

Mecanismo focal y sismotectónica: aportación de Agustín Udías

Elisa BUFORN¹ y Carmen PRO²

¹ Departamento de Geofísica y Meteorología. Universidad Complutense de Madrid

² Departamento de Física. Universidad de Extremadura.

RESUMEN

En este trabajo se presenta las contribuciones de Agustín Udías al estudio del mecanismo focal de los terremotos y a la sismotectónica. Los primeros trabajos corresponden al cálculo del mecanismo focal de los terremotos a partir del ángulo de polarización de las ondas S, para más tarde incorporar datos conjuntos del primer impulso de la onda P y ángulo de polarización de la S. El desarrollo de métodos numéricos está basado en este tipo de datos y se utilizó para el cálculo del mecanismo conjunto de una serie de terremotos. Otra técnica desarrollada, es la basada en la función de directividad utilizando datos de ondas Rayleigh. Los fundamentos teóricos y prácticos de estas metodologías aparecen recogidos en gran número de trabajos publicados en los últimos 40 años. Los estudios de sismotectónica corresponden a la región Azores-Gibraltar y a todo el Mediterráneo, con trabajos específicos para la región Ibero-Mogrebí.

Palabras clave: mecanismo focal, sismotectónica, ondas P y S, directividad, Azores-Gibraltar, Mediterráneo, Ibero-Mogrebí.

Focal mechanism and seismotectonics: contribution of Agustín Udías

ABSTRACT

In this paper we present the contributions of Agustín Udías in the study of the focal mechanism of earthquakes and the seismotectonics. The first works correspond to the determination of the focal mechanism of the earthquakes from the S wave polarization angle, later to incorporate joint information of the first motion of the wave P and S wave polarization angle. The development of numerical methods is based on this type of information and was used for the calculation of the joint mechanism of a series of earthquakes. Another developed methodology is based in the directivity function of Rayleigh waves. The theoretical and practical basis of these methodologies was presented in large number of papers published in the last 40 years. The seismotectonic studies correspond to the Azores-Gibraltar region and the whole Mediterranean, with specific works for the Ibero-Maghrebian region.

Keywords: focal mechanism, seismotectonics, P and S waves, directivity, seismotectonics, Azores-Gibraltar, Mediterranean, Ibero-Maghrebian.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha adquirido gran auge la utilización de catálogos de mecanismos focales de terremotos que se encuentran disponibles en internet. Entre estos catálogos pueden citarse el de Harvard (CMT), del ETH de Zurich, INGV de Roma, etc., o con carácter nacional el del Instituto Geográfico Nacional (ING) o Instituto Andaluz de Geofísica (IAG) entre otros. Aunque útiles, estos catálogos tienen una validez muy limitada, ya que en muchos casos las soluciones son preliminares (por ejemplo en el caso del ETH o IGN), o no tienen resolución en profundidad para sismos muy superficiales (CMT). Sin embargo, la existencia de estos datos en la red no sería posible si previamente no se hubiera desarrollado una metodología para el cálculo del mecanismo focal de los terremotos.

Históricamente, el primer método y más sencillo es el basado en el signo del primer impulso de la onda P y que fue desarrollado por P. Byerly en diversos trabajos entre 1926 y 1955. Estos primeros métodos, a los que se unieron los de la onda S desarrollados por Stauder en 1950, eran de tipo gráfico utilizando una proyección estereográfica de la esfera focal. Sin embargo con el desarrollo de los ordenadores en los años 60 comienzan a desarrollarse métodos numéricos que utilizan como fuente de información tanto la onda P como la onda S.

El mecanismo focal de los terremotos es una de las bases de cualquier estudio sismotectónico. Con este término se define el estudio de la ocurrencia y características de los terremotos de una región en relación con las condiciones tectónicas y la dinámica general de la corteza terrestre, se basa por tanto en el estudio de la sismicidad y el mecanismo focal de los terremotos. La palabra sismotectónica fue empleada por primera vez por Sieberg en 1923 en un mapa que representaba de forma conjunta rasgos sísmicos y tectónicos. Con el desarrollo en los años 30 de las primeras soluciones de determinación del plano de falla de los terremotos, los estudios de sismotectónica experimentan un notable avance. A partir de 1968 los estudios de mecanismo focal experimentan un auge ya que son una fuente importante de información en el desarrollo de la tectónica de placas.

Diversos autores han contribuido al desarrollo de estos métodos numéricos para la determinación del mecanismo focal y a su aplicación en estudios de sismotectónica. Entre ellos se encuentra Agustín Udías, un pionero en este campo y a cuyas contribuciones está dedicado este trabajo.

2. MECANISMO FOCAL A PARTIR DE ONDAS P Y S

A finales de los años 50 comienzan a utilizarse ondas internas para el cálculo del mecanismo focal de los terremotos. Sismólogos de la escuela rusa utilizan de forma conjunta la distribución de signos del primer movimiento de las ondas P, SV y SH. Otra corriente es la desarrollada en Estados Unidos que utiliza el

ángulo de polarización de la onda S siguiendo la metodología propuesta por Stauder (1960).

En sus primeros trabajos Agustín Udías (Stauder y Udías, 1963) utiliza de forma conjunta datos del primer impulso de la onda P junto con el ángulo de polarización de la onda S para determinar el mecanismo focal de terremotos de las islas Aleutinas, mal determinado sólo con datos de la P. En 1964 Udías publica su tesis en la que desarrolló uno de los primeros métodos numéricos para determinar el mecanismo focal de los terremotos a partir de datos de la onda S (Udías, 1964). Es un método de mínimos cuadrados para minimizar el residuo entre el ángulo de polarización de la onda S observado en N estaciones y el calculado de forma teórica a partir de una orientación de los ejes de esfuerzos, introduciendo, por vez primera, el uso de coordenadas esféricas para representar directamente las observaciones sobre la esfera focal. Este método lo aplica al estudio de 34 terremotos de la región de Kamchatka-Kuriles y a partir de los resultados obtenidos, propone un modelo tectónico para la zona (Stauder y Udías, 1964). El estudio del terremoto del Golfo de Cádiz de 1964 (Udías, 1967) es el primer trabajo que realiza de terremotos de España determinándose el mecanismo focal utilizando datos del primer impulso de la onda P y del ángulo de polarización de la onda S (figura 1). En este trabajo concluye la correlación entre el terremoto de 1964 y la posible prolongación hacia el sur de la falla del Guadalquivir, no siendo posible sin embargo comparar el patrón de esfuerzos obtenido para este terremoto con los de otros 23 terremotos seleccionados de la zona, debido a la escasez de observaciones para calcular los mecanismos focales de los terremotos previamente seleccionados.

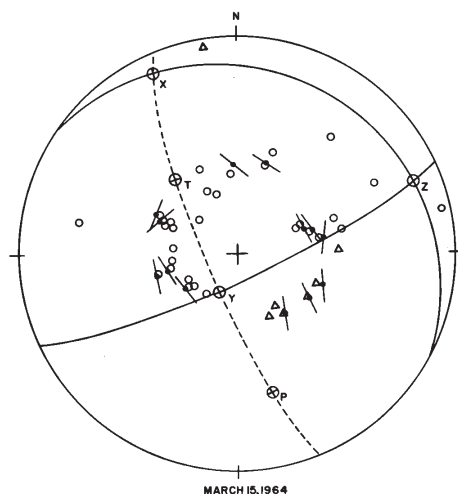


Figura 1.- Mecanismo focal del terremoto de 15 de Marzo de 1964. Los círculos indican compresiones y los triángulos dilataciones de la onda P. Los círculos negros con barra indican los ángulos de polarización de la onda S (Udías, 1967).

En 1969, Udías y Bauman publican el método numérico que ya había sido utilizado en el estudio del terremoto del Golfo de Cádiz. Se basa en una minimización por mínimos cuadrados de los residuos obtenidos entre los signos teóricos del primer impulso de la onda P y del ángulo de polarización teórico de la onda S, para una orientación dada de los ejes de tensión y presión, y los valores observados. El método, que utiliza diferentes pesos para las observaciones de la onda P y S, se aplica a tres terremotos analizando los errores de las soluciones. En 1970 se publica un estudio completo del terremoto del Golfo de Cádiz de 1964 (Udías y López Arroyo, 1970) calculando diferentes parámetros focales como magnitud, localización hipocentral, energía liberada, caída de esfuerzos, etc. El mecanismo focal se estudia utilizando observaciones de ondas internas y superficiales, aplicando por vez primera la función de directividad de las ondas Rayleigh para determinar el plano de falla y la velocidad de ruptura. A partir del análisis espectral de estas ondas se calcula el momento sísmico escalar y las dimensiones de la falla.

El uso de ondas superficiales para el cálculo del mecanismo focal de los terremotos es analizado con detalle en Udías (1971). A partir de la función de directividad propuesta por Ben-Menahen (1961), Udías introduce la función de directividad generalizada (figura 2), calculando la longitud y velocidad de ruptura de cuatro terremotos ocurridos en el Atlántico norte, Aleutinas y Azores. También calcula otros valores como energía sísmica, caída de esfuerzos, esfuerzo medio aparente y dislocación media. Uno de los resultados más destacados es la obtención de valores bajos para la velocidad de ruptura (1.5 km/s) en terremotos de dorsales oceánicas.

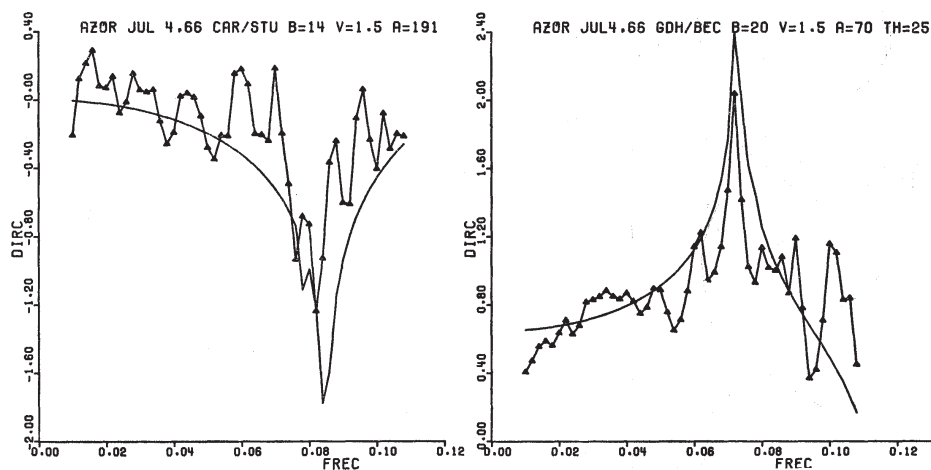


Figura 2.- Función de directividad teórica (línea continua) y observada (triángulos) para el terremoto de 4 de julio de 1966 de Azores. En la parte superior se muestran los pares de estaciones utilizadas, la longitud de la ruptura (B) y velocidad de ruptura (V) (Udías, 1971).

Otro terremoto objeto de un estudio detallado, es el del cabo de San Vicente de 28 de Febrero de 1969 (López Arroyo y Udías, 1972) para el que se estudia no solo el mecanismo focal del sismo, sino también la serie de réplicas y la sismicidad de la zona. Debido a la saturación de las ondas internas, solo es posible utilizar el signo del primer impulso de la onda P para el cálculo de la orientación de los planos de falla. El momento sísmico escalar y las dimensiones y velocidad de la fractura se calcularon a partir del análisis espectral de ondas superficiales G1, G2, G3 y G4, así como de la función de directividad.

En los años 80, en colaboración con la Universidad de Berkeley, se desarrolla un método probabilístico para el cálculo de la orientación del mecanismo focal (Brillinger et al., 1980). El método utiliza el signo del primer impulso de la onda P y a partir de la minimización de una función de máxima verosimilitud que relaciona las observaciones con las amplitudes teóricas de la onda P, permite el cálculo de la orientación del plano de falla y de los ejes de esfuerzos así como de sus errores y la proporción de aciertos. El método puede aplicarse para una determinación conjunta del mecanismo focal de una serie de terremotos, mediante la introducción de un peso asignado a cada sismo (figura 3), permitiendo obtener el patrón regional de esfuerzos para una zona (Udías et al., 1982; Udías y Bufo 1988). Una modificación de este método permite la utilización conjunta de datos de la Onda P y S (Udías y Bufo, 1984).

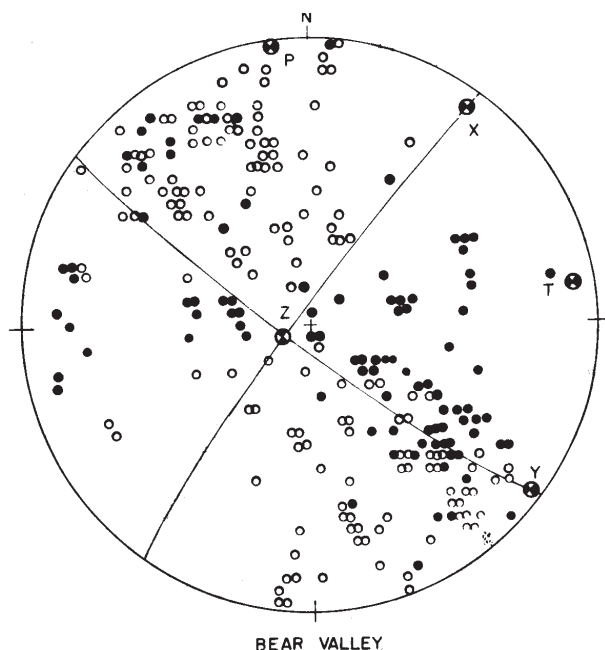


Figura 3.- Mecanismo focal conjunto de 19 terremotos del Bear Valley (California) obtenido a partir del signo del primer impulso de la onda P. En negro compresiones y en blanco dilataciones (Brillinger et al., 1980).

Con motivo del centenario de la Seismographic Station de la Universidad de Berkeley, se publica un volumen conmemorativo. Udías participa con un trabajo sobre el desarrollo histórico de los estudios del mecanismo focal de los terremotos (Udías, 1989). Dos años más tarde, publica un extenso trabajo de carácter monográfico sobre el problema del mecanismo focal de los terremotos, que incluye la evolución de las diferentes teorías y los métodos para el cálculo de los mismos (Udías, 1991).

Los fundamentos teóricos del mecanismo focal de los terremotos son expuestos con todo detalle en cuatro capítulos (16-19) del texto *Principles of Seismology* (Udías, 1999) en el que se abordan tanto aspectos teóricos como prácticos del cálculo del mecanismo focal. El tema es tratado desde el planteamiento más sencillo de un modelo cinemático de fuente puntual, hasta modelos de fuentes extensas (figura 4) y modelos dinámicos. El texto, muy utilizado en diversas universidades, incluye en un apéndice una serie de problemas para que el alumno se familiarice con los aspectos prácticos.

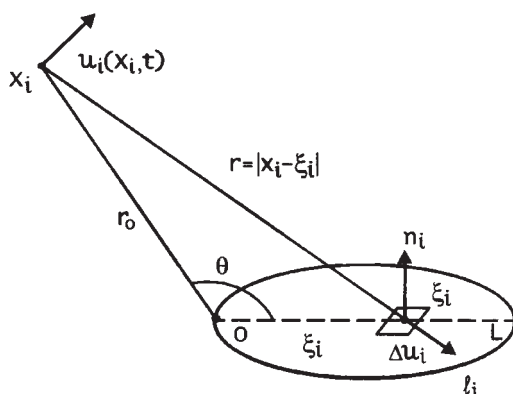


Figura 4.- Desplazamiento u calculado en un punto de coordenadas x_i , para una fuente extensa de dimensión L (Udías, 1999).

Recientemente se ha publicado en dos volúmenes un texto de sismología e ingeniería sísmica. Udías (2002) es autor de uno de los capítulos en el que expone los fundamentos teóricos del mecanismo focal de los terremotos, también ha participado (Grosser et al., 2002) en un Manual de Observatorios, exponiendo los fundamentos del mecanismo focal de los terremotos. Por último, la obtención del mecanismo focal a partir de la inversión de formas de ondas de los terremotos para fuentes extensas ha sido objeto del estudio más reciente (Pro et al., 2006). Para este tipo de fuentes el número de parámetros a determinar aumenta, ya que además de la orientación de los ejes de esfuerzos, profundidad, momento sísmico escalar y función temporal de la fuente sísmica hay que añadir la longitud y

velocidad de la ruptura. Estos dos últimos parámetros pueden obtenerse a partir de la función de directividad, y con ellos realizar la inversión de ondas internas.

3. SISMOTECTÓNICA

Como ya se ha comentado, las bases para un estudio sismotectónico son el conocimiento de la sismicidad y de los mecanismos focales de la región objeto de estudio. Es a partir de los años 60 cuando cobran mas vigor estos estudios con el desarrollo de la tectónica de placas.

Udías y López Arroyo (1972), publican en Nature uno de los primeros trabajos sobre la tectónica de placas de Azores-Gibraltar. A partir de datos de sismicidad y mecanismo focal de 15 terremotos de la zona, 11 de los cuales habían sido calculados por los autores, se propone el primer modelo sismotectónico para la región, que se divide en tres regiones: *A* la dorsal oceánica e islas Azores, *B* la zona central y *C* la región desde el cabo San Vicente hasta el mar de Alborán. Al discutir la sismicidad en esta zona aparece por vez primera la frase tantas veces utilizada por otros autores de que **al este del Estrecho de Gibraltar la sismicidad es mas difusa y se extiende por el mar de Alborán, depresión del Guadalquivir y norte de Marruecos**. A partir de los mecanismos focales de los terremotos de la zona se propone movimiento de extensión a lo largo de la dorsal, de desgarre dextral en la zona central para pasar a compresión norte sur en las proximidades del estrecho (figura 5).

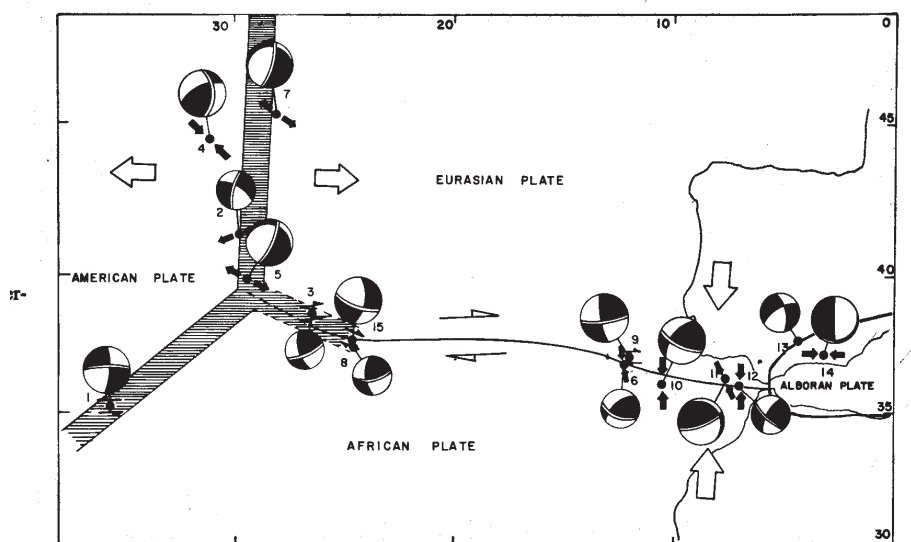


Figura 5.- Esquema sismotectónico para Azores-Gibraltar (Udías y López Arroyo, 1972).

El artículo de Udías et al. (1976) va a ser un trabajo de obligada referencia en estudios posteriores sobre la región de Azores-Alborán. A partir de datos de sismicidad histórica e instrumental y de mecanismo focal de 22 terremotos de la zona, se propone un esquema sismotectónico para la región, concluyendo el comportamiento independiente de la Península Ibérica en el contexto de la tectónica de placas y proponiendo la existencia de una subplaca de Alborán. La región de Azores-Gibraltar es objeto de un nuevo estudio (Bufo et al., 1988a) utilizando datos de sismicidad y mecanismo focal de 29 terremotos de la zona, cuatro de ellos a partir de modelización de ondas internas, momento sísmico escalar y dimensiones a partir del análisis espectral. A partir de estos datos se calcula la velocidad de las tres zonas propuestas en el trabajo de 1972, obteniéndose los mayores valores para la región Central. También se calculó el polo de rotación de la placa Africana.

La sismotectónica del Mediterráneo es abordada en tres trabajos publicados entre 1980 y 1985. En el primero de ellos, Udías (1980) obtiene la distribución de esfuerzos desde las islas Azores hasta Sicilia-Calabria a partir de la sismicidad y mecanismo focal de los grandes terremotos de la zona, mientras que en Udías (1982) se extiende el estudio por todo el Mediterráneo a lo largo del contacto Eurasia-Africa desde Azores hasta Arabia. El trabajo de Udías (1982) constituye uno de los estudios clave del contacto de placas en esta región presentando un esquema sismotectónico de toda ella (figura 6).

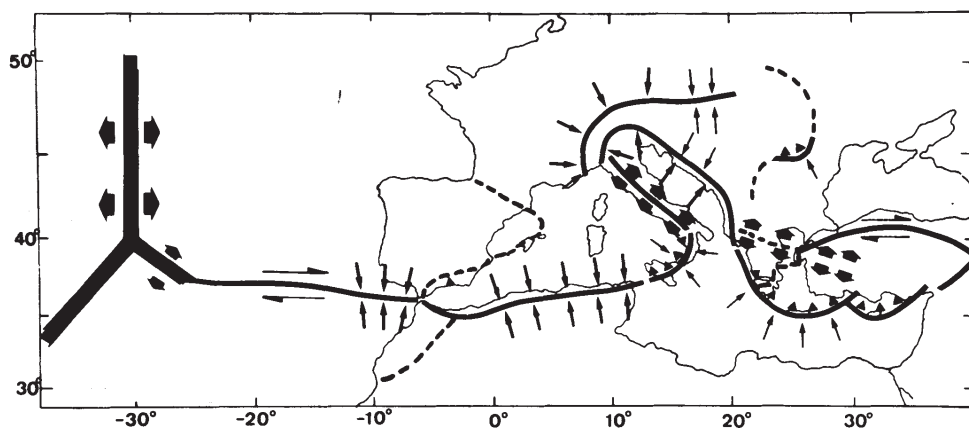


Figura 6.- Patrón regional de esfuerzos y rasgos tectónicos de la región Alpino-Mediterránea (Udías, 1982).

En la región de Azores el límite de placas corresponde a un margen de placas de extensión, pasando a un margen transcurrente en la zona central y el movimiento pasa a ser de compresión N-S desde el oeste del cabo de San Vicente hasta Túnez. En la zona de Sicilia-Calabria el margen es de subducción con la presencia de terremotos a profundidad intermedia pasando a ser de extensión a lo largo de los Apeninos. Vuelve a aparecer un movimiento de compresión en la zona de los Alpes y de la antigua Yugoslavia. En la zona de los Cárpatos la existencia de terremotos a profundidad intermedia y sus mecanismos ponen de manifiesto la existencia de una región de subducción al igual que en la zona del arco helénico. En el norte de Turquía hay movimiento de desgarre dextral asociado a la falla de Norte-Anatolia. La evolución dinámica de la cuenca Mediterránea a partir de datos de sismicidad y mecanismo focal es estudiada en su trabajo Udías (1985).

La sismotectónica de la región Ibero-Mogrebí ha sido objeto de diversos estudios (Bufo et al., 1988b, 1995). En el estudio de 1988 (figura 7) se presenta un esquema sismotectónico para la región obtenido a partir de la sismicidad y mecanismo focal de 17 terremotos, proponiéndose una subducción de África bajo Iberia, para explicar la sismicidad de los terremotos de profundidad intermedia en el mar de Alborán. La idea de dos procesos consecutivos de subducción es propuesta en el trabajo de 1995 donde se analizan datos de geología, sismicidad y mecanismo focal de 24 terremotos seleccionados, presentando un nuevo esquema sismotectónico para la región.

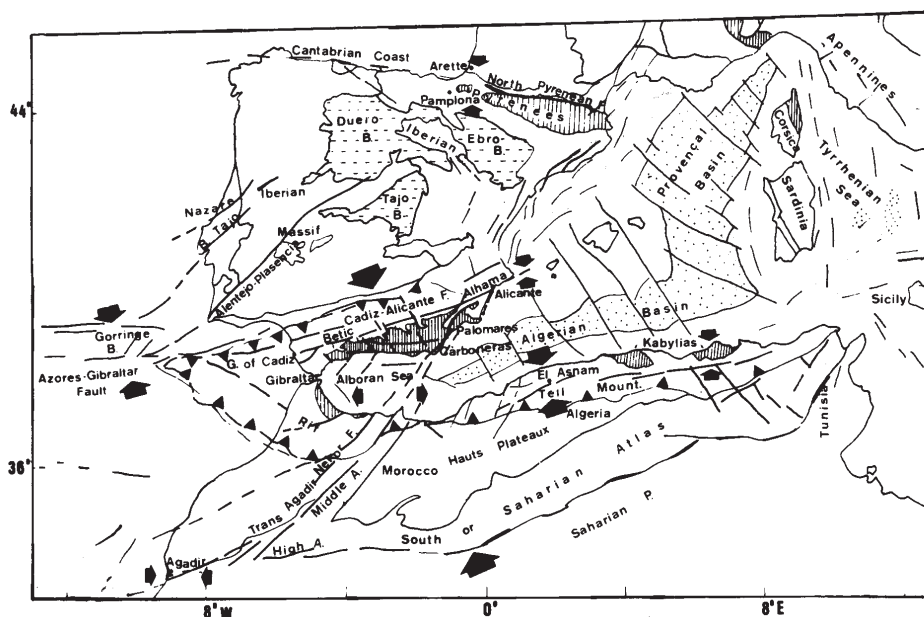


Figura 7.- Esquema sismotectónico de la región Ibero-Mogrebí. Las flechas muestran la dirección del patrón regional de esfuerzos (Buform et al., 1995).

Los terremotos a profundidad intermedia y profundos han sido objeto de diversos estudios (Bufo et al., 1991a, 1991b, 1997) concluyendo que no existe conexión entre la sismicidad intermedia y profunda y su diferente origen.

En 1991, Udías y Bufo, publican un trabajo en el que se presenta el patrón regional de esfuerzos a lo largo del contacto Eurasia-Africa, obtenido a partir del mecanismo focal de grandes terremotos (figura 8). Se confirma los resultados obtenidos en estudios previos, la complejidad de la zona desde Gibraltar hasta el Cáucaso, con la presencia de terremotos a profundidad intermedia y profunda ligados a zonas con estructura de arco como Gibraltar, Sicilia, arco Helénico y Cárpatos. La sismotectónica del Mediterráneo es objeto de un extenso trabajo (Udías y Bufo, 1994) en el que se hace una revisión de los diversos modelos propuestos para la región desde los primeros de Suess (1885-1905) hasta los más recientes basados en la tectónica de placas.

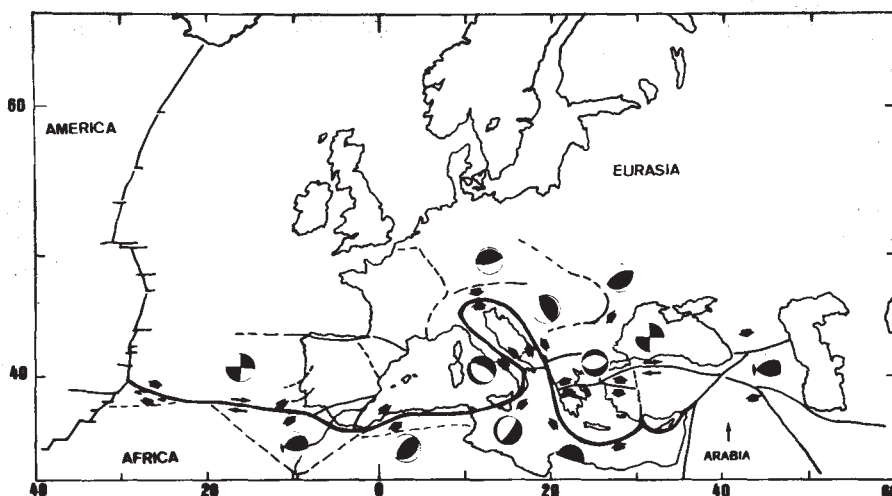


Figura 8.- Esquema sismotectónico del borde de placa Eurasia-Africa. Se muestra el patrón regional de esfuerzos y el tipo de mecanismo predominante para cada zona (Udías y Bufo, 1991).

Recientemente se ha publicado una monografía sobre la geodinámica de Azores-Túnez en la que Udías no sólo participa como editor (Bufo et al, 2004) sino que también es autor de un trabajo sobre la tectónica del límite de placas Iberia-Africa en que se presentan resultados de sismicidad y mecanismo focal, además del cálculo de velocidades en las diferentes partes del límite de placas a partir de datos sismológicos, concluyendo que existe un déficit de terremotos durante el siglo XX en las Béticas, Alborán y norte de Marruecos.

Hay que señalar que en diversos estudios sismotectónicos publicados en los últimos años ha participado de forma activa Agustín Udías, aunque con la generosidad de los grandes profesores ha cedido el protagonismo a autores más jóvenes o incluso no ha querido que su nombre figurase en la publicación. Las autoras de este trabajo se incluyen entre estos afortunados y desde estas páginas quieren expresar su profundo agradecimiento a su maestro y amigo Agustín Udías.

4. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado en parte por el MEC, proyecto REN03-5178.

5. REFERENCIAS

- BEN MENAHEM, A. (1961) Radiation of seismic surface waves from finite moving sources. *Bull. Seis. Soc. Am.* 51, 401-453.
- BRILLINGER, D.; A. UDÍAS & B. A. BOLT (1980). A probability model for regional focal mechanism solutions. *Bull. Seism. Soc. Am.* 70, 149-170.
- BUFORN, E.; A. UDÍAS & M. A. COLOMBÁS (1988a). Seismicity, source mechanism and tectonics of the Azores-Gibraltar plate boundary. *Tectonophysics*, 152, 89 – 118.
- BUFORN, E.; A. UDÍAS & R. MADARIAGA (1991a). Intermediate and deep earthquakes in Spain. *Pure Appl. Geoph.* 136, 375 – 393.
- BUFORN, E.; C. SANZ DE GALDEANO & A. UDÍAS (1995). Seismotectonics of the Ibero-Maghrebian region. *Tectonophysics*, 248, 247 – 261.
- BUFORN, E.; A. UDÍAS & J. MÉZCUA (1988b). Seismicity and focal mechanisms in south Spain. *Bull. Seism. Soc. Am.* 78, 2008-2024.
- BUFORN, E.; A. UDÍAS; J. MEZCUA & R. MADARIAGA (1991b). A deep earthquake under south Spain. 8 March 1990. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 81, 1403 – 1407.
- BUFORN, E.; P. COCA; A. UDÍAS & C. LASA. (1997). Source mechanism of intermediate and deep earthquake in southern Spain. *Journal of Seismology*, 1, 113 – 130.
- BUFORN, E.; M. BEZZEGHOUD; A. UDIAS & C. PRO, (2004). Seismic sources on the Iberia-Africa plate boundary and their tectonic implications, *Pure Appl. Geoph.*, 161, 623-646.
- GROSSER, H.; P. BORMANN & A. UDÍAS (2002). Theoretical seismology source representation. En: P. Bormann (ed). *IASPEI New Manual of Seismology Observatory Practice*. GFZ, Potsdam, vol2, 3.1, 1-19.
- LÓPEZ ARROYO, A. & A. UDÍAS (1972). Aftershocks sequence and focal parameters of the Feb. 28, 1969 earthquake of the Azores-Gibraltar fracture zone. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 62, 699 – 719.

- PRO, C.; E. BUFORN & A. UDÍAS (2006). Rupture length and velocity for earthquakes in the Mid-Atlantic Ridge from directivity effect in body and surface waves (enviado a *Tectonophysics*).
- STAUDER, W. (1960). S waves and focal mechanism: the state of the question. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 50, 333-346.
- STAUDER, W. & A. UDÍAS (1963). S wave studies of earthquakes of north Pacific; part II Aleutian islands. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 53, 59 – 77.
- STAUDER, W. & A. UDÍAS (1964). Application of numerical method for S wave focal mechanism determination to earthquakes of the Kamchatka – Kuril islands region. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 54, 2049 – 2067.
- UDÍAS, A. (1964). A least squares method for focal mechanism determination using S wave data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 54, 2036 – 2049.
- UDÍAS, A. (1967). The focal mechanism of earthquakes in the southern coast of the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, 4, 229 - 234.
- UDÍAS, A. (1971). Source parameters of earthquakes from spectra of Rayleigh waves. *Geophysical Journal R. Astr. Soc.*, 22, 353 – 376.
- UDÍAS, A. (1980). Seismic Stresses in the region Azores-Spain-Western Mediterranean. *Rock Mechanics, Suppl.* 9, 75 – 84.
- UDÍAS, A. (1982). Seismicity and seismotectonic stress field in the Alpine-Mediterranean region. *Alpine-Mediterranean Geodynamics. Geodynamics Series*, 7, 75 – 82.
- UDÍAS, A. (1985). Seismicity of the Mediterranean Basin. En D.J. Stanley y F.C. Wezel. *Geological Evolution of the Mediterranean Basin*, 55 – 63. Springer-Verlag, New York.
- UDÍAS, A. (1989). Development of Fault-Plane studies for the Mechanism of Earthquake. En J.J. Lithiser (ed). *Observatory Seismology University of California Press*, 243 – 256, California Press, California (USA).
- UDÍAS, A. (1991). Source mechanism of earthquakes. *Advances in Geophysics*, 33, 81 – 140.
- UDÍAS, A. (1999). Principles of Seismology. *Cambridge University Press*, 475 pp. Cambridge, Inglaterra.
- UDÍAS, A. (2002). Theoretical Seismology: an introduction. En *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology* vol A, 81 - 102, Academic Press, Londres.
- UDÍAS, A. & D. BAUMAN (1969). A computer program for focal mechanism determination combining P and S wave data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 59, 503-519
- UDÍAS, A. & A. LÓPEZ ARROYO (1970). Body and surface wave study of the source parameters of the 15, 1964 Spanish earthquake. *Tectonophysics*, 9, 323 - 346.
- UDÍAS, A. & A. LÓPEZ ARROYO (1972). Plate tectonics and the Azores-Gibraltar region. *Nature*, 237, 67-69.
- UDÍAS, A. & E. BUFORN (1984). An algorithm for focal mechanism determination using signs of first motion of P, SV and SH waves. *Revista de Geofísica*, 40, 11 – 26.

- UDÍAS, A. & E. BUFORN (1988). Single and joint fault-planes solutions from first motion data. *En D.J. Doornbos. Seismological Algorithms*, 443 – 453.
- UDÍAS, A & E. BUFORN (1991). Regional stresses along the Eurasian-Africa plate boundary derived from focal mechanisms of large earthquakes. *Pageoph*, 136, 433 – 448.
- UDÍAS, A. & E. BUFORN (1994). Seismotectonics of the Mediterranean region. *Advances in Geophysics*, 36, 121-209.
- UDÍAS, A.; A. LÓPEZ ARROYO & J. MEZCUA (1976). Seismotectonic of the Azores-Alboran region. *Tectonophysics*, 31, 259 – 289.
- UDÍAS, A.; E. BUFORN; D. BRILLINGER & B. BOLT (1982). Joint statistical determination of fault-plane parameters. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 31, 178 – 184.