

Sísmica de reflexión de alta resolución en el estudio del Cuaternario de áreas de pie de monte

Gustavo GONZÁLEZ BONORINO¹, Joseph I. BOYCE² y Berkant B. KOSEOGLU³

¹Instituto Geonorte-CONICET, Univ. Nac. de Salta, Buenos Aires 177, (4400) Salta, Argentina. FAX 0387 4255483;
E-mail: bonorino@ciunsa.edu.ar

²Dept. of Geography and Geology, McMaster University, 1260 Main St. W, Hamilton, ON L8S 4M1, Canadá

³Geophysics Division, Dept. of Physics, Univ. of Toronto, Toronto, ON M5S 1A7, Canadá

RESUMEN. Se realizaron varias pruebas piloto con sísmica de reflexión de baja profundidad en depósitos de abanicos aluviales distales en la provincia de Salta, Argentina. Las pruebas incluyen dos áreas con características de subsuelo contrastantes. En el sector nororiental de la provincia, los depósitos del extenso abanico aluvial del Bermejo son arenosos y macizos, casi sin intercalaciones arcillosas; la napa se encontraba a más de 40 m de profundidad al tiempo del estudio. La otra zona de prueba se ubica al sur de la ciudad de Salta, donde coalescen abanicos aluviales pequeños que rellenan el valle de Lerma con depósitos de arena y grava, los cuales en los tramos distales se interdigitan con potentes capas arcillosas; la napa en esta área se hallaba a una profundidad mayor de 20 m al momento del estudio. La operación sísmica empleó un sismógrafo Geometrics R24 con 24 canales activos que se aumentaron a 48 mediante un "roll-over switch", alcanzando un máximo de cobertura de 1200%. Se probaron dos fuentes de sonido: una masa de 5 kg y una escopeta calibre 12. Principalmente por razones operativas se eligió como fuente la masa. Las pruebas en el abanico del Bermejo dieron registros de baja calidad, probablemente debido a la rápida pérdida de energía en las áreas poco consolidadas y secas. Localmente, sin embargo, pudieron distinguirse tres unidades sísmicas y el techo del Terciario posiblemente fue detectado. Las pruebas en eje del valle de Lerma dieron registros sísmicos de excelente calidad. Se distinguieron cuatro unidades sísmicas. Un reflector débil a aproximadamente 220 msec coincide con un cambio de las velocidades a unos 2500 m/seg y puede corresponder con el techo del sustrato terciario. Una potente capa de arcilla a una profundidad de 25 a 50 m puede claramente mapearse como un acuitardo. Los resultados de este estudio piloto demuestran que la sísmica de reflexión de poca profundidad puede ser aplicada con provecho en el noroeste de la Argentina para obtener imágenes del subsuelo en ambientes de abanicos aluviales distales.

Palabras clave: *Sísmica, Estratigrafía, Cuaternario, Salta*

ABSTRACT. *Shallow, high-resolution seismic reflection in the study of the Quaternary in foothill areas.* Several trial shallow seismic reflection surveys were carried out in distal alluvial fan settings in Salta Province, Argentina. The tests span two areas with contrasting subsurface characteristics. In the north-eastern sector of the province, the extensive Bermejo alluvial fan deposits are sandy and massive, with almost no clay intercalations; the water table in this area was located below a depth of 40 m at the time of the survey. The other survey area is located south of Salta City, where small, coalescing alluvial fans fill the Valle de Lerma with sandy and gravelly deposits that in the distal, axial reaches interfinger with thick clayey beds; the water table in this area was located below a depth of 20 m at the time of the survey. Seismic operation involved a Geometrics R24 seismograph with 24 active channels that were incremented to 48 using a roll-over switch, providing a maximum 1200% subsurface coverage. Two seismic source types were tested: a 5 kg sledge hammer and a 12-gauge down-hole seismic gun. Mainly due to operational considerations the hammer source was finally chosen. Tests on the Bermejo fan generally resulted in poor quality seismic records, likely due to rapid loss of energy through the unconsolidated, dry sands. Locally, however, three seismic units could be distinguished and the top of the Tertiary bedrock was possibly mapped. Tests along the axis of the Valle Lerma resulted in excellent quality seismic records. Four seismic units were distinguished. A weak reflector at about 220 msec marks a shift to velocities of around 2500 m/s and may correspond with the top of Tertiary bedrock. A thick clay unit at 25-50 m depth can be clearly mapped and acts as an aquitard. The results of this pilot study show that shallow seismic reflection can be applied profitably in NW Argentina for subsurface imaging in distal alluvial fan environments.

Key words: *seismic, stratigraphy, Quaternary, Salta*

Introducción

La mayor parte de la población en la Argentina está asentada sobre potentes depósitos sedimentarios del Cuaternario. De estos depósitos se obtiene agua para riego y consumo y en estos depósitos se entierran va-

riados tipos de residuos. Tanto la extracción de agua como la disposición de residuos serán más eficientes cuanto más sepamos de la geometría y distribución espacial de los acuíferos y acuitardos. Esto implica conocer en detalle la estratigrafía del depósito cuaternario, incluyendo no sólo la superposición de los cuerpos

sedimentarios sino también sus terminaciones laterales y sus heterogeneidades internas.

El mapeo geomorfológico, tradicional en áreas de llanura, es insuficiente para estos fines. Los perfiles expuestos en cortes naturales y artificiales rara vez alcanzan profundidades de interés. Los registros de perforación de pozos para agua sin duda son más útiles pero son puntuales y costosos. Como en la exploración petrolera, es recomendable preceder la etapa de perforación por un exhaustivo estudio geofísico.

Una poderosa herramienta de geofísica para la investigación del Cuaternario es la sísmica de reflexión adaptada para profundidades someras. La sísmica de reflexión brinda registros continuos del subsuelo útiles en hidroestratigrafía. Más específicamente, la sísmica de reflexión sirve para definir los límites verticales y laterales de los acuíferos y acuitardos y hacer inferencias sobre la conectividad hidráulica de acuíferos vecinos, antes de la perforación de pozos, o con escasos pozos. La sísmica de alta resolución a baja profundidad ha sido aplicada a problemas diversos como la evaluación de repositorios de residuos (Boyce y Koseoglu 1996), el mapeo del Cuaternario bajo cuerpos de agua (Haeni 1986) y otros. El presente trabajo resume los resultados de un estudio piloto con sísmica de reflexión en el Cuaternario de la provincia de Salta, con el propósito de difundir el potencial de este método, así como resaltar algunas de sus limitaciones.

Sísmica de reflexión de poca profundidad

La sísmica de reflexión tiene una larga y fructífera historia en la exploración por hidrocarburos. En esa actividad las profundidades de interés comúnmente se hallan a varios kilómetros por debajo de la superficie terrestre, en estratos consolidados, y es necesario seleccionar fuentes de sonido y receptores cuyas características optimicen el registro sísmico en esos ambientes. El estudio del Cuaternario, en cambio, requiere concentrar la investigación en profundidades someras, generalmente unos pocos cientos de metros por debajo de la superficie, como máximo, y debe tratar con materiales detríticos poco consolidados. Los principios básicos de la sísmica de reflexión son válidos tanto a profundidades someras como profundas pero ciertas particularidades del comportamiento de las ondas sonoras hace necesario que la fuente de sonido, los receptores y en general el modo de operación sea marcadamente diferente en cada caso.

La resolución vertical entre dos reflectores aumenta a medida que decrece la longitud de la onda; la máxima resolución es igual a un cuarto de la longitud de onda. La longitud de onda está dada por el cociente entre velocidad y frecuencia de la onda. El problema es que existe una relación inversa entre la energía de la emisión, que gobierna la profundidad de penetración de las ondas, y la longitud de onda, que determina la reso-

lución. En la exploración por petróleo se requiere una alta energía de emisión para alcanzar las profundidades de interés, lo cual obliga a trabajar con frecuencias bajas (5-100 Hz) y resoluciones verticales en el orden de varios metros. A profundidades someras, como se dan en el estudio del Cuaternario, la energía puede ser menor y la frecuencia mayor. Así, pues, en depósitos poco consolidados, con velocidades de propagación bajas (1-3 km/seg), frecuencias de 100-300 Hz permiten resoluciones verticales menores de 1 metro.

Fuente de sonido

Una adecuada fuente de sonido es esencial para el éxito de una exploración por sísmica de reflexión somera (Hunter *et al.* 1987). Miller *et al.* (1986) compararon sistemáticamente el rendimiento de quince distintas fuentes de sonido en un área cercana al litoral marino donde la freática estaba sólo a 1 m de profundidad y el subsuelo es arcilloso. Estas condiciones son, en principio, ideales para la obtención de un excelente registro sísmico. Posteriormente, Miller *et al.* (1992) llevaron a cabo una comparación similar en terreno arenoso con la freática a más de 30 m de profundidad, es decir, condiciones poco favorables a la propagación de las ondas sonoras. El rendimiento se midió por la energía de la onda reflejada. Teniendo en cuenta la relación entre rendimiento, costo de adquisición o construcción y facilidad de transporte y operación, se puede concluir de los experimentos de Miller *et al.* (1986; 1992) que las dos fuentes de sonido generalmente más convenientes son (a) el golpe de una masa sobre una placa de metal y (b) la explosión de un cartucho de escopeta en un hoyo perforado en el suelo. Miller *et al.* (1986; 1992) emplearon una masa de 7 kg y una placa metálica de peso similar apoyada contra el suelo, y disparos de escopeta de diverso calibre.

Procesamiento de los datos

La construcción de un perfil sísmico a partir de los registros de campo requiere un procesamiento para depurar la recepción, reforzar las señales significativas y eventualmente para pasar del dominio distancia-tiempo al dominio distancia-profundidad. En general, los pasos que se siguen son los siguientes:

1. Conversión de los datos de campo del formato SEG-2 al SEG-Y
2. Edición manual y eliminación de las malas trazas y selección de los primeros arribos
3. Corrección estática y por efecto del suelo en base a los primeros arribos de refracción
4. Separación de las trazas en conjuntos de punto central común (CMP), filtrado de bandas (paso de bandas 90-650 Hz) y deconvolución para balancear el espectro y eliminar señales de baja frecuencia, y filtrado f-k para

eliminar ondas superficiales y aéreas de baja velocidad

5. Análisis de espectro de velocidad cada quinto o décimo punto central común para determinar las velocidades de NMO («normal moveout»; diferencia en tiempo entre los arribos desde un mismo reflector a un geófono situado sobre la fuente y otro lejano de la fuente; esta diferencia permite estimar la velocidad media de propagación de la onda)

6. Corrección por NMO, apilamiento («stacking») de los puntos centrales comunes (máximo 1200 %) y corrección por correlación cruzada estática residual

7. Filtrado de bandas, balance de ganancia e impresión de la sección procesada.

Resultados

Operación

En este estudio se utilizó un sismógrafo Geometrics R24 de 24 canales y un tendido de 48 geófonos de 50 Hz espaciados 5 m, para dar una resolución horizontal de 2,5 m. Como método de registro se empleó el de punto central común («common mid-point» o CMP; Mayne, 1962; Knapp y Steeples, 1986a, b), alcanzando una cobertura del 1200% en las secciones procesadas. Este método implica un ajuste en el tiempo de arribo de las ondículas para simular una incidencia vertical sobre un punto dado en profundidad, y la posterior combinación de todas las ondículas provenientes de un mismo punto de reflexión. En la práctica, el método CMP consiste en desplazar incrementalmente la fuente de sonido y los receptores a lo largo del tendido, con el propósito de obtener reflexiones redundantes superpuestas que refuercen las señales en fase y minimicen el ruido. Steeples y Miller (1991) y Yilmaz (1987) dan una discusión pormenorizada acerca de los métodos para adquirir y procesar datos por la estrategia del CMP.

En cada sitio, antes del inicio del registro, se llevaron a cabo pruebas de «walk away» para determinar el desfase entre fuente y receptor necesario para optimizar la ventana de adquisición de datos (Hunter *et al.* 1984; Knapp y Steeples, 1986b). Se probaron desfases de hasta 25 metros. El desfase óptimo varió entre 0 y 10 m, es decir hasta dos veces el espaciado entre geófonos.

Para el presente estudio se probaron las dos fuentes de sonido más eficientes: masa y explosivos. Se utilizó una masa de 5 kg y una placa de aluminio de 20x20x3 cm. En cada sitio se apilaron («stacked») cinco o más golpes para mejorar la relación señal/ruido. Este método es de fácil y rápida aplicación. El principal inconveniente de la masa es que genera fuertes ondas superficiales y aéreas que interfieren con las señales de registro. Hasta cierto punto estas interferencias pueden filtrarse.

La fuente explosiva es de aplicación más compleja. Primeramente se requiere perforar un pozo de aproximadamente 1 m de profundidad para que la explosión

ocurra por debajo de la capa de suelo. Estos pozos se hicieron con un barreno de mano. El pozo se llenó con agua para dar un medio elástico trasmisor del sonido y también para contener posible eyecta. Como carga explosiva se utilizaron cartuchos calibre 12 sin munición. El cartucho se colocó en una recámara en el extremo de un tubo de acero que se introdujo hasta el fondo del pozo. Una vez emplazado el cartucho, una barreta con punta aguzada ofició de percutor. Pullan y MacAulay (1987) detallan la construcción de un detonador. La operación sísmica con explosivos es un 30 a 50 % más lenta que con la masa.

En nuestro estudio se ensayaron ambos métodos en varias localidades para evaluar su eficiencia como fuentes de sonido. La figura 1 muestra los espectros de amplitud obtenidos en La Isla. Ambos tienen distribuciones similares, con picos a 180 Hz y 120 Hz, pero la resolución de los picos de frecuencia es mejor con explosivos. No obstante, dada la dificultad para taladrar en los suelos endurecidos que caracterizan las áreas de prueba, y dada la mejora poco significativa del registro con explosivos, se optó por emplear la masa. Con la masa, la velocidad de avance fue de 1500 m por día, con cinco golpes por estación.

Registros

Las pruebas de campo se llevaron a cabo durante septiembre de 1997 en dos zonas de la provincia de Salta: (a) Hickman-Dragones, en el Departamento San Martín, y (b) valle de Lerma, Departamento Capital (Fig. 2). Estas dos zonas fueron elegidas por las características contrastantes de los depósitos del Cuaternario.

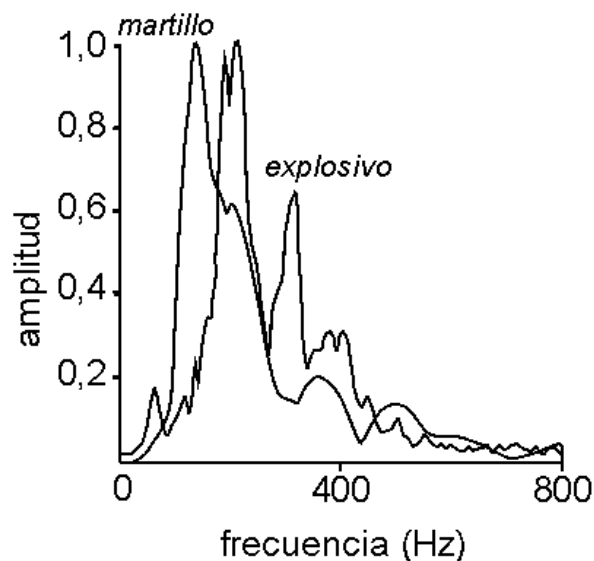


Figura 1: Espectros de amplitud de frecuencias de onda generados con una masa de 5 kg y con explosivos de cartucho calibre 12. Los resultados graficados se obtuvieron durante el registro de la línea 1 en La Isla, valle de Lerma, Salta.

rio. Septiembre es época de precipitaciones casi nulas y una freática regionalmente deprimida.

Hickman-Dragones: El área Hickman-Dragones está en el ámbito del abanico aluvial del antiguo río Bermejo (Iriondo 1993), a unos 50 km de su ápice cerca de la localidad de Embarcación, en el frente de las Sierras Subandinas. Los depósitos estudiados tienen un espesor de alrededor de 150 m y se apoyan en discordancia sobre estratos del Terciario Subandino (cf. Hernández *et al.* 1999) en el antepaís andino. Dos perfiles litológicos basados en registros de pozos de agua muestran la composición predominantemente arenosa del subsuelo (Fig. 3, 1036 y 6). Se realizaron pruebas de sísmica en siete localidades (Fig. 2a), en general con pobres regis-

tros debido a que la freática se hallaba a más de 40 m de profundidad por el efecto combinado de la época de seca y de la abundante extracción de agua para riego. Una excepción parcial es el perfil registrado en la Misión Chaqueña, que dio resultados útiles (Fig. 4a). El perfil mide 1500 m de largo. La profundidad local de la freática se estimó en 15 m en base a datos de pozo. La principal razón para la mejora en el registro es que el suelo superficial es arcilloso y muy compacto, lo cual favoreció la penetración de las ondas sonoras.

La Isla: El valle de Lerma es una depresión estructural de orientación norte-sur en cuyo extremo septentrional se asienta la ciudad de Salta. El relleno cuaternario del valle de Lerma alcanza unos 400 m de espesor y se apoya en discordancia sobre estratos del Grupo Orán (Cenozoico; Gallardo y Georgieff 1999). Estratos del Paleozoico afloran en las sierras de Lesser, al oeste, y la de Mojotoro, al este (Fig. 2b). El relleno cuaternario del valle de Lerma principalmente consiste de arena y grava de abanicos aluviales con ápices en las serranías occidentales y bordes distales al pie de la sierra de Mojotoro. En estas regiones distales de los abanicos la grava y arena interdigitan con depósitos arcillosos, en parte probablemente lacustres (Malamud *et al.* 1996). La localidad de La Isla está a unos 15 km al sur del centro de la ciudad de Salta, en un área de surgencia natural del acuífero La Isla. El nombre La Isla deriva de que por su elevación topográfica levemente mayor queda preservado de anegamiento durante épocas de freática alta (Baudino 1996). Actualmente la freática está deprimida varios metros durante la mayor parte del año debido a la abundante extracción de agua. En el área de La Isla se relevaron tres perfiles sísmicos (Fig. 2b). El perfil 3 dio pobres resultados. En cambio, los perfiles 1 y 2, que están empalmados, dieron excelentes registros. El perfil 1 mide 1500 m de largo sobre la ruta 26 y el 2 mide 300 m de largo sobre un camino vecinal (Fig. 4b).

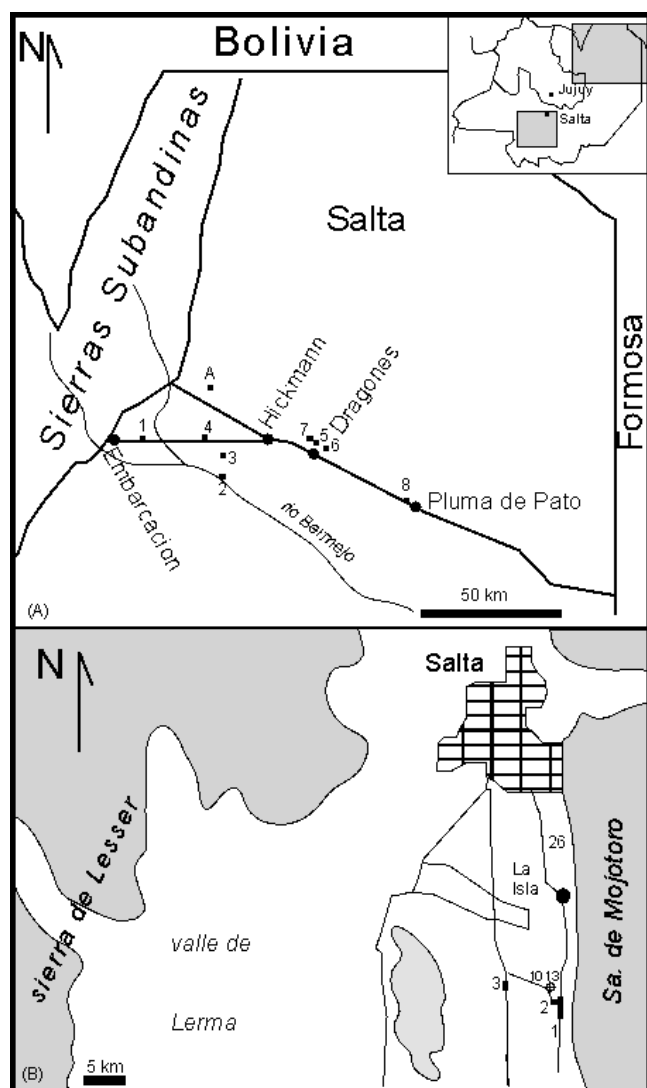


Figura 2: Mapas de ubicación de los ensayos de sísmica. **a.** Área Hickmann-Dragones. Locaciones: 1 - 10 km al este de Embarcación; 2 - sobre depósitos marginales al río Bermejo actual; 3 - 1,5 km al norte de la reserva Misión Chaqueña; 4, 5, 7 - Estancia Desafío del Chaco; 6 - 3 km al este de Padre Lozano. **b.** Área de La Isla, valle de Lerma. Afloramientos de rocas paleozoicas y mesozoicas en grisado.

Interpretación

El registro sísmico relevado en la Misión Chaqueña es de baja calidad pero permite discernir varios reflectores ondulados y caóticos. Provisoriamente se han reconocido tres unidades sísmicas separadas por eventos de reflexión de mayor amplitud que se reconocen a 90-100 mseg y 180-190 mseg. Las velocidades de intervalo en las dos unidades superiores están entre 1200 y 1500 m/seg, lo cual es consistente con sedimentos arenosos poco consolidados. Las velocidades de intervalo aumentan a 1600-1700 m/seg en la unidad sísmica inferior, indicando un cambio en la litología (posiblemente estratos del Terciario Subandino). Las velocidades de intervalo se estimaron a partir de las velocidades RMS (“root mean square”) empleando la ecuación de Dix (1955).

El registro sísmico obtenido en La Isla es de alta cali-

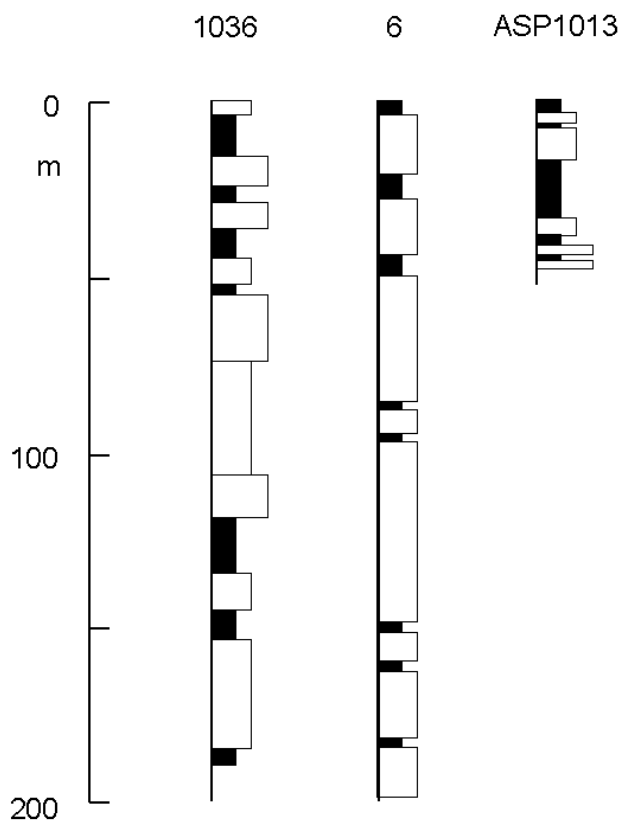


Figura 3: Perfiles de pozos de agua. 1036 - Senda Hachada (localidad A en Figura 2a); 6 - Dragones (localidad 6 en Figura 2a); ASP1013 - La Isla, valle de Lerma (ver Figura 2b). Capas arcillosas en negro y capas arenosas en blanco.

dad, gracias a una freática somera y a la presencia de niveles arcillosos en el tramo superior del perfil. El registro muestra varios reflectores lateralmente continuos y levemente ondulantes. La estratigrafía sísmica fue interpretada por referencia a pozos de agua próximos. El perfil se compone de una alternancia de potentes intervalos tabulares limo-arcillosos y arenosos. Se reconocieron cuatro unidades sismoestratigráficas.

Unidad 1: La unidad 1, superior, consiste en limos y arenas caracterizadas por débiles reflectores internos y velocidades generalmente bajas (1100-1300 m/seg).

Unidad 2: Esta unidad se distingue por su aspecto sísmico homogéneo, con un bajo número de buenos reflectores internos, y por una velocidad de intervalo de 1500-1700 m/seg. La unidad 2 se correlaciona bien con el potente intervalo limo-arcilloso registrado en el pozo ASP1013 entre 25 y 50 m de profundidad (Fig. 3). El grano fino y la aparente homogeneidad interna que sugiere una ausencia de lentes de arena, permiten suponer que la unidad 2 es un importante acuitardo en el subsuelo del valle de Lerma. La base del acuitardo está marcada por un reflector de fuerte amplitud ubicado a 75 mseg, aproximadamente, equivalente a una profun-

didad de 50 m. El reflector indica un fuerte contraste en impedancia acústica entre las unidades 2 y 3.

Unidad 3: Esta unidad sísmica muestra prominentes reflectores de perfil ondulante y se correlaciona bien con el potente cuerpo tabular de arena entre 50 y 60 m de profundidad en los pozos vecinos (Fig. 3). Los registros de pozos indican que esta unidad mayormente consiste en arena y grava. Las velocidades de intervalo menores que para la unidad 2 son consistentes con una textura arenosa. La continuidad lateral y el potente espesor (mayor de 5 m) de la unidad 3 permiten suponer que es un importante acuífero local. Una revisión preliminar de los pozos de agua en La Isla sugiere que muchos de ellos explotan este acuífero.

Unidad 4: La unidad más profunda reconocida en el perfil sísmico se caracteriza por velocidades de intervalo altas (1700-2000 m/seg) y se correlaciona con una potente sucesión de limos y arenas con intercalaciones arcillosas compactas registradas en pozos vecinos. Información de pozos indica que esta unidad se compone mayormente de sedimentos finos pero que incluye gruesos bancos de arena que son explotados por algunos de los pozos profundos (e.g. ASP1016). Un débil reflector a 220 mseg, aproximadamente, indica el pasaje a un sustrato con velocidades mayores, alrededor de 2500 m/seg, y podría coincidir con el techo del Grupo Orán.

Conclusiones

Los resultados de este estudio piloto indican que la sísmica de reflexión de poca profundidad es una herramienta útil para el estudio del Cuaternario en depósitos de abanicos aluviales distales. En tales ambientes suelen alternar estratigráficamente unidades areno-gravosas típicas de los abanicos aluviales y unidades de grano fino acumuladas en los márgenes distales de los abanicos aluviales y quizás en lagos de centro de cuenca. Estas unidades pueden conformar, respectivamente, acuíferos y acuitardos. Sísmicamente los acuíferos se caracterizan por una buena estratificación interna y velocidades sísmicas relativamente bajas, mientras que los acuitardos son acústicamente transparentes y muestran sismofacies homogéneas. En zonas axiales de una cuenca puede esperarse tabularidad y continuidad lateral de las unidades sísmicas, lo cual facilitaría su correlación regional y el mapeo de los acuíferos. El mapeo de los acuíferos permitiría optimizar no sólo la distribución y profundidad de las perforaciones sino también las profundidades de los filtros.

Agradecimientos

Este trabajo fue enteramente financiado con fondos de un PIA-CONICET otorgado al primer autor. Agrade-

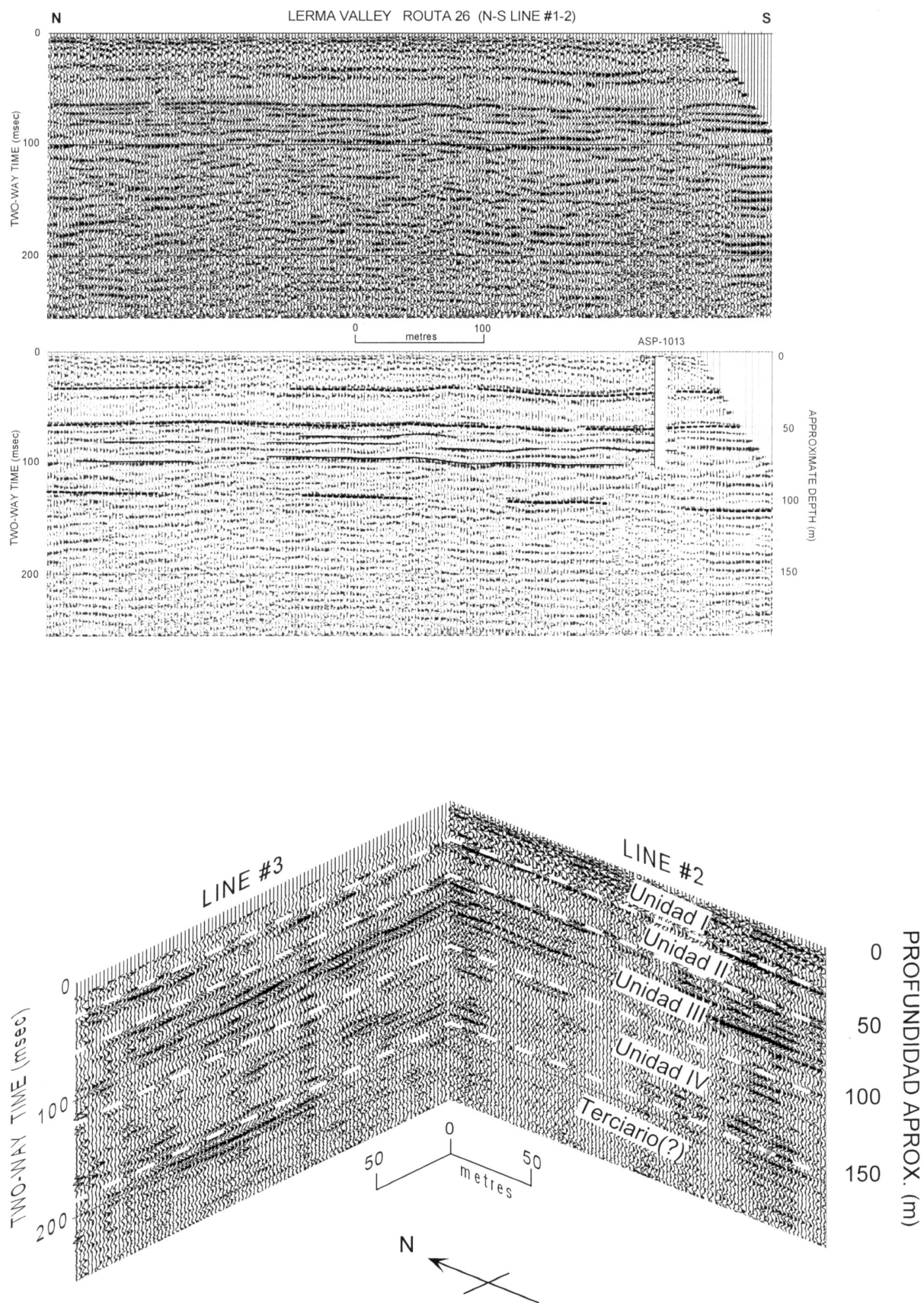


Figura 4: Registros sísmicos procesados. a, Misión Chaqueña; b, La Isla (líneas 1 y 2), armados en un panel.

ceamos al Dr. Nick Eyles de la Universidad de Toronto, Canadá, el habernos facilitado en préstamo el equipo de sísmica. Apreciamos y agradecemos las revisiones de este manuscrito realizadas por los árbitros de la revista.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Baudino, G., 1996. Hidrogeología del valle de Lerma, provincia de Salta. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta, 166p. (Inédito)
- Boyce, J.I. and Koseoglu, B.B., 1996. Shallow seismic reflection profiling of waste disposal sites. *Geoscience Canada*, 23(1): 9-21.
- Dix, C.H., 1955. Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 20: 68-86.
- Gallardo, E.F. y Georgieff, S.M., 1999. Estratigrafía y paleogeografía del Cuaternario del valle de Lerma, Salta. *Relatorio 14° Congreso Geológico Argentino*, 1: 443-450. Salta.
- Haeni, F.P., 1986. Application of continuous seismic reflection methods to hydrologic studies. *Groundwater*, 24: 23-28.
- Hernández, R.M., Galli, C.I. y Reynolds, J., 1999. Estratigrafía del Terciario en el noroeste argentino. *Relatorio, 14° Congreso Geológico Argentino*, Tomo 1: 316-328.
- Hunter, J.A., Pullan, S.E. Gagne, R.E., and Good, R.L., 1984. Shallow seismic reflection mapping of the overburden-bedrock interface with the engineering seismograph - some simple techniques. *Geophysics*, 49: 1381-1385.
- Hunter, J.A., Pullan, S.E., Burns, R.A., Gagne, R.L., and Good, R.L., 1987. Applications of shallow seismic reflection method to groundwater and engineering studies. *Ontario Geological Survey, Special Volume 3*: 704-715.
- Iriondo, M., 1993. Geomorphology and late Quaternary of the Chaco (South America). *Geomorphology*, 7: 289-303.
- Knapp, R.W. and Steeples, D.W., 1986a. High-resolution common-depth point seismic reflection profiling: instrumentation. *Geophysics*, 51: 276-282.
- Knapp, R.W. and Steeples, D.W., 1986b. High-resolution common-depth point seismic reflection profiling: field acquisition parameter design. *Geophysics*, 51: 283-294.
- Malamud, B.D., Jordan, T.E., Alonso, R.A., Gallardo, E.F., González, R.E. and Kelley, S.A., 1996. Pleistocene lake Lerma, Salta province, NW Argentina. 13° Congreso Geológico Argentino, *Actas*, 4: 103-114. Buenos Aires.
- Mayne, W.H., 1962. Common-reflection-point data stacking techniques. *Geophysics*, 27: 927-938.
- Miller, R.D., Pullan, S.E., Waldner, J.S. and Haeni, F.P., 1986. Field comparison of shallow seismic sources. *Geophysics*, 51: 2067-2092.
- Miller, R.D., Pullan, S.E., Steeples, D.W. and Hunter, J.A., 1992. Field comparison of shallow seismic sources near Chino, California. *Geophysics*, 57: 693-709.
- Pullan, S.E. and MacAulay, H.A., 1987. An inhole shotgun source for engineering seismic surveys. *Geophysics*, 52: 985-996.
- Steeple, D.W. and Miller, R.D., 1991. Seismic reflection methods applied to engineering, environmental and groundwater problems. En: Ward, S.H. (Ed.): *Investigations in Geophysics*, No. 5. Society of Exploration Geophysicists, 1: 1-30.
- Yilmaz, O., 1987. Seismic data processing. En: Doherty, S.M. (Ed.): *Investigations in Geophysics* No. 2. Society of Exploration Geophysicists, 526p.

Recibido: 8 de agosto, 2001

Aceptado: 23 de septiembre, 2002