



**Memoria Técnica de Acciones Complementarias  
Modalidad E (no EXPLORA)  
(Acciones de política científica-tecnológica)  
Convocatoria 2008**

**Nombre del Investigador Principal (Apellidos, Nombre):** Jiménez-Munt, Ivone

**Título de la Acción Complementaria:** Caracterización sísmica de la corteza y manto litosférico del Alto Atlas.

**Organismo:** Consejo Superior de Investigaciones Científicas

**Área Temática de Gestión:** Ciencias de la Tierra

---



**Resumen de la actuación para la que solicita ayuda: (máximo aproximado 100 palabras)**

El objetivo de esta acción complementaria, asociada al proyecto del Plan Nacional TopoAtlas (CGL2006-05493/BTE), es la estimación de los espesores de corteza y de manto litosférico en el Alto Atlas, así como la evaluación de las variaciones de velocidades sísmicas del manto litosférico a lo largo de la cadena y sus márgenes, para correlacionarlas con variaciones de temperatura, densidad y composición. Para esto, se propone instalar 4 estaciones sísmicas de banda ancha a lo largo de la cadena del Atlas por un periodo mínimo de un año, aprovechando el despliegue de estaciones de proyectos afines (SIBERIA) que estudian la zona del Rif y el Margen Marroquí. Estas estimaciones permitirán constreñir mejor el modelado numérico geodinámico que se está llevando a cabo en el marco de TopoAtlas y así comprender mejor la interacción entre procesos que ha conformado las características tectónicas y del relieve de la cadena.

**Summary**

**Title:** Seismic characterization of the crust and lithospheric mantle beneath the High Atlas

The objective of this complementary action, associated to the Project "TopoAtlas" (CGL2006-05493/BTE) is to estimate the crust and lithosphere-mantle thicknesses beneath several points in the High Atlas and to evaluate the seismic velocities changes of the lithospheric mantle along the Atlas chain and the margins to correlate with the temperature, density and composition variations. In order to do that, we propose the deployment of 4 broadband stations along the axis of the Atlas Mountains for at least one year, seizing the opportunity of the recent broadband stations deployment in the project "SIBERIA" to study the Rif and the Moroccan margin. These estimations will constrain the geodynamic numerical model that we are developing on the "TopoAtlas" project and, therefore, we will get a better understanding of the several processes that shaped the tectonic and relief characteristics of the chain.



## 1.- Objetivos de la propuesta

El objetivo de esta propuesta es emprender una acción puntual dentro del proyecto 'TopoAtlas' (CGL2006-05493/BTE) para determinar en primera aproximación el espesor cortical y litosférico en la cadena del Atlas y las variaciones de velocidad en el manto.

La cadena del Atlas es un orógeno alpino intraplaca inusual, caracterizado por un acortamiento tectónico muy moderado ( $< 30$  km) y por la ausencia de cuencas sedimentarias de antepaís de relevancia (Figura 1). Recientes estudios geológicos y resultados obtenidos de la modelización de los campos potenciales sugieren que estas peculiares características están relacionadas con la fuerza ascendente producida por un adelgazamiento del manto litosférico. Estos estudios (p.e. Fullea et al., 2007) sugieren además que este adelgazamiento sería muy pronunciado, pasando de unos 200 km de espesor litosférico en el norte de Marruecos, a menos de 100 km en la parte central del Atlas y Anti-Atlas (Figura 2a). Ni la geometría ni los mecanismos responsables de este adelgazamiento del manto litosférico son todavía bien comprendidos. El adelgazamiento propuesto en base a datos de campos potenciales depende fundamentalmente del espesor cortical considerado y de la densidad media de la corteza y manto litosférico. Esto hace que sea de gran interés para la modelización tener bien determinadas estas variables.



Fig. 1. Mapa tectónico de la Cadenas Atlásicas de Marruecos (de Arboleya et al., 2004).



En la actualidad se están llevando a cabo 4 proyectos del Plan Nacional, 3 de ellos liderados por investigadores del Instituto de Ciencias de la Tierra “Jaume Almera” (ICTJA-CSIC), que tienen como objetivo mejorar el conocimiento de la estructura de la corteza y manto superior en las cordilleras del Atlas y del Rif en Marruecos, así como los procesos geodinámicos responsables de esta estructura.

En el primero de ellos, ‘TopoAtlas: Modelado numérico de la evolución tectónica y topográfica de la cordillera del Atlas en Marruecos’ (CGL2006-05493/BTE), se están llevando a cabo estudios de modelización numérica que sugieren que los procesos sublitosféricos podrían ser uno de los principales motores en la evolución de la cadena Atlásica. Un mejor conocimiento tanto de la estructura como de la composición actual de la litosfera será de gran importancia para constreñir mejor el modelado de los diferentes procesos que han tenido lugar en la zona.

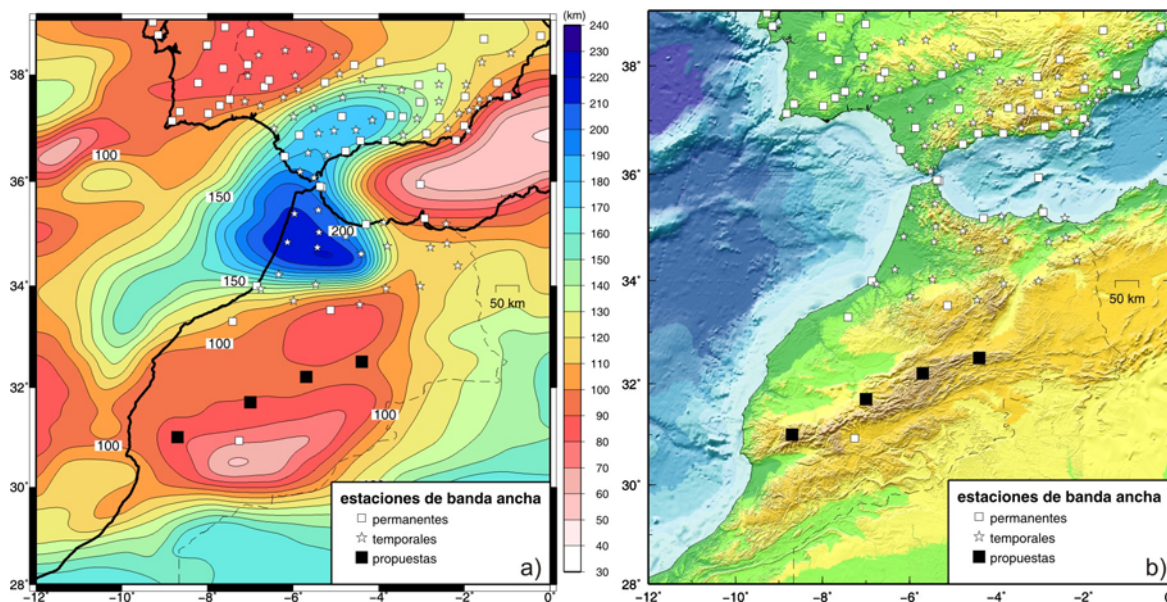


Fig. 2. a) Modelado de la profundidad de la base litosférica a partir de los campos potenciales (Fullea et al., 2007) y b) mapa topográfico de la zona, con las estaciones sísmicas existentes y las que se proponen instalar en este proyecto (cuadrados negros).

En segundo lugar, dentro del proyecto del Plan Nacional SIBERIA (CGL2006-01171/BTE), se han desplegado 18 estaciones de banda ancha en el norte de Marruecos y el Rif, que vienen a sumarse a las 38 desplegadas en el sur de la Península Ibérica en el marco del proyecto TOPO-IBERIA (Consolider-Ingenio CSD2006-00041). Esta red sísmica temporal, con una densa cobertura de estaciones de banda ancha (una cada 60 km), permitirá obtener imágenes de la estructura del subsuelo de estas zonas con una resolución sin precedentes.

En tercer lugar, dentro del proyecto SIMA (CGL2007-63889) se propone la realización de dos perfiles de refracción (gran ángulo) a través del Atlas que



proporcionarán una imagen en 2D de la corteza y manto superior a lo largo de esas dos transectas.

Finalmente, el grupo de la Universidad Autónoma de Barcelona, con más de 10 años de experiencia en el Atlas, está liderando el proyecto TERA (CLG2006-07226) donde están estudiando la geología y morfología de la cadena del Atlas. Actualmente existe ya una colaboración entre este grupo y el equipo integrante de esta acción complementaria.

Sin embargo, la estructura profunda de la región del Atlas continúa siendo muy pobremente conocida, debido principalmente a la ausencia de sismógrafos de banda ancha permanentes o temporales en esta región. Además, las estaciones existentes actualmente en Marruecos se encuentran en las zonas de litosfera gruesa o donde la variación del espesor de ésta es muy pronunciado, habiendo una ausencia total de estaciones en la región donde se han obtenido los valores mínimos del espesor litosférico (ver Figura 2a).

## Objetivos

Los objetivos de esta Acción Complementaria son el de poder estimar en primera aproximación la profundidad de la discontinuidad corteza-manto (Moho) y del límite litosfera-astenosfera (LAB según sus siglas en inglés) utilizando métodos sísmicos. Además, evaluar la variación de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas en la corteza y manto litosférico a lo largo de la cadena del Atlas.

Con este objetivo se propone la instalación de 4 estaciones sísmicas de banda ancha a lo largo del Alto Atlas, que es en la actualidad una zona que carece de este tipo de instrumentación. Este es un esfuerzo moderado en comparación con los que se están llevando a cabo en el marco de los otros proyectos del Plan Nacional citados, y que además reúne circunstancias únicas de oportunidad que nos llevan a presentar la solicitud dentro de esta modalidad:

1. La oportunidad de disponer a muy corto plazo (a partir del verano de 2008) de 4 estaciones de banda ancha pertenecientes al consorcio público POLARIS de Canadá para ser desplegadas según se propone en este proyecto (ver carta de apoyo adjunta del Prof. David Eaton de la Universidad de Calgary).
2. La coincidencia en el tiempo de un experimento sísmico en el norte de Marruecos utilizando el mismo tipo de instrumentación (Figura 2), dentro del proyecto Siberia llevado a cabo por investigadores que también participan en la acción que aquí se presenta. Esto permitirá aprovechar la infraestructura y las colaboraciones ya existentes en Marruecos con el Institut Scientifique de la Universidad Mohammed V Agdal de Rabat



De esta forma, con un esfuerzo adicional de financiación y de personal muy moderado, sería posible extender de manera notable la cobertura de estaciones de banda ancha en Marruecos, incluyendo por vez primera la región del Atlas y por tanto obtener información de la estructura sísmica en esta zona.

## Metodología

La metodología propuesta en esta Acción Complementaria consiste en el despliegue en el Alto Atlas durante un periodo mínimo de un año de 4 estaciones sísmicas de banda ancha siguiendo la dirección principal ENE de la cordillera cubriendo así la zona actualmente desprovista de estaciones sísmicas. Debido a que las estaciones son de bajo mantenimiento y tienen la capacidad de transmitir los datos vía satélite, sin coste adicional podrían mantenerse instaladas por un periodo superior a la duración de esta Acción Complementaria (1 año).

Los datos registrados por estas estaciones se integrarán con los datos obtenidos por las otras estaciones temporales y permanentes actualmente en funcionamiento en Marruecos y en el sur de la Península Ibérica y Canarias, y se procesarán de forma conjunta.

Los métodos sísmicos que se utilizarán para obtener la estructura de la corteza y manto superior en el Atlas serán:

1. Estudio de funciones receptoras de ondas P para obtener la profundidad del Moho bajo las estaciones instaladas
2. Estudio de funciones receptoras de ondas S para determinar la profundidad del límite litosfera-astenosfera (LAB)
3. Análisis de los residuos de tiempos de llegada de ondas internas de terremotos lejanos (telesismos) para establecer las variaciones de velocidades laterales a lo largo de la cadena del Atlas utilizando tomografía sísmica.
4. Estudio de la dispersión de ondas superficiales, a partir de terremotos y de la correlación de largas series temporales de ruido ambiente, para determinar la estructura de velocidades de las capas más superficiales.

Los métodos descritos en los apartados 1 y 2 proporcionarán estimaciones del espesor de la corteza y de la litosfera justo bajo las estaciones instaladas. Para los estudios de los apartados 3 y 4 se utilizarán también todos los datos de estaciones disponibles en Marruecos, sur de la Península Ibérica y Canarias, permitiendo extender de forma considerable la región para la que se obtendrán imágenes detalladas de las variaciones laterales de velocidades sísmicas utilizando métodos tomográficos.



## Plan de trabajo

La primera tarea de la acción consistirá en la búsqueda de los sitios para la instalación de las estaciones sísmicas. Las localizaciones propuestas indicadas en la Figura 2 se han seleccionado coincidiendo con los perfiles geológicos del estudio de Teixell et al., (2003), con la región de mayor adelgazamiento litosférico (Fullea et al., 2007) y con la existencia de carreteras que permiten el acceso al Alto Atlas. Las ubicaciones finales deberán tener en cuenta además la seguridad de los equipos, a la vez que estar alejadas de zonas con fuentes de ruido (carreteras, maquinaria, etc.). El conocimiento de la zona por parte de los participantes en este proyecto de la Universidad Mohammed V de Rabat y la colaboración con el grupo de la Universidad Autónoma de Barcelona (M.L. Arboleya y A. Teixell) será de gran utilidad para la selección de las ubicaciones finales.

En una segunda fase se procederá a la instalación de los equipos. Esta fase necesitará de 2 días por estación sin incluir los desplazamientos. A diferencia de otros tipos de instrumentos sísmicos, los sensores de banda ancha requieren de una instalación que garantice un buen acoplamiento con la roca aflorante, así como un buen aislamiento del sensor respecto a las variaciones de temperatura. Con posterioridad, se harán visitas de mantenimiento a las estaciones, en coordinación con las planeadas dentro del proyecto TopoAtlas y SIBERIA.

En cuanto se comiencen a recibir datos de estas estaciones, se integrarán en las bases de datos que están siendo creadas en el marco de los proyectos antes descritos, y serán procesados para obtener funciones receptoras de ondas P y S y modelos tomográficos a partir de ondas internas y superficiales según se ha detallado en el apartado de Metodología.

Los estudios sísmicos propuestos proporcionarán importantes restricciones (*constraints*) de cara a la modelización numérica que se lleva a cabo en TopoAtlas, que integran el cálculo de la isostasia, la deformación tectónica y los procesos superficiales de erosión/sedimentación en un modelo evolutivo de orogénesis. En particular, estos modelos se beneficiarán de la cuantificación del engrosamiento cortical bajo la cordillera y de la estimación de la magnitud del posible adelgazamiento mantélico responsable de parte de la actual topografía. Los resultados permitirán además:

- Contrastar la estructura resultante de los modelos tomográficos con la obtenida a partir de datos geopotenciales.
- Validar las anomalías de densidad y temperatura utilizadas en la modelización numérica a partir de las anomalías de velocidad de propagación de las ondas sísmicas.
- Inferir las variaciones de composición mineralógica del manto litosférico adelgazado en base a las variaciones laterales de las velocidades sísmicas obtenidas.



## Referencias

- Arboleya, M.L., A. Teixell, M. Charroud y M. Julivert, A structural transect through the High and Middle Atlas of Morocco, *Jour. of African Earth Sci.*, 39, 319-327, 2004.
- Fullea J., M. Fernández, H. Zeyen, J. Vergés, A rapid method to map the crustal and lithospheric thickness using elevation, geoid anomaly and thermal analysis. Application to the Gibraltar Arc System, Atlas Mountains and adjacent zones, *Tectonophysics*, 430, 97-117, 2007.
- Teixell, A., M.-L. Arboleya, M. Julivert, and M. Charroud, Tectonic shortening and topography in the central High Atlas (Morocco), *Tectonics*, 22(5), 1051, doi:10.1029/2002TC001460, 2003