

FBF, UN PAQUETE DE CÓMPUTO PARA CONSTRUIR SECCIONES ESTRUCTURALES BALANCEADAS

Juan Contreras-Pérez
Depto. de Geología, CICESE
Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada, Ensenada, B.C., México
E-mail: juanc@cicese.mx

RESUMEN

El paquete de cómputo FBF permite simular, en dos dimensiones, deformaciones geológicas producto de fallamiento tanto normal como inverso. El algoritmo usado por FBF conserva masa y por lo tanto puede ser utilizado para construir secciones estructurales balanceadas. El paquete consiste en una serie de programas modulares que corren en modo texto cuyo código fuente es independiente de la plataforma de cómputo. Contiene un pre-procesador (fbfmesh), un procesador (fbfault), y un post-procesador (fbfplot). El pre-procesador genera mallas de puntos materiales que representan el estado inicial, sin deformar, de formaciones geológicas. El procesador realiza una simulación directa para calcular el estado deformado dislocado de los puntos materiales inducido por fallamiento. Finalmente, el post-procesador toma la salida de procesador fbffault y los pone en un formato conveniente para ser graficados.

INTRODUCCIÓN

En este artículo se describe una serie de programas de cómputo, de diseño modular e independientes de la plataforma de cómputo, denominados FBF (fault-bend fold) que utilizan la metodología desarrollada por Contreras y Suter (1990) para modelar secuencias de deformación por fallamiento en dos dimensiones. Estos autores desarrollaron un autómata celular para obtener la deformación originada por el transporte de un medio sobre una falla de geometría conocida. De esta manera, con este autómata se pueden efectuar simulaciones de deformación de régimen frágil y es especialmente aplicable para aquellas áreas donde la carpeta sedimentaria se ha desacoplado del basamento tectónico a lo largo de una superficie de cizallamiento. Aún más, con este modelo es posible generar secciones estructurales balanceadas, ya que las reglas de deformación empleadas por el autómata conserva el área.

La descripción algorítmica, así como la implementación computacional del autómata celular se encuentran descritas en Contreras (1991), donde se utilizó el lenguaje de programación Pascal que fué uno de los primeros lenguajes de computación estructurados. En éste, el código fuente sufre de varias limitaciones; la principal de ellas es el hecho de que no es transportable, ya que contiene llamadas a subrutinas comerciales de graficado que sólo fueron desarrolladas para el sistema operativo MS-DOS. También hay que considerar que la codificación en Pascal ha caído en desuso y ha sido sustituida por lenguajes más compactos con compiladores más eficientes tal como C++. Por lo tanto, la actualización del código fuente era necesaria.

Los nuevos programas, descritos en este artículo, no tienen esos problemas, ya que se han eliminado las subrutinas de graficado y la codificación se ha hecho con apego al estándar ANSI del lenguaje de programación C++. Esto los hace efectivamente transportables e independientes del sistema operativo y equipo de cómputo.

En la primera parte de este trabajo se presenta una descripción de las metodologías geométricas empleadas en el balanceo de secciones, así como una descripción del algoritmo utilizado por FBF. Después se da una descripción detallada del uso de los programas, y finalmente se presentan y discuten una serie de secciones sintéticas generadas con FBF.

METODOLOGÍAS DE BALANCEO DE SECCIONES Y EL ALGORITMO UTILIZADO POR FBF

Las técnicas de balanceo de secciones estructurales fueron desarrolladas para constreñir y minimizar la incertidumbre durante la reconstrucción de la geometría del subsuelo o partes erosionadas. Esto es de gran importancia en la geología económica, como en el caso de la exploración por hidrocarburos, donde es necesario tener un buen control de la estructura de las rocas almacenadoras. El balanceo de secciones está basado en el principio de conservación de masa. Es decir, durante la deformación, la masa de las rocas debe permanecer constante. De manera equivalente, una sección estructural debe cumplir con las siguientes condiciones para que esté balanceada: (i) que la reconstrucción propuesta del subsuelo sea retrodeformable y (ii) que la orientación de la sección sea paralela al transporte tectónico (de otra manera habría un flujo de masa a través del plano de la sección). Las técnicas de balanceo de secciones son especialmente útiles cuando la deformación es somera y de régimen frágil, ya que es común que bajo este régimen las rocas

sedimentarias se desacoplen del basamento y se deformen a lo largo de una superficie de despegue (o corrimiento basal) formando una falla de bajo ángulo. Esto hace que la deformación esté concentrada por arriba del despegue basal, facilitando la interpretación estructural como se verá mas adelante.

Ya que la sección está contenida en un plano, se pueden utilizar metodologías de reconstrucción que conserven área (v.g. Chamberlain, 1910). Para este caso se supone que las rocas son incompresibles y por lo tanto el área de las rocas contenida en el plano de la sección debe permanecer constante. Con base en la Figura 1, se puede establecer la siguiente relación entre el área deformada A_d , el transporte tectónico u y la profundidad al despegue basal h_b :

$$A_d = u \times h_b. \quad (1)$$

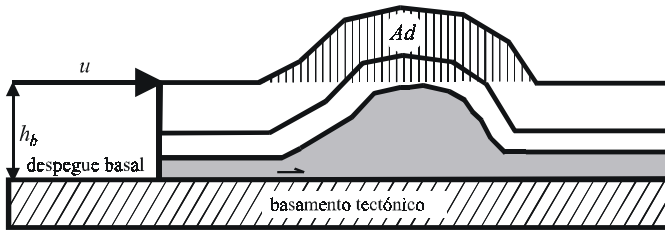


Figura 1. La deformación frágil somera se caracteriza por un desprendimiento de la carpeta sedimentaria del basamento tectónico a lo largo de un corrimiento basal. En estos casos es posible definir una relación sencilla entre el transporte tectónico u , la profundidad al despegue basal h_b y el área acortada A_d (según Chamberlain, 1910).

Esta expresión sencilla es sumamente útil en la construcción de secciones estructurales, ya que con ella se puede estimar el espesor de la cubierta sedimentaria que ha sido involucrado en la deformación. Con esta información se puede simular cómo los pliegues pierden amplitud con la profundidad hasta el despegue basal. Otras aplicaciones de la relación (1) son las siguientes: si la profundidad al despegue es conocida por información de pozos o sísmológica, es posible obtener el transporte tectónico u a lo largo de cabalgaduras. Si el transporte tectónico u y la profundidad del despegue h_b son conocidas, entonces se puede obtener la geometría de las fallas y/o su echado, ya que el área del relieve estructural debe ser la misma que el producto $u \times h_b$ (Suter, 1981).

Otras metodologías frecuentemente utilizadas son aquellas donde se supone que la longitud de las unidades sedimentarias permanece constante, es decir, se considera que durante la deformación no hay dilatación ni extensión de capas (Woodward et al., 1985). Un ejemplo de este tipo de deformación es el plegamiento que se observa en una gruesa de papel al aplicarse fuerzas compresivas sobre sus lados. Claramente, la longitud de cada una de las hojas de la gruesa no cambia aún si éstas se desgarran. Aquí destaca la metodología propuesta por Suppe y Namson (1979) y Suppe (1983) la cual es aplicable a cinturo-

nes de pliegues y cabalgaduras donde predominan pliegues-rampa (fault-bend folds) y pliegues de propagación de rampas (fault-propagation folds). En estas estructuras se presentan dos mecanismos de deformación que actúan de manera simultánea (Figura 2): fallamiento inverso en el núcleo de la estructura y plegamiento en los niveles estructurales superiores. El método de Suppe (op cit.) consiste en aplicar una serie de relaciones trigonométricas entre el ángulo del frente del pliegue-rampa (γ) y el echado de la falla (θ) de tal manera que se garantiza que la longitud de las capas sea la misma, tanto en el estado deformado como sin deformar. Sin embargo, cuando el frente del pliegue acorrido de pliegues de propagación de rampas se vuelve recumbente, se genera una gran distorsión en esta área (ya que no está presente un despegue superior que acomode el desplazamiento tectónico), y por lo tanto, en esta situación es necesario relajar la restricción de la conservación de longitud en el flanco frontal del pliegue; en el resto de la estructura se considera que la longitud de capas es preservada.

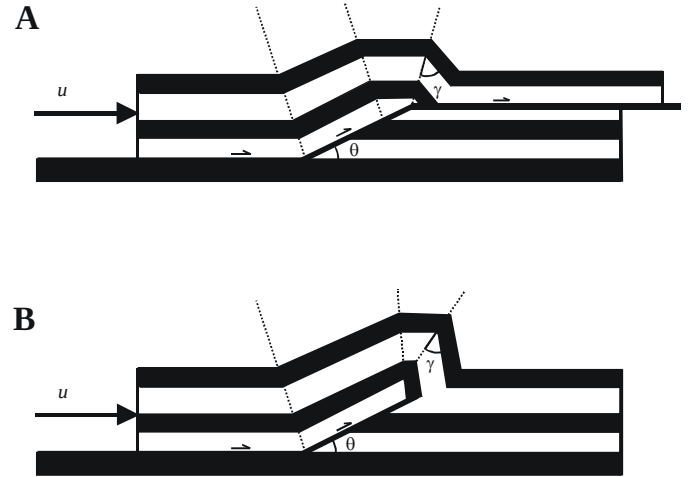


Figura 2. (A) Diagrama que muestra la geometría idealizada de pliegues-rampa y (B) pliegues de propagación de rampas (según Suppe, 1985).

Una estrategia diferente, que es la utilizada en este trabajo, es especificar una función de deformación basada en leyes empíricas derivadas de observaciones geológicas. De esta manera, Contreras y Suter (1990) y Contreras (1991) desarrollaron un modelo cinemático bidimensional para obtener el estado deformado de un medio inducido por desplazamientos grandes finitos a lo largo de una superficie de falla. El quid de la metodología consiste en aproximar la geometría de una falla por medio de segmentos rectos y desplazar el medio sobreyacente de forma paralela a la superficie de la falla. Los planos axiales entre dos segmentos de falla consecutivos limitan regiones de vectores de dislocación constante. El estado deformado está dado simplemente por la ecuación:

$$\begin{bmatrix} p'_x \\ p'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x + u \cos \theta \\ p_y + u \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde p es la posición inicial de la partícula material, p' es la posición deformada, u es la magnitud del transporte tectónico a lo largo de la falla y θ es el echado del segmento de falla subyacente. En otras áreas de ciencias físicas este planteamiento se conoce como autómatas celulares (Toffoli, 1984). Los modelos numéricos generados de esta manera tienen geometrías similares a los observados en la naturaleza (Contreras y Suter, 1997). Estas simulaciones también están en acuerdo con los modelos que se basan en relaciones geométricas entre la falla y la longitud de las capas (Suppe, 1983; Mitra, 1986, Cruickshank *et al.*, 1989). Además, este modelo tiene la ventaja importante de que genera secciones balanceadas sin invocar ninguna suposición acerca de la función de deformación (v.g. conservación de área o de longitud de capa).

USO DE LOS PROGRAMAS

FBF se encuentra disponible tanto en paquetes ejecutables para sistemas Windows 9x, Linux y así como un paquete con el código fuente. FBF puede ser descargado de la página web del CICESE en el URL: <http://www.cicese.mx/~juanc/fbf/fbf.html>. Hay que tomar en cuenta que FBF ha sido desarrollado en Linux por lo que este ambiente, u otros sistemas operativos UNIX, son los más adecuados para correrlos. El autor también está dispuesto a proporcionar copias impresas del código fuente. Este consta de unas 2000 líneas y está codificado en lenguaje de programación C++. Ya que estos programas corren en modo texto, sólo se requieren las bibliotecas usuales de C++. FBF fue desarrollado usando el compilador C++ ANSI g++ v. 2.95.2, pero cualquier otro compilador C++ ANSI deberá ser capaz de generar los ejecutables sin ningún problema. Los programas que conforman FBF son gratuitos y son distribuidos bajo una licencia GPL (GNU General Public Licence). Esto significa que pueden ser copiados y redistribuidos libremente; para mayor información véase los términos de la licencia GLP en <http://www.gnu.org>

A continuación se describen los programas que constituyen a FBF: el pre-procesador `fbfmesh`, el procesador `fbfold` y el post-procesador `fbfplot`. El diseño de estos programas está inspirado en GMT (Generic Mapping Tools) y en GRI (Graphing language), programas que toman como entrada un archivo de datos y generan un archivo de salida. Siguiendo la filosofía de GMT y GRI, como se verá más adelante, los programas de FBF no son programas interactivos ni utilizan el ratón, ya que todo el proceso es controlado a través de los parámetros del archivo de entrada. Debe remarcarse que uno debe ser cuidadoso al editar el archivo de entrada para así obtener los resultados deseados (ver ejemplos en los Apéndices A y B). Los archivos de entrada son archivos de texto normal y contienen una lista de parámetros con sus respectivos valores. Estos parámetros son especificados de la siguiente manera:

<nombre del parámetro> = <valor>

Donde <valor> puede ser un número entero, flotante o una cadena de caracteres.

Las convenciones utilizadas son las siguientes: valores en x se incrementan hacia la derecha, valores en y se incrementan hacia arriba y los ángulos se incrementan en el sentido opuesto al de las manecillas del reloj. Las cadenas de caracteres no deben contener espacios en blanco. También se pueden introducir comentarios en los archivos de entrada y así clarificar su contenido; estos tienen que iniciar con el carácter “#” y no deben de sobrepasar ochenta caracteres por línea.

PROGRAMA FBFMESH

El primer paso para generar un modelo estructural del subsuelo con FBF consiste en definir la geometría de la unidades geológicas en su estado previo a la deformación actualmente observada. El pre-procesador `fbfmesh` facilita esto ayudando a generar dicho estado. `Fbfmesh` construye mallas de puntos equi-espaciados a partir de información contenida en un archivo de entrada. Debe recalcarse que `fbfmesh` no es un mallador sofisticado y sólo puede generar celosías bidimensionales con topología sencillas, v.g., mallas rectangulares y mallas que se acunían gradualmente a lo largo del eje de las ordenadas. Estas son aproximaciones aceptables, ya que la mayoría de las unidades estratigráficas tienen geometrías tabulares o se adelgazan lateralmente de manera gradual. Por supuesto que es posible reproducir geometrías iniciales más complicadas combinando varias de estas primitivas.

El pre-procesador `fbfmesh` primero lee y analiza una serie de parámetros almacenados en un archivo de entrada, después calcula la posición de los puntos de la malla basado en esta información y finalmente almacena la malla en un archivo de salida. Los parámetros leídos del archivo de entrada se muestran en la Figura 3 y son los siguientes:

rows, cols: número de renglones y columnas de que consta la malla de puntos materiales. Se pueden definir mallas con un máximo de 100 renglones por 500 columnas.

dx, dy: separación horizontal y vertical entre nodos de la malla.

x0, y0: las coordenadas del nodo inferior izquierdo de la malla.

taperanglesup, taperangleinf: los ángulos que definen el acunamiento en la dirección horizontal de los puntos de la malla.

outputmesh: una cadena de caracteres que almacena el nombre del archivo de salida.

De manera adicional, se puede especificar el parámetro “regionname”, una cadena de caracteres con el nombre del modelo o región, e.g., el nombre de una formación o unidad litológica. En el Apéndice A se muestra, a manera de ejemplo, el texto de un archivo de entrada para `fbfmesh` y la manera de invocar a este programa.

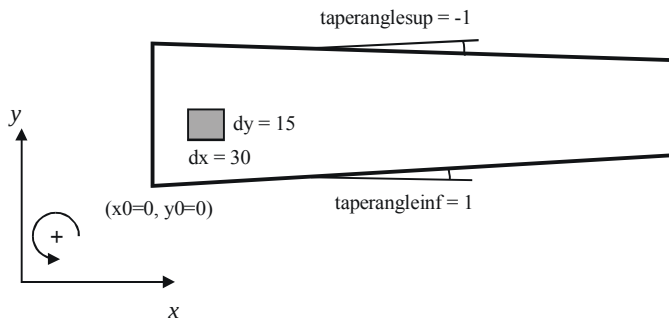


Figura 3. Diagrama con los parámetros de entrada para el pre-procesador fbmesh. Ver texto y Apéndice A para más detalles.

PROGRAMA FBFOLD

El programa fbfold calcula la deformación finita de un medio inducida por su movimiento a lo largo de una superficie de falla. Este programa está basado en el algoritmo de Contreras y Suter (1990) y Contreras (1991). El archivo de entrada para este programa especifica los archivos con mallas a deformar (archivos de salida de fbmesh o del mismo fbfold), la geometría de la falla, el transporte tectónico a lo largo de la falla, y los archivos de salida donde almacenar las mallas deformadas. Fbfold simplemente desplaza los nodos de las mallas de manera paralela a la superficie de la falla iterando la ecuación (2) utilizando desplazamientos muy pequeños (un decimo del parámetro dx) hasta que el desplazamiento acumulativo es igual al desplazamiento tectónico prescrito. La geometría de la falla es especificada con segmentos de rectas (Figura 4); utilizando varios segmentos es posible definir geometrías complicadas como se verá en ejemplos posteriores. Cada segmento recto de la falla es definido por su longitud y echado. Para especificar completamente la geometría de la falla es necesario especificar el punto donde se inicia la falla; es recomendable que este punto no esté contenido en la malla o mallas a deformar, ya que de lo contrario aparecerán vacíos en la(s) malla(s). Con fbfold se puede modelar la deformación de hasta 50 fallas; más de esta cantidad generará un desborde de memoria en el arreglo que almacena la geometría de las fallas. Los parámetros leídos del archivo de entrada son los siguientes:

faultname: una cadena de caracteres opcional con el nombre de la falla

nsegments: el número de segmentos que definen la geometría de la falla. Es posible definir fallas que consten de hasta 500 segmentos.

x0, y0: el punto donde se inicia la falla

segmentlength, segmentdip: estos parámetros especifican la longitud y echado de cada uno de los segmentos rectos que definen a la falla.

utotal: magnitud del transporte tectónico.

inputmesh: nombre del archivo con la malla de entrada a ser deformada.

outputmesh: nombre del archivo de salida donde se almacena la malla deformada.

Opcionalmente se pueden especificar los parámetros “inputoldfaults” y “outputoldfaults”. Su uso requiere de una explicación más detallada. Es claro que la deformación inducida por varias fallas puede ser modelada usando iteradamente fbfold sobre las mallas deformadas generadas por este mismo programa (hasta 50 fallas). Conforme son introducidas nuevas fallas, las fallas antiguas se tornan inactivas y por lo tanto son susceptibles de ser deformadas por la falla actualmente activa. Fbfold almacena estas fallas inactivas en archivos separados y estos dos parámetros indican el nombre del archivo donde se deberán almacenar (outputoldfaults) y el nombre del archivo de donde deberán ser leídas (inputoldfaults). En el apéndice B se muestra un ejemplo de cómo utilizar estos parámetros para formar los archivos de entrada y de como invocar fbfold.

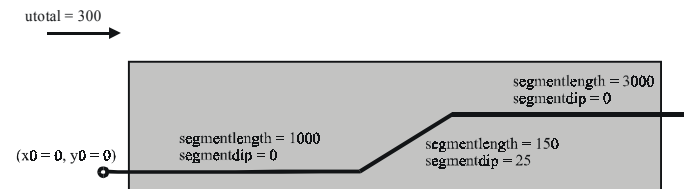


Figura 4. Diagrama con los parámetros de entrada del procesador fbfold que definen la geometría de la traza de la falla. Aquí se muestra una falla inversa con geometría desgue-rampa-desgue. Ver Apéndice B y texto para más detalles.

PROGRAMA FBFOLD

Para visualizar los modelos estructurales generados por fbfold primero hay que poner los archivos con las mallas y fallas deformadas en un formato conveniente para ser graficadas. Fbplot no despliega ninguna gráfica; sólo toma los archivos de salida de fbfold y crea una serie de archivos con extensiones .tmp de estructura columnar que contienen las coordenadas de los nodos de las mallas deformadas. Para efectuar el graficado de los modelos estructurales se recomienda el uso de gnuplot, un programa robusto para el desplegado bi y tridimensional de datos. Otras ventajas de gnuplot son: es un programa libre y gratuito, ha sido portado a varias plataformas y sistemas operativos, es fácil de aprender, y más importante aún, puede generar archivos postscript con gráficas vectoriales de alta resolución de los modelos estructurales. Los archivos postscript pueden ser importados, a su vez, por la mayoría de los paquetes comerciales de diseño gráfico e industrial. Fbplot también puede generar un script para gnuplot, lo que facilita más el graficado. El apéndice B muestra un ejemplo de como utilizar fbplot.

EJEMPLOS DE MODELOS ESTRUCTURALES GENERADOS POR FBF

UN EJEMPLO CON PLIEGUES-RAMPA

La Figura 5 muestra una comparación entre una sección sintética generada por FBF y una sección estructural de la parte

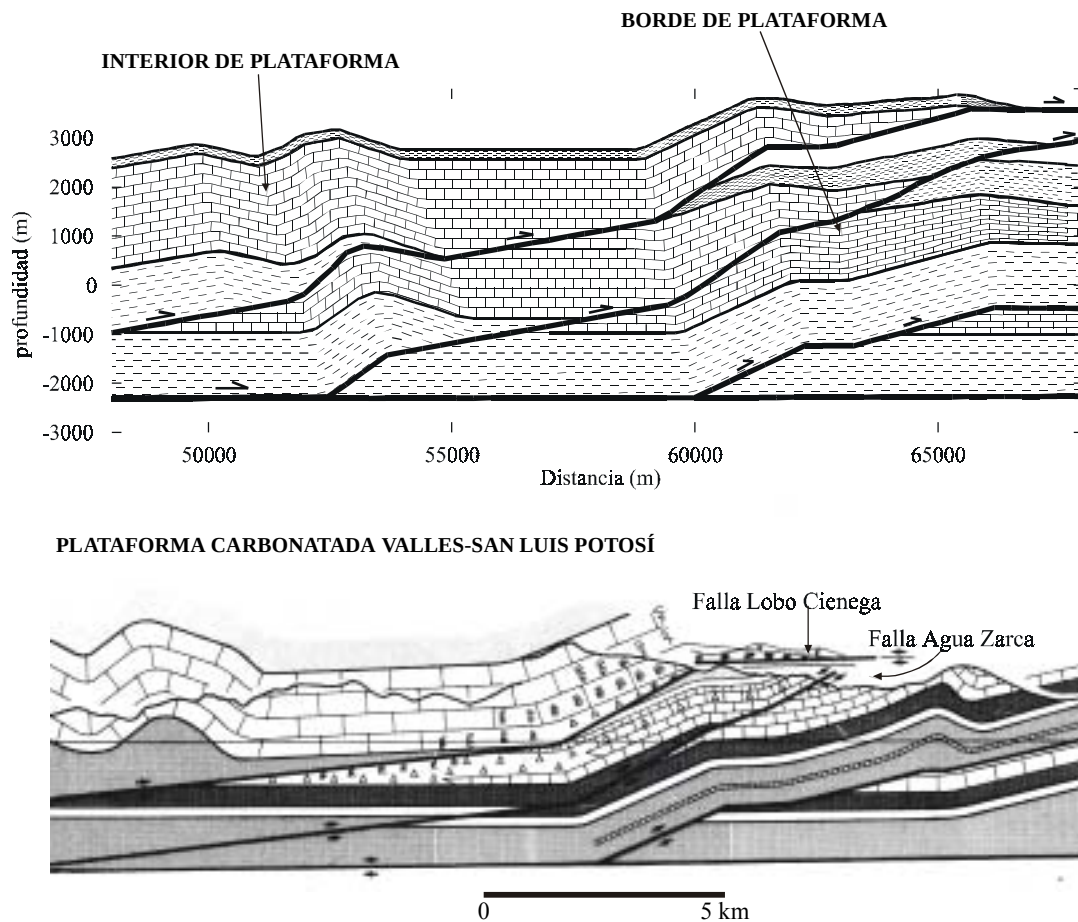


Figura 5. Comparación entre una sección estructural de la parte central de la Sierra Madre Oriental (figura inferior, después de Suter 1987) y una sección sintética para la misma área generada con FBF (figura superior) .

central del cinturón de pliegues y cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental propuesta por Suter (1987). En la construcción de la sección sintética se utilizaron 5 mallas para aproximar la geometría del banco de carbonatos Valles-San Luis Potosí (Formación El Abra), las rocas de facies de cuenca asociada (Formación Tamaulipas) y unidades cretácicas tardías. Hay que notar que para aproximar la geometría de las facies de borde de plataforma se utilizó una malla en forma de cuña con una pendiente superior a 15°. En esta sección sintética se utilizaron tres fallas inversas con geometrías escalonadas (geometría de despegue-rampa-despegue). En general existe un buen acuerdo entre la sección propuesta por Suter (1987) y la sección sintética, especialmente en la parte superficial que es donde se tiene mayor control estructural. Existe diferencias a profundidad entre ambas secciones, pero esto se debe a que se utilizaron diferentes suposiciones para obtener las reconstrucciones. Este es el caso del pliegue disarmónico sobre la cabalgadura Lobo Ciénega propuesto por Suter (1987), que se modeló como un escalón en la cabalgadura de Agua Zarca (Figura 5).

UN EJEMPLO CON FALLAS NORMALES LÍSTRICAS

Ya que FBF y en general el autómatas celular presentado por Contreras y Suter (1990) no distingue entre tipos de fallas, es posible modelar fallamiento normal. Hay que tomar en cuenta

que FBF esta orientado a áreas donde la cubierta sedimentaria se encuentra desacoplada del basamento tectónico. En zonas donde fallas penetran hasta la corteza profunda (fallas con longitudes mayores de 40 km) existen otros procesos que no pueden ser modelados por FBF como son isostasia, flexión y adelgazamiento de la corteza. La figura 6 muestra una sección sintética con tres fallas normales lísticas que se unen a profundidad formando un despegue de bajo ángulo. Este es, por ejemplo, el estilo de fallamiento observado en la Cuenca de Burgos en el noreste de México.

UN EJEMPLO CON FALLAMIENTO INVERSO Y SEDIMENTACIÓN

FBF también puede ser utilizado para modelar otros procesos geológicos. Tal es el caso de la evolución de cuencas sedimentarias clásticas donde se presenta deformación frágil sinsedimentaria. Este proceso se puede modelar en dos dimensiones por medio de la ecuación diferencial parcial (Hardy *et al.*, 1996):

$$\frac{\partial}{\partial t}(h + u_y) = \kappa \frac{\partial^2}{\partial x^2} h + s, \quad (3)$$

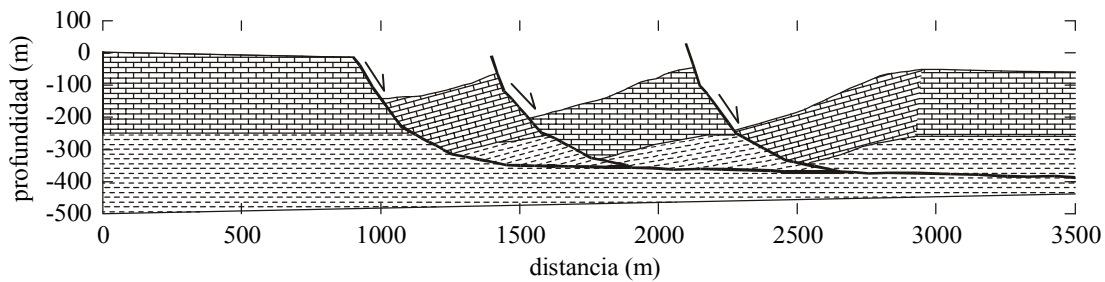


Figura 6. Simulación numérica con fallas listricas generado con FBF.

donde h es la elevación topográfica de la cuenca, u_y es la componente vertical del transporte tectónico producto de la deformación frágil, el término diferencial de la derecha representa erosión o sedimentación local (según sea el signo de la curvatura de la topografía), κ es la resistencia de la roca a ser erosionada y s es una sedimentación de fondo producida por fuentes sedimentarias distantes. La figura 7 muestra un experimento numérico basado en la ecuación (3) que ilustra el efecto de deformación compresional en la sedimentación. En esta figura también se muestra una línea sísmica del cinturón de pliegues y cabalgaduras de Perdido localizado en la parte central del Golfo de México (Trudgill *et al.*, 1999). Las relaciones sedimentarias observadas en la sección sísmica y las generadas en el experimento numérico muestran buen acuerdo. Especialmente el acunamiento de reflectores y el patrón de sobrelape (onlap) hacia el núcleo del pliegue acofrado. Este tipo de simulaciones pueden ser realizadas con la ayuda de FBF gracias a que éste realiza una simulación directa de la deformación frágil y plegamiento asociado. Esto no sería posible si FBF estuviera únicamente enfocado a reconstruir la geometría del subsuelo como lo hacen programas de diseño gráfico o CAD.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han descrito una serie de programas para modelar la deformación finita por desplazamientos grandes asociada a fallamiento. Estos programas son útiles para simular la deformación de áreas donde la carpeta sedimentaria se encuentra desprendida del basamento tectónico a lo largo de una zona de cizalla. El modelo de deformación consiste en un autómata celular que desplaza los nodos de una malla, que representa el medio sin deformar, de forma paralela a la traza de la falla. Con estos programas es posible construir secciones estructurales balanceadas. Dado que el autómata celular no distingue entre tipos de fallas es posible modelar la deformación tanto de áreas bajo acortamiento como extensión. Aún más, la salida de estos programas puede ser utilizada para modelar procesos geológicos más complejos como la evolución de cuencas sedimentarias.

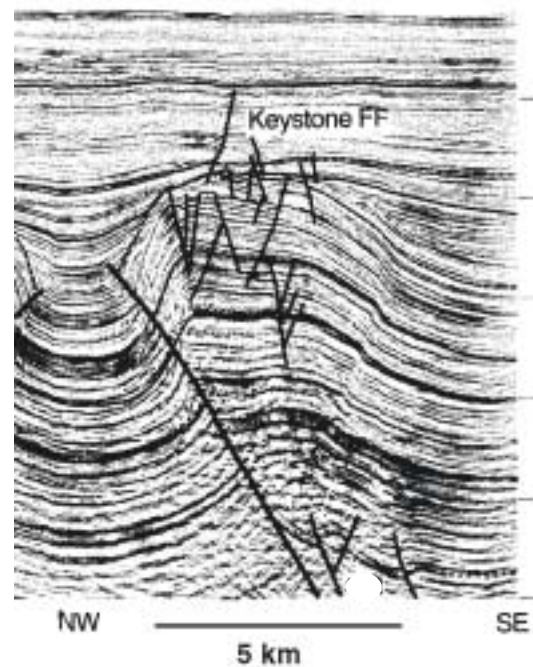
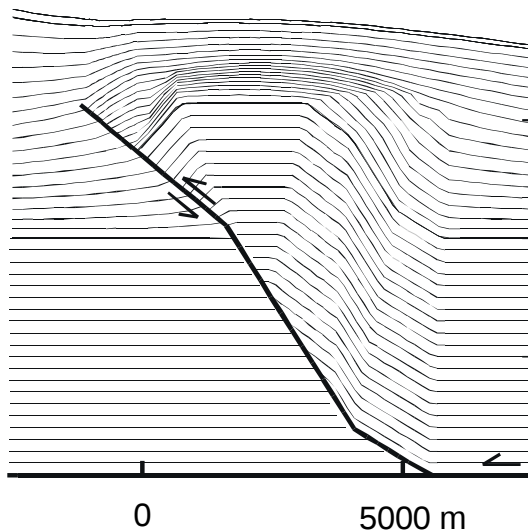


Figura 7. Comparación entre un experimento numérico con deformación y sedimentación simultáneas y una de las estructuras del cinturón plegado de Perdido en el Golfo de México iluminada mediante sísmica de reflexión (Trudgill *et al.*, 1999).

APÉNDICE A

El siguiente texto ilustra cómo se forman los archivos de entrada para fbfmesh con los parámetros descritos en este artículo y en la Figura 3.

```
=====
# Archivo ejemplo para generar el estado inicial sin deformar.
# Las unidades están en el SI
=====
# Nombre de la región
regionname = capa_1
# Los siguientes parámetros definen el tamaño de la malla
cols = 200
rows = 15
# Los siguientes parámetros definen las coordenadas del
# nodo (0,0)
x0 = 0.0
y0 = 0.0
# Los siguientes parámetros establecen la separación horizontal
# y vertical entre nodos adyacentes de la malla
dx = 3.0
dy = 15.0
# Los siguientes parámetros especifican una malla con forma
de cuña
taperanglesup = -1
taperangleinf = 1
# Este es el archivo de salida donde se almacena la malla
outputmesh = capa_inicial.mesh
```

El ejemplo anterior genera una malla de 15 renglones por 200 columnas con celdas rectangulares de 15 m de largo por 5 m de alto. La malla se acuña gradualmente en la dirección del eje x con una pendiente de -1° y 1° en su cima y base, respectivamente. El resultado es almacenado en el archivo de salida “capa_inicial.mesh”. Para generar la malla en el estado sin deformar es necesario pasar a fbfmesh, desde la línea de comandos, el nombre del archivo que contiene los parámetros de entrada, e.g.,

```
fbfmesh <archivo de entrada>
```

APÉNDICE B

El siguiente texto ilustra como formar los archivos de entrada para fbfold con los parámetros descritos en este artículo y en la Figura 4.

```
=====
# Archivo ejemplo para definir la geometría de una falla.
# Unidades en SI
=====
# Nombre de la falla
faultname = falla_1
# Numero de segmentos de la falla
nsegments = 3
# Punto donde inicia la falla
x0 = 0.0
y0 = 0.0
# Estos parámetros definen la geometría de la falla
# 1er segmento, un despegue basal
segmentlength = 1000.0
segmentdip = 0.0
##
# 2do segmento, una rampa
segmentlength = 150.0
segmentdip = 25.0
##
# 3er segmento, un despegue superior
segmentlength = 3000
segmentdip = 0
##
# Desplazamiento a lo largo de la falla
utotal = 300.0
# Archivo con la malla en el estado sin deformar
inputmesh = capa_inicial.mesh
# Archivo de salida con la malla deformada
```

outputmesh = capa_deformada.mesh

Archivo de salida con fallas inactivas

outputoldfaults = fallasinactivas.dat

Para calcular el estado deformado es necesario pasar a fbfbfold, desde la línea de comandos, el nombre del archivo que contiene los parámetros de entrada, e.g.,

fbfbfold <archivo de entrada>

Para poder graficar el estado deformado calculado por fbfbfold, primero hay que poner las mallas deformadas en un formato conveniente a través del uso de fbfbplot. Uno debe invocar a fbfbplot de la siguiente manera

fbfbplot -m <lista de archivos con las mallas deformadas> -f <archivo con fallas inactivas> -o <archivo de salida con script para gnuplot>

Donde <archivo de salida con script para gnuplot> es un archivo con instrucciones para el programa de graficado gnuplot. Para obtener la gráfica del estado deformado del ejemplo anterior hay que teclear la siguientes instrucciones

%fbfbplot -m capa_deformada.mesh -f fallas_inactivas.dat -o grafica.plt

%gnuplot grafica.plt

REFERENCIAS

- Chamberlain, R.T., 1910, The Appalachian folds of Central Pennsylvania: *Journal of Geology*, 18, p. 21-30.
- Contreras J. and Suter M., 1990, Kinematic modeling of cross-sectional sequences by computer simulation: *Journal of Geophysical Research*, 95, p. 21913-21929.
- Contreras J., 1991, Kinematic modeling of cross-sectional sequences by computer simulation: coding and implementation of the model: *Computer & Geosciences*, 17, p. 1197-1217, 1991.
- Contreras J. and Suter M., 1997, A kinematic model for the formation of duplex systems with a perfectly planar roof thrust: *Journal of Structural Geology*, 19, p. 269-278.
- Cruikshank, K.M., Neavel, K.E. and Zhao, G., 1989, Computer simulation of growth of duplex structures, *Tectonophysics*, 164, p. 1-12.
- Hardy S., Poblet J., McClay K. and Waltham D., 1996, Mathematical modelling of growth strata associated with fault-related fold structures: en Buchanan P.G. y Nieuwland D.A., Modern development in structural interpretation, validation and modeling, *Geological Society Special Publication*, No. 99, p. 265-282.
- Mitra, S., 1986, Duplex structures and imbricate thrust systems: geometry, structural position, and hydrocarbon potential: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 70, p. 1087-1112.
- Suppe, J. and Namson J., 1979, Fault-bend origin of frontal folds of the western Taiwan fold and-thrust belt: *Petroleum Geology of Taiwan*, 16, p. 1-18.
- Suppe J., 1983, Geometry and kinematics of fault-bend folding: *American Journal of Science*, 283, p. 684-721.
- Suppe J., 1985, Principles of structural geology: *Prentice-Hall*, 537 pp.
- Suter, M., 1981, Strukturelles Querprofil durch den nordwestlichen Faltenjura, Mt-Terri-Randüberschiebung-Freiberge: *Eclogae Geol. Helvetiae*, 74 p. 255-275.
- Suter, M., 1987, Structural traverse across the Sierra Madre Oriental fold-thrust belt in east-central Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 98, p. 249-264.
- Toffoli, T., 1984, Cellular automata as an alternative to differential equations in modeling physics: *Physica*, p. 117-127.
- Trudgill, B.C., Rowan, M.G., Fiduk, J.C. Weimer, P, Gale, P.E., Korn B.E., Phair, R.L., Gafford, W.T., Roberts G. and Dobbs, S.W., 1999, The Perdido Fold Belt, Northwestern Deep Gulf of Mexico, Part 1: Structural Geometry, Evolution and Regional Implications, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 83, No. 1, p. 88-96.
- Woodward, N.B., Boyer S.E. and Suppe, J., 1985, An outline of balanced cross-sections, 2nd edition: University of Tennessee, Department of Geological Sciences, *Studies in Geology* 11, 2nd edition 170 pp.