



DESCRIPCION GEOLOGICA Y EVOLUCION DEL DELTA DEL RIO SAN PEDRO, SALAR DE ATACAMA, CHILE.

P. Bevacqua*

INTRODUCCION

Depósitos deltaicos recientes, con paleomárgenes de costa, han sido reconocidos en varios salares del norte de Chile, destacando los de Huasco, Tara, Coposa, Ollagüe y Laguna Tuyajto¹. Varios de estos deltas denotan un progresivo traslado de los márgenes del cuerpo de agua que los generó, desde el extremo apical al distal, como producto del descenso de los niveles de agua. En la actualidad, ninguno de estos deltas es significativamente activo. Escasos son los conocimientos estratigráficos y sedimentológicos acerca de estos depósitos, habiéndose sólo descrito algunos rasgos geomorfológicos.

El Río San Pedro aporta el 60% del total de la recarga superficial que alimenta el Salar de Atacama, 2ª Región de Chile, con un caudal promedio de 1,02 m³/s. Desemboca en la parte norte de la depresión del Salar, aguas abajo de la confluencia de los ríos Grande y Salado. Su cauce penetra el perímetro noroccidental del Salar hasta alcanzar el Núcleo Salino (Figura 1). Se ramifica en 3 drenajes principales, a su vez divididos en otros menores, estacionalmente activos. El más oriental de los drenajes principales genera esporádicamente un extenso cuerpo de agua, localmente denominado «Laguna Blanca».

Una secuencia formada por limos y arcillas, reconocida hasta 30 m de profundidad, se emplaza alrededor de los cauces del río. Capas de sulfato con y sin fango orgánico negro, con abundantes diatomitas y residuos de algas rojas y verdes, además de lentes de arena, se intercalan entre los sedimentos finos.

La disposición tanto horizontal como vertical de estos sedimentos sugiere un depósito deltaico, actualmente cubierto por costras de cloruro que -por su color pardo oscuro- resulta claramente identificable en tomas aéreas y satelitales.

Este trabajo intenta contribuir al conocimiento de los depósitos deltaicos formados en cuencas endorreicas asociadas a facies evaporíticas, del norte de Chile.

RASGOS GEOMORFOLOGICOS E HIDROGEOLOGICOS

El Delta presenta una forma triangular, con un eje longitudinal orientado NNW-SSE y ángulo apical de aproximadamente 35°. Su longitud es de 20 km, su ancho máximo 14 km y una inclinación promedio de 0.06% hacia el sur.

La mayor parte de la cobertura del Delta está formada por las variedades «a», «b» y «c» de costras de cloruro «tipo Delta», según una nomenclatura definida para la geología de la superficie de todo el Salar de Atacama². Arcas menores se componen de cloruros "tipo Núcleo", "Cloruro en costra de superficie plana", "costras de sulfatos" y "sulfatos con cloruros".

Entre las estructuras salinas "mayores" (superiores a 5 m de diámetro) se identifican pozas, aureolas zonadas, "planicies de sumideros", y márgenes rectos sin detritos. Estructuras «menores» frecuentemente halladas son las copas y conos de sal, tubos de disolución, estalactitas salinas, pináculos de sal, agrietamientos poligonales y cordones salinos. Todas estas estructuras se forman en costras de cloruros, excepto las aureolas salinas compuestas por sulfatos, rodeadas por costras de cloruros.

Existen varios acuíferos en el Delta: se componen de depósitos evaporíticos y sedimentos clásticos, principalmente cloruros de alta porosidad y sulfatos granulares (gipsarenistas), separados por estratos limo-arcillosos con permeabilidades de 10⁻⁷ a 10⁻⁸ cm/s. Un extenso acuífero confinado se emplaza bajo casi toda la superficie, a una profundidad de 80 a 150 cm. Entre 20 y 50 cm existe, en ciertas áreas, un acuífero freático que genera una mayor rugosidad y menor proporción de sedimentos finos incorporados a las costras de cloruro. Los niveles de agua manifiestan una fluctuación en el ciclo diario y anual, debido a las variaciones barométricas y de recarga. Otro acuífero artesiano, confinado a unos 27 m de profundidad, posee un carácter surgente en el extremo distal del Delta: origina las «aureolas zonadas» y «planicies de sumideros», además de extensos depósitos de sulfatos granulares.

*: General Blanche 9548, Dpto. 21. Las Condes, Santiago.

El total de sólidos disueltos de las salmueras, varía significativamente entre los extremos apical y distal, con concentraciones de 20 a 336 g/l; sus densidades son 1,01 a 1,23 g/cm³ respectivamente. Durante las crecidas, disminuyen aún más los rangos inferiores. Las salmueras del sector centro-sur poseen altos contenidos en Ca y Na, siendo bajos en Mg, K, Li, SO₄ y H₃BO₃, respecto a las salmueras del Núcleo Salino.

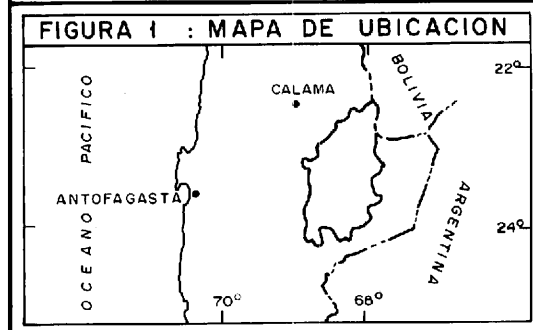
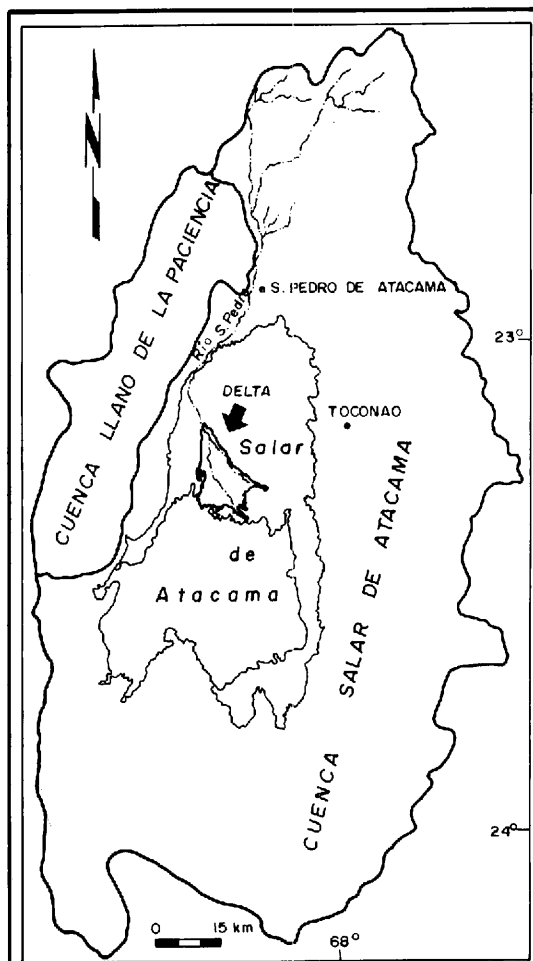
La morfología de la superficie del Delta, en particular su textura y microrelieve, depende principalmente de los siguientes factores:

1. Presencia de un acuífero libre, además del confinado.
2. Inundación de las costras producto de crecidas del Río San Pedro y ocasionalmente por la vertiente de Tambillo, situada inmediatamente al W.
3. Tiempo transcurrido desde la inundación anterior, debido al progresivo desecamiento que afecta a las costras.
4. Ascenso capilar a través de capas de sedimentos finos, provocando la depositación de halita.
5. Disolución por aguas de lluvia de la superficie de las costras de cloruros.
6. Ascenso de aguas desde el acuífero artesiano, por la ausencia local de sedimentos confinantes, provocando la disolución de costras de cloruro.

ESTRATIGRAFIA SUBSUPERFICIAL

Hasta una profundidad de 30 m, el Delta se compone de arcillas y limos (60%), yeso mayoritariamente mezclada con materia orgánica(30%), arena y halita (10%). Hacia el borde distal, se interdigitan estratos de esta composición con estratos de yeso (Fig.2). La estratigrafía subsuperficial del Delta (hasta 2,5 m de profundidad), se describe mediante la definición de 5 variedades de sedimentos, cuyas características son resumidas a continuación.

1. Costra superficial de cloruros. Su potencia es progresivamente mayor hacia el extremo distal, compuesta por halita y presentando gran abundancia de cavidades. Entre 1,0 y 1,5 m de profundidad y con un espesor de 50 cm, se halla -en el extremo SE- una segunda capa de cloruros separada de la primera por arcilla.
2. Arcillas y limos. Estratos de esta composición se extienden por todo el Delta en una proporción promedio de 30%, si bien son particularmente abundantes (>40%) en el sector centro-distal. Allí se ha reconocido un nivel guía con un alto grado de selección (>97%) y una baja permeabilidad, denominado «Arcilla Superior». En el extremo distal los estratos de arcilla se interdigitan con sulfatos y cloruros. Análisis mineralógicos demostraron que la fracción de arcilla está principalmente compuesta por montmorillonita (40%), muscovita y/o illita (35%) y clorita (18%). Granos de cuarzo, plagioclasa y feldspatos



potásicos forman -entre otros- la fracción arenosa, progresivamente más abundante hacia el N.

3. Arenas medias y finas. Representan, en los sectores central y apical, entre 30 y 50% de los estratos. Las capas de arena son de limitada extensión horizontal (generalmente inferiores a 1.000 m), con potencias que varían entre algunos centímetros a un metro. Su mineralogía

corresponde a cuarzo, plagioclasa, feldespatos potásicos y biotitas; la matriz incluye frecuentemente carbonato de calcio. En el sector distal prácticamente no se hallaron lentes de arena.

4. Sulfatos. Se distribuyen predominantemente en el sector distal y centro-occidental del Delta. Su mineralogía corresponde a yeso y anhidrita subordinada con textura granular, tipo gipsarenita. En el sector distal existen áreas extensas donde afloran potentes cuerpos de yeso, dispuestos hasta profundidades desconocidas.
5. Fangos orgánicos. Se presentan mezclados con yeso y se distribuyen predominantemente en un área con forma de arco, emplazado a lo largo del margen distal. Son de color negro, olor algo sulfuroso y textura pastosa. La materia orgánica es de origen algal, con una fracción importante de basanita y carbonato (según análisis de Rayos X). A veces la materia orgánica está mezclada con arcilla y arena.

EVOLUCION DEL DELTA

La «Zona del Delta», definición otorgada al área cubierta por los afloramientos de los depósitos ya descritos, representa la etapa final de acumulación de sedimentos clásticos transportados por el Río San Pedro. Su distribución triangular corresponde a la «forma verdadera de Delta», según la clasificación de THORNBURY³. Sin embargo, esta forma representa probablemente sólo la etapa más reciente, ya que los estratos situados hasta 2,5 m de profundidad denotan una forma de abanico abierto. La progresiva reducción del ángulo apical se interpreta como una disminución de los aportes detríticos. De hecho, la etapa actual refleja una actividad depositacional mínima, con transporte de sedimentos sólo cuando ocurren crecidas significativas del Río San Pedro. Este efecto se debe tanto a razones climáticas como al uso para fines agrícolas de las aguas. Esta situación favorece los procesos de sedimentación química, con la consecuente generación de costras de sulfatos y cloruros; éstas cubren actualmente la casi totalidad del Delta, sin incluir los tributarios estacionalmente activos.

En el sector de las lagunas de Tebinquiche y Cejar, al norte del Delta, se han descrito potentes capas de arcilla con algunas intercalaciones de arena y carbonatos², los que posiblemente representan depósitos deltaicos anteriores. La migración del cauce del río hacia el centro del Salar, mediante el desvío, hacia su periferia, se habría originado a consecuencia de la progresiva colmatación de la cuenca y el desplazamiento de los cuerpos de agua.

Las capas frontales, con inclinación hacia el sentido de avance del Delta, y las dorsales, de granulometría gruesa -estructuras deltaicas definidos por GILBERT y por BARRELL⁴ no han sido identificados en este Delta. Los

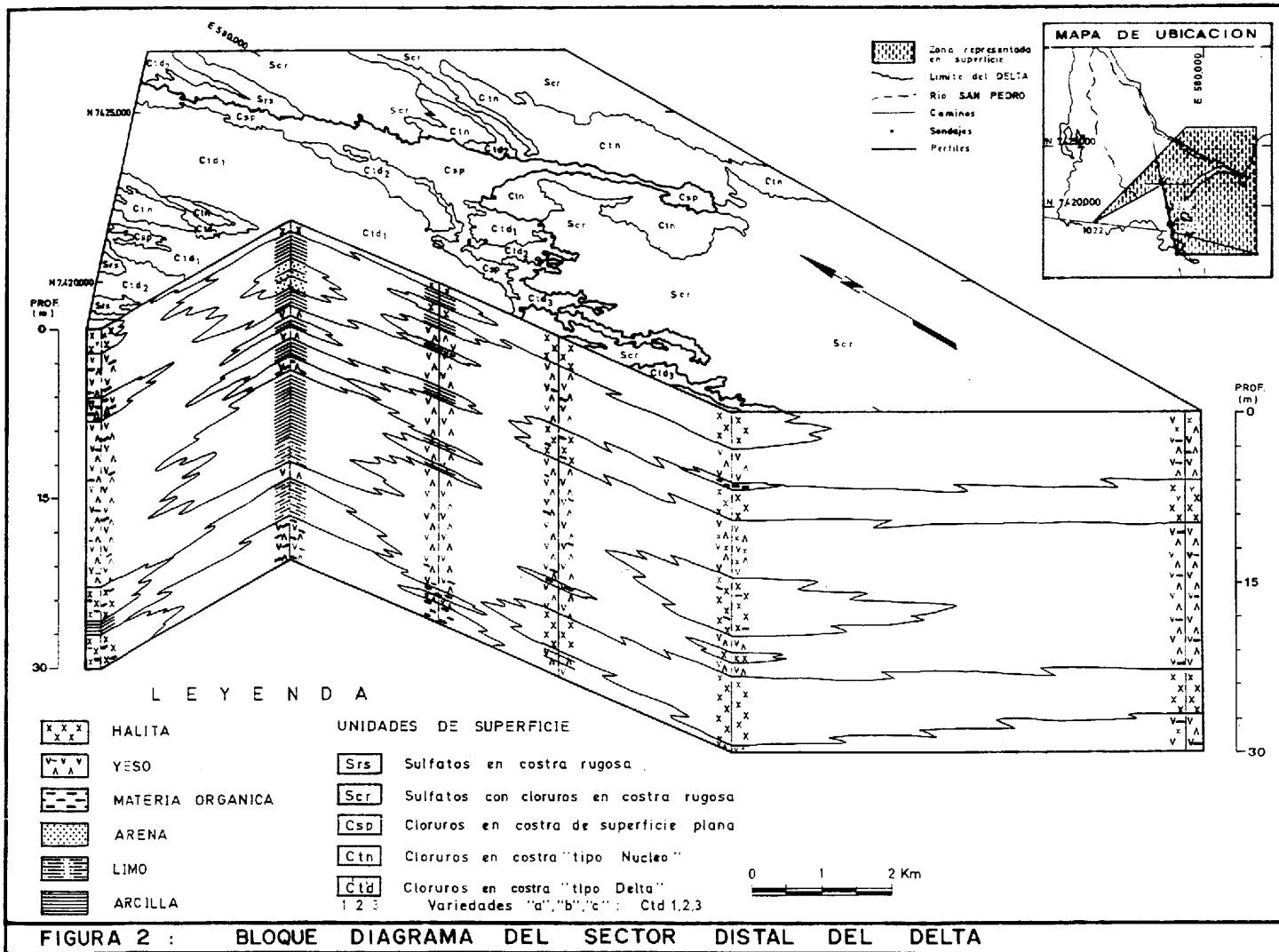
depósitos descritos son interpretados como capas basales, debido a su granulometría muy fina y disposición subhorizontal.

El transporte predominante debió haber sido fluvial, siendo esto lo más habitual en medios lacustres; el oleaje tiene una importancia muy secundaria. Por lo tanto, el Delta del Río San Pedro pertenece al «dominio fluvial», según la clasificación de BROUSSARD⁵. Los procesos de la cuenca receptora tienen -en este caso- una importancia menor que los procesos determinados por las características de la cuenca de drenaje. Esta particularidad se asigna, según la clasificación de FISHER *et al.*⁴, a deltas «altamente constructivos», los que pueden ser elongados o lobados. Este Delta se asimila a la segunda variedad, debido a su forma general, distribución de sus facies y mayor número de tributarios. La distribución de los depósitos arenosos, responde a las características del «Tipo 1» de la clasificación de COLEMAN y WRIGHT⁵, basada en la interpretación del régimen deltaico y el análisis multivariado de sus parámetros. Esta se caracteriza por formarse en medios con baja energía de oleaje y mareas, reducido talud y depositación predominante de sedimentos finos.

Durante la desglaciación ocurrida entre el Wisconsin y el Holoceno, 13.000 a 10.000 años A.P., la que siguió a la Glaciación Puna (28.000 a 14.000 años A.P.), se habrían producido los más recientes alzamientos de niveles lacustres en la región de los Andes Centrales. Existen registros en Bolivia -período Tauca⁶- y en el N de Chile, en cuencas tales como Huasco, Carcote, Ollagüe, Coposa, Tara, Pujsa, Aguas Calientes, Quisquiro y Punta Negra⁷. Otra situación ocurrió en la Puna argentina, donde los mayores niveles lacustres se habrían originado durante la glaciación, producto de una mayor pluviometría⁸. Estos fenómenos regionales debieron también haber afectado al Salar de Atacama, generándose probablemente lagunas en el sector norte del Núcleo, sin que se hallan preservado sus palcosiberas. Simultáneamente, durante el período de desglaciación, el Delta habría recibido un gran aporte de sedimentos, representando la etapa más activa de acumulación de estos depósitos. Esta hipótesis debería ser comprobada mediante dataciones de estratos conteniendo materia orgánica y cenizas volcánicas.

ANALISIS DE LOS PARAMETROS DE CUENCAS.

Las características del sistema de drenaje del Río San Pedro y el área norte del Salar, generan los parámetros de cuenca del Delta. Durante su etapa activa, habría existido un cuerpo de agua con características similares a la actual Laguna de Tebinquiche en el norte del Salar y un mayor caudal del Río San Pedro. Las observaciones acerca de las



variables principales del régimen de las cuencas de drenaje y receptora pueden considerarse como válidas hasta unos 30 m de profundidad y constituyen las interpretaciones finales de las condiciones de formación del Delta.

(I) Cuenca de drenaje

1. La diferencia de elevación entre el Salar y el extremo superior de la cuenca es de 2.700 m, con una pendiente promedio de 3%. Estos valores representan un cauce con alta energía de transporte.
2. La parte baja de la cuenca (>3.000 m s.n.m.) se compone de rocas sedimentarias de fácil erosión. Son mayoritariamente rocas detrítico-evaporíticas de la Formación San Pedro (Olig.-Mioc. Inf) y tobas del Grupo San Bartolo (Mioc. Sup). Las secciones media (3.000-4.000 m) y alta (>4.000 m) tienen un sustrato de rocas volcánicas de mayor resistencia a la erosión. Por lo tanto, se ha producido un gran volumen de aporte detrítico al cauce del Río.
3. El caudal de agua transportado es muy variable de una estación del año a otra, debido al clima Desértico Marginal de Altura imperante en el área. Las precipitaciones provocan crecidas de gran envergadura que actualmente pueden representar de 1 a 10% del volumen total de agua escurrida durante un año. Estos eventos provocan un arrastre de sedimentos de granulometría significativamente más gruesa que aquellos acarreados durante el resto del año. No obstante, la sección terminal del Río, dispuesta en la depresión del Salar, manifiesta escasa turbulencia y reducida velocidad de transporte.
4. El modo promedio de transporte parece tener lugar mediante los procesos de suspensión viscosa y coloidal.

(II) Cuenca receptora

1. El total de sólidos disueltos contenidos en las aguas del Río San Pedro son, en promedio, de 36.000 ppm. Las lagunas tienen aproximadamente 150.000 ppm y las salmueras del Núcleo unos 330.000 ppm. Esto define un régimen "hipopónico", según la clasificación de BATES⁴, lo que habría provocado una floculación de la carga suspendida de sedimentos y una diseminación en forma de "pluma" en el sector donde el agua ingresaba a la laguna.
2. El cuerpo de agua debió tener una forma irregular y aguas muy someras, estando situada en la parte norte del Núcleo; coincidía aproximadamente con la ubicación de los depósitos de sulfato y fango orgánico. No se registran paleoriberas que precisen mejor su perímetro.
3. El régimen de energía de la cuenca receptora debió ser débil por el poco espesor del agua. Los promedios mensuales de velocidad del viento, en el Salar, varían aproximadamente entre 100 y 330 km/día, aún cuando

los registros instantáneos son mucho mayores.

4. La velocidad de subsidencia del Delta se enmarca en el contexto de la depresión del Salar y resulta, por lo tanto, significativa. Sin embargo, no se conoce la magnitud propia de este fenómeno en el referido sector.

REFERENCIAS

1. STOERTZ G. y ERICKSEN G. 1974. Geology of salars in northern Chile. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 811. 65 p.
2. BEVACQUA, P. 1992. Geomorfología del Salar de Atacama y estratigrafía de su Núcleo y Delta, Segunda Región de Antofagasta, Chile. U. Católica del Norte, Dpto. de Ciencias Geológicas, Memoria de Título (inédito), 284 p.
3. THORNBURY, W. 1966. Principios de geomorfología. Segunda Edición, Edit. Kapelusz S.A. 643 p. B. Aires.
4. ELLIOTT, T. 1986. Deltas. In Sedimentary environments and facies; READING, H.G. (editor). Blackwell Scientific Publications. p. 97-142. Oxford.
5. MIALL, A.D. 1979. Deltas. In Facies models; WALKER R. (editor). Geoscience Canada. Geol. Assoc. of Canada. p. 43-56. Hamilton.
6. LEVANU, A., FORNARI, M. y SEBRIER, M. 1984. Existence de deux nouveaux épisodes lacustres quaternaires dans l'Altiplano Péruvo-Bolivien. Cah. O.R.S.T.R.O.M., ser. Géol., vol. XIV, N° 1. p. 103 - 114.
7. OCHSEIUS, C. 1986. La glaciación Puna durante el Wisconsin, desglaciación y máximo lacustre en la transición Wisconsin-Holoceno y refugios de megafauna postglaciales en la Puna y Desierto de Atacama. Revista de Geografía Norte Grande. N° 13. p. 29-58. Santiago.
8. IGARZABAI, A. 1991. Evaporitas cuaternarias de la Puna Argentina. In Génesis de formaciones evaporíticas, Modelos andinos e ibéricos; PUEYO, J.J. (coord.) U. de Barcelona. p. 333-373. Barcelona.