

VELOCIDADES SISMICAS DE LAS UNIDADES AFLORANTES EN EL FLANCO OCCIDENTAL DE LA SIERRA DE LA INVERNADA, PRECORDILLERA DE SAN JUAN

Sofía PÉREZ LUJÁN^{1,2}, Patricia ALVARADO^{1,2}, Arturo GÜELL², Mauro SÁEZ² y Graciela VUJOVICH³

¹CIGEOBIO. CONICET-Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

²Departamento de Geofísica y Astronomía-Universidad Nacional de San Juan, Rivadavia, San Juan. e-mail: sofiap.lujan@unsj-cuim.edu.ar

³IDEAN. Dpto. de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

En este trabajo se muestran determinaciones de velocidades de ondas sísmicas P (V_p) en un sector (Reserva Don Carmelo) del flanco occidental de la sierra de la Invernada, Departamento Ullúm, Provincia de San Juan. Las velocidades obtenidas con el método de refracción sísmica indican valores de V_p de 550; 1.670 y 4.134 m/s y espesores de 1 m y 7 m aproximadamente, para un modelo de dos capas apoyadas sobre un substrato correspondiente a la mayor velocidad. Las unidades aflorantes reconocidas abarcan grauwacas y areniscas muy bien compactadas que se correlacionan con los valores más altos de V_p determinados en el experimento geofísico para los niveles interpretados a mayor profundidad. Asimismo los valores más bajos de V_p son consistentes con material de tipo aluvional situado en las capas sísmicas más superficiales (< 7m de profundidad). Otras unidades relevadas en el terreno indican afloramientos de diabasas y gabros, los cuales no han sido explorados geofísicamente. Sin embargo, a partir de la comparación de las litologías y velocidades sísmicas V_p observadas con bases de datos globales, es posible predecir la continuación en profundidad de las litologías máficas con velocidades sísmicas de V_p aún mayores que aquellas determinadas en superficie. Estos resultados son de interés debido a que ayudan a identificar una posible faja ofiolítica en Precordillera, en un sector donde el espesor cortical actual estimado en 64 km aproximadamente, estaría engrosado.

Palabras clave: *Refracción sísmica, basamento, ondas P, ofiolita, Precordillera, petrología, geofísica.*

ABSTRACT

Seismic velocities in outcropping units in the western flank of the la Invernada range, San Juan Precordillera.

P-wave seismic velocity (V_p) determinations are shown in this work for a region in the western flank (Don Carmelo nature reserve) of the la Invernada range in the Ullúm Department of the San Juan Province. The velocities obtained using the seismic refraction method indicate V_p values of 550; 1.670 and 4.134 m/s and thicknesses of 1 m and 7 m approximately, for a two-layer over a higher V_p half space model. The exposed units show greywacke and well compacted sandstones, which have a good correlation with the deepest and higher V_p values of the seismic model. Also the lowest V_p values are consistent with alluvial material located in the shallower seismic layers (< 7m depth). Other units observed on the surface exhibit outcrops of diabases and gabros, which were not geophysically explored. However, a comparison between the observed lithologies and V_p values with a global database predicts the continuation at depth of mafic rocks associated with even higher V_p values than those determined at the surface. These results are of interest because they help us to identify an ophiolite belt in the Precordillera, a region presently characterized by an overthickened crust of 64 km.

Keywords: *seismic refraction, basement, P waves, ophiolite, Precordillera, petrology, geophysics.*

INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se encuentra sobre el flanco occidental de la sierra de la Invernada, que se destaca por ser un cordón

alargado en sentido norte-sur, extendiéndose desde el cerro Pachaco al sur hasta los 30° 41'S donde comienza el cordón del Coronel. La ladera occidental de la sierra es más abrupta que la oriental, pero más

corta, ya que cae rápidamente a los valles elevados que la circundan. Su altura máxima es de 3.449 m s.n.m., correspondiente al cerro Bayo, ubicado en el sector medio de la misma (Figs. 1 y 2). En este trabajo

geológico-geofísico se ha relevado un sector de la sierra de la Invernada, en las inmediaciones de la Reserva Don Carmelo. El sitio es de fácil acceso a través de una huella con buen mantenimiento sobre el valle de la Invernada, tras recorrer 32 km desde la ruta provincial N° 149 que dista unos 130 km desde la ciudad de San Juan (Fig. 1).

El objetivo del estudio consiste en determinar un modelo de velocidades sísmicas para un sector donde afloran unidades correspondientes a la Formación Sierra de la Invernada de edad ordovícica media a superior, constituida mayormente por sedimentitas silicoclásticas con intercalaciones de cuerpos ígneos básicos. Para ello se han generado ondas sísmicas primarias (P) longitudinales utilizando el método de refracción sísmica que permite obtener las velocidades sísmicas de las mismas en función de la profundidad. Las velocidades medidas son correlacionadas con distintas composiciones de los materiales del subsuelo permitiendo elaborar un modelo geológico-geofísico a lo largo del perfil estudiado. Además, otras litologías reconocidas en el sector bajo estudio (no exploradas geofísicamente) son comparadas con bases de datos globales. Cabe destacar que la zona relevada se encuentra muy próxima a la estación sismológica de banda

ancha Don Carmelo, perteneciente a la Universidad Nacional de San Juan para la cual, existen determinaciones de velocidades sísmicas de ondas P y estimaciones del espesor de corteza continental de unos 64 km (Gans *et al.* 2011; figuras 1 y 2).

ANTECEDENTES Y GEOLOGIA DE LA SIERRA DE LA INVERNADA

La sierra de la Invernada se caracteriza por estar constituida casi exclusivamente por sedimentitas con intercalaciones de rocas básicas de edad paleozoica (Furque 1983). En el cerro Bayo, ubicado en el sector central de la sierra, Furque y Caballé (1985) realizaron una descripción geológica de detalle (Fig. 2). Trabajos posteriores identificaron graptolitos de edad ordovícica y realizaron el ordenamiento estratigráfico de la sucesión sedimentaria aprovechando el corte natural expuesto a lo largo de la quebrada Vallecito (Furque y Caballé 1988). Estos autores reconocieron el Grupo Vallecito que en orden ascendente corresponden a las siguientes formaciones: Formación Corralito con grauvacas y areniscas de matices verde-claro de 400 m de espesor; Formación Sierra de La Invernada, constituida por dos miembros inferiores compuestos por alternancias de

cuarcitas, subgrauvacas y filitas de color verde claro grano estrato-crecientes, un miembro cuarcítico medio consistente en un banco de conglomerados en su techo y clastos de calizas grises de la Formación San Juan y, un miembro superior con una alternancia de cuarcitas y calizas estratos crecientes, que van de 5 cm hasta 1,5 metros; los niveles superiores presentan una caliza conglomerádica. El espesor de esta formación es de 1.000 m aproximadamente. La unidad superior del Grupo Vallecito corresponde a la Formación Cántaro de Oro, con lutitas satinadas e intercalaciones de areniscas cuarcíticas, limolitas y calizas subordinadas, de unos 1.000 m de espesor. La edad de este Grupo quedó asignada al lapso Darriviliano superior, Sandbiano y Katiano inferior en base al hallazgo de niveles fosilíferos de graptolitos y conodontes (Furque 1983), lo cual es ratificado por Ortega *et al.* (2008).

La Formación Corralito, fue posteriormente asignada al lapso silúrico-devónico en base al hallazgo de fauna fósil (Banchig 1995, Pittaluga *et al.* 1997). Banchig (1996), reconsideró el concepto de Grupo Vallecito, relacionando a la Formación Cántaro de Oro como una variación lateral de la Formación Sierra de la Invernada.

Entre el material cuaternario se encuentra la Formación Invernada, definida por Furque (1983), que se desarrolla exclusivamente en la quebrada de la Invernada, sepultando con sus sedimentos a las unidades del Neógeno. En general son fanglomerados integrados por rocas de la Formación Sierra de la Invernada, entre las que se destacan cantos rodados de rocas básicas, de mayor resistencia a la erosión.

La interpretación paleoambiental de las unidades ordovícicas en la sierra de la Invernada es aún motivo de debate. Las mismas fueron inicialmente interpretadas como depósitos de sistemas de abanicos y corrientes de turbidez (Banchig 1995, 1996) en cañones submarinos, en ambiente marino profundo (Furque y Caballé 1985, Spalletti *et al.* 1989). Por otro lado Basili *et al.* (2003, 2005), Gomes *et al.* (2005) y Moretti (2009) interpretan estas formaciones como depósitos de plataforma silicoclástica en base a la presencia de estructuras sedimentarias de tipo *hummocky* la cual indicaría deposición de material clástico por encima del nivel de

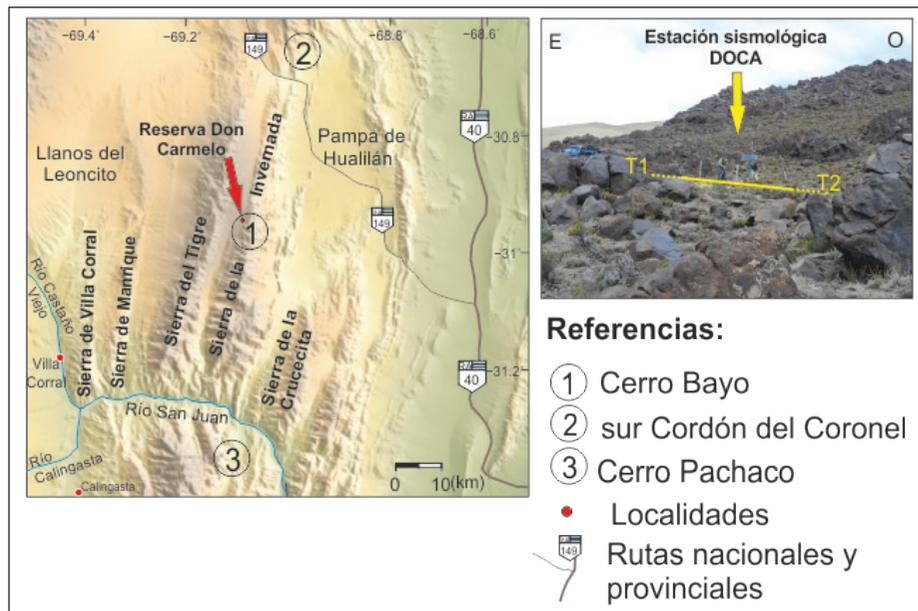


Figura 1: Ubicación de la Reserva Don Carmelo y estación sismológica DOCA donde se ha realizado el perfil sísmico que se muestra en las figuras 3 y 4. T1 y T2 corresponden a los puntos de emisión de energía tomados en el perfil.

base de olas de tormenta y asociados a depósitos de flujos gravitacionales con icnofósiles o niveles altamente bioturbados.

Una característica a resaltar en la sierra de la Invernada es la presencia de manifestaciones magmáticas de carácter básico, que se distribuyen en forma de filones o cuerpos lenticulares concordantes con la estratificación afectando a las Formaciones Sierra de la Invernada y Cántaro de Oro. La actividad magmática que afecta a los miembros de la Formación Sierra de la Invernada es similar a la que intruye a la Formación Yerba Loca en la sierra del Tigre al oeste y cordón del Coronel al norte (Fig. 1). En la sierra de la Invernada, el cuerpo volcánico más potente es el que aflora en el cerro Bayo (Cortelezzi *et al.* 1982). El mismo consiste en rocas basálticas de color negro a marrón oscuro, con textura porfirica, pasta muy fina con escasos fenocristales de plagioclasa básica y piroxenos; se encuentra generalmente alterado, propilizado y serpentinizado. Las plagioclasas están generalmente argilizadas y carbonatizadas. De acuerdo a las descripciones de Furque y Caballé (1985), en este sector habría evidencias de metamorfismo de contacto en las sedimentitas calcáreas. Los cuerpos volcánicos son generalmente de geometría tabular, concordantes y discordantes con el material clástico y carbonático

Estructuralmente, la sierra de la Invernada forma parte de un bloque corrido y plegado como es descrito localmente por La Motte (1996), afectando a las Formaciones Sierra de La Invernada y Corralito. El plegamiento es de tipo asimétrico apretado, con vergencia oriental y ejes buzantes al sur. Entre las formaciones anteriormente mencionadas existe un fallamiento inverso buzante al oeste y con rumbo casi meridional. La Formación Sierra de la Invernada posee un espesor variable a lo largo de su exposición submeridional, oscilando entre 1000 y 4000 m por efectos de acunamientos y repetición tectónica (Banchig 1995).

METODOLOGIA DE TRABAJO

En este trabajo se ha realizado un estudio geológico-geofísico de campo en el sector de la estación sísmológica DOCA (más detalles relacionados con la instalación y toma de

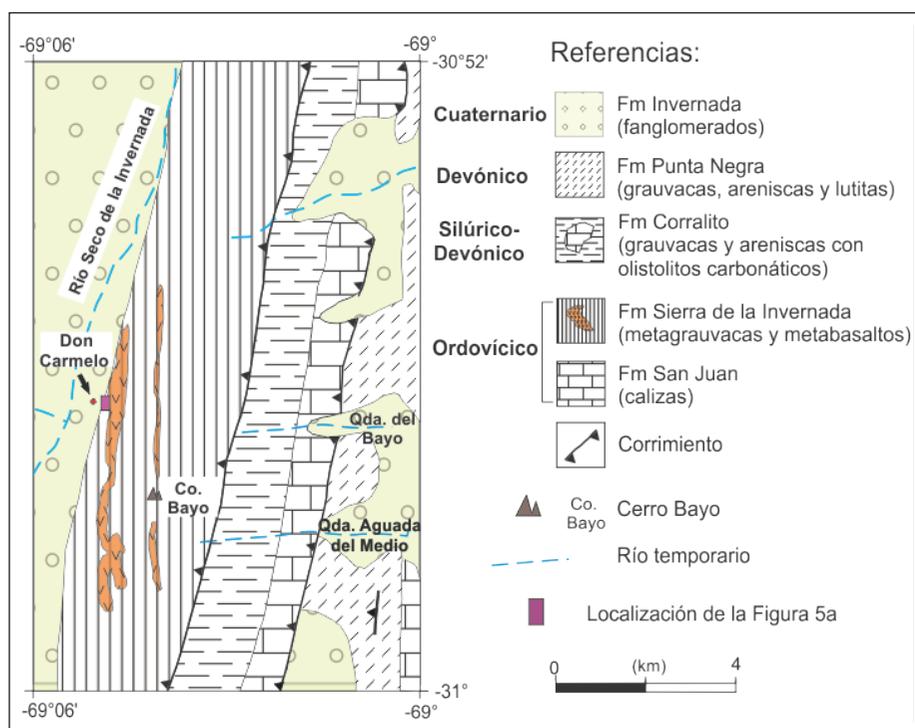


Figura 2: Mapa geológico en las inmediaciones de la Reserva Don Carmelo y localización de la estación sísmológica DOCA. Se muestran las litologías relevadas y la localización de la figura 5a donde se ha medido con funciones del receptor el espesor de corteza continental en unos 64 km (Gans *et al.* 2011).

datos sísmicos de banda ancha pueden obtenerse en Monsalvo 2011). Para ello, se llevó a cabo un relevamiento geológico de detalle en las proximidades de la Reserva Don Carmelo (Fig. 1) con el objeto de reconocer y describir las unidades geológicas aflorantes que pudieran compararse con el modelo geofísico. Esta etapa incluyó mapeo de campo, toma de muestras georeferenciadas y descripción petrográfica de las mismas, con el fin de obtener un conocimiento más preciso de las litologías involucradas. Los trabajos geofísicos consistieron en un estudio de refracción sísmica a lo largo de un perfil y contra-perfil intersectando los afloramientos relevados en el sitio de emplazamiento de la estación DOCA para comparar los resultados de las mediciones geofísicas con aquellos provenientes del relevamiento geológico realizado en el sector del perfil. Además, se contrastaron estas observaciones con valores de referencia esperados de acuerdo a determinaciones existentes a nivel global de Christensen y Mooney (1995), Christensen (1996) y Brocher (2005). Estos autores confrontaron estudios de laboratorio y de

campo relacionados con el comportamiento de las ondas sísmicas en función de la profundidad, litología y densidad de las rocas. Sus trabajos permitieron obtener valores promedio de referencia para las velocidades sísmicas, densidad y rangos característicos de profundidad para diferentes composiciones mineralógicas lo cual es aprovechado en este trabajo a modo de comparación en el sector del perfil sísmico para los niveles superiores de la corteza y también, para estimar parámetros de la corteza más profunda atendiendo al relevamiento geológico realizado que se muestra en la figura 2 y a determinaciones geofísicas que involucran niveles más profundos de la corteza.

El objetivo final de este trabajo consistió en integrar la información geológica y geofísica en un modelo local a nivel de superficie y compararlo con un modelo teórico de velocidades sísmicas esperadas a partir de datos experimentales de referencia obtenidos por otros autores. Por otra parte debido a que las litologías máficas y otras metasedimentarias reconocidas en terreno para la sierra de la Invernada (Fig. 2) no fueron auscultadas por la

geofísica realizada se procedió a compararlas también con valores de referencia conocidos con el propósito de extender un modelo a mayores profundidades que considere al menos los niveles superiores de la corteza, la cual exhibe 64 km de espesor bajo la estación DOCA (Gans *et al.* 2011).

Descripción del método de refracción sísmica

El método de refracción sísmica demuestra ser de inestimable eficacia para la determinación de espesores de cubiertas sedimentarias así como profundidades de basamento.

Para la ejecución de este ensayo, se dispone de un cable con sensores denominados geófonos a lo largo de la traza a investigar. La separación entre geófonos depende de la profundidad de prospección deseada en cada caso y del detalle que se quiera lograr bajo los mismos. Si bien las profundidades y velocidades sísmicas de las capas del subsuelo horizontales pueden conocerse precisamente a partir del registro de ondas sísmicas de un perfil en un sentido, es deseable contar con un registro para la emisión de energía en ambos extremos del tendido; así, es posible determinar si existen variaciones en el buzamiento de las capas del subsuelo y sus velocidades de manera más aproxi-

mada. En este caso se realizaron impactos dinámicos con golpes de martillo para las posiciones de tiro T_1 y contra-tiro T_2 del perfil sísmico (Fig. 3). Durante el ensayo se midieron los tiempos de arribos de las ondas sísmicas P, desde que la señal es emitida hasta que llega a cada uno de los geófonos, los cuales están alineados y mantienen una distancia de separación prefijada entre ellos. La identificación de los diferentes arribos en tiempo correspondientes a los estratos o capas donde se generan, se realizó sobre el registro sísmico. En la figura 3a se ilustra mediante una vista en planta el esquema de un perfil sísmico de 12 canales empleado en el trabajo de campo de este estudio.

El equipo de medición empleado en este estudio es un sismógrafo EG-S 1225 GEOMETRICS con registro de 12 canales. Para la generación de las ondas sísmicas P se emplearon golpes verticales de martillo de unos 8 kg en una placa solidaria al suelo. Cada disparo debe ser transmitido al equipo registrador para tomar una señal de referencia del tiempo cero a partir del cual se miden los tiempos de arribos (tiempos de viaje) de las distintas ondas sísmicas. Los impactos fueron repetidos para un mismo punto de disparo con el objeto de superponer la energía en la fuente sísmica y aumentar la relación señal/ruido en los canales registrados. La longitud del perfil estudiado es de 72 m, con separación entre geófonos de 6 m.

Una vez obtenidos los sismogramas, se efectuaron las lecturas de los tiempos de arribo de las ondas P en gabinete (Cuadro 1), y luego se graficaron en función de la distancia obteniendo las dromocronas (Fig. 4). Los detalles de la fundamentación teórica del método de refracción sísmica no se presentan en este trabajo; los mismos pueden obtenerse en la mayoría de los libros de exploración geofísica (ej. Telford *et al.* 1990). La velocidad sísmica promedio para distintas capas del subsuelo se puede calcular a partir de las dromocronas desde una regresión lineal de los grupos de datos asociados a cada una de ellas. Las pendientes de las rectas se relacionan con la velocidad sísmica y el buzamiento de cada capa del subsuelo. Así por ejemplo, la velocidad del medio superior (V_1) puede obtenerse como la inversa de la pendiente de la onda directa y, las velocidades de los otros medios (V_2 y V_3) como la

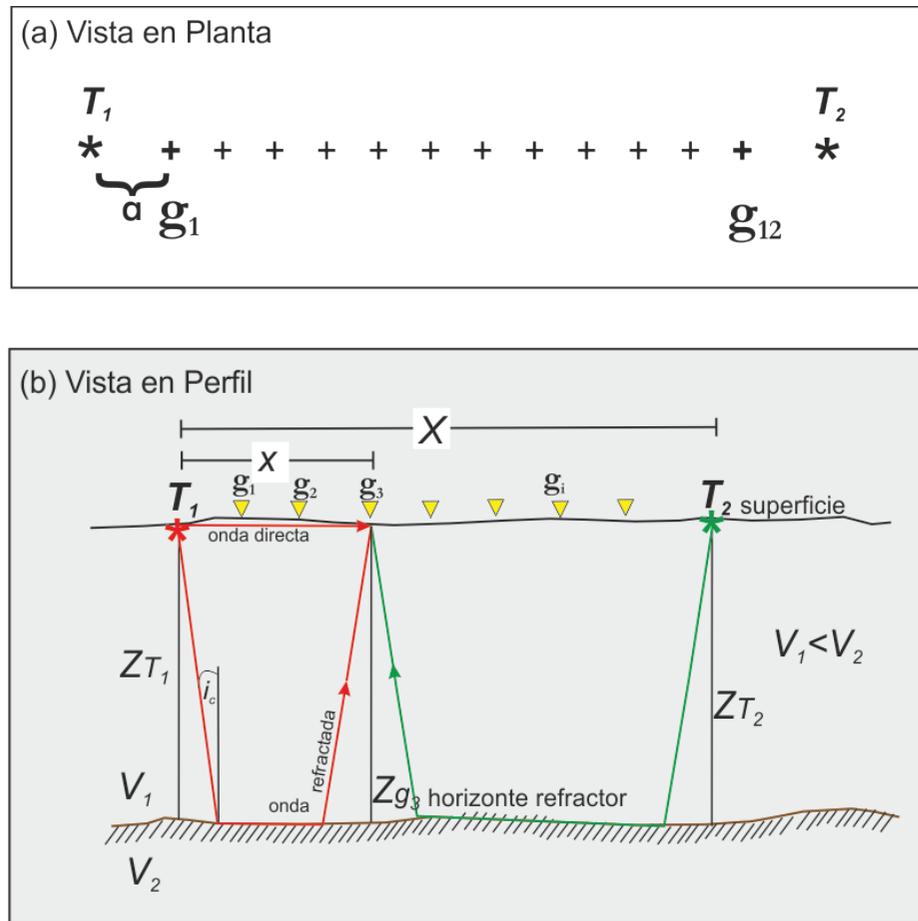


Figura 3: Perfil sísmico esquemático: a) vista en planta. Referencias: [T] distintos puntos de emisión de energía sísmica para la posición de tiro (1) y contra-tiro (2); [*] localización del disparo; [+] ubicación de receptor (geófono); [g1] geófono N°1; [g12] geófono N°12; [a] *off-set* equivalente a la distancia entre el punto de disparo y el primer geófono; b) corte transversal para el esquema del perfil sísmico que se muestra en (a) suponiendo una sola capa de profundidad irregular y velocidad V_1 apoyada sobre un substrato de mayor velocidad V_2 . Por simplicidad solo se muestran los rayos que arriban al tercer geófono (g_3) para las posiciones de emisión de energía de tiro (T_1) y contra-tiro (T_2); Z_{T1} , Z_{T2} y Z_{g_3} representan las profundidades bajo cada elemento del perfil sísmico. $[x]$ simboliza la distancia desde la fuente T_1 a cada geófono mientras que $[X]$ es la longitud total del tendido; i_c corresponde al ángulo de incidencia/emergencia crítico, para el cual la refracción en el medio 2 se produce con un ángulo de 90° de acuerdo con la ley de Snell.

inversa de las pendientes de las otras ondas refractadas (asumiendo que no hay buzamiento). Se hace notar que en el estudio realizado la mayor incertidumbre existe en la determinación de los parámetros de la capa superior ya que la recta correspondiente a la onda directa no contiene una alta densidad de puntos de observación (Fig. 4); esto conlleva a una mayor incertidumbre en la estimación del espesor de la primera capa.

En el caso de capas del subsuelo que inclinan, el buzamiento para cada una de ellas afecta a los tiempos de intersección y así a las profundidades. En este caso, un detalle de la geometría que siguen las ondas refractadas para un modelo multicapas que inclinan y la estimación de las velocidades y profundidades correspondientes puede obtenerse de Johnson (1976).

Siguiendo esta metodología que considera el buzamiento, se procedió a estimar las velocidades sísmicas y el espesor de cada capa bajo las posiciones T_1 y T_2 . Para ello se utilizaron además de las velocidades obtenidas a partir de las pendientes de las rectas que representan a las ondas directa y refractadas, el tiempo de intersección de la recta correspondiente a la onda P refractada con el eje de ordenadas de las dromocronas (eje de tiempos de la figura 4).

Es importante destacar que no se observaron variaciones significativas en la topografía relevada a lo largo del perfil sísmico.

Así, este estudio permitió obtener un modelo de velocidades sísmicas superficial utilizando el método sísmico de refracción para un perfil y contra-perfil que contiene al sitio de la estación DOCA y los afloramientos relevados alrededor de la misma (Fig. 5a), correlacionando las unidades aflorantes con aquellas interpretadas en profundidad.

Relevamiento geológico de campo

En el relevamiento geológico de campo se llevó a cabo la descripción de las unidades aflorantes en las inmediaciones de la Reserva Don Carmelo, previo estudio de los antecedentes de la zona, aprovechando un corte natural de la sierra la Invernada, aquí denominada quebrada Don Carmelo (Fig. 1). Sobre este sector se discriminaron diferentes unidades litológicas separando las mismas en clásticas y volcánicas (Fig. 5a). En las unidades clásticas reconocidas se

CUADRO 1: tiempos de arribo de ondas P (columnas 3 y 4) en los diferentes geófonos indicados en la columna 1 y ubicados según indica la progresiva (columna 2) para las posiciones de los puntos de emisión de energía T_1 , T_2 (ver Figs. 1, 3 y 4).

Tiros Geófonos	Progresiva (m)	Tiempo para T1 (milisegundos)	Tiempo para T2 (milisegundos)
T1	0		
1	3	6	35
2	9	10	34
3	15	13	33
4	21	16	31
5	27	20	30
6	33	23	29
7	39	27	26
8	45	30	23
9	51	31	19
10	57	33	15
11	63	35	10
12	63	36	5
T2	72		

observaron areniscas y grauvacas compuestas por granos de cuarzo de granulometría variable, de forma angulosa a subangulosa, con extinción ondulante y en algunos casos con migración de bordes; granos de feldspato que constituyen un componente su-

bordinado fuertemente alterados a arcilla y sericita; y finalmente, acompañan cristales de biotita completamente alterados a clorita, que junto al material arcilloso, ocupa el espacio entre los componentes más importantes (Figs. 5b y c).

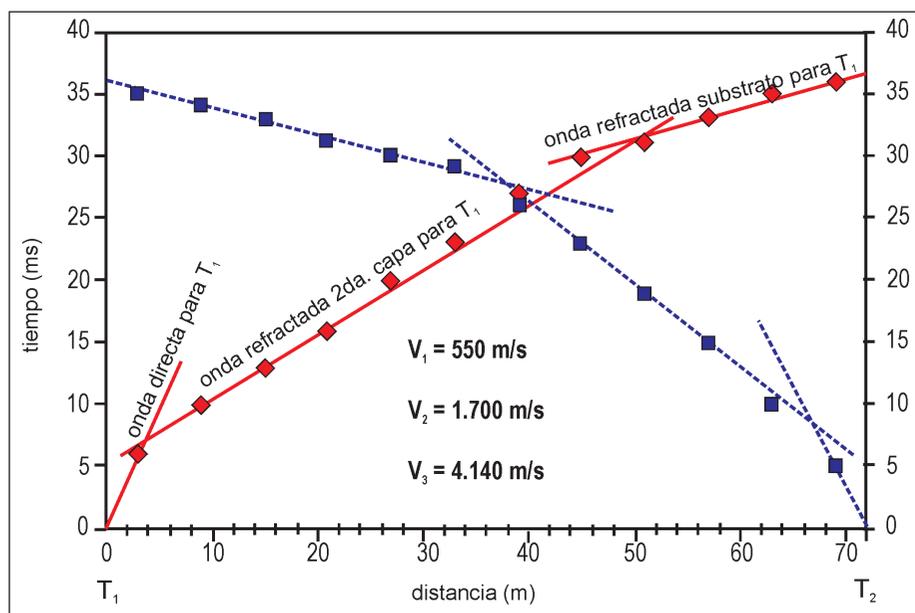


Figura 4: Dromocronas obtenidas para el perfil sísmico mostrado en la figura 1 y esquema de la figura 3. En el Cuadro 2 se muestran los valores de velocidades sísmicas resultantes del análisis geofísico.

Las unidades máficas están representadas por cuerpos de diabasas y gabros de color verde oscuro en corte fresco, de textura fina a gruesa, con venillas de composición diorítica en su mayoría de rumbo N-S con un ancho de hasta 3 centímetros. La composición mineralógica de estas rocas consiste en clinopiroxeno; biotita alterando a clorita y plagioclasas generalmente alteradas a arcilla, sericita y calcita. En algunos especímenes se observó textura subofítica a ofítica y poikilítica, mientras que en otros es equigranular (Figs. 5d-g).

En el contacto entre ambas litologías, no se reconocen a simple vista cambios texturales y/o composicionales, pudiendo observar en algunos casos estructuras sedimentarias de tipo convoluta en las proximidades de los intrusivos máficos.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Sísmica de refracción

La disposición del perfil sísmico se eligió tomando en cuenta la zona más favorable en las inmediaciones de la estación sísmológica DOCA, correspondiente a la de menor pendiente ubicada sobre el flanco occidental de la sierra de la Invernada y coincidente con una traza aproximadamente este-oeste, aprovechando las exposiciones a lo largo de la quebrada natural Don Car-

melo con el objeto de mostrar variaciones litológicas posibles de asociar a las velocidades sísmicas investigadas (Figs. 1 y 2).

A partir de las mediciones y del análisis de los sismogramas registrados, se procedió a leer los tiempos de arribo de las ondas P (Cuadro 1) y se graficaron los mismos en función de las distancias para las cuales fueron observados dichos tiempos de arribo obteniendo así el gráfico camino-tiempo que se muestra en la figura 4. El siguiente paso consistió en identificar la estructura de subsuelo calculando las velocidades de las ondas para distintas capas investigadas (Cuadro 2) y la profundidad de las mismas bajo los geófonos (Cuadro 3). Así, fue posible obtener una sección transversal esquemática en función de la profundidad de las diferentes capas rocosas relevadas en el ensayo geofísico (Fig. 6).

Las velocidades Vp obtenidas indican valores de 550 m/s para el nivel más superficial correspondiente a la cobertura sedimentaria poco consolidada a consolidada que constituirían el abanico aluvial al pie de la sierra, un nivel intermedio de Vp de aproximadamente 1.700 m/s y, a mayor profundidad Vp de alrededor de 4.000 m/s representando niveles rocosos compactos y competentes (Cuadro 2).

El análisis de las velocidades registradas indica su variación en función de la profundidad quedando asignados los valores de Vp encontrados a capas rocosas de diferente comportamiento mecánico y por lo tanto, diferente competencia. La investigación de la geometría del modelo sísmico indica una suave pendiente en la dirección de T₁ a T₂ (es decir de este a oeste) con un ángulo de buzamiento de las capas superiores menor a 1 grado. La estimación de velocidades y profundidades se resume en los Cuadros 2 y 3 y figura 6.

Comparación de los resultados sísmicos con el análisis de la litología de la sierra de la Invernada

Si bien el ensayo fue realizado a nivel de superficie (profundidades máximas investigadas menores que 16 m), los valores máximos de velocidades medidas estarían representando un material fuertemente compactado cubierto de sedimentos detríticos de origen aluvial acorde a la morfología de la

zona investigada. Este resultado es consistente con las observaciones geológicas en superficie, donde el material aflorante está constituido por grauvacas y niveles de areniscas sabulíticas muy bien compactados de edad ordovícica, intruidas por cuerpos de diabasas y gabros en relación de concordancia con las sedimentitas. Es importante destacar que estas litologías representan la composición predominante de la sierra de la Invernada y por lo tanto aquellas situadas en las inmediaciones de la estación sísmológica DOCA (Figs. 1; 2 y 5a).

Las velocidades medidas para la capa más profunda (> 4.000 m/s), para las rocas situadas a mayor profundidad podrían corresponder a sedimentitas clásticas o rocas ígneas básicas tal como se reconocen en los afloramientos. En este sentido, un análisis sísmológico más detallado que investigue una mayor profundidad de penetración puede ayudar a precisar alguna diferencia entre las litologías de la sierra.

Otra información disponible en la zona de la Reserva Don Carmelo proviene de estudios de función del receptor y representan niveles de corteza profunda. Para esta zona se ha observado valores de espesor de la corteza de 64 km y velocidades de ondas P superiores a 6.000 m/s. En este sentido, puede esperarse la continuación en profundidad de las litologías observadas en superficie indicando en este caso que las mismas estarían afectadas en menor grado por meteorización o bien corresponder a rocas máficas y ricas en calcio (Grupo C en Fig. 7) cuyas velocidades de ondas P son aún mayores como se discute a continuación.

DISCUSIÓN

El análisis litológico de las unidades aflorantes en las cercanías de la Reserva Don Carmelo y las mediciones realizadas mediante el método de sísmica de refracción permitió modelar un perfil en profundidad con velocidades crecientes para dos capas rocosas apoyadas sobre un substrato de mayor velocidad. Los valores de velocidades medidas indicarían para el nivel más profundo situada a más de 13 m de profundidad una composición de material clástico compacto, una capa intermedia de material meteoricamente disgregado y una cobertu-

CUADRO 2: valores promedios obtenidos de las velocidades sísmicas de ondas P (V₁, V₂ y V₃) para el modelo de tres capas de rocas relevadas en el ensayo geofísico (Fig. 6) a partir de los tiros T₁ y T₂ en uno y otro sentido (Figs. 1, 3 y 4).

Capa	Velocidad Sísmica (m/s)
superior	V _{1,T1} = 500
	V ₁ = 550
media	V _{1,T2} = 600
	V _{2,T1} = 1.760
	V ₂ = 1.670
substrato	V _{2,T2} = 1.590
	V _{3,T1} = 3.760
	V ₃ = 4.134
	V _{3,T2} = 4.600

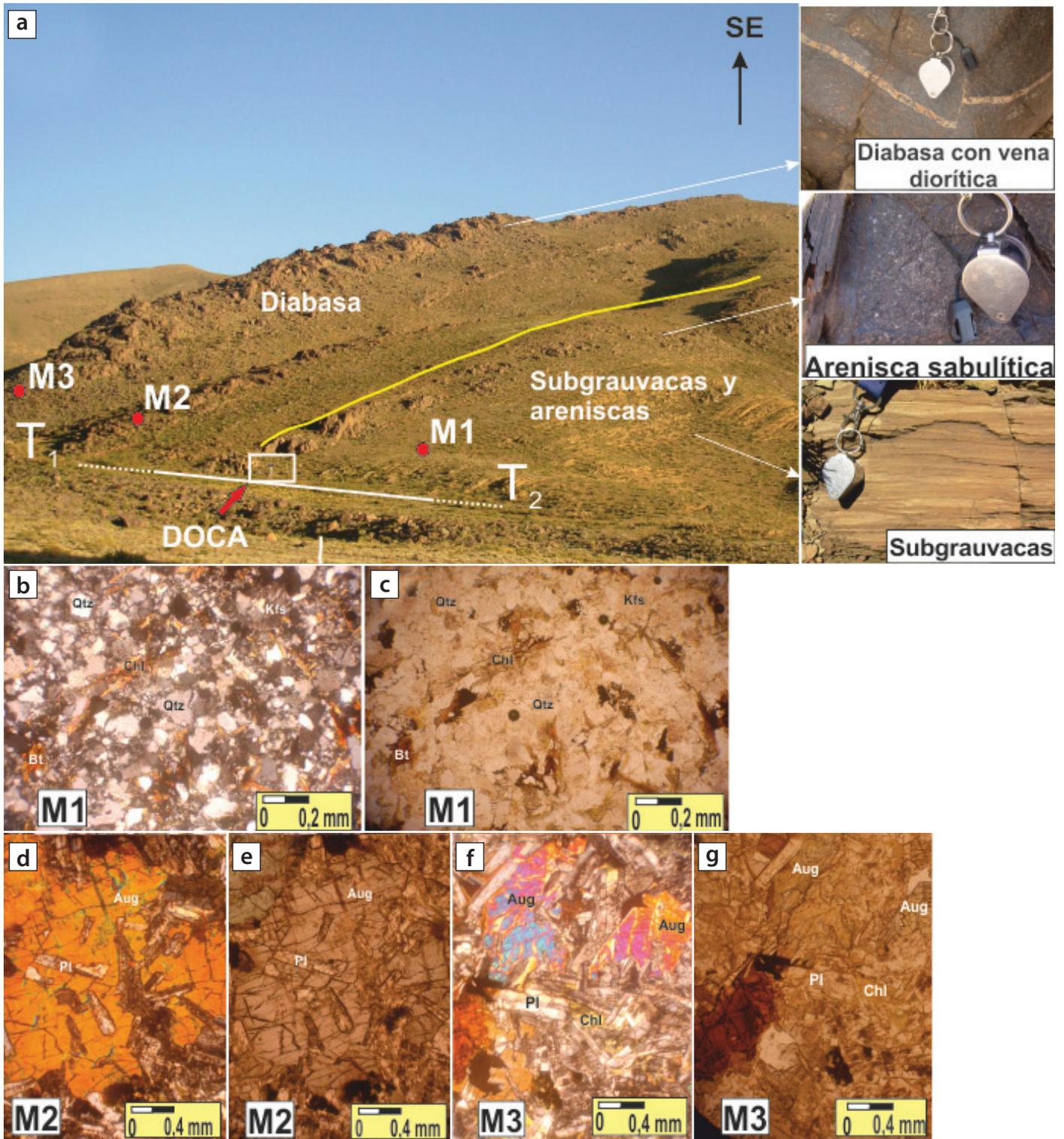


Figura 5: a) unidades aflorantes observadas en las proximidades de la estación sísmológica DOCA y detalle de los distintos tipos de rocas reconocidas. Se indican las localizaciones de las muestras analizadas petrográficamente en corte delgado (figuras 5b-g) y la localización del tendido sísmico. La línea amarilla separa las rocas máficas de las rocas sedimentarias; b) fotomicrografía de roca clástica cuarzosa (M1) en la que se observan granos de cuarzo (Qtz) con extinción ondulante y migración de borde de grano, acompañado por granos de feldespato (Kfs), clorita (Chl) y biotita (Bt), aumento 10x con nicóles cruzados; c) M1 con nicóles paralelos; d) fotomicrografía de gabro (M2) con textura poikilítica en el que se reconoce cristales de augita (Aug), plagioclasa (Pl) y clorita (Chl), aumento 5x con nicóles cruzados; e) fotomicrografía de M2 con nicóles paralelos; f) fotomicrografía de gabro de textura granuda media (M3) de composición similar a la muestra M2 con aumento 5x y nicóles cruzados; g) Fotomicrografía de M3 con nicóles paralelos.

CUADRO 3: Profundidades en metros de distintos tipos de rocas obtenidas de la interpretación de los registros sísmicos (columnas 3 y 4), para las posiciones de la progresiva correspondientes (columnas 1 y 2).

Perfil	Progresiva (m)	Profundidad capa 1 (m)	Profundidad capa 2 (m)
T1	0	1,2	7,7
1	3		
2	9	1,4	8
3	15	1,7	
4	21	1,9	8,2
5	27	2,2	
6	33	2,3	8,45
7	39	2,5	
8	45	2,6	9,03
9	51	2,9	
10	57	3	9,4
11	63	3,1	
12	63		
T2	72	3	9,7

ra sedimentaria de baja velocidad sísmica P del orden de 550 m/s consistente con valores globales (Grupo A en Fig. 7). Tomando como base las mediciones globales presentadas por Brocher (2005) que compara las velocidades de ondas sísmicas

P y la relación entre ondas sísmicas P y S (V_p/V_s o el coeficiente de Poisson) en base a datos obtenidos desde perforaciones y mediciones de laboratorio, se estableció un rango de velocidades V_p y V_p/V_s para una amplia gama de litologías (Fig. 7). En

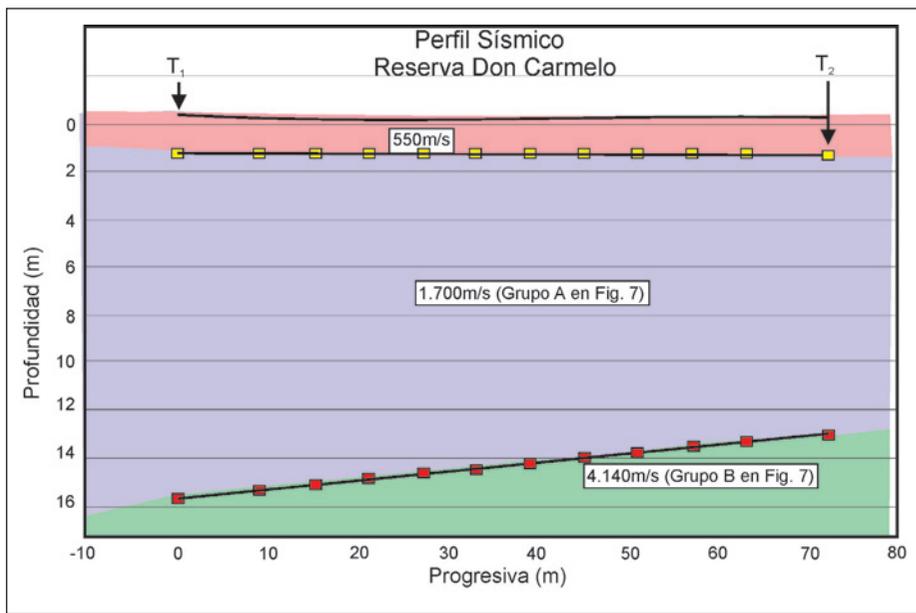


Figura 6: Perfil esquemático que detalla la profundidad de las capas del subsuelo relevadas con el método de refracción sísmica y las velocidades de ondas P interpretadas a partir de las dromocronas y el método de capas con buzamiento (Fig.4).

el caso de las determinaciones geofísicas de este trabajo y las litologías observadas en superficie se observan estimaciones de velocidades que se correlacionan con un grupo de valores identificado como Grupo de datos B en la figura 7. El grupo B con V_p del orden de 4.000 m/s corresponde a los mayores valores esperados para rocas sedimentarias (Brocher 2005). Por otra parte, las otras litologías relevadas (Figs. 2 y 5a) se corresponden con otro rango de valores posibles de velocidades sísmicas V_p mayores indicadas como Grupo de datos C. El Grupo C puede exhibir valores de V_p de hasta 6.200 m/s con una buena correlación con los valores esperables para rocas cristalinas máficas y enriquecidas en calcio.

Otra observación interesante que se desprende de los ajustes de parámetros petrofísicos establecidos por Brocher (2005) nos permite afirmar que las unidades geológicas involucradas en la medición corresponderían a material sedimentario detrítico muy compacto pero fracturado como para producir valores V_p/V_s elevados del orden de 1,94 para meta-grauvacas y rocas máficas de acuerdo al diagrama de la figura 7, lo cual es consistente con las observaciones en afloramiento (Fig. 5a). Estas unidades fracturadas provocarían una disminución de la velocidad de ondas S (V_s) aunque el comportamiento de este tipo de ondas sísmicas no ha sido relevado o modelado en este trabajo.

Se destaca que para producir un promedio de velocidades de ondas P de más de 6.000 m/s en la corteza de 64 km de espesor como aquél determinado a partir del apilamiento de funciones sísmicas del receptor, las velocidades de la corteza media e inferior deben experimentar un notable aumento con la profundidad. Esta observación es consistente con la presencia de litologías de la faja de rocas máficas propuesta en este sector de la sierra de la Invernada, las cuales se corresponden con altos valores de velocidades V_p .

CONCLUSIONES

Las mediciones geofísicas y geológicas relevadas en el flanco occidental de la sierra de la Invernada indican la presencia de

metagrauvas y rocas básicas en niveles aflorantes estudiadas sobre un perfil en las proximidades de la estación sísmológica DOCA. Las determinaciones de velocidades V_p mapean litologías con grados variables de meteorización, que pueden ser separadas en tres grupos: el primero correspondería a la cobertura sedimentaria de baja velocidad sísmica, del orden de 550 m/s (Grupo de datos A en figura 7); un segundo grupo con V_p de aproximadamente 4.000 m/s corresponde a los mayores valores esperados para rocas sedimentarias más compactas a mayor profundidad (Grupo de datos B en figura 7). Ambos grupos son consistentes con valores globales determinados por Brocher (2005)

y con las litologías observadas en superficie. El tercer grupo de datos, correspondería a unidades relevadas tanto sobre el perfil sísmico realizado como a escala más regional, que consiste en potentes cuerpos de rocas máficas intercalados entre material clástico de granulometría fina. Si bien no se obtuvieron para estos cuerpos máficos velocidades sísmicas lo suficientemente altas, cabría esperar para las mismas, a niveles de corteza media a inferior, velocidades superiores a los 6.200 m/s como así lo establecen aquellas estimadas por Brocher (2005) y en concordancia con las mediciones sísmológicas de esta zona de 64 km de profundidad del Moho. Esta litología se separa de las anteriores como Grupo C (Fig. 7) se-

ñalando para las mismas velocidades de V_p esperadas para rocas cristalinas máficas y enriquecidas en calcio que no han sufrido fracturamiento por meteorización.

Estos valores tomados en conjunto muestran una buena correspondencia con la presencia de una faja de rocas máficas, probablemente asociada a una faja ofiolítica en este sector de Precordillera.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo logístico brindado por la Reserva Don Carmelo agradeciendo cálidamente al señor propietario de la Reserva Don Arturo Curatola y a Andrés Calderón y Sergio Pé-

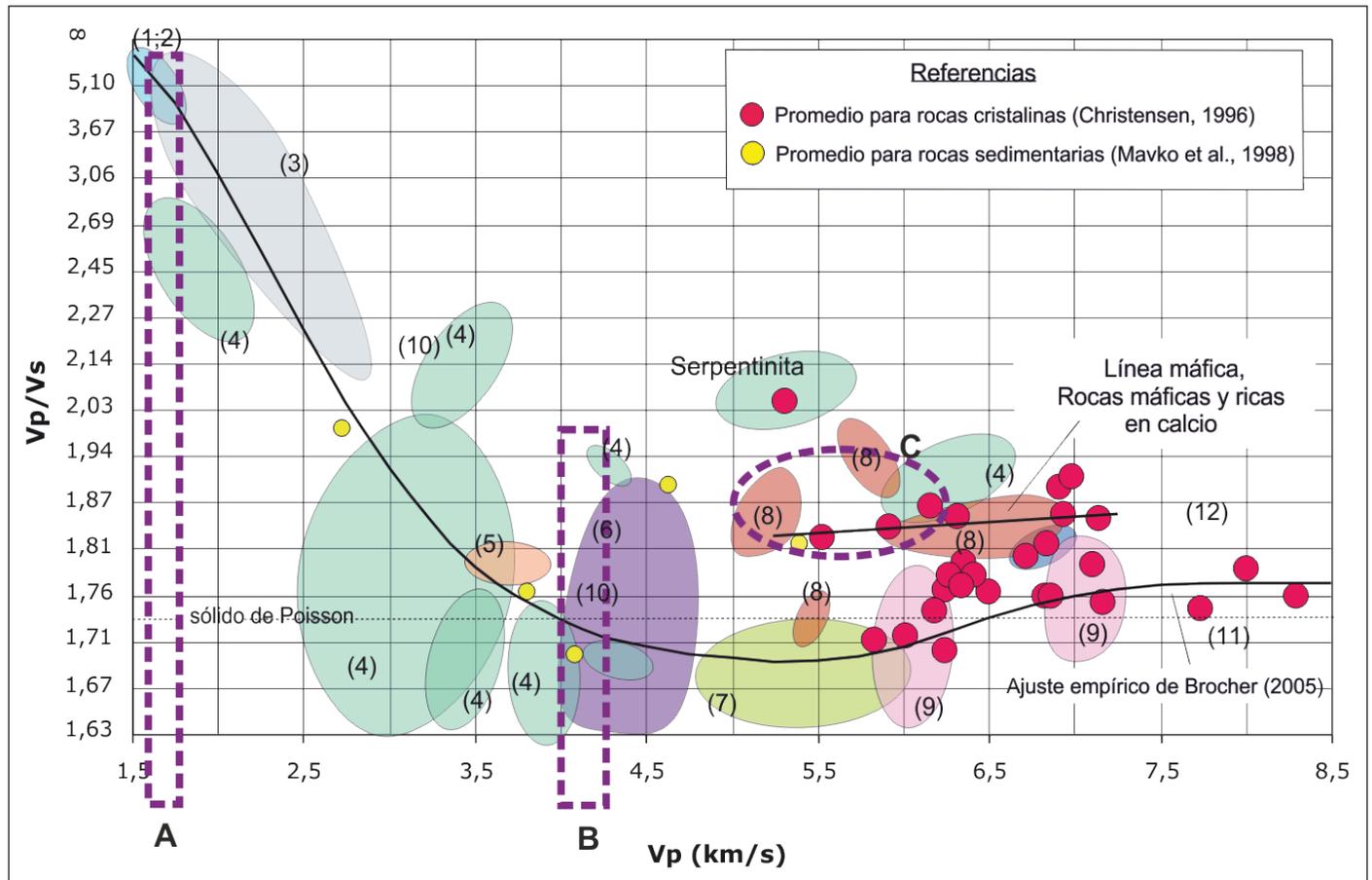


Figura 7: Diagrama simplificado (modificado de Brocher 2005) basado en observaciones independientes de V_p , V_s y V_p/V_s sobre litologías relevadas en otras regiones (Brocher 2005) utilizado para comparar las velocidades de ondas sísmicas interpretadas geofísicamente en DOCA para el grupo de datos A y B (rectángulos con línea de trazo, ver esquema de la figura 6) y predichas para las litologías observadas en afloramientos para el grupo de datos C (elipse con línea de trazo, ver figura 2). Los números entre paréntesis indican las siguientes litologías y/o determinaciones: (1) Sedimentos holocenos; (2) Perfil sísmico vertical (VSP); (3) Aluviones cuaternarios; (4) Rocas sedimentarias; (5) Complejo "Franciscan" de Norteamérica; (6) Tufas; (7) Granito saliniano de Norteamérica; (8) Meta-grauvas y rocas máficas; (9) Rocas metamórficas; (10) Corteza superior; (11) Velocidades modeladas para corteza y (12) Testigos de rocas máficas. Para mayores detalles ver Brocher (2005). Nótese la consistencia entre las litologías presentes en el sector de estudio y los valores predichos para rocas máficas y metagrauvas (Grupo C) de mayor velocidad de ondas P que las relevadas con el método de sísmica de refracción.

rez. Agradecemos los comentarios y sugerencias de dos árbitros anónimos y editores Dr. Rubén Somoza y Dr. Pablo Pazos que ayudaron decididamente a mejorar este artículo. Las actividades se enmarcan en el Proyecto de Investigación financiado por la UNSJ (CICITCA E888) y FON-CyT2011-160 para el periodo 2011-2013, PIP-0072 (2011-2013).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Banchig, A. L. 1995. Evolución del talud continental Cambro-Ordovícico entre el río San Juan y Los Sombreros, San Juan. Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Juan (inédita), 202 pp., San Juan.
- Banchig, A. L. 1996. Litofacies y Paleoambiente Sedimentario del Ordovícico clástico de la sierra de la Invernada (Formación Sierra de la Invernada), Precordillera Central, San Juan. 6° Reunión Argentina de Sedimentología, 111-116, Bahía Blanca.
- Basilici, G., Peralta, S. y Finney, S. C. 2003. The Portezuelo del Tontal Formation: A widespread storm-dominated siliciclastic shelf of the lower Caradocian, Western Precordillera, San Juan Province, Argentina. 3° Latinoamerican Congress of Sedimentology (Abstract), Belem Do Para, Brasil.
- Basilici, G., Cutolo, A., Gomes Borges, J.P., Henrique, A. y Moretti, P.A. 2005. Ordovician storm-dominated basin and the evolution of the western Gondwana margin (Portezuelo del Tontal, Sierra de la Invernada and Yerba Loca formations, Argentine Precordillera). In: Pankhurst, R.J., Veiga, G.D. (eds.). Gondwana 12. "Geological and Biological Heritage of Gondwana", Mendoza, Academia Nacional de Ciencias, Abstracts, p. 64.
- Brocher, T. 2005. Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the Earth's crust. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95: 2081-2092.
- Christensen, N. y Mooney, W. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research*, 100: 9761-9788.
- Christensen, N. 1996. Poisson's ratio and crustal seismology. *Journal of Geophysical Research*, 101: 3139-3156.
- Cortezzi, C., G. Furque y Paulicevic, R., 1982. Estudio petrológico de la lavas en almohadilla del Katiano inferior a medio de la zona de Rodeo. Departamento Iglesia. Provincia de San Juan. República Argentina. 5° Congreso Latinoamericano de Geología, actas, 161-172.
- Furque, G. 1983. Descripción Geológica de la Hoja 19c - Ciénaga de Gualilán Boletín Servicio Geológico Nacional, 111 pp.
- Furque, G. y Caballé, M. 1985. Paleozoico inferior en el Cerro Bayo, sierra de la Invernada, San Juan. *Revista del Museo de la Plata (Nueva Serie)*, 1-18. La Plata.
- Furque, G. y Caballe, M. 1988. Descripción de la sierra de la Invernada, San Juan. Dirección Nacional de Geología y Minería (Inédito), 1-76. Buenos Aires.
- Gans, C.R., Beck, S.L., Zandt, G., Gilbert, H., Alvarado, P., Anderson, M. y Linkimer, L. 2011. Continental and oceanic crustal structure of the Pampean flat slab region, western Argentina, using receiver function analysis: new high-resolution results. *Geophysical Journal International* 186: 45-58.
- Gomes, J. P. B., Basilici, G., Cutolo, A. A., Henrique, A. y Moretti, P. A. Jr. 2005. The importance of storm-gravitational combined flows on the construction of sandstone reservoirs in siliciclastic shelves: analogous in Portezuelo del Tontal and Sierra de la Invernada Formations (middle-upper Ordovician, Precordillera Argentina). *Gondwana 12 "Geological and Biological Heritage of Gondwana"*, Mendoza, Academia Nacional de Ciencias, Abstracts, p. 174.
- Johnson, S. H. 1976. Interpretation of split-spread refraction data in terms of plane dipping layers. *Geophysics* 41: 418-424.
- La Motte, G. M. 1996. Estratigrafía y estructura en la Quebrada de Aparicio, sierra de la Invernada, departamento de Ullúm, San Juan. Trabajo final de Licenciatura, Facultad de Ciencias Exáctas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan. Inédito, 210 pp.
- Monsalvo, G. 2011. Instalación de estación sísmológica de tiempo real. Análisis de datos mediante SAC. Práctica Profesional de la Especialidad de Licenciatura en Geofísica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, 50 pp.
- Moretti, P. A. 2009. Análise de Fácies e Modelo Paleodeposicional da Plataforma Siliciclástica Ordovician da Pré-Cordilheira Argentina. Subcomissão de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de petróleo, Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 126 pp. São Paulo, Brasil.
- Ortega G., Albanesi, G. L., Banchig, A. L. y Peralta, G. L. 2008. High resolution conodont-graptolite biostratigraphy in the Middle-Upper Ordovician of the Sierra de la Invernada Formation (Central Precordillera, Argentina). *Geológica Acta*, 2: 161-180.
- Pittaluga, A., Banchig, A. L., y Bordonaro, O. L. 1997. Depósitos olistostrómicos Silúricos-Devónicos en la Quebrada de Vallecitos, sierra de la Invernada, Precordillera Central, San Juan. II Jornadas de Geología de Precordillera, Actas I: 54-59.
- Spalletti, L. A., Cingolani, C. A., Varela, R., y Cuerda, A. J. 1989. Sediment gravity flow deposits of Ordovician deep-sea fan system (western Precordillera, Argentina), *Sedimentary Geology*, 287-301.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. y Sheriff, R.E. 1990. *Applied geophysics*. Cambridge (England), New York: Cambridge University Press., 770 p.

Recibido: 07 de septiembre, 2012

Aceptado: 24 de febrero, 2013