

Sismotectónica y esfuerzos en Brasil

Marcelo ASSUMPCÃO
Instituto Astronómico y Geofísico.
Universidad de São Paulo (Brasil)

RESUMEN

Las características principales de la sismicidad intraplaca en Brasil son presentadas. La actividad sísmica es menor que en varias otras regiones intraplaca del mundo: solamente cinco sismos con magnitudes $\geq 5,4 m_b$ son conocidos. Aunque el número de epicentros sea pequeño para análisis estadísticos detallados, es posible verificar que la actividad sísmica no es uniforme, es decir, algunas regiones son más activas que otras. Algunas zonas sismotectónicas son sugeridas tomando en cuenta no sólo la distribución epicentral sino también los datos de mecanismos focales. Los datos de esfuerzos intraplaca, obtenidos mayormente de mecanismos focales y breakouts, muestran un campo de esfuerzo regional del tipo desgare en la parte este del continente. Posiblemente estos esfuerzos pasan a ser más compresivos hacia al oeste. La tensión horizontal máxima promedia de toda la parte continental es más o menos E-W. En la parte oceánica del margen sudeste, los esfuerzos parecen ser compresivos. Además de esta componente regional, debido tanto a las fuerzas motoras de la placa sur-americana como a las variaciones de estructura de gran escala, otras fuentes locales de esfuerzo (como tensiones flexurales en la corteza debido a la carga de sedimentos en la plataforma), son muy importantes y en algunos casos pueden ser mayores que las tensiones regionales.

ABSTRACT

The main features of the intraplate seismicity in Brasil are presented. The level of seismic activity is lower than several other intraplate areas in the

world: only five events with magnitudes $\geq 5,4 m_b$ are known. Despite the small number of events for detailed statistical analyses, it seems that the activity is not uniform in Brazil: some areas are more seismically active than others. Some seismotectonic zones are suggested taking into account not only the epicentral distribution but also the few focal mechanisms available. The intraplate stress data, derived mainly from focal mechanisms and breakouts, reveal a somewhat uniform regional field with strike-slip stresses in the eastern part of the continent, possibly changing to more compressional towards the west. The maximum horizontal stresses are roughly oriented E-W on average. In the southeastern continental shelf, stresses are compressional. Besides this regional component, due both to the plate driving forces and to the large-scale lateral structural variations, other local sources of stress (such as crustal flexural forces from sediment loading in the continental shelf) are also very important and can overcome the regional component in some cases.

1. INTRODUCCIÓN

Al contrario de muchas otras regiones intraplaca del mundo, terremotos fuertes con daños severos o fatalidades nunca se han reportado en Brasil. Sin embargo, a pesar del bajo nivel de sismicidad brasileña, estudios de peligro sísmico han sido hechos en las últimas décadas por causa de la instalación de grandes estructuras como plantas nucleares y embalses. Varios casos de sismicidad inducida por embalses hidroeléctricos en las últimas décadas también aumentaron la importancia práctica de la sismología en Brasil. El estudio de la sismicidad intraplaca, a nivel mundial, ha aportado dos conclusiones importantes: a) terremotos de gran magnitud en regiones intraplaca, aunque muy raros, pueden tener un impacto importante en las estimaciones de peligro sísmico por causa de la baja atenuación sísmica, y b) la probabilidad de ocurrencia de un terremoto de gran magnitud en una región intraplaca es muy baja, pero no es totalmente nula, especialmente en áreas donde la corteza ha sido extendida en tectonismo post-paleozoico (dichas "zonas de debilidad" tectónica, e.g. Johnston y Kanter, 1990).

Estas consideraciones tornan las estimaciones de peligro sísmico muy inciertas pues hay que tener en cuenta sismos de gran magnitud con frecuencias de ocurrencia muy bajas. Algunas estimaciones preliminares de peligro sísmico fueron hechas para la región sudeste de Brasil (Assumpção, 1983b; Berrocal et al., 1995). En este trabajo se presenta una revisión de los patrones de sismicidad con respecto a la distribución de los epicentros y a los esfuerzos litosféricos. La correlación entre epicentros, provincias geológicas regio-

nales y tensiones en la corteza, puede ayudar a definir mejor las zonas sismotectónicas principales, lo que es necesario para una mejor estimación del peligro sísmico.

El estudio de la sismicidad y de los esfuerzos intraplaca en América del Sur tiene también importantes implicaciones en el análisis de las fuerzas motoras que controlan el movimiento de la placa sur-americana. A pesar de extensivos modelos teóricos (e.g., Meijer y Wortel, 1992; Stefanick y Jurdy, 1992; Meijer, 1995; Coblenz & Richardson, 1996), aún no está establecido si el movimiento de la placa sur-americana hacia el oeste está causado por flujo en el manto superior (la placa sería conducida), o si su movimiento está resistido por la astenosfera (la placa sería empujada desde la cadena meso-atlántica). Esta dificultad se debe a que el campo de esfuerzo intraplaca es aún poco conocido (e.g., Assumpção, 1992; 1998a,b). Seguramente, a la medida en que la sismología ayude a definir los patrones de esfuerzo litosférico, modelos geodinámicos mejor definidos podrán ser desarrollados para explicar el movimiento de la placa sur-americana.

2. CATÁLOGO DE SISMOS DE BRASIL

2.1. Fuente de datos

Las dos fuentes principales de datos de sismos brasileños son: a) el catálogo de Berrocal et al. (1984; 1983), que incluye tanto datos históricos como instrumentales, y b) los Boletines Sísmicos Brasileños (*Revista Brasileira de Geofísica*, 1983-1997). Los datos instrumentales compilados por Berrocal et al. (1984) de las agencias internacionales ISS, ISC y NEIC fueron corregidos por errores de localización o de identificación, especialmente los sismos más antiguos. Los Boletines Sísmicos Brasileños presentan los epicentros localizados principalmente con estaciones brasileñas operadas por las universidades de Brasilia (UnB), São Paulo (USP), Federal do Río Grande do Norte (UFRN), y el Instituto de Investigaciones Tecnológicas (IPT) de São Paulo. Estas dos fuentes también incluyen sismos de algunas regiones vecinas a Brasil, como Paraguay, detectados por las estaciones brasileñas, como muestra la figura 1. Los datos combinados de estas dos fuentes serán llamados de "catálogo brasileño".

La figura 1 muestra todos los epicentros del catálogo brasileño con magnitudes mayores que 2,5 hasta 1996. El límite geográfico del catálogo está mostrado por la línea gruesa al oeste de la frontera de Brasil. Los cinco sismos más grandes (exceptuando los sismos intermedios y profundos de la

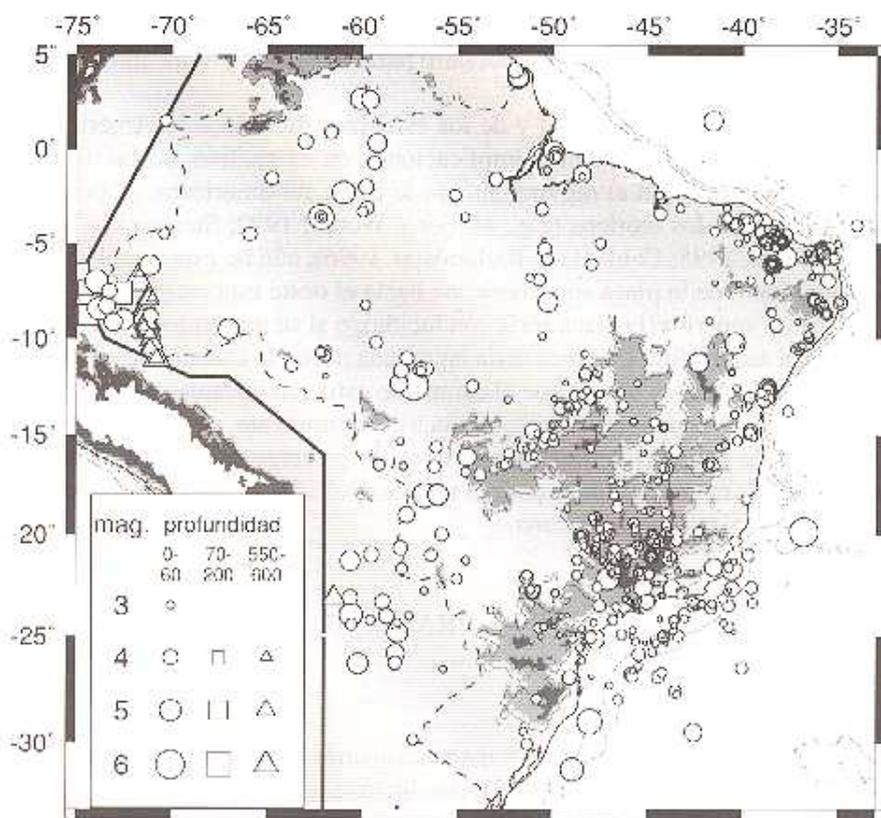


Figura 1. Catálogo de sismos en Brasil y cercanías (1724 a 1996, magnitudes > 2,5). Epicentros del catálogo brasileño con sismos en Brasil y regiones vecinas hasta 1996 y magnitudes mayores que 2,5. La línea gruesa al oeste de la frontera indica el límite de compilación de datos para el catálogo. Los contornos indican topografías de 600 m y de 1.000 m en el continente, y profundidades de 200 m y de 2.000 m en el océano.

frontera Perú-Brasil) están en la tabla 1. Magnitudes mayores que 5,5 mb parecen ocurrir una vez a cada 10 años, aproximadamente. La tabla 1 demuestra que el nivel de la sismicidad brasileña es mucho más bajo que en otras regiones intraplaca como en América del Norte, Australia, África y la India, donde terremotos de magnitud $M_s \geq 6$ son más frecuentes y hasta magnitud 8 han ocurrido en tiempos históricos (Johnston, 1989; Johnston y Kanter, 1990).

La concentración de eventos en la meseta topográfica en el sudeste de Brasil, principalmente con magnitudes pequeñas, pueden ser atribuidos al

mayor número de estaciones sismográficas en esta parte del país, y también a la mayor densidad de población que favorece la recuperación de datos históricos. Del mismo modo, el menor número de epicentros en el norte de Brasil (muy pocos sismos menores que 3,5) es debido al menor número de estaciones sismográficas y a la población extremadamente baja en la Amazonia.

Tabla 1. Mayores sismos en Brasil

Fecha	h:min:s	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Profundidad (km)	Magnitudes m_b M_s	
01.31.1955	05:03:07	12.42	57.30	N	6,2	5,5
01.03.1955	01:46:18	19.84	36.75	N	6,1	5,3
05.08.1983	06:21:42	03.59	62.17	23	5,5	4,5
28.06.1928	11:32:22	29.00	48.00	N	5,5	—
13.02.1964	11:21:46	18.06	56.69	5	5,4	4,5

Por este motivo, la completitud del catálogo brasileño es muy variable conforme la región. Por ejemplo, en el sudeste de Brasil, donde la densidad de estaciones ha sido mayor, un límite de detectabilidad alrededor de 3,0 desde 1980 fue estimado por Berrocal et al. (1995) y Assumpção (1997). Para el resto del país, un límite de 3,5 desde 1980 parece más probable (Assumpção, 1998a).

2.2. Magnitudes

La magnitud patrón usada en el catálogo brasileño es la magnitud de la onda P, m_b (onda P telesísmica de 1 s). Para eventos menores que 4,5 m_b , normalmente no registrados a distancias telesísmicas, la escala de magnitud regional brasileña m_R es usada (Assumpção, 1983a) tomando en cuenta la baja atenuación sísmica en la litosfera en Brasil. Esta escala de magnitud usa la máxima amplitud de la velocidad de partícula en todo el tren de onda P, con períodos entre 0,1 y 1,0 s. Para sismos de 3,8 a 5,5 m_b , estas dos escalas de magnitud son aproximadamente equivalentes como muestra la figura 2a. La magnitud m_b estimada a partir de m_R tiene una desviación standard de 0,26 unidades. Las magnitudes M_s , por otro lado, son menores que m_b (tabla 1) lo que es típico para regiones intraplaca en esta banda de magnitudes (Nuttli 1983; Assumpção & Suárez, 1988).

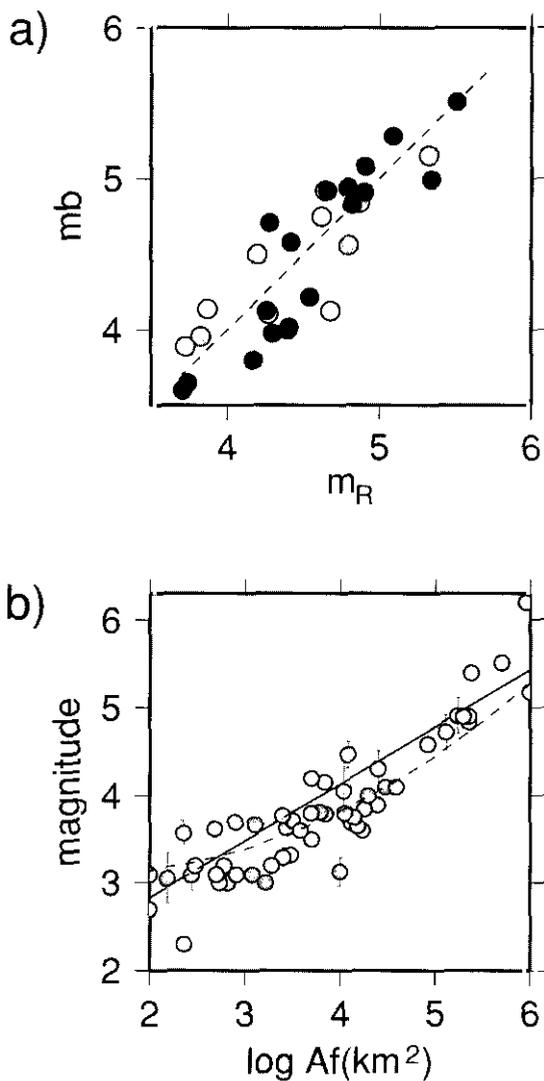


Figura 2. Relaciones empíricas de magnitudes.

a) Relación entre la magnitud m_b de onda P telesísmica, y la magnitud regional de Brasil m_R medida a distancias de 200 y 2000 km. Los círculos grises indican los datos usados en la definición de la escala m_R (Assumpção, 1983), y los círculos negros indican datos independientes.

b) Relación entre magnitud (m_b , m_R , o promedio de las dos) y el área donde el sismo fue sentido (área de la isosista II MM). La línea continua es la relación utilizada por Berrocal et al.(1984) basada en pocos datos. La curva discontinua es la relación empírica de Nuttli et al.(1979) para la región central y leste de Norte-América.

Para eventos históricos sin magnitud instrumental, una relación empírica entre magnitud y área donde el sismo fue sentido (línea continua en la figura 2b) fue usada en el catálogo de Berrocal et al. (1984). En realidad, tanto el área total como el área de la isosista IV (Mercalli Modificada) fueron usadas para estimar las magnitudes de los eventos históricos antiguos. Los datos de la figura 2b muestran la baja atenuación de intensidades típica de regiones de interior de placa. La línea discontinua representa la relación empírica de Nuttli et al. (1979) para la región central y este de Norte-América. En Brasil, sismos de magnitud 5,5 m_b son normalmente sentidos hasta 500 km de distancia.

3. DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD Y PROVINCIAS GEOLÓGICAS

Para mejor definir las varias zonas sísmicas en Brasil, un catálogo “uniforme” fue preparado (figura 3) filtrándose el catálogo brasileño (figura 1) con los límites de detectabilidad variando en tiempo (tabla 2), como usado por Assumpção (1998a). Esto elimina concentraciones artificiales de epicentros en áreas con mejor cobertura, como se discutió antes para la región sudeste. Los límites usados en la figura 3, aunque reducen dramáticamente la cantidad de eventos dibujados, permiten una comparación más realista entre las diferentes regiones geográficas.

Tabla 2. Límites de detectabilidad conforme el año, usado para el “catálogo uniforme” de la figura 3

Año	m_b	Comentarios
1950	6.0	Catálogo del “International Seismological Summary”
1962	5.0	Inicio de la red mundial WWSSN
1968	4.5	Inicio de la red de Brasilia (SAAS) y estación NAT
1980	3.5	Redes regionales de UnB, USP, y UFRN

La correlación de sismicidad intraplaca con aspectos geológicos y geofísicos de la corteza para definir “zonas sísmicas” es un problema muy difícil, donde los “expertos” raramente se ponen de acuerdo. Por ejemplo, Berrocal et al. (1984) presentó un mapa sismotectónico (epicentros sobre un mapa tectónico de Brasil) y sugirió cinco zonas “sismotectónicas” principales: Sudeste, Nordeste, Paraguay-Araguaia (centro-oeste de Brasil), Amazo-

nia, y plataforma continental sudeste. Mioto (1993), por su lado, hizo una revisión histórica muy detallada de todos los estudios sismológicos anteriores en Brasil y definió 26 regiones sísmicas diferentes. Por lo tanto, no es el objetivo de este trabajo definir las zonas sismotectónicas en Brasil, sino presentar algunas características de los pocos datos disponibles que puedan ayudar a otros trabajos en el futuro. Por causa de los pocos epicentros del catálogo "uniforme" (figura 3), solamente algunas ideas generales están discutidas aquí.

El estudio de la distribución epicentral en la figura 3 muestra las siguientes tendencias:

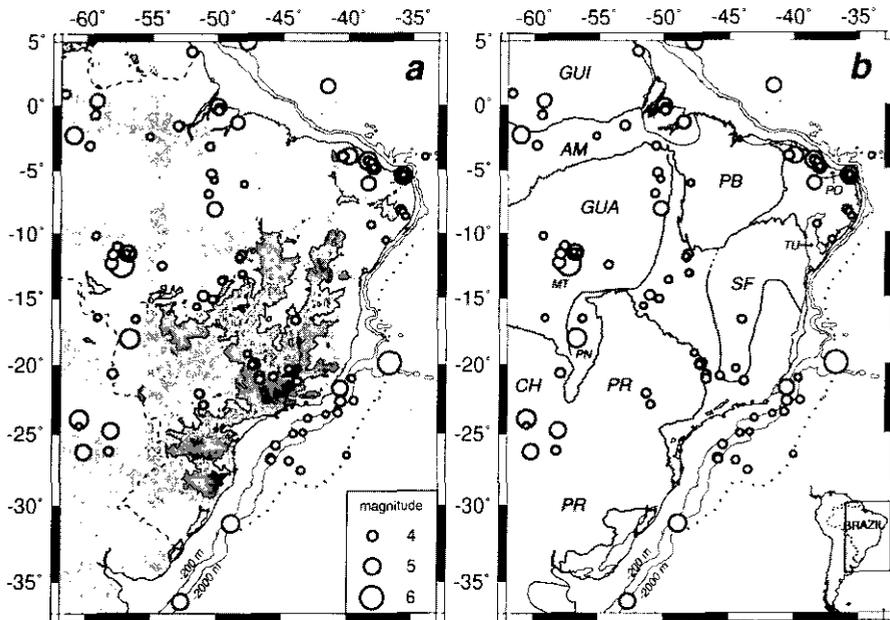


Figura 3. Catálogo uniforme, topografía y geología. Epicentros del "catálogo uniforme" obtenido filtrándose el catálogo brasileño (figura 1) con los límites de detectabilidad de la tabla 2. En la parte oceánica, la línea puntillada es el límite de la corteza continental extendida durante el rifteamiento Mesozoico.

a) Topografía: las partes grises más oscuras indican altitudes mayores que 600m y 1000m. La línea discontinua es la frontera de Brasil.

b) Provincias geológicas principales: cratones de Guiana (GUI), Guaporé (GUA) y São Francisco (SF); cuencas intracontinentales de origen paleozóica: Amazonía (AM), Parnaíba (PB), Paraná (PR) y Chaco (CH); las líneas más finas indican cuencas marginales Mesozoicas como Potiguar (PO) y Tucano (TU). En la parte no identificada predominan cinturones de plegamiento. PN indica la cuenca Cenozoica del Pantanal, y MT la región de Mato Grosso.

- a) En la región continental, los sismos tienden a ocurrir en áreas de baja altitud. Las áreas de la meseta en el sudeste de Brasil (altitudes mayores que 600 m) parecen menos activas que el resto del área continental en el interior de la placa: el catálogo uniforme no tiene ningún evento mayor que 4,2 de magnitud en el plateau (figura 3a).
- b) No se ve una correlación clara entre la distribución epicentral y las principales provincias geológicas del continente. La única excepción puede ser las cuencas intracráticas paleozoicas de Paraná y Parnaíba que parecen mucho menos sísmicas que el resto del continente (figura 3b). En la cuenca de Paraná, la baja sismicidad es caracterizada principalmente por pequeños sismos inducidos por embalses hidroeléctricos (Berrocal et al., 1995; Assumpção et al., 1997), con magnitudes menores que 4.
- c) Una amplia zona sísmica podría ser definida en la parte centro-oeste de Brasil desde el estado de Mato Grosso en la parte norte, extendiéndose por la parte oeste del Paraguay en el sur (aproximadamente entre 10°S y 27°S, a oeste de 55°W, figura 3b). El sismo de mayor magnitud del catálogo brasileño (6,2 m_b en 1955, tabla 1) ocurrió en esta zona. Esta zona incluiría parte del cratón amazónico y la cuenca del Pantanal en Brasil, y la cuenca del Chaco en Paraguay (figura 3b). Aunque esta amplia zona contenga diferentes provincias geológicas, los pocos mecanismos focales disponibles son compatibles con un campo de esfuerzo más o menos uniforme con la tensión horizontal máxima aproximadamente E-W (figura 4).
- d) El margen pasivo brasileño (plataforma continental + áreas cerca de la costa) no parece significativamente más activa que el resto del continente. Sin embargo, observase una diferencia significativa entre el margen ecuatorial y el margen sudeste. En los márgenes norte y nordeste (al norte de 10°S) los sismos ocurren en el continente con casi ninguna actividad fuera de la costa. Al sur de 15°S, la actividad se concentra preferencialmente en la plataforma continental, con poca actividad dentro de la costa. Chang et al. (1992) mapeó el límite de la corteza continental que fue extendida durante el rifting del Atlántico Sur (figura 3, línea punteada). Es notable como este límite de corteza extendida también parece ser el límite de la sismicidad en el margen continental sudeste. Esto es consistente con la interpretación de que cortezas extendidas en el Mesozoico constituyen zonas de debilidad tectónica (e.g., Sykes, 1978; Johnston, 1989). Además, parece que la figura 3b muestra una concentración de actividad a lo largo del talud continental, i.e., entre 200 m y 2.000 m de batimetría, donde en general el espesor de los sedimentos es mayor. Assumpção (1998a) mostró que los sismos de la plataforma continental

- SE tienen mecanismos inversos con focos en la parte superior o intermedia de la corteza, abajo de los sedimentos. Esto sería consistente con los esfuerzos flexurales causados por la sedimentación en la plataforma.
- e) Una zona sísmica muy bien definida puede ser vista en el margen nordeste (figura 3) con epicentros distribuyéndose principalmente alrededor de la cuenca marginal de Potiguar. Un estudio muy detallado de esta región (Ferreira et al., 1998) mostró que la actividad sísmica está confinada a los 10 km de la corteza superior. Un campo de esfuerzos de cizalla actúa en esta región con compresión paralela, y extensión perpendicular a la costa (figura 4).
 - f) Una zona lineal SW-NE en la parte central de Brasil (cerca de 15°S, 50°W) es claramente observada en las figuras 1 y 3. Assumpção et al. (1986) mostró que esta zona lineal es paralela, pero no totalmente coincidente, con el Lineamento Transbrasiliano, una serie de fallas del Proterozoico superior y Paleozoico inferior, de dirección SW-NE. Esta zona sísmica también ha sido correlacionada con un alto gravimétrico de dirección SW-NE (Fernandes et al., 1991) y una estructura de “pop-up” (Hasui y Mioto, 1988), pero ningún mecanismo sismogénico ha sido propuesto hasta ahora.

4. ESFUERZOS TECTÓNICOS

La figura 4 muestra los datos observados de esfuerzo en Brasil y una comparación con un modelo teórico de los esfuerzos intraplaca calculado por Coblenz y Richardson (1996). Los datos de esfuerzo provienen mayormente de mecanismos focales y breakouts. Apenas tres determinaciones in-situ son disponibles (figura 4).

4.1. Datos de mecanismos focales

Aunque los ejes P y T de los mecanismos focales no sean los ejes principales del esfuerzo ambiente, es común usarlos como una aproximación para los esfuerzos corticales. Teóricamente, el eje P puede quedarse hasta 90° de la compresión máxima S1 (McKenzie, 1969). En casos de sismicidad en fallas de desgarre muy activas (e.g., San Andreas en California), donde la falla es una zona de debilidad muy marcada con coeficiente de fricción muy pequeño, se ha observado que las diferencias entre el eje P y S1 pueden llegar a 45° (Mount y Suppe, 1992). Todavía, en regiones intraplaca con tasa de deforma-

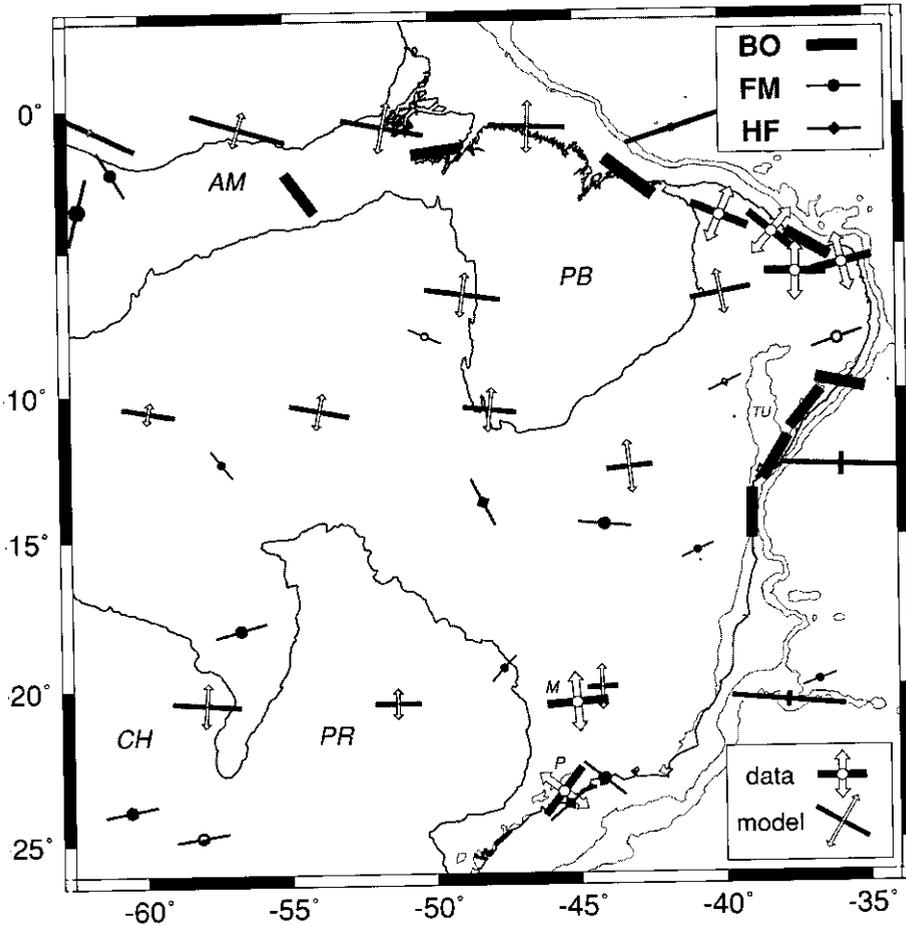


Figura 4. Datos de esfuerzo y modelo de SHmax CR96. Datos y modelo del esfuerzo intraplaca. Las estimaciones individuales de esfuerzo indican las direcciones de la tensión horizontal máxima (SHmax) y son mayormente de “breakouts” (BO, promedio de tres o más medidas consistentes), y mecanismo focal (FM). Los datos de mecanismos indican las direcciones del eje P de sismos inversos y de desgarre (círculos llenos), o el eje B de fallas normales (círculos blancos). HF son medidas in-situ, mayormente de fraturamiento hidráulico. Las tensiones principales determinadas con inversión de mecanismos focales están indicadas por la barra negra (tensión máxima) y la flecha blanca (tensión mínima) gruesa. “M” y “P” son datos obtenidos con sismos en Minas Gerais, y con sismos inducidos en el embalse de Paraibuna, respectivamente. Las barras y flechas más finas indican el modelo de esfuerzo intraplaca de Coblenz y Richardson (1996). En el modelo teórico, el tamaño (longitud) de los símbolos indica las magnitudes relativas de las tensiones principales. Los datos de inversiones de mecanismos sólo indican las direcciones, pues el factor de forma (S2-S3)/(S1-S3) no fue bien determinado en general. Otros símbolos como en figuras anteriores.

ción muy bajo y actividad sísmica distribuida en muchas fallas pequeñas, los ejes P de mecanismos inversos y transcurrentes (o los ejes B de mecanismos normales) pueden ser una aproximación para la dirección del esfuerzo horizontal máximo (SHmax). Zoback (1992b) hizo un estudio de los mecanismos focales intraplaca en Norte-América con relación a los esfuerzos corticales medidos con métodos independientes. Un análisis de los datos de Zoback (1992) muestra que en 86% de los sismos estudiados, la estimación de SHmax con el mecanismo focal está a menos de 25° de S1. Así, cuando no hay otras medidas mejores, mecanismos focales individuales pueden ser útiles para una estimación aproximada de la dirección de SHmax en regiones intraplaca.

Por otro lado, las direcciones principales del esfuerzo pueden ser obtenidas por inversión de un conjunto de mecanismos focales diferentes en la misma área (e.g., Michael, 1987). La figura 4 muestra seis casos de inversión de esfuerzo con mecanismos focales, todos con esfuerzo resultante de cizalla (símbolo "data", barra negra y flechas blancas en la figura 4). En el noreste de Brasil, cuatro inversiones de mecanismos focales fueron hechas por Ferreira et al. (1998) indicando compresión paralela al margen continental norte (y extensión perpendicular a él). En el sudeste de Brasil, una inversión de cuatro mecanismos focales en el estado de Minas Gerais (Assumpção, 1998b) resultó en un esfuerzo transcurrente con compresión E-W y extensión N-S ("M" en la figura 4) muy parecido con el modelo de Coblenz y Richardson (1996). En el sudeste de Brasil, más próximo de la costa, Mendiguren (1980) determinó cuatro mecanismos focales compuestos, representativos de la sismicidad inducida por la presa de Paraibuna-Paraitinga. La inversión de estos cuatro mecanismos resulta también en un esfuerzo de cizalla, pero con compresión orientada paralela a la costa ("P" en la figura 4).

Las estimaciones de SHmax con un único mecanismo focal (símbolo "FM" en la figura 4) son basadas en los mecanismos compilados por Assumpção (1992) junto con dos mecanismos más recientes: una falla normal en el noreste (Ferreira et al., 1998) y una falla inversa en la costa sudeste (Berrocal et al. 1993). Al oeste de la cuenca de Paraná, y en la parte central de Brasil, los mecanismos focales muestran una dirección de SHmax promedio E-W. En la cuenca del Amazonas, dos mecanismos inversos parecen indicar SHmax orientado N-S.

4.2. Datos de breakouts

Lima et al. (1997) analizaron centenas de "breakouts" en las cuencas sedimentarias principales en Brasil. En general los datos de "breakout" tienen una

dispersión muy grande. Esta dispersión es causada por las dificultades de identificación de los "breakouts" en el perfilage, y la acumulación de tensiones locales muy cerca del pozo que puede superar las tensiones tectónicas regionales. Así, en la figura 4 (símbolo "BO"), sólo se muestran las direcciones de SHmax determinadas como promedio, estadísticamente significativo, de tres o más medidas cercanas (Lima et al., 1997). En la margen norte de Brasil, la dirección de SHmax es paralela a la costa, consistente con los esfuerzos obtenidos de los mecanismos focales. En la costa este, SHmax determinada con breakouts sigue la tendencia de ser paralela a la costa.

4.3. Comparación con modelo teórico

Las fuerzas motoras de la placa sud-americana sólo pueden ser estudiadas indirectamente a través de los esfuerzos que producen en el interior de la placa. A pesar de muchos estudios de modelado de los esfuerzos intraplaca (e.g., Mendiguren y Richter, 1978; Stefanick y Jurdy, 1992; Meijer y Wortel, 1992; Meijer, 1995; Coblentz y Richardson, 1996), todavía no se sabe si la placa Sur-Americana es empujada desde la dorsal centro-atlántica ("ridge-push") con alguna resistencia de la astenosfera, o si la placa es llevada pasivamente por el flujo en el manto superior. Hay dos motivos para esta dificultad: primeramente los pocos datos confiables de esfuerzo intraplaca en América del Sur no son suficientes para restringir las varias posibilidades teóricas; segundo, fuentes locales de esfuerzo pueden perturbar significativamente los esfuerzos regionales, dificultando la comparación con los modelos.

La figura 4 muestra los esfuerzos teóricos (símbolo "model") calculados por Coblentz & Richardson (1996) con un modelo 2-D por elementos finitos de la placa sur-americana. En este modelo, la placa litosférica tiene 100 km de espesor y una teología puramente elástica. Las fuerzas principales utilizadas son: el empuje de la cadena Meso-Atlántica, la resistencia debido a la colisión con la placa de Nazca, una pequeña tensión de cizallamiento positiva por debajo de la placa (i.e., el flujo en la astenosfera ayuda el movimiento de la litosfera). Además de estas fuerzas, los importantes efectos topográficos de los Andes y del margen continental debidos a la variación lateral de densidad (conocidos como "spreading stresses") fueron también incluidos. La figura 4 muestra que en la parte oceánica el esfuerzo teórico es compresivo de dirección E-W; en la parte continental el esfuerzo es de cizalla con compresión E-W y extensión N-W aproximadamente.

En la parte interior del continente, el modelo teórico es consistente con la mayor parte de las observaciones. En la cuenca Amazónica, la diferencia

entre la dirección de SHmax observada con breakouts y el modelo teórico fue atribuido a efectos locales de flexura de la litosfera debido a intrusiones de alta densidad en la corteza inferior a lo largo del eje de la cuenca (Zoback y Richardson, 1996; Lima et al, 1997). En la costa este (entre 10°S y 15°S), SHmax determinada con breakouts es paralela a la costa y casi perpendicular a la dirección teórica. Lima et al. (1997) sugirió que esta discrepancia es debida a efectos locales de flexura por cargas sedimentarias no compensadas en las cuencas de Tucano y otras cuencas marginales. Aunque el modelo de Coblenz & Richardson (1996) toma en cuenta el efecto de "spreading stress" en el margen continental, las observaciones indican que otros efectos locales son muy importantes como los efectos de flexura por cargas sedimentarias en la plataforma continental. Ferreira et al. (1998) también sugieren que efectos locales de flexura son importantes para explicar la pequeña variación lateral de SHmax en el nordeste de Brasil.

Variaciones en los parámetros de las fuerzas motoras usadas en los modelos teóricos pueden producir pequeñas diferencias en el campo de esfuerzo. Meijer (1995), por ejemplo, usó técnicas parecidas a las de Coblenz & Richardson (1996), pero parámetros un poco diferentes. Su modelo de campo de esfuerzos es parecido al de Coblenz & Richardson (1996) pero la dirección de SHmax en el continente está desviada 20° en dirección dextral. El modelo de Coblenz & Richardson (1996) es más compatible con los datos en la parte sur de Brasil; el modelo de Meijer (1995) describe mejor las direcciones de SHmax en la parte norte y nordeste de Brasil.

A pesar de estas diferencias, los dos modelos (Meijer, 1995; Coblenz & Richardson, 1996) reproducen las principales características de primer orden del campo de esfuerzos intraplaca. Como conclusión, es posible decir que el campo de esfuerzos intraplaca en Brasil es debido tanto a las fuerzas motoras de la placa Sud-americana como también a efectos de grandes estructuras locales. En algunos casos, como en la costa este, los efectos locales pueden ser mayores que las tensiones regionales.

Es interesante observar que los dos modelos preferidos de Meijer (1995) y Coblenz & Richardson (1996) tienen una pequeña tensión de cizallamiento positiva en la base de la litosfera. Como consecuencia, esto implicaría en que la placa es llevada por el flujo del manto superior. Sin embargo, Meijer (1995) mostró que esta pequeña tensión positiva no es todavía significativa. Es posible que una mayor cantidad de datos de esfuerzo intraplaca en América del Sur, y modelos más complejos, en los próximos años, puedan traer informaciones importantes y más definitivas sobre las fuerzas motoras de la placa sur-americana y sus relaciones con el flujo del manto superior.

5. CONCLUSIONES

El nivel de sismicidad en Brasil es muy bajo (tabla 1), menor que en otras regiones intraplaca como Australia, América del Norte, África y la India. Sin embargo, la ocurrencia de sismos con magnitud $6 m_b$ y la baja atenuación de las intensidades en la corteza predominantemente pre-cambriana han mostrado que estudios de riesgo sísmico juegan un papel importante en la construcción de estructuras críticas como plantas nucleares y embalses hidroeléctricos.

El análisis de la distribución epicentral en Brasil demuestra que la sismicidad no es uniforme. Algunas regiones parecen relativamente más sísmicas que otras. El estudio de las tensiones corticales observadas por mecanismos focales y por "breakouts" indica que el campo de esfuerzo litosférico tiene una componente regional y una componente local. La componente regional es debido a las fuerzas motoras de la placa sur-americana y a grandes variaciones laterales de estructura como los Andes y la transición continente/océano. La componente local puede ser debido a variaciones locales de estructura, o a efectos flexurales en cuencas sedimentarias.

Una comparación entre la distribución epicentral (figuras 1 y 3) y los datos de esfuerzo (figura 4) permiten sugerir las siguientes regiones sismotectónicas principales:

- a) *Amazonia central*: parte central de la cuenca amazónica y parte del cratón de Guiana. El tipo de esfuerzo no es totalmente definido.
- b) *Centro-oeste de Brasil y Chaco*: región al oeste de 55°W incluyendo parte del craton Amazónico y la cuenca del Pantanal en Brasil, y la cuenca del Chaco en Paraguay. Las tensiones corticales parecen ser compresivas E-W o de cizalla (S1 E-W y S3 N-S). Estas tensiones pueden ser, en parte, relacionadas a la tectónica andina.
- c) *Nordeste*: parte continental al este de la cuenca de Parnaíba y al norte de 7°S . Esfuerzo bien definido como strike-slip con S1 paralelo a la costa norte. Este esfuerzo total resulta de la combinación de tensiones compresivas regionales E-W, con tensiones locales extensivas perpendiculares a la costa (Assumpção, 1992; Ferreira et al., 1998).
- d) *Plataforma sudeste*: región marina en el margen continental sudeste, entre la costa y el límite de corteza extendida. Los mecanismos focales indican predominio de esfuerzos compresivos (Assumpção, 1998a). Esto es consistente con los modelos teóricos (Meijer, 1995; Coblenz y Richardson, 1996) aunque la dirección de SHmax no ha podido ser determinada con los mecanismos focales. Tensiones flexurales debido a la carga de sedimentos de la plataforma pueden ser contribuciones adicionales a los esfuerzos compresivos en la corteza superior (Assumpção, 1998a).

Debido a los pocos sismos del catálogo uniforme (figura 3) y a los escasos datos de esfuerzo intraplaca (figura 4), estas definiciones de regiones sismotectónicas son aún preliminares.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos mis colegas sismólogos de UnB, USP, UFRN, e IPT por muchos años de colaboración y trabajo en conjunto, con discusiones provechosas (científicas y políticas), que resultaron en un avance de la sismología brasileña y duraderas amistades. Este trabajo fue hecho con apoyo de CNPq-Brasil (proc. 30.0227/79).

REFERENCIAS

- ASSUMPCÃO, M., 1983a. A regional magnitude scale for Brazil. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 237-246.
- ASSUMPCÃO, M., 1983b. Terremotos no Brasil. *Ciência Hoje (Brasil)*. 1 (6), 13-20.
- ASSUMPCÃO, M., G. SUÁREZ y VELOSO, J.A., 1985. Fault plane solutions of intraplate earthquakes in Brazil: some constraints on the regional stress field. *Tectonophysics*, 113, 283-293.
- ASSUMPCÃO, M., T.M. LIMA y L.A.R. TOMÁS, 1986. O sismo de Araguapaz de 14.01.86 e o lineamento Transbrasiliano. 34º Congr. Bras. Geol., Goiânia-GO, 6: 2.573-2.580.
- ASSUMPCÃO, M. y G. SUÁREZ, 1988. Source mechanisms of moderate size earthquakes and stress orientation in mid-plate South America. *Geophys. J.*, 92, 253-267.
- ASSUMPCÃO, M., 1992. The regional intraplate stress field in South America. *J. Geophys. Res.* 97, 11.889-11.903
- ASSUMPCÃO, M., J.R. BARBOSA, J. BERROCAL, A. BASSINI, J.A.V. VELOSO, V. MÁRZA, M. HUELSEN y L.C. RIBOTTA, 1997. Seismicity patterns and focal mechanisms in SE Brazil. *Rev. Bras. Geofísica*, 15, in press.
- ASSUMPCÃO, M., 1998a. Seismicity and stresses in the Brazilian passive margin. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 160-169.
- ASSUMPCÃO, M., 1998b. Focal mechanisms of small earthquakes in SE Brazilian shield: a test of stress models of the South American plate. *Geophys. J. Int.*, 132, in press.
- BERROCAL, J., M. ASSUMPCÃO, R. ANTEZANA, C.M. DIAS NETO, H. FRANÇA y R. ORTEGA, 1983. Seismic activity in Brazil in the period 1560-1980. *Earthquake Prediction Research*, 2, 191-208.

- BERROCAL, J., M. ASSUMPCÃO, R. ANTEZANA, C.M. DIAS NETO, R. ORTEGA, H. FRANÇA y J. VELOSO, 1984. Sismicidade do Brasil. *IAG-USP/CNEN*, São Paulo, 320 págs.
- BERROCAL, J., C. FERNANDES, A. BUENO, N. SEIXAS y A. BASSINI, 1993. Seismic activity in Monsuaba-RJ, Brazil, between december /88 and february/89. *Geophys. J. Int.*, 113, 73-82.
- BERROCAL, J., C. FERNANDES, A. BASSINI y J.R. BARBOSA, 1996. Earthquake hazard assessment in southeastern Brazil. *Geofísica Internacional*, 35, 257-272.
- BOTT, M.H.P. y D.S. DEAN, 1972. Stress systems at young continental margins, *Nature Phys. Sci.*, 235, 23-25.
- CHANG, H.K., R. KOWSMAN, A.M.F. FIGUEIREDO y A.A. BENDER, 1992. Tectonics and stratigraphy of the east Brazil rift system: an overview. *Tectonophysics*, 213, 97-138.
- COBLENTZ, D.D. y R.M. RICHARDSON, 1996. Analysis of the South American intra-plate stress field, *J. Geophys. Res.*, 100, 20245-20255.
- FERNANDES, E.P., M. BLUM y R. RIBEIRO, 1991. The Goiás seismic zone, a new approach. In *35º Int. Congr. Bras. Geophys. Soc., Salvador, Anales*, V 2, 553-558.
- FERREIRA, J., R.T. OLIVEIRA, M.K. TAKEYA y M. ASSUMPCÃO, 1998. Superposition of local and regional stresses in NE Brazil: evidence from focal mechanisms around the Potiguar marginal basin. *Geophys. J. Int.*, in press.
- HASUI, Y. y J.A. MIOTO, 198. A zona sismogênica de Porangatu (GO). In *35º Congr. Bras. Geología, Belém, Anales*, V 5, 2173-2186.
- JOHNSTON, A.C., 1989. The seismicity of stable continental interiors. In *Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Postglacial Rebound*, S. Gregersen and P.W. Basham (eds.), 299-327, Kluwer Academic, Boston, USA.
- JOHNSTON, A.C y L.R. KANTER, 1990. Earthquakes in stable continental crust. *Scientific American*, 262, 68-75.
- LIMA, C., E. NASCIMENTO y M. ASSUMPCÃO, 1997. Stress orientations in Brazilian sedimentary basins from breakout analysis - implications for force models in the South American plate. *Geophys. J. Int.*, 130(1), 112-124.
- MCKENZIE, D.P., 1969. The relationship between fault plane solutions for earthquakes and the directions of principal stresses. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59, 591-601.
- MEIJER, P.T. y M.J.R. WORTEL, 1992. The dynamics of motion of the South American plate. *J. Geophys. Res.* 97, 11.915-11.931.
- MEIJER, P.T., 1995. Dynamics of active continental margins: the Andes and the Aegean region, *Ph. D. thesis*, Utrecht University, The Netherlands, 218 págs.
- MENDIGUREN, J.A. y F.M. RICHTER, 1978. On the origin of compressional intraplate stresses in South America. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 16, 318-326, 1978.

- MICHAEL, A.J., 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: a control study. *J. Geophys. Res.*, 92, 357-368.
- MIOTO, J.A., 1993. Sismicidade e zonas sismogênicas do Brasil. *Tese de doutoramento, IGCE-UNESP, Brasil.*
- MOUNT, V.S. y J. SUPPE, 1992. Present-day stress orientations adjacent to active strike-slip faults: California and Sumatra. *J. Geophys. Res.*, 97(B8), 11.995-12.013.
- NUTTLI, O.W., G.A. BOLLINGER y D.W. GRIFFITHS, 1979. On the relation between Modified Mercalli intensity and body-wave magnitude. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 69, 893-909.
- NUTTLI, O.W., 1983. Average seismic source-parameter relations for mid plate earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 519-535.
- STEFANICK, M. y D.M. JURDY, 1992. Stress observations and driving force models for the South American plate, *J. Geophys. Res.*, 97 (B8), 11.905-11.913.
- STEIN, S., S. CLOETINGH, N.H. SLEEP y R. WORTEL, 1989. Passive margin earthquake, stresses and rheology, in *Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Postglacial Rebound*, págs. 231-259, eds Gregersen, S. y Basham, P.W., Kluwer Academic, Boston, MA.
- SYKES, L., 1978. Intraplate seismicity, reactivation of pre-existing zones of weakness, alkaline magmatism, and other tectonism postdating continental fragmentation.. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 16, 621-688.
- ZOBACK, M.L., 1992a. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *J. Geophys. Res.*, 97 (B8), 11.703-11.728.
- ZOBACK, M.L., 1992b. Stress field constraints on intraplate seismicity in eastern North America. *J. Geophys. Res.*, 97 (B8), 11.761-11.782.
- ZOBACK, M.L. y R.M. RICHARDSON, 1996. Stress perturbation associated with the Amazonas and other ancient continental rifts. *J. Geophys. Res.*, 101, 5.459-5.475.