 1996. Los sedimentos eólicos del noreste de la llanura pampeana (Cuaternario superior). *XIII Congreso Geológico Argentino; Actas IV*:27-48. Bs. As.
- Iriondo, M. y D. Kröhling**, 2004. «New» types of loess, not related to glaciation. En B. Flemming, D. Hartmann, D. y M. Delafontaine (Eds.), *International Workshop «From Particle Size to Sediment Dynamics»*, Resumen extendido pp. 83-85. HWK Delmenhorst.
- Kröhling, D.**, 1998. Geomorfología y Geología del Cuaternario de la cuenca del río Carcarañá, desde la confluencia de los ríos Tercero y Cuarto, provincias de Sta. Fe y Córdoba. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, 224 pp. (inédita).
- Kröhling, D.**, 1999. Upper Quaternary of the Lower Carcarañá Basin, North Pampa, Argentina. En T. Partridge, P. Kershaw y M. Iriondo (Eds.), *Paleoclimates of the Southern Hemisphere. Quaternary International* 57/58:135-148.
- Kröhling, D. y O. Orfeo**, 2002. Sedimentología de unidades loésicas (Pleistoceno Tardío-Holoceno) del centro-sur de Santa Fe. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología* 9(2):135-154.
- Kröhling, D. e Iriondo, M.**, 2003. El loess de la Pampa Norte en el bloque de San Guillermo. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología* 10(2):137-150.
- Krumbein, W. y L. Sloss**, 1955. *Stratigraphy and Sedimentology*. Freeman & Co. San Francisco, 660 pp.
- Miretzky, P. y A. Fernández Cirelli**, 2004. Silica dynamics in a pampean lake (lake Chascomús, Argentina). *Chemical Geology* 203:109-122.
- Muller, G., 1967.** *Methods in Sedimentary Petrology*. E. Schweizerbartische Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 283 pp.
- Nickling, W.**, 1994. Aeolian sediment transport and deposition. En K. Pye (Ed.), *Sediment transport and depositional processes*. Blackwell Scientific Publications, pp.293-350. Oxford.
- Paoli, C., R. Giacosa, J. Collins, D. Brea y D. Sosa**, 2005. Proyecto de descarga de la laguna La Picasa al Río Paraná, aspectos hidrológicos – hidráulicos. *XX Congreso Nacional del Agua CONAGUA 2005*, Trabajo Extendido en CD (21 pp.). Mendoza.
- Parras, P.**, 1943. *Diario y derrotero de sus viajes*. Ed. Solar, Bs. As., 251 pp.
- Petit-Maire, N., J. De Beaulieu, M. Iriondo, G. Boulton y T. Partridge**, 1999. Maps of the World environments during the two last climatic extremes. Commission of the Geological Map of the World/Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radiactifs. París.
- Wentworth, C.**, 1922. Scale of grade and class terms for clastic sediments. *Geology* 30:377-392.