

CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LAS SOLUCIONES DE PLANO DE FALLA SÍSMICA OBTENIDAS MEDIANTE EL PROGRAMA FPFIT

F. Alejandro Nava y José Frez

Depto. de Sismología, División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada, Ensenada, B.C. 22860, México

E-mail: fnava@cicese.mx

E-mail: jofrez@cicese.mx,

RESUMEN

La no unicidad en soluciones de plano de falla, ocasionada por posibles deficiencias en la cobertura de estaciones, errores en la localización hipocentral y en el modelo de velocidades, así como por la presencia de ruido en los sismogramas, es causa de incertidumbre respecto a la representatividad del mecanismo determinado. El programa FPFIT (Reasenber y Oppenheimer, 1985), ampliamente utilizado para la obtención de soluciones de plano de falla, proporciona además de los parámetros de la solución preferida, un listado de orientaciones de los ejes de tensión y presión, T y P, para las soluciones alternativas. Proponemos que el área relativa cubierta por estas soluciones alternativas sobre la semiesfera focal puede usarse como una estimación cuantitativa de dicha incertidumbre.

INTRODUCCIÓN

Conocer características del fallamiento de los sismos, como son la orientación (rumbo y echado) del plano de falla y la dirección del deslizamiento relativo entre las caras de la falla, es de importancia capital para estudios de sismotectónica y de riesgo y peligro sísmicos. Un método clásico para determinar dichas características consiste en encontrar el mecanismo que sea consistente con las polaridades de los primeros arribos de las ondas P observadas en estaciones sismológicas situadas a diferentes distancias y azimuths de la fuente. Este método se conoce como *solución de plano de falla*.

No expondremos aquí la teoría completa de los métodos de solución de plano de falla o de sus diferentes representaciones, pues están ampliamente descritos y discutidos en numerosos textos (v.g. Aki y Richards, 1980; Lay y Wallace, 1995; Udías y Mezcuca, 1996), ni los algoritmos utilizados para implementarlos y que aparecen en artículos y manuales (v.g. Reasenber y Oppenheimer, 1985; Núñez-Cornú, 1987). Solamente expondremos algunos conceptos esenciales para la comprensión del presente trabajo.

Cuando observamos longitudes de onda suficientemente largas como para poder representar un ruptura sísmica como una fuente puntual, entonces los esfuerzos responsables del deslizamiento cosísmico en la falla pueden representarse como un doble par de fuerzas y la orientación de este doble par determina cómo son las polaridades de las ondas en distintas direcciones. Por ejemplo, supongamos que colocamos el origen de un sistema de coordenadas cartesianas en el hipocentro (donde suponemos que está la fuente puntual) y orientamos este sistema de manera que el plano de falla corresponda a F_1F_3 , y el deslizamiento sea paralelo al eje F_1 de

la Figura 1 (el eje F_3 es vertical); el plano F_2F_3 se llama *plano auxiliar*. Las fuerzas que causaron la aceleración del medio pueden representarse como el doble par de pequeñas flechas ilustrado: el par paralelo a F_1 corresponde al esfuerzo de cizalla que causó el deslizamiento en la falla (transcuriente izquierdo en esta ilustración), mientras que el par paralelo a F_2 corresponde a la reacción del medio que evita la rotación de la falla.

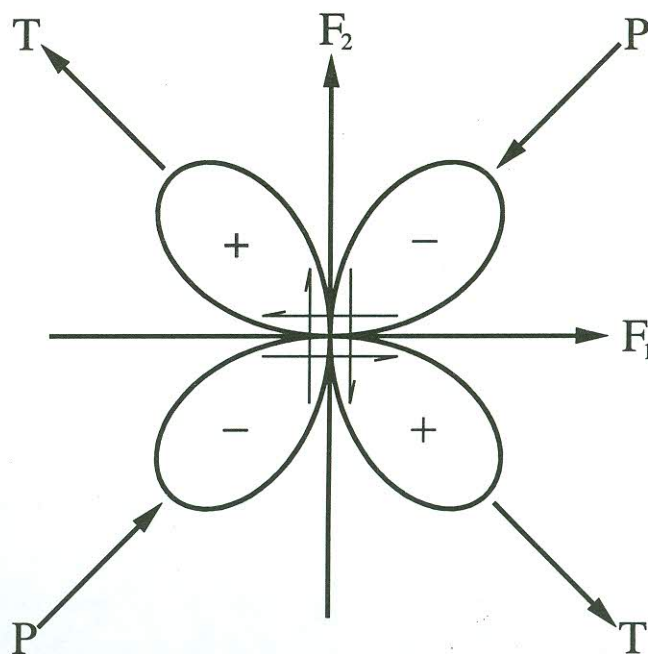


Figura 1. Vista desde el eje F_3 (vertical) del patrón de radiación debido a una dislocación puntual en el plano F_1F_3 en la dirección F_1 , o en el plano F_2F_3 en la dirección F_2 . Se ilustra el doble par de fuerzas y los cuadrantes de compresión y dilatación, así como los vectores de presión y tensión equivalentes al doble par.

La aplicación de dicho par causa compresión en dos cuadrantes, indicados por el signo '+', y dilatación en los cuadrantes alternos, indicados por el signo '-'. Para cada dirección fuente-receptor dada, la amplitud del desplazamiento causado por la onda P es proporcional a la distancia del origen al trebol en dicha dirección; las amplitudes son máximas en planos orientados a 45° de nuestros ejes y mínimas (teóricamente nulas) para planos perpendiculares a éstos. Por tanto, las estaciones que reciben ondas provenientes de cuadrantes compresionales tienen polaridades positivas (según la convención de que la polaridad del sismograma concuerde con la del movimiento del terreno), las estaciones correspondientes a cuadrantes tensionales tienen polaridades negativas, y las polaridades en las estaciones en las direcciones de los planos nodales están indeterminadas, pues las señales tienen amplitudes nulas.

Cuando el sistema de coordenadas tiene alguna otra orientación los cuadrantes de compresión y tensión estarán rotados pero, en principio, con base en las polaridades observadas puede determinarse la orientación relativa de los

planos de falla y auxiliar y de allí determinar también la dirección del deslizamiento. La Figura 2 muestra a la izquierda tres ejemplos de observaciones de polaridades, obtenidos durante un estudio de microsismicidad en el norte de Baja California (Frez *et al.*, 1999); las polaridades han sido llevadas a la esfera focal y proyectadas (equiárealmente) en el hemisferio superior de ésta; los círculos pequeños indican compresiones y las cruces indican dilataciones; los arcos de círculo indican la intersección de los planos de falla y auxiliar con la esfera focal.

Sin embargo, no puede saberse cuál plano es cuál, ya que el patrón de radiación sería idénticamente igual para una falla en el plano F_2F_3 y deslizamiento transcurrente derecho paralelo a F_2 (en cuyo caso F_1 sería el plano auxiliar), por lo que no se puede distinguir un plano del otro con base en las polaridades observadas.

Como puede verse de la Figura 1 y demostrarse mediante una simple rotación, aplicar el doble par de fuerzas es equivalente a aplicar sobre el origen dos fuerzas tensionales

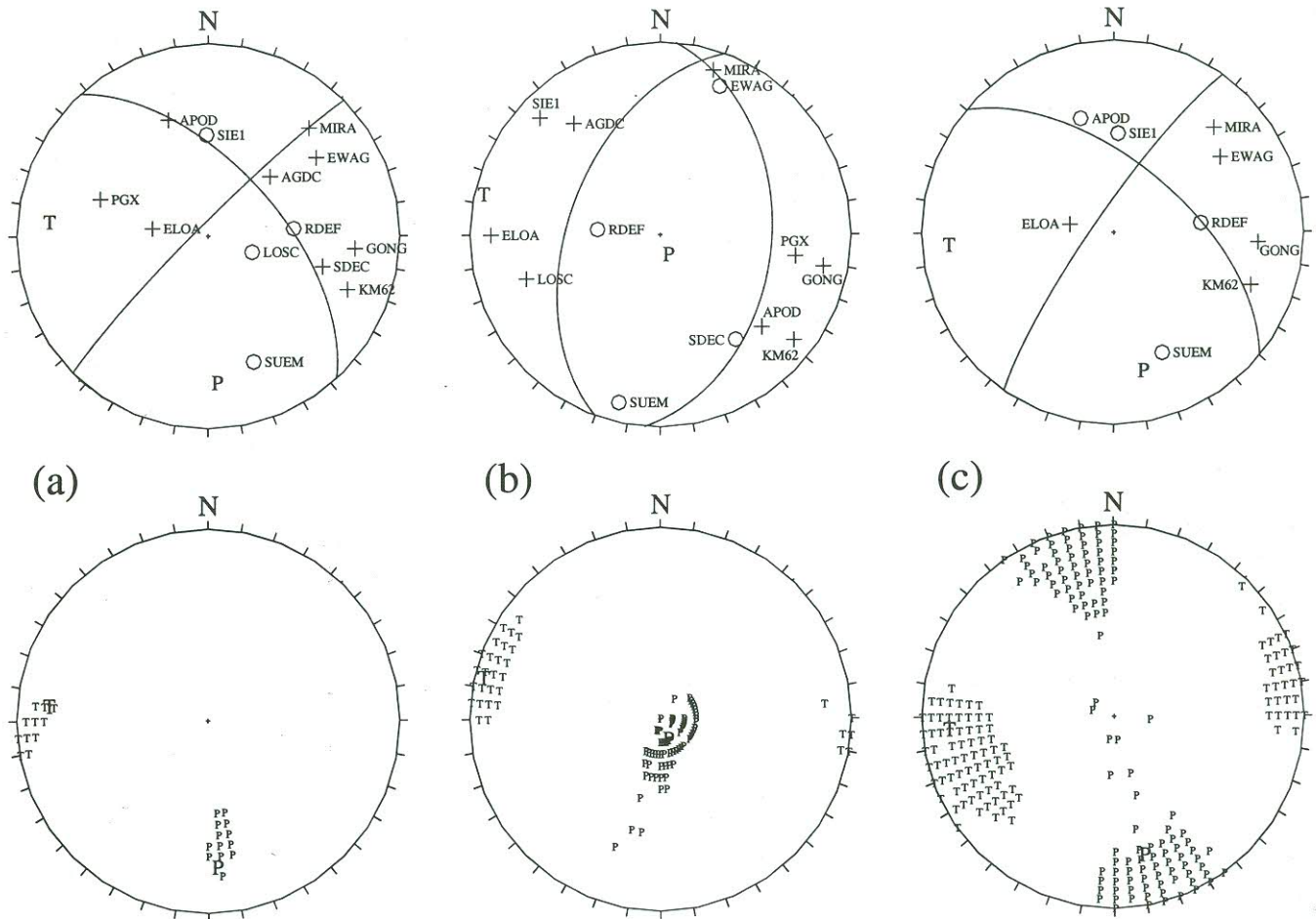


Figura 2. Ejemplos de soluciones de plano de falla proyectadas sobre el hemisferio superior: (a) buena, (b) regular y (c) mala. A la izquierda las polaridades se representan como círculos para compresión y cruces para dilatación, los arcos representan los planos de falla y auxiliar de la solución preferida, y las letras T y P indican la posición de los correspondientes ejes de tensión y presión (modificadas de Frez *et al.*, 1999). A la derecha se indica con letras T y P la posición de los ejes de la familia de soluciones, con negritas los ejes mostrados a la izquierda.

(T) y dos compresivas (P), todas de la misma magnitud, orientadas según los vectores (línea gruesa) de la figura a lo largo de dos ejes, T y P, que están en el plano F_1F_2 y forman ángulos de 45° con F_1 y F_2 por lo que coinciden con las direcciones de máxima amplitud de radiación de ondas P. La orientación de los ejes T y P, indicada en la Figura 2 por las letras respectivas, no depende de cuál plano es de falla y cuál auxiliar y puede aportar información valiosa respecto al campo de esfuerzos en la región focal.

Arriba se dijo que, en principio, se puede determinar una solución de plano de falla a partir de las polaridades observadas. En la práctica es muy común que una cobertura de estaciones insuficiente, errores en el modelo de velocidades usado para la determinación de hipocentros y para el cálculo de ángulos de emergencia de las ondas observadas, errores en los tiempos de lectura usados para localizar el hipocentro, ruido que oscurece las determinaciones de polaridad y otros factores, hagan que la solución no sea única. Para coberturas razonables con localizaciones y modelo de velocidades razonablemente correctos, los datos admiten usualmente una familia de soluciones cuyos miembros no difieren substancialmente entre sí. Sin embargo, en caso de errores graves y, sobre todo, para coberturas instrumentales pobres, los datos pueden admitir dos o más familias de soluciones que pueden llegar a corresponder a mecanismos muy distintos.

En cualquier caso, por múltiples razones expuestas más adelante, es importante poder evaluar cuantitativamente la incertidumbre respecto a las soluciones obtenidas. A continuación presentamos un método diseñado por nosotros para hacer dicha evaluación para soluciones de plano de falla obtenidas mediante el ampliamente utilizado programa FPFIT. Ilustraremos el método con la aplicación a tres mecanismos focales, tomados de Frez *et al.* (1999), que son ejemplos de determinaciones buenas, regulares y malas.

MÉTODO Y EJEMPLOS

Para determinar la solución de plano de falla, el FPFIT lleva a cabo una búsqueda sistemática sobre el espacio de soluciones, evaluando el acuerdo entre polaridades teóricas y observadas mediante la función:

$$F^i = \frac{\sum_k |p_o^k - p_t^{i,k}| w_o^k w_t^{i,k}}{\sum_k w_o^k w_t^{i,k}}, \quad (1)$$

donde el superíndice i indica el i -ésimo modelo, F^i es el error (norma uno) para dicho modelo, p_o^k y $p_t^{i,k}$ son la polaridad observada y la teórica en la k -ésima estación (valuados como +0.5 para compresión y -0.5 para dilatación), w_o^k es un peso asignado por el científico a la lectura y $w_t^{i,k}$ es un peso teórico

calculado como la raíz cuadrada de la amplitud normalizada de la radiación de la onda P en la dirección de la estación. Para perfecta concordancia entre el modelo y las observaciones $F^i = 0$, y para perfecta discordancia $F^i = 1$.

El FPFIT refina el modelo con mínimo F^i para obtener una solución preferida a cuya medida de discordancia llamaremos F_{min} , y a continuación desecha todos los modelos tales que $F^i > F_{min} + \Delta F$ (ΔF es parámetro de entrada, usualmente alrededor de 0.05). En los ejemplos mostrados en la columna derecha de la Figura 2 las posiciones de los ejes para la solución preferida aparecen como letras T y P negritas, mientras que las letras T y P pálidas muestran las posiciones de los ejes para soluciones alternas. Los modelos no desechados son posibles soluciones alternas que satisfacen los datos casi tan bien como la solución preferida y que, considerando las posibles deficiencias en la cobertura de estaciones, las incertidumbres en la localización hipocentral y en el modelo de velocidades, así como la presencia de ruido, podrían contener la verdadera solución. Por tanto, es necesario poder cuantificar el espacio que abarcan las soluciones alternativas y que corresponde al de la incertidumbre en la solución preferida.

Para crear la familia de modelos, el FPFIT muestrea la semiesfera focal en azimuth (o longitud) φ y ángulo polar (o colatitud) θ con incrementos $\Delta\theta = \Delta\varphi = 0.5^\circ$, de manera que si φ_i y θ_i son las orientaciones de un eje T o P (línea gruesa en la figura 3) para cada solución aceptada, a dicho eje corresponde un área δA_i (sombreada en la Figura 3) que abarca de $\varphi_i - \Delta\varphi/2$ a $\varphi_i + \Delta\varphi/2$ y de $\theta_i - \Delta\theta/2$ a $\theta_i + \Delta\theta/2$ sobre la semiesfera focal de radio unitario:

$$\delta A_i = \int_{\theta_i - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\theta_i + \frac{\Delta\theta}{2}} \int_{\varphi_i - \frac{\Delta\varphi}{2}}^{\varphi_i + \frac{\Delta\varphi}{2}} \sin\theta \, d\theta \, d\varphi = 2\Delta\varphi \sin\frac{\Delta\theta}{2} \sin\theta_i = 0.00007613 \sin\theta_i, \quad (2)$$

excepto, en principio, para puntos en el ecuador y el polo.

Para el ecuador, $\theta_i = 90^\circ$:

$$\delta A_i = 2 \int_{\theta_i - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\theta_i + \frac{\Delta\theta}{2}} \Delta\varphi \sin\theta \, d\theta = 2\Delta\varphi \sin\frac{\Delta\theta}{2} = 0.00007613,$$

valor que concuerda con el obtenido de (2) al substituir θ_i del ecuador.

Para el polo, $\theta_i = 0^\circ$:

$$\delta A_i = 2 \int_{\theta_i - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\theta_i + \frac{\Delta\theta}{2}} \Delta\varphi \sin\theta \, d\theta = 4\Delta\varphi \sin^2\frac{\Delta\theta}{4} = 0.000000166. \quad (3)$$

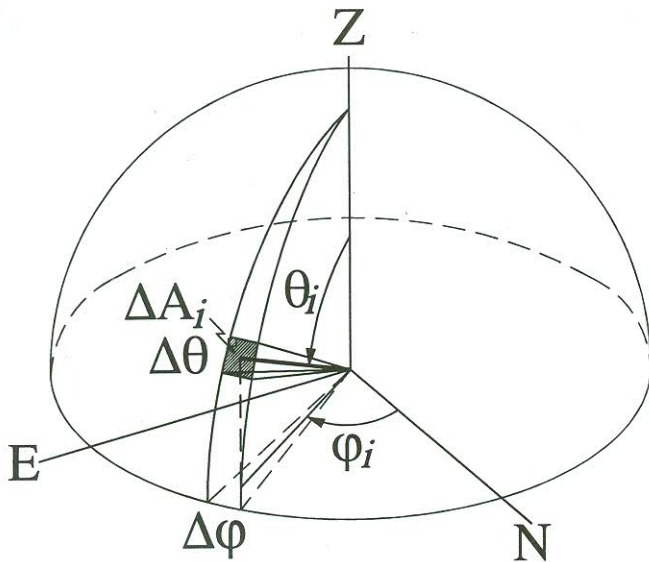


Figura 3. Hemisferio focal superior que muestra la localización (ϕ_i, θ_i) de un eje T o P (línea gruesa) y el área ΔA_i correspondiente (sombreada), para intervalos de muestreo $\Delta\phi$ y $\Delta\theta$.

La suma de las áreas correspondientes a las soluciones alternas, evaluadas mediante (2) y (3), dividida entre el área total de la semiesfera:

$$A_I = \frac{\sum_i \delta A_i}{2\pi} \quad (4)$$

da el área relativa de incertidumbre para la solución. Esta área, expresada como fracción o como porcentaje, permite cuantificar la incertidumbre en la determinación de cada uno de los ejes o de ambos.

Para los ejemplos mostrados en la Figura 2, obtenidos con los valores mencionados arriba de ΔF , $\Delta\phi$ y $\Delta\theta$, las áreas relativas A_I aparecen en la Tabla 1.

TABLA 1

Solución	A_I T	A_I P	A_I T+P
Buena (a)	1.4%	1.5%	2.9%
Regular (b)	4.7%	2.2%	7.0%
Mala (c)	11.7%	13.6%	25.3%

CONCLUSIONES

La fracción del área de la semiesfera focal cubierta por los ejes P y T de las soluciones aceptables, A_I , obtenida fácilmente a partir de un archivo de salida del FPFIT y de las ecuaciones (2) a (4), es una buena medida de la incertidumbre en la solución de plano de falla. Es un dato valioso para el analista que generalmente conjunta la información mencionada (solución "preferida", soluciones auxiliares, etc.) con información adicional (polaridad de onda S, amplitudes de

ondas P y S, comparación con sismogramas sintéticos, etc.) para mejorar la estimación de plano de falla.

A_I puede usarse para calificar una solución determinada, como criterio para aceptar o rechazarla; puede usarse también como criterio para juzgar qué tan buena es la cobertura de una red sísmica o, para una cobertura densa y obviamente apropiada, para juzgar qué tan apropiado es el modelo de velocidades.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a dos árbitros anónimos sus atinadas sugerencias. Este trabajo fue hecho como parte del proyecto CONACYT 25-309-T.

REFERENCIAS

- Aki, K. and Richards, P. (1980) *Quantitative Seismology*, vol. I. W.H. Freeman & Co., USA, 574 pp.
- Frez, J., González, J.J., Acosta, J.G., Nava, F.A., Méndez, I., Carlos, J., García-Arthur, R.E. and Alvarez, M. (1999). A detailed microseismicity study and current tectonics in the Peninsular Ranges of northern Baja California, Mexico: The Ojos Negros valley. *Bull. Seism. Soc. Am.*, sometido.
- Lay, T. and Wallace, T. (1995). *Modern global seismology*. Academic Press, Inc., USA, 517 pp.
- Núñez-Cornú, F. (1987) Un programa interactivo en BASIC para cálculo de mecanismos focales. *Rev. Geofis.* 43, 209-212.
- Reasenber, P. and Oppenheimer, D. (1985). FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, Open-File Report No. 85-739, US Geological Survey, Menlo Park, California, 46 pp.
- Udías, A. y Mezcua, J. (1996) *Fundamentos de sismología*. UCA Editores, El Salvador, 200 pp.