

# Geometría de la raíz cortical bajo la Cordillera del Rif

## *Geometry of the crustal root beneath the Rif Cordillera*

J. Díaz<sup>1</sup>, A. Gil<sup>1</sup>, R. Carbonell<sup>1</sup>, J. Gallart<sup>1</sup> y M. Harnafi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ICTJA-CSIC, c/ Solé Sabarís sn, 08028 Barcelona.

<sup>2</sup> Institut Scientifique, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, Morocco.

**Resumen:** Los diversos experimentos sísmicos llevados a cabo en el Norte de Marruecos durante la última década han permitido obtener una información detallada de la geometría de la corteza bajo la Cordillera del Rif. En el marco del proyecto RIFSIS se han obtenido modelos de velocidad/profundidad a lo largo de dos perfiles de unos 300 km orientados N-S y E-W, que han puesto de manifiesto la presencia de una zona engrosada, con profundidades de Moho cercanas a los 50 km, bajo el Rif Externo. La geometría cortical de esta zona ha sido investigada también mediante datos de sísmica pasiva, utilizándose métodos basados en el análisis de funciones receptoras y obteniéndose valores coincidentes. El origen del engrosamiento bajo el Rif Externo se relaciona con el efecto de la placa de Alborán, que estaría aún conectada a la litosfera bajo este área, provocando la deformación de la corteza.

**Palabras clave:** Grosor cortical bajo el Rif; Datos de sismicidad natural y de fuente sísmica controlada; Slab de Alboran conectado a la litosfera.

**Abstract:** *The seismic experiments conducted in northern Morocco during the last decade have provided detailed information on the geometry of the crust beneath the Rif Cordillera. In the mainframe of the RIFSIS project, 2D models of velocity / depth along two 300 km-long profiles oriented NS and EW, have revealed the presence of a thickened area, with depths of Moho near 50 km under the External Rif. The crustal geometry of this area has also been investigated using passive seismic data using methods based on the analysis of receiver functions and obtaining consistent values. The origin of the thickening under the External Rif is related to the slab of Alboran, which would still be connected to the lithosphere under this area, hence causing the crustal deformation.*

**Key words:** *Crustal thickness variations beneath the Rif Cordillera; Controlled source and natural seismicity data; Vertical slab attached to the lithosphere beneath the Rif Cordillera*

## INTRODUCCIÓN

La Cordillera del Rif constituye, junto con las Cordilleras Béticas, el llamado Arco de Gibraltar, un arco orogénico que rodea al Mar de Alborán y que forma la zona de límite continental entre Nubia y Eurasia. A pesar de este escenario de convergencia, se observan claras evidencias de tectónica extensional que requieren modelos geodinámicos complejos y a menudo excluyentes (p.e. Platt et al 2013). Para discernir entre los diversos modelos propuestos, resulta imprescindible progresar en el conocimiento de la estructura cortical de la zona, de la que se disponía de escasa información. Durante la última década se han realizado con este objetivo diversas campañas de adquisición de datos sísmicos a partir de fuentes activas, (RIFSIS, Gil et al., 2014; GASSIS-Westmed, Gracia et al., 2012) así como diversos despliegues de redes temporales de estaciones sísmicas de banda ancha (TopoIberia, Diaz et al., 2009; PICASSO) Platt et al., 2008).

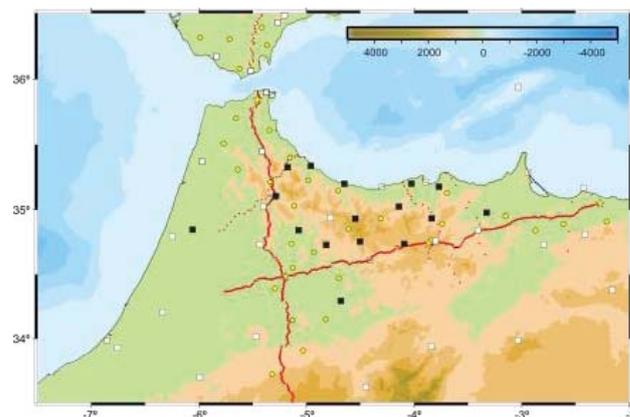


FIGURA 1. Disposición de los perfiles sísmicos principales RIFSIS y de las estaciones de banda ancha utilizadas en los experimentos de sismicidad natural. Los cuadrados blancos representan las estaciones TopoIberia, los círculos amarillos las estaciones PICASSO y los cuadrados negros las estaciones desplegadas en el marco del proyecto RIFSIS.

## DATOS SÍSMICOS DE FUENTE ACTIVA

En el marco del proyecto RIFSIS se han modelizado dos perfiles sísmicos de refracción / reflexión de gran ángulo de unos 300 km de longitud

cada uno y orientados en dirección NS y EW (Figura 1).

Gil et al. (2014) han mostrado que la profundidad del Moho varía de forma clara entre las secciones oriental y occidental del perfil EW (Figura 2). Mientras que en la zona oriental el Moho se sitúa a unos 33 km, en la zona occidental el grosor cortical excede los 45 km. El perfil NS muestra también una gran variación entre las zonas del Rif, donde el Moho se sitúa a unos 43 km de profundidad y la zona del Gharb, donde las profundidades son de 30-35 km (Figura 2).

Simultáneamente a este experimento, se llevó a cabo la adquisición de perfiles sísmicos marinos en el marco del proyecto GASSIS-Westmed. Las

explosiones de cañones de aire comprimido de esta campaña fueron registradas también en tierra mediante el despliegue de diversos perfiles adicionales con el objetivo de modelizar la transición entre el continente y el Mar de Alborán. Díaz et al. (2015) han analizado recientemente los registros de las explosiones de cada perfil en las estaciones situadas fuera de línea mediante la elaboración de pseudo-perfiles CMP (common midpoint stack) a lo largo de diversas orientaciones. Se han utilizado también los tiempos de llegada de las fases PmP identificadas fuera de línea para estimar el grosor cortical asumiendo una velocidad media en la corteza. Con ello ha sido posible obtener un primer mapa de grosor cortical de la zona Norte de Marruecos (Figura 3).

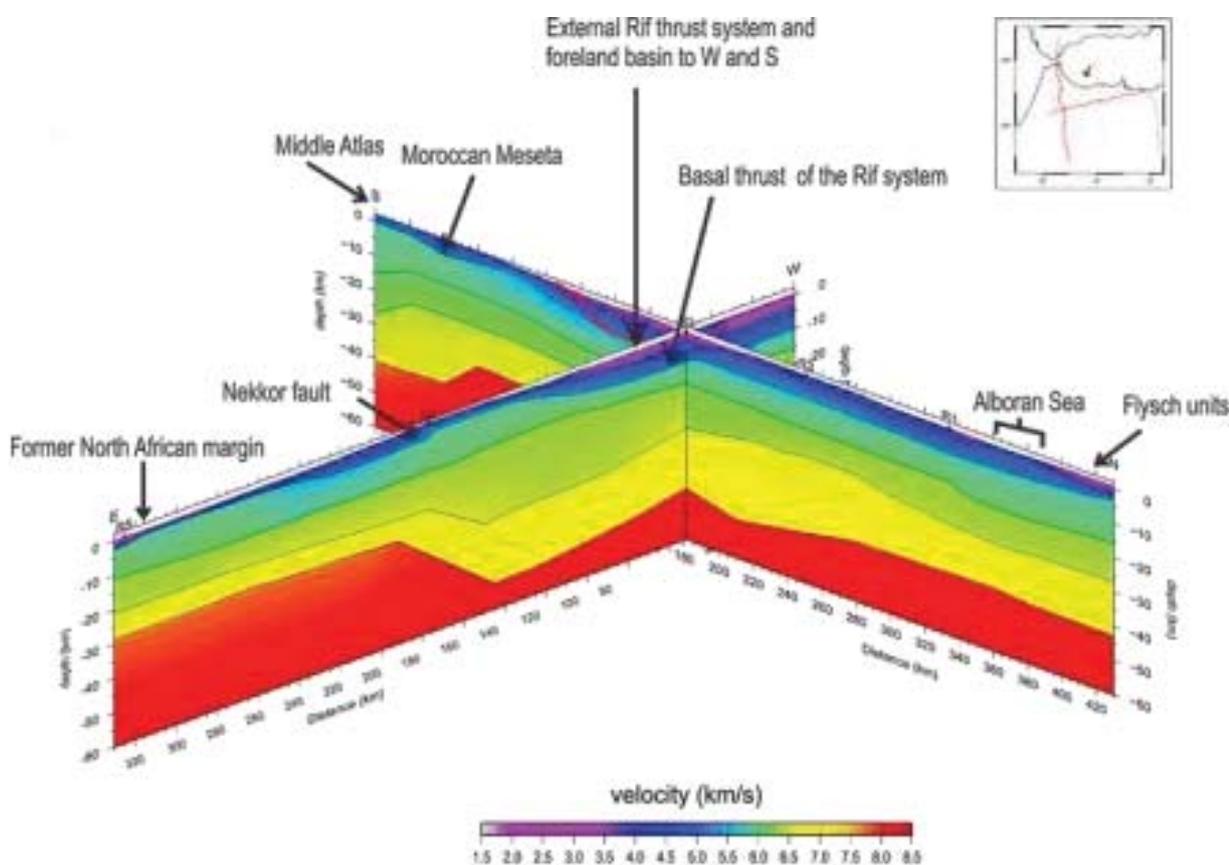


FIGURA 2. Modelización velocidad-profundidad de los perfiles sísmicos RIFSIS a partir del método de trazado de rayos.

## DATOS DE SISMICIDAD NATURAL

En paralelo, se han calculado las funciones receptoras de los terremotos distantes (telesismos) registrados por las diversas redes sísmicas desplegadas en el área. Se ha reanalizado los datos de las estaciones PICASSO y TopoIberia, incluyendo en este último caso un periodo de registro mayor que el utilizado en Mancilla et al. (2012). Se han analizado también los datos recogidos por un despliegue adicional de 13 estaciones

TopoIberia para cubrir con mayor resolución la zona de mayor complejidad estructural. Siempre que ha sido posible, se ha utilizado el método clásico de sumación H-K para estimar la profundidad del Moho y el coeficiente de Poisson medio en la corteza (Figura 4).

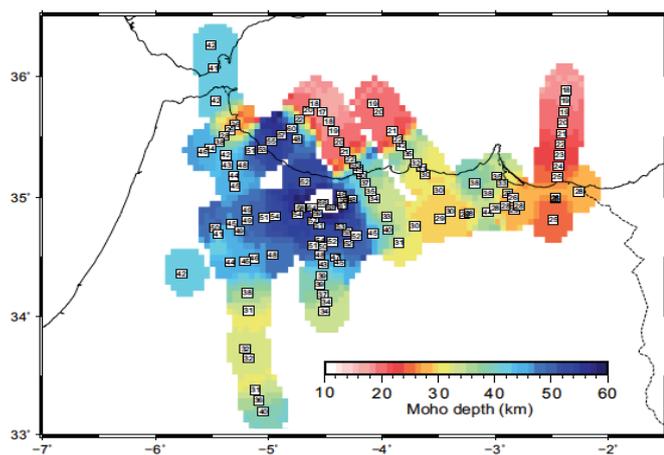


FIGURA 3: Mapa de profundidad del Moho inferidos de los experimentos sísmicos de fuente controlada. Los colores azules muestran el engrosamiento de la corteza bajo el Rif Externo, con valores que exceden los 50 km

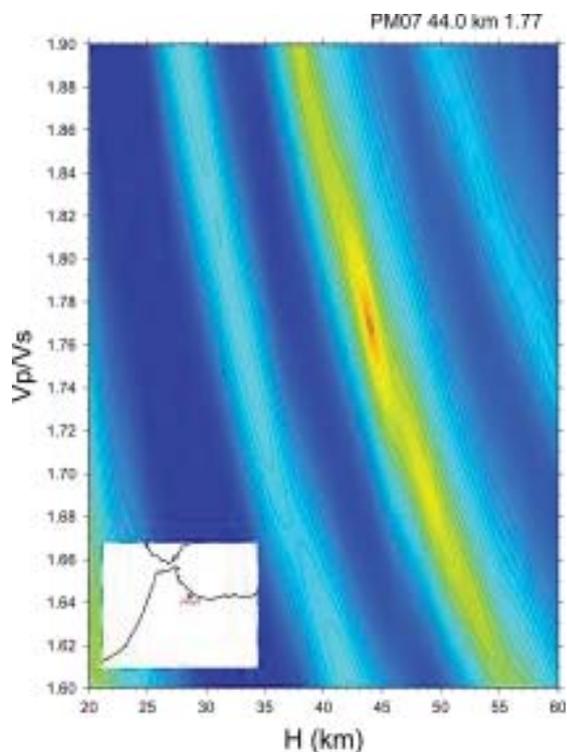


FIGURA 4. Análisis H-K de la estación PM07, situada en la zona engrosada de la Cordillera del Rif, para la que el grosor cortical se estima en 44 km.

En zonas de gran complejidad estructural este método puede dar resultados erróneos, por lo que en estos casos se han utilizado directamente las lecturas de los tiempos de llegada de las fases convertidas Ps. Con todo ello se ha elaborado un segundo mapa de grosor cortical del Norte de Marruecos (Figura 5), que, como discutiremos en la próxima sección, es compatible con el obtenido a partir de datos de sismica activa.

### INTERPRETACIÓN Y CONCLUSIONES

Los mapas de profundidad de Moho obtenidos a partir de datos sísmicos de fuente controlada y de

sismicidad natural proporcionan una imagen muy consistente de las variaciones de la corteza terrestre en 3D, claramente dominado por la presencia de una gran raíz de la corteza por debajo del Rif Externo. Las estimaciones de espesor de la corteza derivadas de los dos tipos de datos son por lo general consistentes, con diferencias dentro del rango de error generalmente admitido (p. e. Spada et al., 2013). Los resultados son también compatibles con el mapa de anomalías de Bouguer, que presenta una importante anomalía negativa en el área engrosada.

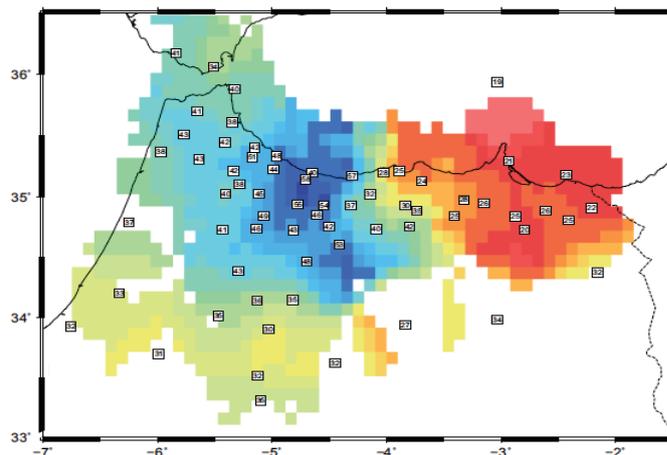


FIGURA 5. Mapa de profundidad del Moho inferidos del análisis de datos de sismicidad natural. Los colores azules muestran el engrosamiento de la corteza bajo el Rif Externo, con valores que exceden los 50 km.

Las diversas tomografías sísmicas disponibles muestran una losa (slab) de velocidad de propagación rápida bajo la zona de Alborán que llega a los 600 km de profundidad y que se interpreta como derivado de la subducción de corteza oceánica. Resultados recientes indican que este slab no puede ser identificado a profundidades menores de 100 km bajo las Béticas, pero sí bajo el Rif (Turner et al., 2014). Esto se interpreta asumiendo que el slab está aún conectado con la litosfera bajo esta zona, si bien estaría desconectando progresivamente para sumergirse en el manto. Otros estudios basados en datos de geodesia o en análisis del grado de compensación isostática han llegado recientemente a conclusiones similares (Perouse et al., 2010; Petit et al., 2015). Nuestro estudio aporta nuevos elementos en favor de esta hipótesis, ya que la zona de máximo engrosamiento puede interpretarse como el resultado del empuje descendente generado por el slab de Alborán.

### AGRADECIMIENTOS

La financiación para este trabajo proviene del Ministerio de Economía mediante los proyectos CGL2009-09727 (RIFSIS), CSD 2006-00041 (TopoIberia), CGL2007-63889 (SIMA), CGL2008-

3474 (TopoMed) y de la subvención de la Generalitat de Catalunya 2009SGR996. Hemos utilizado también datos del proyecto PICASSO, financiado por el proyecto EAR0808939 de la NSF de Estados Unidos.

## REFERENCIAS

- Díaz, J., A. Villaseñor, J. Gallart, J. Morales, A. Pazos, D. Córdoba, J. Pulgar, J.L. García-Lobón, M. Harnafi and the TopoIberia Seismic Working (2009). The IBERARRAY broadband seismic network: a new tool to investigate the deep structure beneath Iberia. *Orfeus Newsl.* 8, 2.
- Díaz, J., Gil, A., Carbonell, R., Gallart, J. and Harnafi, M. (2016). Constraining the crustal root geometry beneath Northern Morocco, *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2015.12.009
- Gil, A., J. Gallart, J. Díaz, R. Carbonell, A. Levander and M. Harbafi (2014) Crustal structure beneath the Rif Cordillera, North Morocco, from the RIFSIS wide-angle reflection seismic experiment. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 15, 4712–4733, doi:10.1002/2014GC005485.
- Gracia, E., C.R. Ranero, I. Grevemeryer, The WestMed, TopoMed, and GEomargen-1 cruise parties (2012), Seismic Images and Wide-angle Velocity constrains of the structure and geodynamic origin of the Gibraltar Arc system: A geological interpretation of the Gulf of Cadiz imbricated wedge, the western and eastern Alboran basins, and the South-Balearic basin. *Geophys. Res. Abs.*, Vol 14, EGU 2012-8209 presented at 2043 spring Meeting EGU, Vienna, Austria, April
- Mancilla, F.L., D. Stich, J. Morales, J. Julià, J. Díaz, A. Pazos, D. Córdoba, J.A. Pulgar, P. Ibarra, M. Harnafi, and F. Gonzalez-Lodeiro (2012), Crustal thickness variations in Northern Morocco, *J. Geophys. Res.*, 117, B02312, doi:10.1029/2011JB008608
- Pérouse, E., P. Vernant, J. Chery, R. Reilinger, and S. McClusku, (2010), Active surface deformation and sub-lithospheric processes in the western Mediterranean constrained by numerical models, *Geology* 38(9), 823-826, doi: 10.1130/G30963.1
- Petit, C., Le Pourhiet, L., Scalabrino, B., Corsini, M., Bonnin, M. and Romagny, A. (2015). Crustal structure and gravity anomalies beneath the Rif, northern Morocco: implications for the current tectonics of the Alboran region. *Geophys. J. Int.* 202 (1): 640-652. doi: 10.1093/gji/ggv169
- Platt, J.P., Th.W. Becker, R.L. Evans, E.D. Humphreys, C.T. Lee, and A. Levander (2008), PICASSO:testing models for upper mantle processes beneath the Alboran Basins and the Gibraltar Arc (Western Mediterranean), *Geol. Soc. Am. Abstrat. Prog.*, 40(6), 273.
- Platt, J.P., Behr W, Johanesen, K., and Williams R. (2013) The Betic-Rif Arc and Its Orogenic Hinterland: A Review. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* Vol. 41: 313-357 doi: 10.1146/annurev-earth-050212-123951
- Spada, M., Bianchi, I., Kissling, E., Piana Agostinetti, A., Wiemer, S. (2013). Combining controlled-source seismology and receiver function information to derive 3-D Moho topography for Italy. *Geophys. J. Int.*, 194, 1050-10698, doi: 10.1093/gji/ggt148
- Turner, S., I. Palomeras, A. Levander, R. Carbonell and L. Cin-ty (2014), Evidence for Ongoing Lithospheric Removal in the Western Mediterranean: Ps Receiver Function Results from the PICASSO Project, G3, doi:10.002/201GC005124