

Geofís. Int., Vol. 28-5, 1989, pp. 907-938

Spec. Vol.: Dynamics and Evolution of the Lithosphere, Part 2.

*ROTACION DE BLOQUES EN SISTEMAS DE FALLAS DE
DESPLAZAMIENTO LATERAL - CUENCAS TENSIONALES*

J. URRUTIA-FUCUGAUCHI*

(Recibido: 10 de agosto, 1988)

(Aceptado: 1o. de marzo, 1989)

RESUMEN

En sistemas de fallas laterales con discontinuidades en forma de cambios de orientación o fallas *en échelon*, el desplazamiento lateral produce extensión y subsidencia o levantamiento y compresión. Estos procesos originan estructuras de cuencas tensionales o bloques de presión, características de ambientes tectónicos de fallamiento transformado o en el interior de las placas. Se han identificado estructuras tensionales en el sistema de fallas de San Andrés-Golfo de California, en el sistema Polochic-Motagua y en la porción central de México en la Faja Volcánica Trans-Mexicana. Estas estructuras tensionales muestran varias características comunes, no obstante la diversidad de escalas y de ambientes tectónicos en que se presentan. Entre estas características se encuentran la forma geométrica que se aproxima a un rombo y sus relaciones entre los largos y anchos. Independientemente del tamaño de la cuenca, los anchos tienen una relación con la mitad de los largos de 1:1.6. Dicha relación sugiere que esta característica está asociada al proceso de formación y evolución de las cuencas. En este trabajo se examina un mecanismo para el origen y evolución de estructuras tensionales que implica la rotación de bloques en el dominio de la estructura asociada al desplazamiento lateral. El proceso de rotación parece constituir el mecanismo responsable de la formación de las cuencas. La relación geométrica de 1:1.6 corresponde al cociente de términos adyacentes en la progresión geométrica de Fibonacci y a la sección áurea o rectángulo de oro, empleado en Arte y Arquitectura. Se discuten varios aspectos relacionados con el proceso de crecimiento de organismos,

* Laboratorio de Paleomagnetismo y Geofísica Nuclear, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, D. Coyoacán 04510, D. F., MEXICO.

que presentan relaciones semejantes, así como las características de sistemas dinámicos en los cuales ciertos fenómenos aleatorios presentan patrones geométricos simples, constituyendo formas especiales de 'caos', y sistemas determinísticos simples con relativamente pocos elementos que generan comportamientos caóticos y que sin embargo sugieren relaciones causales y presentan relaciones geométricas. Finalmente, se discuten varias características del modelo de origen y evolución de las cuencas tensionales y se analizan las estructuras en la región de California - Golfo de California. Los datos paleomagnéticos indican la ocurrencia de rotaciones. La magnitud de estas rotaciones aumenta con la edad de la cuenca.

ABSTRACT

Strike-slip motion along systems of lateral faults with discontinuities (*en échelon* or sharp bends) results in extension and subsidence at releasing bends or in uplift and deformation at restraining bends. The resulting structures are known as pull-apart basins and pressure ridges, respectively (or simply pull-apart structures, for short). Pull-apart structures are common at transform plate boundaries and in intraplate tectonic settings such as the San Andrés - Gulf of California right-lateral transform system, the Polochic-Motagua left-lateral transform system or along central Mexico (Trans-Mexican volcanic belt). Despite the widely varying tectonic settings and scales, pull-apart structures are characterized by a remarkably constant geometry, with generally rhombus-like shapes and a half-length to width ratio of about 1.6. A simple mechanism to account for the origin and evolution of pull-apart structures is proposed and discussed; it involves block rotation as the main factor in the origin and evolution. The relationships examined allow us to discuss briefly similar relations involved in widely different fields such as those of spiral growth patterns of plants and animals, those used in the design of paintings and buildings, and those arising from geometric progressions (Fibonacci series); the relationship found for the half-length to width ratio of pull-apart structures (the so-called golden section in Arts and Architecture) also arises in certain chaotic systems where randomness presents an underlying geometric form, and simple deterministic systems which despite containing few elements may still generate random behaviour (*i.e.* chaos), although they suggest causal relationships.

INTRODUCCION

El reconocimiento de la posible ocurrencia de desplazamientos horizontales de gran magnitud implícitos en las teorías de deriva continental y tectónica de placas ha fomentado el interés por el estudio de los sistemas de fallas laterales. Wilson (1965) interpretó estos sistemas de fallas como elementos tectónicos de unión entre sistemas de dorsales y trincheras oceánicas y sugirió que éstos, por lo tanto, constituyen límites entre las placas de la litosfera. Estos sistemas de fallas en los límites de las placas se denominaron transformadas ("transform faults") y presentan características diferentes de los sistemas de fallas laterales en el interior de las placas, conocidos como fallas transcurrentes. Estos sistemas de fallas transcurrentes, por otro lado, constituyen una importante componente de la tectónica del interior de las placas. Las características y la escala de estas estructuras varía grandemente, desde sistemas locales y con desplazamientos de poca magnitud, hasta los sistemas regionales sujetos a desplazamientos del orden de decenas, centenas y hasta miles de kilómetros. Entre

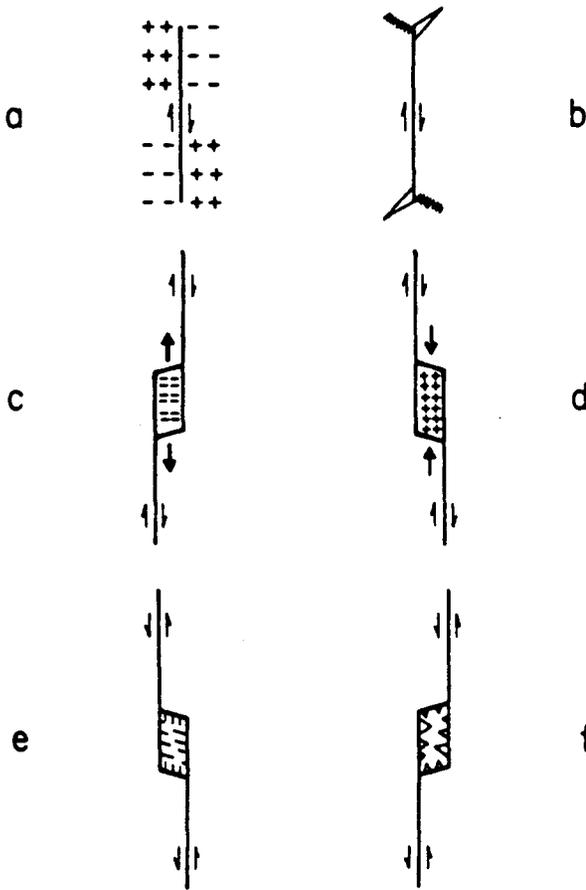


Fig. 1. Representación esquemática de la formación de estructuras tensionales (cuencas o grabens tensionales y bloques o horsts de presión) en ambientes de fallamiento lateral. El tipo de estructura (tensión o compresión) depende del sentido de desplazamiento lateral y de la posición relativa de la discontinuidad. (a) segmento de falla lateral derecha (movimiento indicado por las flechas). La compresión y la tensión se indican por los símbolos positivos y negativos, respectivamente. (b) formación de estructuras de compresión y tensión en los extremos del segmento de falla (ver a). (c) falla lateral derecha con discontinuidad o escalón, con la formación de estructura de tensión (cuenca). (d) falla lateral derecha con discontinuidad o escalón y la formación de estructura de presión (horst). (e) falla lateral izquierda con discontinuidad y formación de cuenca. (f) falla lateral izquierda con la formación de estructura de presión.

estos sistemas mayores se encuentran los de fallas transformadas, como el que constituye el límite entre las placas de Norteamérica y Pacífica, la falla de San Andrés o el representado por el sistema intraplaca de Asia Central, en el Tíbet y China.

En este trabajo se examina brevemente la evidencia sobre la rotación de bloques en sistemas de fallas laterales (transformadas o transcurrentes), en relación con la formación de cuencas tensionales ("pull-apart basins"). Estas cuencas tensionales presentan una disposición geométrica característica, la cual, al parecer, se conserva en una gran diversidad de escalas y de ambientes tectónicos. El mecanismo propuesto en este trabajo para el origen y evolución de estas estructuras incorpora la rotación de bloques como rasgo principal y pone de manifiesto una serie de relaciones geométricas que contienen información cinemática y dinámica sobre los procesos que participan en los sistemas de movimientos laterales. Relaciones de este tipo se presentan en la naturaleza en los patrones de crecimiento de una variedad de organismos y se han empleado extensamente en obras de arte y en construcciones arquitectónicas. En particular, se tratará de exponer un modelo de evolución para las cuencas tensionales en el que se plantean interrogantes tan diversas como: ¿en qué se parecen un girasol, una pintura de Leonardo de Vinci, una progresión geométrica del siglo XIII, el caracol de un *nautilus* y una cuenca tensional en sistemas de fallas laterales (transformadas o transcurrentes)?

CUENCAS TENSIONALES

El desplazamiento lateral a lo largo de segmentos de fallas laterales con cambios de orientación o discontinuidades *en échelon*, ocasiona tensión y subsidencia o bien compresión y elevación, dependiendo del sentido del desplazamiento lateral y de la discontinuidad en la falla (figura 1). Como resultado de estos procesos, en los sistemas de fallas laterales se forman grabens y horsts, los cuales se han referido en la literatura con una variedad de nombres, entre ellos: cuencas tensionales ("pull-apart basins") y bloques de compresión ("pressure ridges"). Entender el origen y la evolución de estas cuencas tensionales y bloques de compresión ha constituido un tema de gran interés; sin embargo, un modelo de aplicación general ha sido difícil de desarrollar. Estas estructuras tectónicas presentan una amplia diversidad de tamaños y una disposición regional generalmente compleja (figura 2). Las estructuras, por otro lado, presentan un patrón geométrico aparentemente más regular, ya que muchas muestran una forma romboidal o formas de "S" o "Z" (figura 3).

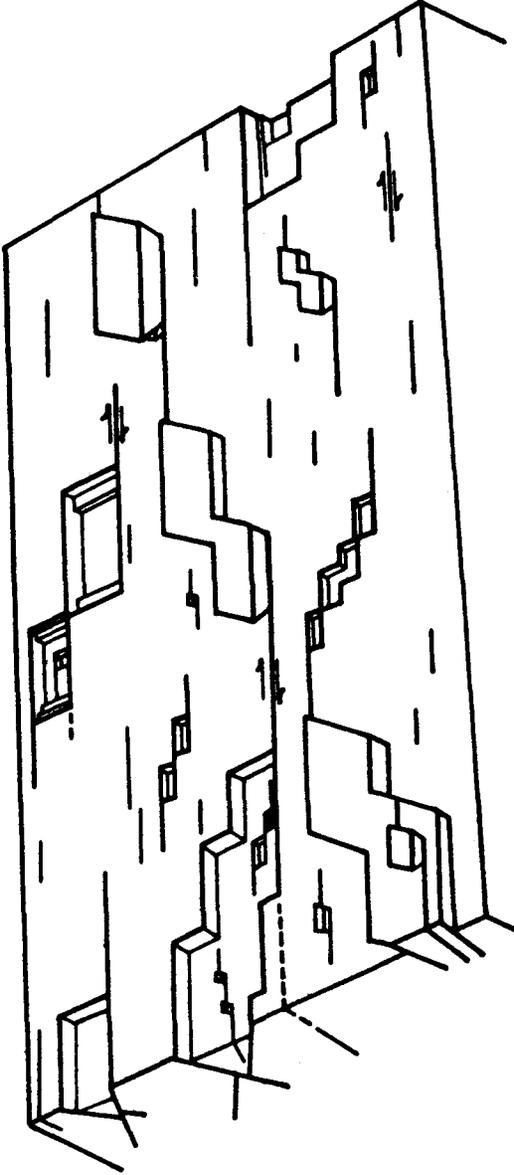


Fig. 2. Diagrama generalizado de un ambiente de desplazamiento lateral, con la formación de cuencas tensionales (adaptado de Crowell, 1974). Frecuentemente, la disposición tectónica espacio-temporal es compleja y abarca varias cuencas tensionales de diversos tamaños y con diferentes grados de interacción o cercanía entre ellas y los segmentos de falla. En forma aislada o individual, las estructuras presentan una disposición geométrica sencilla, tanto en su forma como en sus relaciones espaciales. Esta disposición se manifiesta en escalas diversas y situaciones tectónicas complejas.

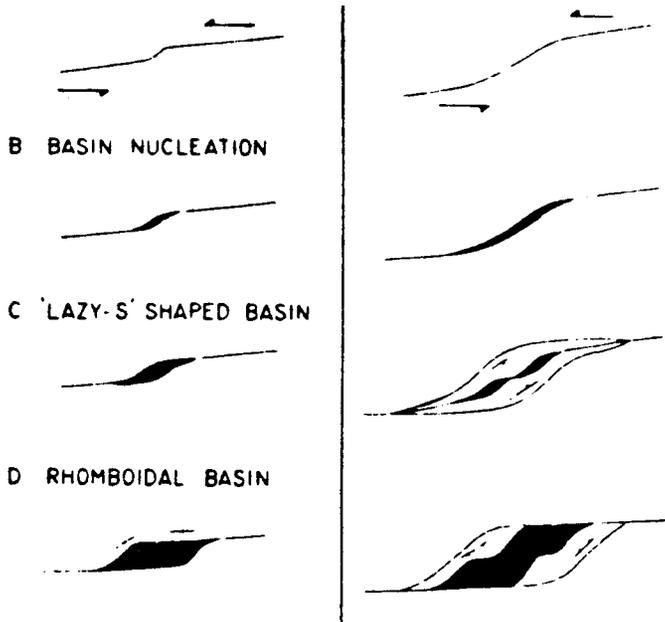


Fig. 3. Formas geométricas características de cuencas tensionales (adaptada de Mann *et al.*, 1983). Obsérvese la forma romboidal (o de 'S' y 'Z') asociada al desplazamiento lateral y su aparente relación con el sentido de los desplazamientos. Las figuras corresponden a sistemas de falla lateral derecha con discontinuidad (o escalón) de tensión. La convención para establecer los movimientos es a partir de uno de los bloques y observando al otro lado de la falla. (Ver Figura 1 y texto.)

Los modelos más sencillos asocian el origen y evolución de estas estructuras a los desplazamientos laterales (como está implícito en los nombres empleados) en zonas de discontinuidad geométrica en los trazos de las fallas. En este tipo de modelos, el ancho de la estructura se fija por la separación o curvatura inicial entre los segmentos de la falla, mientras que el largo aumenta con la magnitud del desplazamiento lateral (figura 4a). Estos modelos implican que las cuencas deben mostrar una geometría característica, que depende de la magnitud de los desplazamientos y por lo tanto de la edad, con cuencas más alargadas en sistemas muy activos (o más antiguos). Estas implicaciones pueden comprobarse, ya que los largos de las cuencas estarán correlacionados con la magnitud del desplazamiento total y su edad.

Aydin y Nur (1982) examinaron las relaciones geométricas entre el largo y el an-

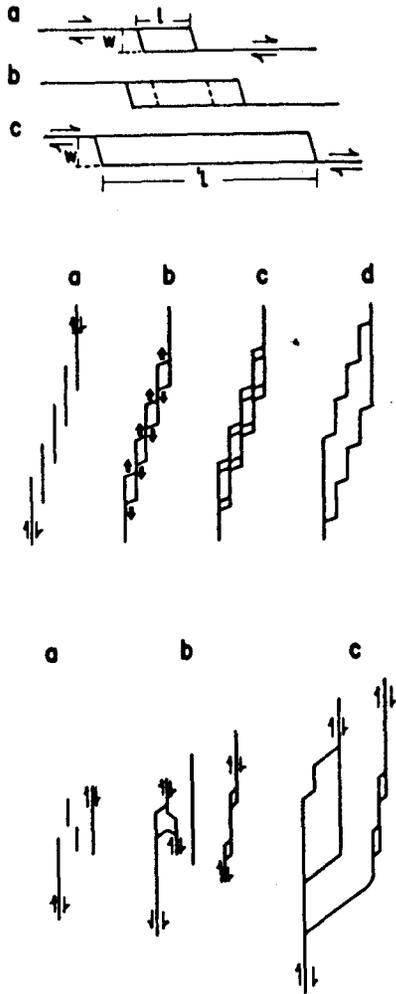


Fig. 4. Algunos modelos propuestos para la formación de cuencas tensionales (adaptado de Aydin and Nur, 1982). (a) Modelo de anchura constante y longitud variable, la cual se incrementa con la magnitud de los desplazamientos a lo largo de los segmentos de falla. Obsérvese que este modelo implica cuencas alargadas, cuyas longitudes son función de la magnitud de los desplazamientos laterales (y de la edad). (b) Modelo de interacción de varias cuencas tensionales, en el cual se conserva por la interacción y agregación una determinada geometría con cociente de ancho y largo constante. (c) Modelo de formación de segmentos de falla y nuevas cuencas tensionales, en el cual se intenta conservar la geometría mencionada para el anterior. Obsérvese que en estos dos casos, tanto las cuencas individuales como las que son el resultado de los procesos de interacción, agregación, etc. deben de conservar una geometría particular (ilustrada en la Fig. 5).

cho de 70 cuencas tensionales, las cuales presentaban escalas diferentes desde unas decenas de metros hasta decenas de kilómetros. En contraste con las relaciones esperadas, Aydin y Nur (1982) encontraron que las cuencas mostraban una relación geométrica constante, en la que los anchos y los largos de las estructuras se correlacionan independientemente de la magnitud del desplazamiento total (y de aquí, la edad). La relación geométrica se ilustra en la figura 5. El amplio rango de escalas y ambientes tectónicos examinado (figura 5) sugiere que si el largo depende del desplazamiento lateral, entonces el ancho está directamente relacionado con el mecanismo de formación de las estructuras. La aparente complejidad de los fenómenos y factores que intervienen en ambientes de desplazamiento lateral (figura 2) sugiere, por otro lado, que el "orden" mostrado (figura 5) puede ser un fenómeno fortuito en que una serie de procesos aleatorios da como resultado una relación ordenada. ¿Podrían estos procesos sugerir una causa determinística?

ORIGEN Y EVOLUCION DE CUENCAS TENSIONALES - MODELOS

Las características geométricas aparentemente sencillas mostradas por las estructuras tensionales han atraído la atención y permitido la formulación de una gran variedad de modelos para explicar su origen y evolución. Algunos de los modelos propuestos se ilustran en la figura 4. Aydin y Nur (1982) propusieron dos modelos para explicar la relación $L = 1.6 W$ (figura 5), en los cuales participan procesos aleatorios capaces de producir un orden aparente. Estos modelos están más relacionados con la evolución de las estructuras que con su origen. En uno de los modelos (figura 4b) la relación se conserva por un proceso de interacción en el sistema de fallas laterales y cuencas, proceso que se ha observado en varios sistemas. Desafortunadamente, en este modelo, las cuencas, en su origen, no solamente deben ser capaces de mantener la relación geométrica sino que además, en el proceso de interacción y agregación al incrementarse la longitud de las cuencas 'compuestas' deben conservar la relación geométrica. De hecho, el proceso de interacción es más probable que perturbe el proceso de crecimiento ordenado de los sistemas de cuencas. El otro modelo examinado por Aydin y Nur (1982) requiere un proceso con componentes aleatorias aún mayores, ya que éste implica la formación de nuevas zonas de fracturamiento que deben guardar relaciones geométricas y temporales precisas con las cuencas pre-existentes (figura 4c).

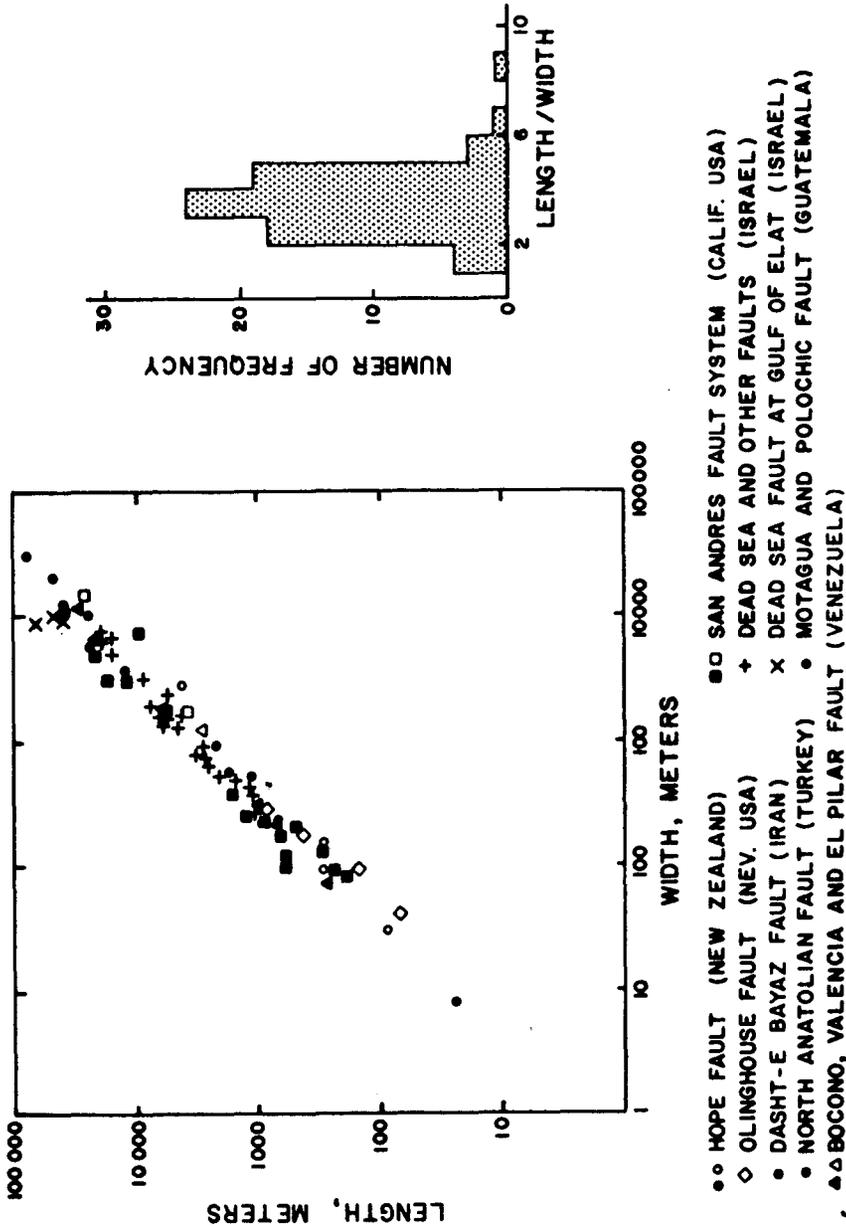


Fig. 5. Relación geométrica entre el ancho y el largo de 70 estructuras tensionales (tomado de Aydin and Nur, 1982). (a) Gráfica logarítmica de anchos y largos. (b) Histograma de frecuencias para los cocientes largo-ancho de las diferentes estructuras tensionales. Obsérvese que la relación logarítmica es: $\log(10) L = C1 \log(10) W + \log(10) C2$, donde $C1 = 1.0$ y $C2 = 3.2$, lo cual da una relación entre la mitad del largo (L) y el ancho (W) de $L = 1.6 W$. Los diferentes símbolos en la figura (a) corresponden a los nombres y localización de las fallas incluidas en el análisis (se incluyen detalles en Aydin and Nur, 1982).

MODELO PROPUESTO

El modelo propuesto para explicar el origen y la evolución de las cuencas tensionales y que incorpora como un aspecto fundamental la relación geométrica desde su inicio, presupone la rotación de bloques en la cuenca y el sistema de fallamiento lateral (Urrutia-Fucugauchi, 1987, 1988).

Las características geométricas del modelo se ilustran en la figura 6. En las fases iniciales, la región localizada entre los segmentos de falla o en la zona de curvatura por efecto del desplazamiento lateral (considerado en este ejemplo como lateral izquierdo) se tiene el efecto combinado de extensión y rotación (figura 6a). El polo de rotación se localiza en la región central y es aproximadamente simétrico, dependiendo de la orientación de los segmentos de falla (ilustrados por simplicidad como paralelos en la figura). Al aumentar el desplazamiento lateral, los parámetros de rotación se modifican, con la formación de dos polos de rotación que se localizan a lo largo de un eje orientado a 45 grados respecto de la línea de separación inicial (figura 6b). La rotación se divide en dos procesos simétricos en los que los polos de rotación (y el radio de rotación) cambian de posición (figura 6c) hasta que intersectan los segmentos de falla correspondientes a lo largo del eje de rotación relativa (figura 6d). El proceso combinado de rotación y de subsidencia forma dos cuencas simétricas, las cuales mantienen una sencilla relación geométrica que corresponde a dos rectángulos dorados (figura 6e). Estos rectángulos dorados, que se construyen geométricamente por medio de una rotación simple en una de sus diagonales, mantienen un cociente constante entre sus largos y anchos de 1:1.6, de tal manera que la formación de la cuenca por medio de la rotación de bloques en su interior, generada por los desplazamientos laterales, resulta invariablemente en una geometría constante, independientemente de las dimensiones iniciales. Este proceso de rotación es el que origina la cuenca, constituyendo el mecanismo fundamental, y permite que la región deformada y fallada se acomode en la zona de fracturamiento. El proceso de rotación puede observarse en las características morfológicas de los segmentos de falla y la forma de la cuenca; los segmentos se curvan en el sentido de la rotación y la forma resultante se asemeja a un rombo cuya orientación depende del sentido del desplazamiento lateral.

La rotación (geoméricamente idealizada) de un punto situado en el extremo del segmento de falla sigue una trayectoria espiral como resultado del cambio de posición del polo de rotación y el incremento del radio (figura 6f). Esta espiral de creci-

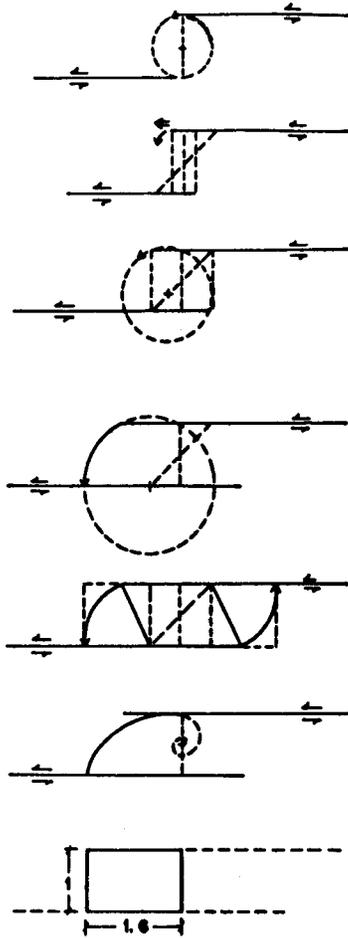


Fig. 6. Representación esquemática del modelo propuesto para la formación de cuencas tensionales por medio de rotaciones de bloques en el dominio de la cuenca (de Urrutia, 1987, 1988). La ilustración es para una falla de desplazamiento lateral izquierdo. En el modelo, el polo relativo de rotación es paulatinamente desplazado del centro (entre los segmentos de falla), hacia ambos segmentos, lo cual es el resultado de la tensión y de la rotación en el interior de la cuenca (a - d). El resultado es la formación de dos 'subcuencas' (e) con geometrías características correspondientes a dos rectángulos dorados (g), con las correspondientes relaciones de $L = 1.6 W$ (o para toda la cuenca de $1 = 3.2 W$; (Fig. 5). El movimiento de un punto hipotético situado en el extremo del segmento de falla (o discontinuidad) corresponde a una espiral (f), la cual es característica de otros sistemas de crecimiento en la naturaleza (Fig. 11).

miento constituye un mecanismo eficiente y estable que se presenta en otros fenómenos de la naturaleza (por ejemplo, en procesos de crecimiento de organismos, Bayer, 1984).

La cuenca tensional está simplemente constituída por dos rectángulos dorados (figura 6f), que guardarán en detalle una relación dependiente de la orientación inicial de los segmentos de falla, la dirección del vector de desplazamiento y las características reológicas de la zona de deformación (heterogeneidades, rasgos estructurales, etcétera, en el interior y alrededor de la cuenca). Ello puede dar como resultado la modificación de la forma de la cuenca (figura 3).

El desplazamiento lateral subsecuente en el sistema continúa el proceso de rotación, lo que controla efectivamente la relación geométrica característica de las cuencas tensionales (figura 7). Una vez formada la cuenca por rotación y subsidencia (figuras 7a y d) las rotaciones mayores de 90 grados producen una modificación en la zona activa de fracturamiento por la cual el ancho de la cuenca se incrementa, permitiendo acomodar desplazamientos laterales y el crecimiento de la estructura (figura 7e). En el proceso ocurre una modificación en la forma de la cuenca, en la que las fallas se curvan para acomodar la rotación, se presentan segmentos de falla inactivos y se producen sub-dominios de rotación y deformación dentro de la cuenca (incluyendo la posibilidad de sub-cuencas sujetas al proceso de rotación y subsidencia; figura 7f). Dependiendo de las características reológicas y las condiciones de frontera del proceso de rotación, habrá una mayor división interna, en la que las sub-cuencas proporcionarán un mecanismo energéticamente favorable para concertar los movimientos (figura 8).

RELACIONES DETERMINISTICAS Y CAOS

La relación entre el largo y el ancho de las estructuras tensionales (figura 5) de $L = 1.6 W$ corresponde al cociente entre dos términos consecutivos cualesquiera (a partir del tercer término) de la progresión geométrica de Fibonacci, la cual se expresa como

$$0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55 \quad (2)$$

Esta serie fue calculada por Leonardo da Pisa y dada a conocer en 1218. Los cocientes de términos mayores tienden al valor de la llamada relación dorada o sección áurea (figura 9), la cual se emplea en arte y arquitectura. La sección áurea, como se mencionó anteriormente, se obtiene por medio de una rotación sencilla a partir de

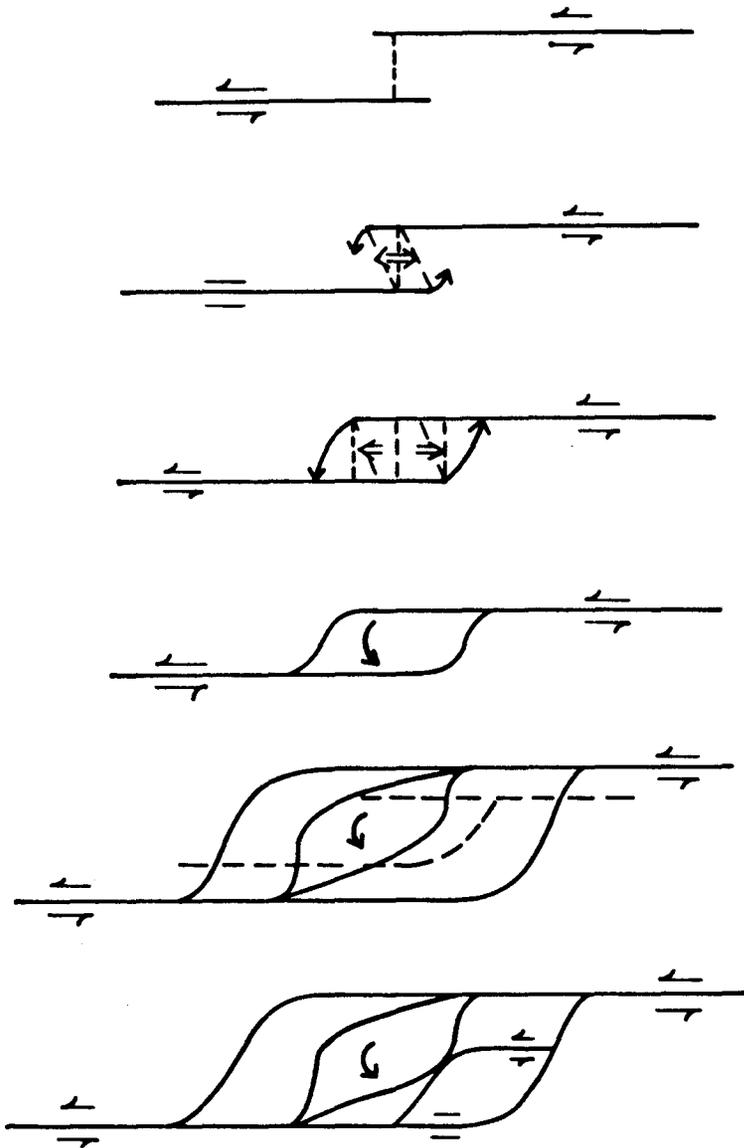


Fig. 7. Representación esquemática del modelo de evolución de las cuencas tensionales (ver Fig. 6). Una vez formada la cuenca con la geometría característica (a - d), el desplazamiento lateral resulta en la rotación continuada de la estructura y el 'desplazamiento' subsecuente y crecimiento (Figs. 16 y 17). El proceso de rotación puede ser más complejo que una simple rotación del dominio entero de la cuenca y generalmente resultará en la rotación de subcuencas (Fig. 8).

una figura cuadrática y se puede encontrar en pinturas tales como el 'San Jerónimo' de Leonardo da Vinci, 'La Parade' de Seurat y 'la Place de la Concorde' de P. Mondrian. Entre las construcciones arquitectónicas más conocidas se encuentran el Partenón de Atenas y las numerosas casas habitación realizadas en París por LeCorbusier (figura 10). La relación de 1:1.6 se encuentra también en los patrones de crecimiento de ciertas plantas y animales, tales como la relación entre las espirales que se observan en los girasoles y las cámaras del caracol *nautilus* (figura 11). La forma espiral de crecimiento (figura 11b) reproduce el patrón de rotación en las cuencas tensionales (figura 6f). Aún la dispersión en las relaciones geométricas de las estructuras (histograma, figura 5b) es similar a la encontrada en los cocientes de los términos consecutivos de la serie de Fibonacci (figura 9).

Recientemente, la teoría de números ha desarrollado aplicaciones muy diversas de esta serie, particularmente en una disciplina conocida como dinámica del caos (May, 1976; Schroeder, 1985; Devaney, 1986). La metodología se toma de la teoría de números algebraicos (más que de la teoría algebraica de números), en la cual un número complejo dado es algebraico si satisface una ecuación polinómica con coeficientes de números racionales y es un número real algebraico en el caso en que los coeficientes son enteros. La relación dorada $\delta = (1 + \sqrt{5})/2$, satisface la ecuación $\delta^2 - \delta - 1 = 0$. Asociado con el número de la relación dorada se encuentra un campo de números que consiste en todos los números $p + q\delta$ donde tanto p como q son racionales y el anillo de reales en donde p y q son enteros. La teoría de los números algebraicos estudia la aritmética de estos anillos de números. La dinámica del caos estudia sistemas determinísticos en los cuales se presentan comportamientos caóticos. En estos sistemas existen estados iniciales con periodicidades que, sin embargo, son inestables.

Los estudios de dinámica clásica, brillantemente desarrollados por Isaac Newton, permiten por otro lado determinar el comportamiento de sistemas sujetos a fuerzas. En los estudios de geología estructural y tectónica, uno de los objetivos es el determinar la evolución cinemática de partículas y determinar el estado de esfuerzos. La ocurrencia de deformación interna, la presencia de sistemas de fuerzas complejos o de comportamiento no lineal, no obstante, puede complicar los procesos evolutivos y resultar en sistemas que eludan su reconstitución.

La ocurrencia de la sección áurea y de la serie de Fibonacci en una gran variedad de situaciones, incluyendo los patrones de crecimiento, relaciones estructurales en

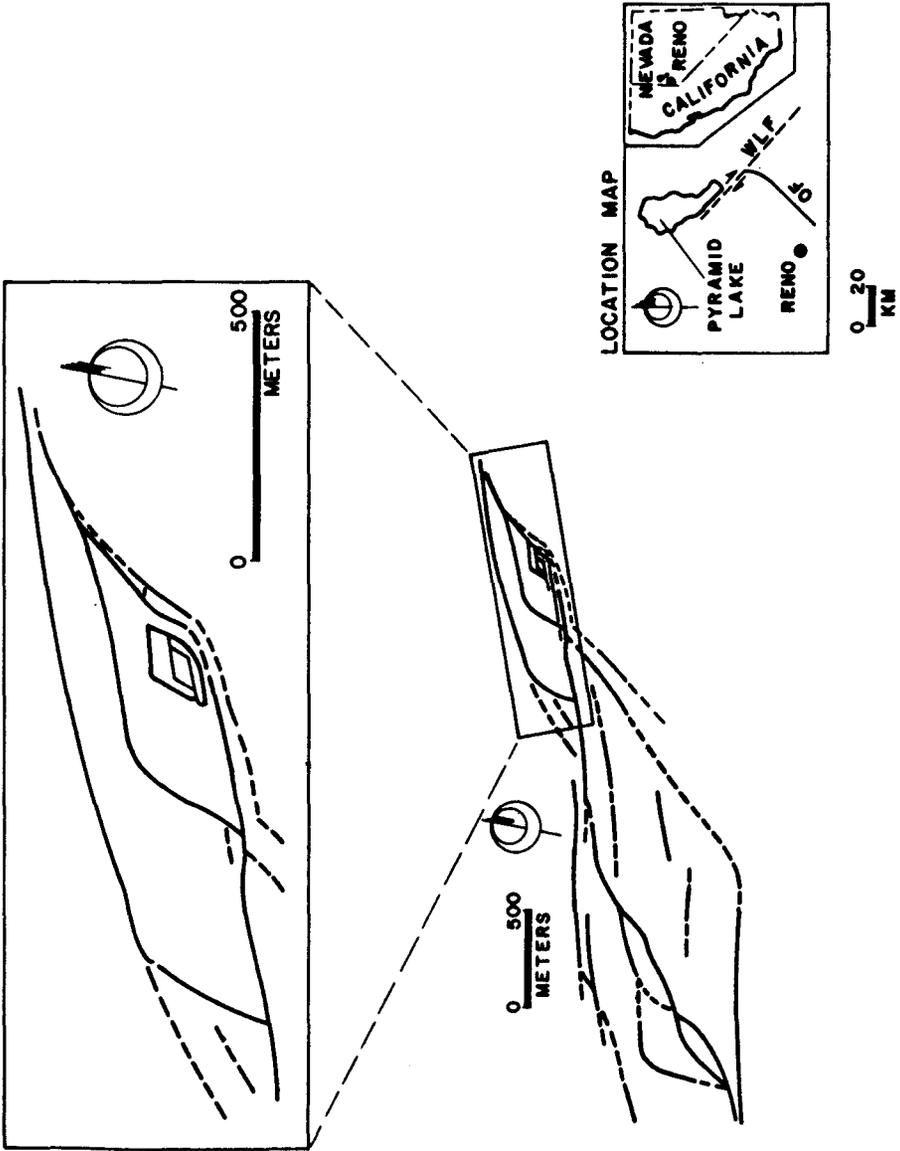


Fig. 8. Representación esquemática para el sistema de falla lateral izquierda Olinghouse, oeste de Nevada, USA. Obsérvese la cuenca principal y la formación de subcuencas, con sus relaciones geométricas particulares (tomado de Sanders and Slemmons, 1979).

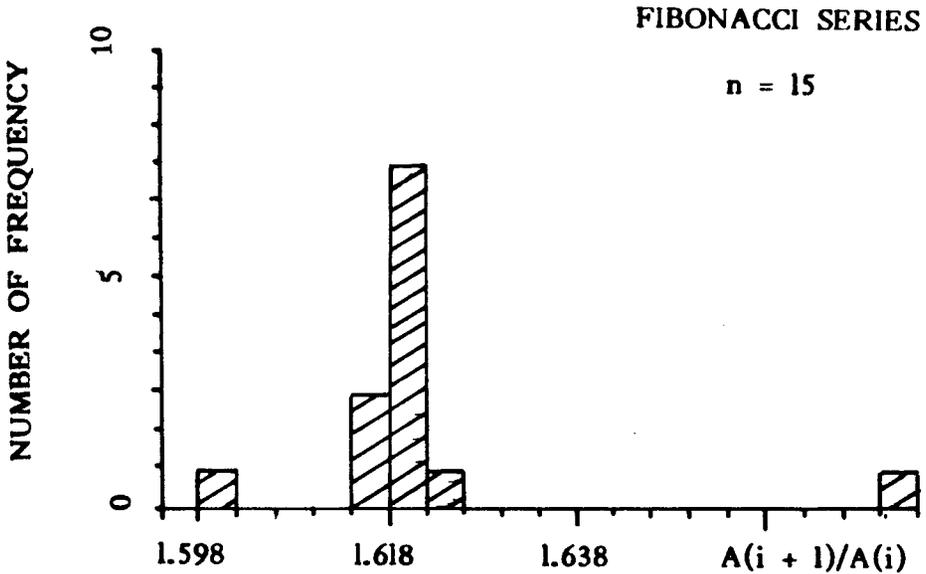


Fig. 9. Histograma de frecuencias para los cocientes de términos adyacentes en la progresión geométrica de Fibonacci (mayores que el tercer término). Compárese con la Fig. 5 b. Los cocientes de términos en la progresión tienden al valor de la relación dorada de 1:1.6.

construcciones y en los parámetros geométricos de las estructuras tensionales, sugiere que la relación es dinámica y estructuralmente eficiente y estable y que no sólo constituye un factor fortuito. Las relaciones geométricas en las cuencas tensionales se conservan en escalas desde unos metros hasta decenas de kilómetros, en diferentes ambientes tectónicos, tanto en fronteras de placas como en regímenes intraplaca, por lo que los procesos que intervienen son estables en períodos largos de millones o decenas de millones de años. El proceso de rotación aquí propuesto constituye un factor fundamental y las relaciones asociadas contienen información dinámica y cinemática de la evolución de estos sistemas.

DISCUSION Y PREDICCIONES

El estudio de las cuencas tensionales se ha ampliado en los últimos años con el reconocimiento de diversos aspectos relacionados con su potencial económico (recursos minerales, hidrocarburos y geotérmicos), intensa actividad sísmica y sus peculiares características estructurales y tectónicas (Reading, 1980). Los recursos minerales y



Fig. 10. Representación esquemática de ejemplos en arquitectura de la proporción dorada o sección áurea. (a) Partenón, Atenas, Grecia. (b) Casa de los suburbios de París, por el arquitecto LeCorbusier.

energéticos se asocian a la actividad volcánica, alto flujo térmico, grandes espesores de sedimentos clásticos, etcétera. El temblor de Tangshan, China, en julio de 1976, que causó graves pérdidas de vidas humanas y de recursos materiales, se produjo en una cuenca tensional. Las cuencas tensionales se han reconocido en una gran diversidad de ambientes tectónicos; sin embargo, presentan varias características comunes, entre ellas sus parámetros geométricos.

El modelo esquematizado en las figuras 6 y 7 para el origen y evolución de las cuencas tensionales por medio de un proceso de rotación es simple y permite explicar las características principales de estas estructuras. En detalle, en cuencas y ambientes particulares se presentan varios factores adicionales capaces de modificar los patrones de evolución y ciertas características. Entre ellos se encuentran algunos de los ya mencionados, tales como los ilustrados en la figura 4, en relación con la interacción y acreción de las cuencas en sistemas de fallamiento lateral y la posibilidad de creación de nuevas zonas de falla y de cuencas tensionales. Esta situación se presenta en las zonas de fallamiento regional, tales como el suroeste de los Estados Unidos de Norteamérica, en la falla de San Andrés (figura 12) y en Guatemala-México, en la falla de Polochic-Motagua (figura 13).

Por otro lado, el modelo contiene varias predicciones específicas, las cuales pueden ser comprobadas por estudios estructurales, paleomagnéticos, etcétera. Al considerar la rotación del dominio de la cuenca como factor de formación y asociado al

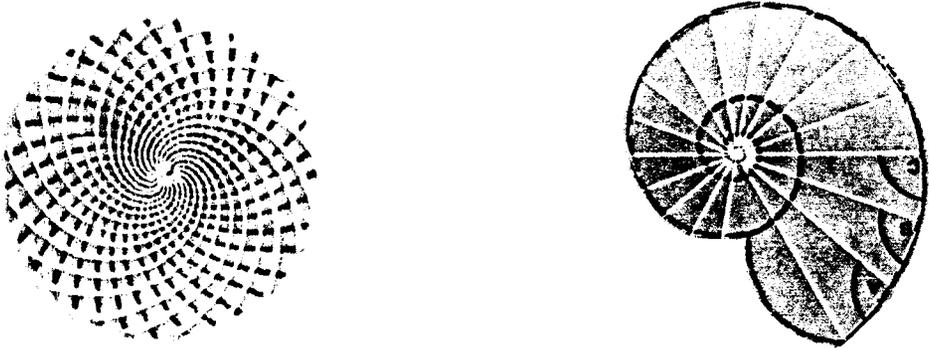


Fig. 11. Representación esquemática de ejemplos de crecimiento en la naturaleza. (a) girasol (obsérvese que el número de espirales en uno y otro sentido presenta una relación de 1:1.6). (b) Caracol de *nautilus* y crecimiento espiral logarítmico. Compárese con la Fig. 6 f.

desplazamiento lateral, el modelo requiere que la rotación sea una función de la edad y del desplazamiento total. Desafortunadamente, no se dispone aún de datos paleomagnéticos detallados sobre cuencas tensionales, que podrían proporcionar información sobre la magnitud de las rotaciones y su dependencia temporal. Sin embargo, existen datos paleomagnéticos y estructurales sobre ambientes regionales de fallamiento lateral en diversos regímenes tectónicos (Freund, 1970, 1974; MacDonald y Opdyke, 1972; Garfunkel, 1974; Freund y Tarling, 1979; Urrutia, 1981, 1983; Ron *et al.*, 1984; Urrutia y Böhnell, 1988). En particular, en la zona sur de California, dentro del sistema lateral derecho de San Andrés, se dispone de datos paleomagnéticos en detalle sobre las rotaciones asociadas al desplazamiento lateral (Luyendyk *et al.*, 1980; Hornafius *et al.*, 1986). En este sistema se observan varias estructuras tensionales del tipo analizado aquí y para las regiones analizadas se ha documentado una clara dependencia de la magnitud de la rotación con la edad (figura 14). En las cuatro regiones la rotación es mayor con el tiempo, en los últimos 25 millones de años, con magnitudes hasta de más de 90 grados (Hornafius *et al.*, 1986).

En México, los sistemas de fallamiento lateral y de cuencas tensionales se presentan asociados a los límites de la placa Norteamérica - Pacífico (figura 12) y Norteamérica - Caribe (figura 13), en los cuales se observan desplazamientos laterales dere-

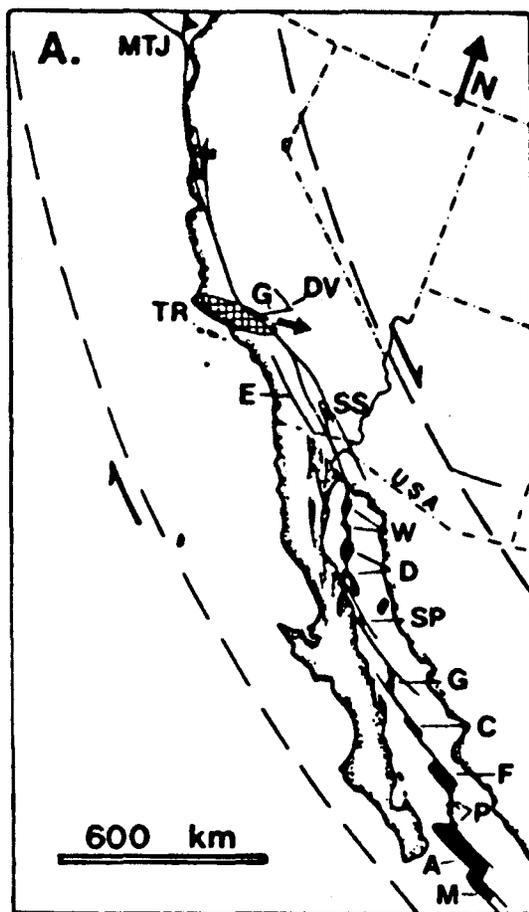


Fig. 12. Representación esquemática del sistema lateral derecho de San Andrés - Golfo de California y sus sistemas de cuencas tensionales asociados. Frontera de placas Norteamérica - Pacífico. Las letras identifican las diferentes cuencas tensionales y rasgos tectónicos mayores: M, cuenca Mazatlán; A, cuenca Alarcón; P, cuenca compleja Pescadero; F, cuenca Farallón; C, cuenca Carmen; G, cuenca Guaymas; SP, cuenca San Pedro Mártir; D, cuenca Delfín; W, cuenca Wagner; SS, cuenca del mar Salton; E, cuenca del lago Elsinore; G, zona de fallamiento izquiendo Garlock; DV, cuenca del Valle de la Muerte; TR, Transverse Ranges (bloque de presión en la zona de San Andrés) y MTJ, Junta Triple de Mendocino.

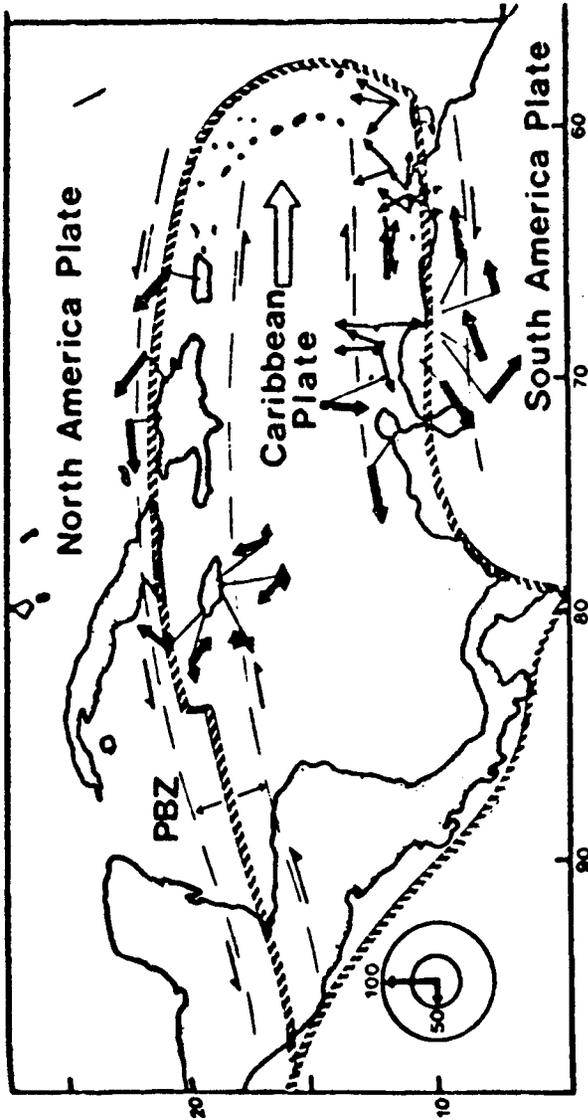


Fig. 13. Representación esquemática del sistema lateral izquierdo de Pólochic - Motagua y sus sistemas de cuencas tensionales asociados. Fronteras de placas Norteamérica - Caribe, Cocos - Caribe y América del Sur - Caribe indicadas en forma esquemática por la curva achurada. El movimiento relativo de la placa Caribe es hacia el este (flecha mayor en blanco). Las flechas oscuras indican los movimientos determinados por estudios paleomagnéticos en la región.

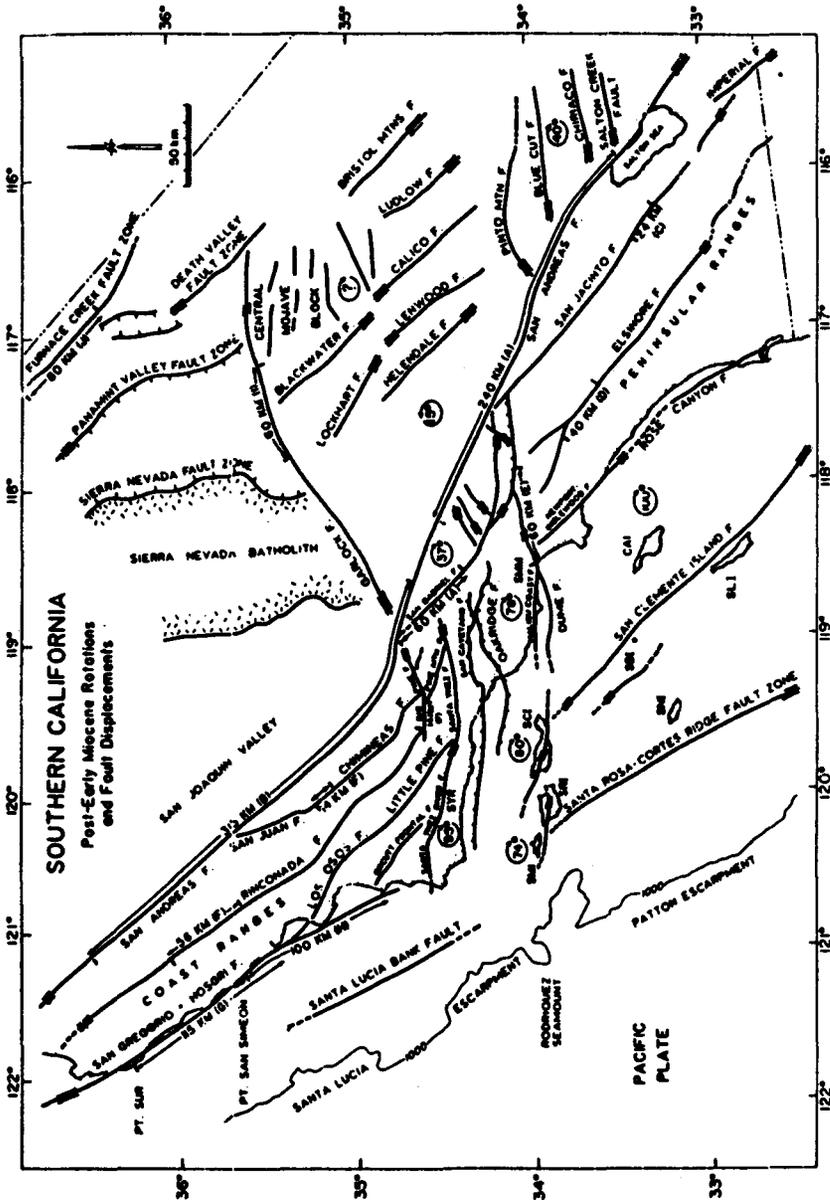


Fig. 14. Datos paleomagnéticos del sur de California, USA (tomado de Hornafius *et al.*, 1986). (a) Mapa tectónico simplificado de la región, con las fallas laterales principales. Las flechas circulares y el número en el centro indican la magnitud y sentido de las rotaciones detectadas por paleomagnetismo. El sistema de falla es lateral derecho y las rotaciones siguen el giro de las manecillas del reloj. (b - e) Diagramas de rotación relativa en función de la edad (y de los desplazamientos laterales) para las diferentes regiones estudiadas. La edad es en Ma antes del presente y la rotación está dada en términos de las declinaciones paleomagnéticas. Obsérvese que la magnitud de las rotaciones se incrementa con la edad, con magnitudes de rotación de hasta 90 grados.

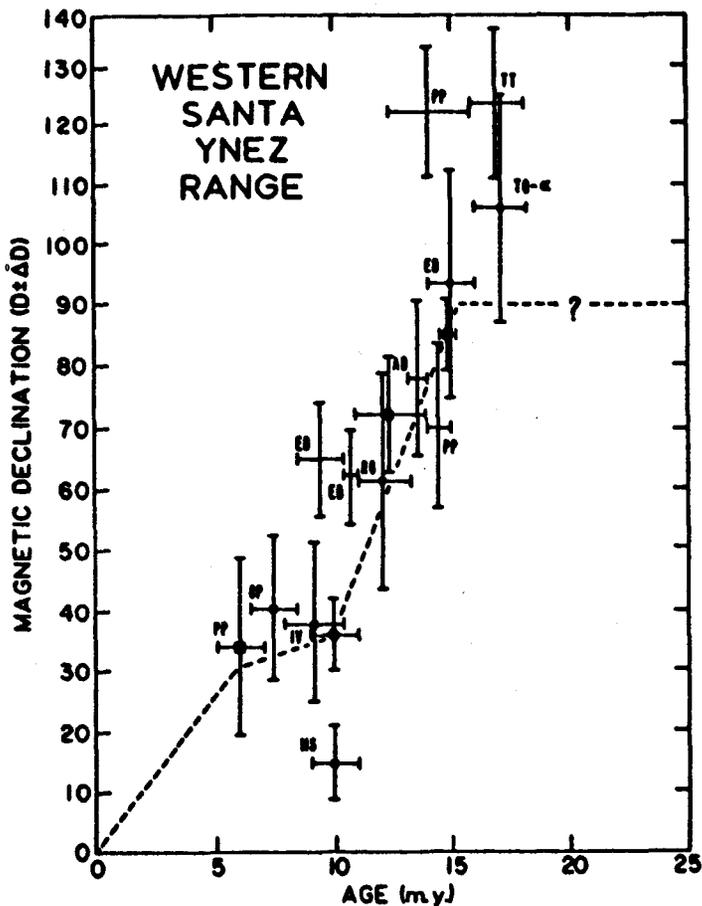


Fig. 14 (b). Porción oeste de Santa Inés.

cho e izquierdo, respectivamente. En la porción central de México, caracterizada por la actividad volcánica reciente (e histórica) se ha documentado la posible ocurrencia de rotaciones (en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj), particularmente en el centro (Urrutia, 1981, 1983) y en el este (Böhnel, 1985). Estas rotaciones podrían estar asociadas a fallamiento lateral (predominantemente izquierdo). Los sistemas de fallas en la provincia volcánica han sido estudiados en varios trabajos (Mooser, 1968, 1972; Gastil y Jensky, 1973; Pasquaré *et al.*, 1986, 1987; Johnson,

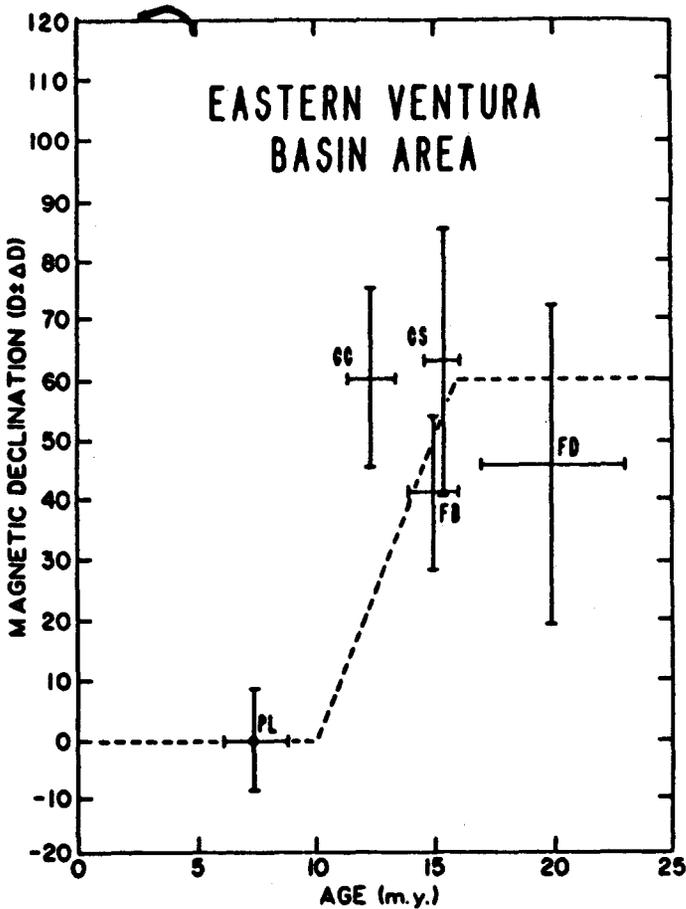


Fig. 14 (c). Porción este de la cuenca Ventura.

1987); sin embargo, aún se requiere de más estudios en detalle para documentar la posible ocurrencia de largos desplazamientos laterales. Este régimen tectónico estaría relacionado con la convergencia de placas Cocos - Norteamérica (Urrutia, 1981; Johnson, 1987; Urrutia y Böhnell, 1988). Los sistemas de cuencas tensionales han sido aún menos estudiados, aunque por las características geométricas (formas alargadas con orientaciones aproximadas este-oeste, en la dirección principal del posible

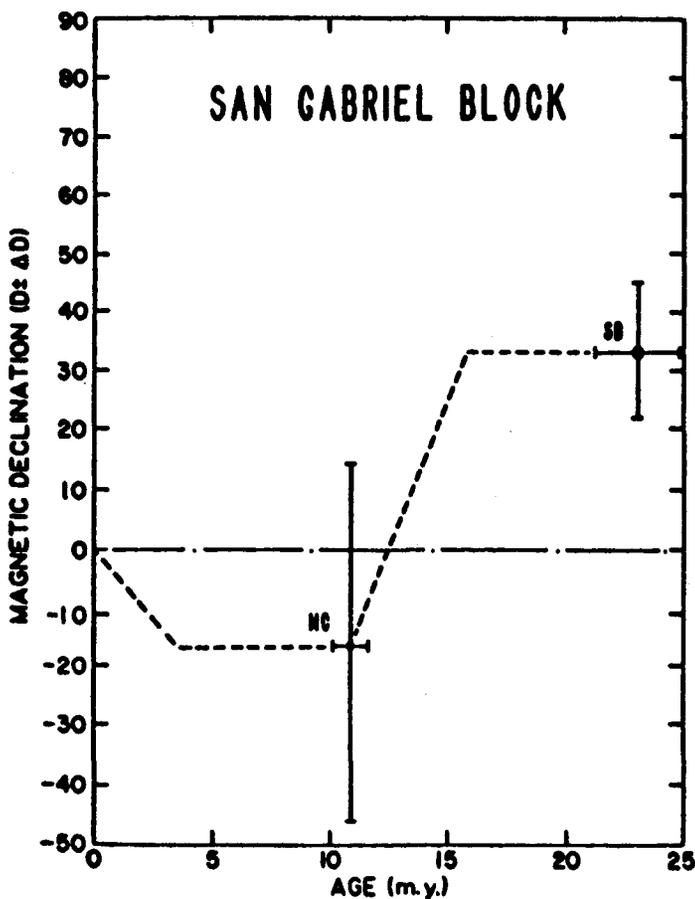


Fig. 14 (d). Bloque San Gabriel.

desplazamiento lateral, ocurrencia de grabens y horsts, etcétera) varias de las estructuras, como el graben de Chapala, la región de Acambay - El Oro, etcétera, podrían corresponder a este tipo de cuencas. Estas regiones, como la de Acambay, presentan sismicidad (Astiz, 1986) y los datos paleomagnéticos preliminares indican la posible ocurrencia de rotaciones (Urrutia y Böhnell, 1988). No obstante, existen interpretaciones alternativas para los datos (Suárez y Singh, 1986) y se requiere de más estudios tectónicos, estructurales, geomorfológicos, sismológicos y paleomagnéticos de la región.

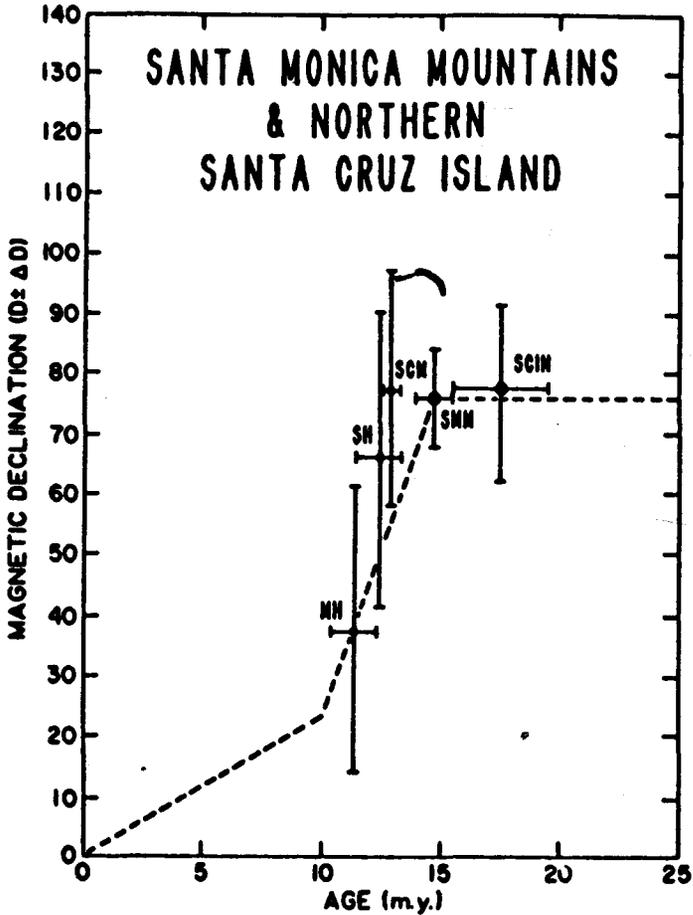


Fig. 14 (e). Montañas Santa Mónica y norte de la isla de Santa Cruz.

En términos generales, el modelo permite hacer inferencias sobre varias características de las cuencas en relación con los rasgos de compresión y tensión, la ocurrencia de volcanismo, fenómenos hidrotermales, etcétera. Con el proceso de rotación se esperan rasgos compresionales como pliegues, etcétera, en las porciones hacia las cuales se dirige el sentido de rotación y tensión en la porción central sujeta a extensión y hacia el extremo opuesto de las porciones rotadas. Además, es probable que el proceso de rotación pueda ser más complicado, ya que no se requiere que el dominio completo de la cuenca rote como un cuerpo rígido. Es posible, dadas las caracterís-

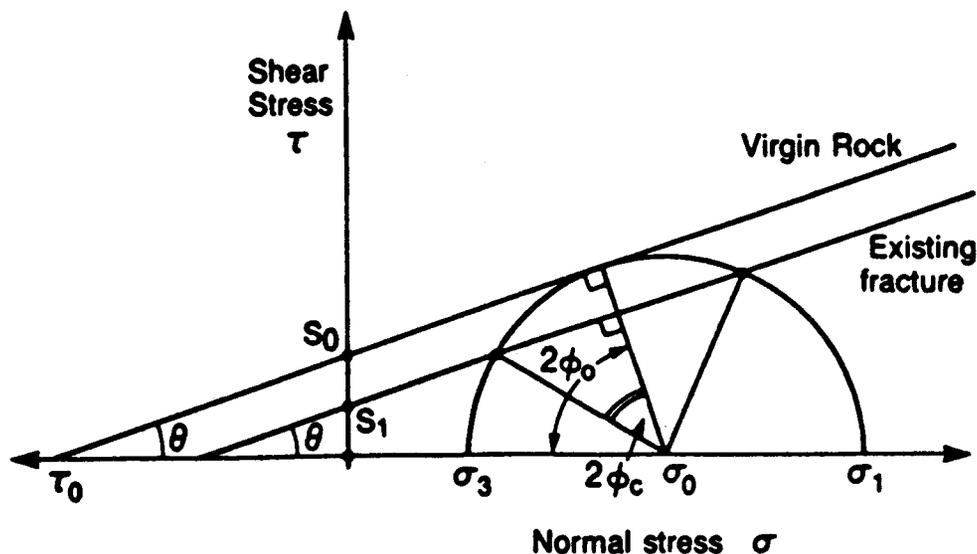


Fig. 15. Representación en diagrama de Mohr para el estado de esfuerzos asociado con fallamiento lateral (adoptado de Nur *et al.* (1986)). El ángulo de fricción es $\theta = \tan^{-1} \mu$, resistencia cohesiva en roca fracturada y sin fracturar son S_0 y S_1 y ángulo máximo permisible entre una fractura dada y otra potencial a desarrollar en caso de continuar el proceso de rotación. El esfuerzo transversal (τ) requerido para el desplazamiento lateral en una fractura está dado por

$$\tau = S_0 + \mu \sigma_0 = S_0 + \mu (\sigma - \rho)$$

donde μ es el coeficiente de fricción, σ es el esfuerzo normal y ρ es la presión de poro (Fig. 16). Para generar una nueva fractura se requiere que la resistencia en la falla anterior sea mayor que el esfuerzo cortante, el cual disminuye debido al cambio de orientación de los segmentos de falla y la dirección de esfuerzos laterales.

ticas de la zona, que el dominio de la cuenca esté constituido por varias regiones rotadas. Ello proporcionaría un patrón más complejo de rotaciones y por otro lado, quizá resulte en un proceso de acomodo y de deformación dentro de la zona interior (Ron *et al.*, 1984). Las rotaciones también pueden presentarse (y probablemente sea un caso general) en las porciones adyacentes del exterior del dominio de la cuenca. Estas rotaciones estarían asociadas al desplazamiento lateral; sin embargo, las relaciones angulares serían diferentes de las existentes en el interior de las cuencas tensionales.

El proceso de rotación en las cuencas tensionales implica una continua modificación de las relaciones angulares entre los segmentos de falla, la dirección de despla-

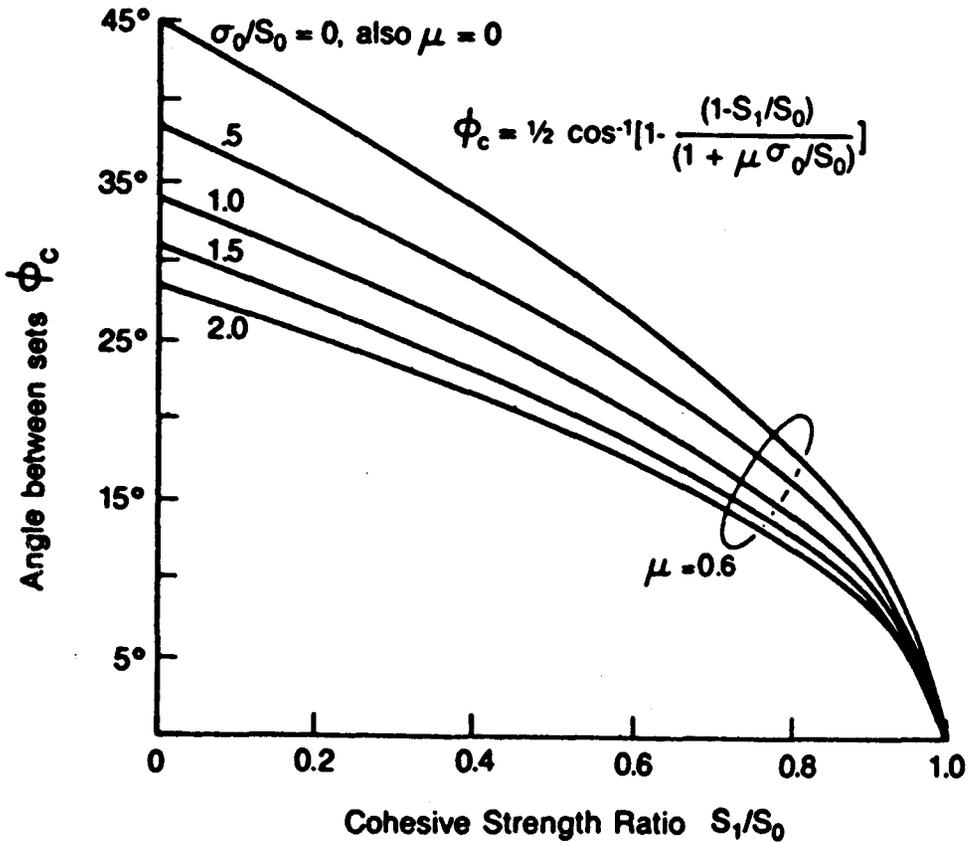


Fig. 16. Máximo ángulo permisible entre segmentos de falla sujetos a rotación, en función de la resistencia cohesiva y la presión efectiva (tomada de Nur *et al.* (1986). Ver texto y Figura 15. So representa el esfuerzo cohesivo de la zona hacia donde se desplazó la fractura. Los valores varían con el tipo de roca y las condiciones mecánicas.

miento lateral y los desplazamientos angulares. Dado que la cuenca no presenta una geometría equidimensional por el proceso de extensión que la origina, en cierto momento la rotación resulta en un proceso de deformación en las fronteras, con la consecuente rotación de los segmentos de falla, los cuales son desviados de la dirección “óptima” de desplazamiento lateral. El proceso resulta eventualmente en un obstá-

culo para el desplazamiento, el cual es inhibido a un cierto valor crítico de las relaciones angulares. Este conjunto de valores críticos depende además de las propiedades (o comportamiento) de los diversos materiales que componen la región de la cuenca y sus alrededores, donde comportamientos elásticos, elasto-plásticos, etcétera, derivarán en muy diversos resultados en cuanto al desplazamiento - deformación - rotación. Un cálculo preliminar puede obtenerse a partir de consideraciones sencillas sobre el estado de esfuerzos - deformación en función de los esfuerzos cortantes (τ), coeficientes de cohesión (S), esfuerzo efectivo (σ_o), coeficiente de fricción (μ), esfuerzo normal (σ_n) y presión de poro (P_p). Dichos parámetros pueden ser representados gráficamente en el círculo de Mohr (figura 15). Con ello es posible estimar los parámetros que definen los valores críticos en los cuales se impide el movimiento lateral en los segmentos de falla y la posición de la "nueva" fractura. En general, para la rotación de la falla se requiere que el esfuerzo cortante exceda la resistencia para deslizar a lo largo de la falla. Para generar una nueva fractura se requiere que la resistencia en la falla anterior sea mayor que el esfuerzo cortante, el cual disminuye debido al cambio de orientación de los segmentos de falla y la dirección de esfuerzos laterales (figura 15).

En la figura 16 se muestran las relaciones del máximo ángulo permisible entre conjuntos de fallas en función del cociente de esfuerzos cohesivos y de la presión litostática efectiva y el esfuerzo cohesivo S_o (Nur *et al.*, 1986). En este cociente, S_o representa el esfuerzo cohesivo de la zona hacia donde se desplaza el fracturamiento. Estos valores varían con el tipo de roca y sus condiciones mecánicas (Jaeger y Cook, 1976).

Un mecanismo posible para el crecimiento de la cuenca debido al proceso de rotación y al desplazamiento de la zona de fracturamiento se ilustra en la figura 8. Los valores críticos para el proceso se incluyen en las figuras 15 y 16. Como resultado de este proceso existe una zona de deformación y de fracturamiento previo (generalmente inactivo, aunque puede aún mostrar rotaciones en forma de subcuencas; figura 9).

El comportamiento a profundidad de las fallas que limitan las cuencas es difícil de estimar con la información disponible. Intuitivamente, las fallas deben mostrar una curvatura a profundidad y generalmente alcanzar profundidades mayores para el caso de cuencas en sistemas de fallas transformantes en límites de placa. La facilidad (o dificultad) de rotar los dominios interiores de la cuenca dependerá en cierta forma

de la profundidad y el grado de acoplamiento con el terreno circundante. La sismicidad asociada (magnitud, número, período de recurrencia, localización, etcétera) depende también en gran medida del grado de acoplamiento. La magnitud de los temblores asociados puede por otro lado ser grande, como lo muestra el temblor de Tangshan, China, de 1976. Datos en detalle de la sismicidad en cuencas tensionales permitirían obtener información sobre el comportamiento a profundidad de las fallas relacionadas.

Las características y patrones de sedimentación en las cuencas tensionales también muestran relaciones generales. Las cuencas tensionales se caracterizan por (a) espesores considerables de sedimentos en relación con los tamaños de las cuencas, (b) altos cocientes de sedimentación, (c) asimetría en el espesor de la sedimentación y del patrón de facies, (d) distribución de facies en fanglomerados marginales acotados por fallamiento y depósitos centrales de cuenca y lacustres y (e) ciclos texturales relacionados con la actividad tectónica (Ballance y Reading, 1980; Hempton *et al.*, 1983). El estudio de los sedimentos (frecuentemente deformados) de las cuencas es de interés, además de sus relaciones e implicaciones con el origen y evolución de las estructuras, en diversos estudios (incluyendo la exploración de hidrocarburos y gas).

CONCLUSIONES

Las cuencas tensionales desarrolladas en sistemas de fallas laterales presentan un patrón característico en sus relaciones geométricas. Estas cuencas presentan formas geométricas romboidales, en las cuales la mitad de su largo (L) mantiene una relación con el ancho (W) de tal forma que $L = 1.6 W$. Esta relación se conserva para cuencas de diferente tamaño y situadas en muy diversos ambientes tectónicos. Esta relación geométrica puede explicarse como resultado de rotación tectónica asociada al origen y evolución de la cuenca. De hecho, la cuenca se forma debido al proceso de rotación. Las cuencas en diversas zonas del país, tales como las asociadas al límite de placas Pacífico - Norteamérica (en el Golfo de California y en la región de la falla de San Andrés) y en el límite Norteamérica y Centroamérica (en el sistema de fallas Polochic-Motagua) podrían haber sido originadas por este mecanismo.

BIBLIOGRAFIA

- ASTIZ, L., 1986. The 1912 Acambay, Mexico ($M_s = 7.0$) earthquake: A reexamination. *Bol. Geos.*, 6, 17 (resumen).

- AYDIN, A. and A. NUR, 1982. Evolution of pull-apart basins and their scale of independence. *Tectonics*, 1, 91-105.
- BALLANCE, P. F., and H. G. READING (Eds.), 1980. Sedimentation in Oblique-Slip Zones. Spec. Publ. Intern. Assoc. Sediment., Blackwell Sci. Publ., 4, 265 pp.
- BAYER, U., 1984. Pattern Recognition Problems in Geology and Paleontology. Springer-Verlag, Berlin. Lecture Notes in Earth Sciences, 2, 229 pp.
- BÖHNEL, H., 1985. Paleomagnetische Untersuchungen an Jurassischen bis Quartären Gesteinen aus Zentral- und Südmexiko. Doktor Dissertation, Münster-Universität, 235 pp.
- CROWELL, J. C., 1974. Origin of Late Cenozoic basins in southern California. Spec. Publ. Soc. Econ. Paleontol. Miner., 22, 190-204.
- DEVANEY, R. L., 1986. Introduction to chaotical dynamical systems. Cambridge University Press, Cambridge.
- FREUND, R., 1970. Rotation of strike slip faults in Sistan, Southeast Iran. *J. Geol.*, 78, 188-200.
- FREUND, R., 1974. Kinematics of transform and transcurrent faults. *Tectonophysics*, 21, 93-134.
- FREUND, R. and D. H. TARLING, 1979. Preliminary Mesozoic palaeomagnetic results from Israel and inferences for microplate structure in the Lebanon. *Tectonophysics*, 60, 189-205.
- GARFUNKEL, Z., 1974. Model for the Late Cenozoic tectonic history of the Mojave Desert, California and for its relation to adjacent region. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 85, 1931-1944.
- GASTIL, R. G. and J. JENSKY, 1973. Evidence for strike slip displacement beneath the Trans-Mexican volcanic belt. Stanford Univ. Press. Earth Sci. Publ., 13, 171-180.
- HEMPTON, M., L. A. DUNNE and J. F. DEWEY, 1983. Sedimentation in an active strike-slip basin, Southeastern Turkey. *J. Geol.*, 91, 401-412.
- HORNAFIUS, J. S., B. P. LUYENDYK, R. R. TERRES and M. J. KAMERLING, 1986. Timing and extent of Neogene tectonic rotation in the western Transverse Ranges, California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 97, 1476-1487.
- JAEGER, J. C. and N. G. W. COOK, 1976. Fundamentals of Rock Mechanics. John Wiley and Sons, Inc., New York, 585 pp.
- JOHNSON, C., 1987. A study of neotectonics in central Mexico from Landsat thematic mapper imagery. M. Sc. Thesis, Univ. Miami, USA, 112 pp.
- LUYENDYK, B. P., M. J. KAMERLING and R. R. TERRES, 1980. Geometric model for Neogene crustal relations in southern California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 91, 211-217.

- MACDONALD, W. D. and N. D. OPDYKE, 1972. Tectonic rotations suggested by paleomagnetic results from northern Colombia, South America. *J. Geophys. Res.*, 77, 5720-5730.
- MAY, R. M., 1976. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 261, 459-467.
- MOOSER, F., 1968. The Mexican volcanic belt - Structure and development. Formation of fractures by differential crustal heating. Pan-Am. Symp. Upper Mantle, Mexico, 15-22.
- MOOSER, F., 1972. The Mexican volcanic belt: structure and tectonics. *Geofis. Int.*, 12, 2, 55-70.
- NUR, A., H. RON and O. SCOTTI, 1986. Fault mechanics and the kinematics of block rotations. *Geology*, 14, 746-749.
- PASQUARE, G., F. FORCELLA, A. TIBALDI, L. VEZZOLI and A. ZANCHI, 1986. Structural behaviour of a continental volcanic arc: The Mexican volcanic belt. In: F.-C. Wezel (Ed.), *The Origin of Arcs*, Elsevier Sci. Publ., 509-527.
- PASQUARE, G., L. FERRARI, V. PERAZZOLI, M. TIBERI and F. TURCHETTI, 1987. Morphological and structural analysis of the central sector of the Trans-Mexican volcanic belt. *Geofis. Int.*, 26, 2, 177-193.
- READING, H. G., 1980. Characteristics and recognition of strike-slip fault systems. In: P. F. Ballance and H. G. Reading (Eds.), *Sedimentation in Oblique-Slip Mobile Zones*, Spec. Publ. Intern. Assoc. Sedim., 4, 7-26.
- RON, H., R. FREUND, Z. GARFUNKEL and A. NUR, 1984. Block rotation by strike slip faulting: Structural and paleomagnetic evidence. *J. Geophys. Res.*, 89, 6256-6270.
- SANDERS, C. O. and D. B. SLEMMONS, 1979. Recent crustal movements in the central Sierra Nevada-Walker Lane region of California-Nevada, 3. The Oligocene Fault Zone. *Tectonophysics*, 52, 585-597.
- SCHROEDER, M., 1985. *Number Theory in Science and Technology*, Springer-Verlag, Heidelberg.
- SUAREZ, G. and S. K. SINGH, 1986. Tectonic interpretation of the Trans-Mexican volcanic belt - Discussion of a paper by D. H. Shurbet and S. E. Cebull. *Tectonophysics*, 127, 155-160.
- URRUTIA J., 1981. Palaeomagnetism of the Miocene Jantetelco granodiorite and Tepexco volcanic group and inferences for crustal block rotations in central Mexico. *Tectonophysics*, 76, 149-168.
- URRUTIA, J., 1983. Preliminary palaeomagnetic study of Lower Tertiary volcanic rocks from Morelos and Guerrero States. *Geofis. Int.*, 22, 1, 87-112.

- URRUTIA, J., 1987. La serie de Fibonacci, la relación dorada y el origen y evolución de cuencas tensionales en sistemas de fallas laterales. *Conmemoración L Aniversario Ingeniero Geólogo, Palacio Minería, México*, p. 97 (resumen).
- URRUTIA, J., 1988. Origin and evolution of pull-apart basins by block rotation. *Com. Tec., Instituto de Geofísica*, 77, 12 pp.
- URRUTIA, J. and H. BÖHNEL, 1988. Tectonics along the Trans-Mexican volcanic belt according to paleomagnetic data. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 52, 320-329.
- WILSON, J. T., 1965. A new class of faults and their bearing on continental drift. *Nature*, 207, 343-347.