

INSTITUT FRANÇAIS  
DU PÉTROLE  
(IFP)

---

YACIMIENTOS PETROLIFEROS  
Y FISCALES DE BOLIVIA  
(YPFB)

---

INSTITUT FRANÇAIS  
DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION  
(ORSTOM)

---

LA ZONA DE TRANSFERENCIA DEL BOOMERANG (BOLIVIA)

INTERPRETACION Y MODELAJE EXPERIMENTAL

---

Mayo 1992

**INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE**  
Division Géologie-Géochimie - RB10  
20 exemplaires  
Mai 1992  
Réf. IFP : 39781/E  
Réf. Géologie : 29900  
N° projet : B4136008

**LA ZONA DE TRANSFERENCIA DEL BOOMERANG  
(BOLIVIA)  
INTERPRETACION Y MODELADO EXPERIMENTAL.**

-----

**Patrice BABY (ORSTOM)  
Jaime OLLER (YPFB)  
Enaro MONTEMURO (YPFB)**

**Convenios: YPFB-ORSTOM  
ORSTOM-IFP**

**Resumen:**

En este estudio se presentan los resultados del análisis estructural sobre el cambio de dirección del frente de cabalgamiento en los Andes Bolivianos en la región de STA CRUZ.

Este trabajo se llevó a cabo en el marco de un convenio entre IPFB, ORSTOM y IFP.

# **INDICE**

<b>INTRODUCCION</b>	p - 1
<b>ESTRATIGRAFIA Y ESTRUCTURA DE LA ZONA DEL BOOMERANG</b>	p - 5
Estratigrafía y litología de series implicadas	p - 5
Estructuras	p - 5
<b>INTERPRETACION DEL ORIGEN DE LA ZONA DEL BOOMERANG</b>	p - 8
<b>ACERCAMIENTO EXPERIMENTAL</b>	p - 9
Descripción del modelo	p - 9
Resultados	p - 12
Estadio 27 mn., o sea 6,8% de acortamiento	p - 12
Estadio 56 mn., o sea 14% de acortamiento	p - 14
Chronología de la deformación	p - 15
<b>DISCUSION</b>	p - 16
Microbola y silicona	p - 16
Estadio 27 mn.	p - 16
Estadio 56 mn.	p - 19
Chronología de la deformación	p - 22
<b>CONCLUSION</b>	p - 23
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	p - 24
<b>LISTA DE LAS FIGURAS</b>	p - 25
<b>LISTA DE LAS LAMINAS</b>	p - 26

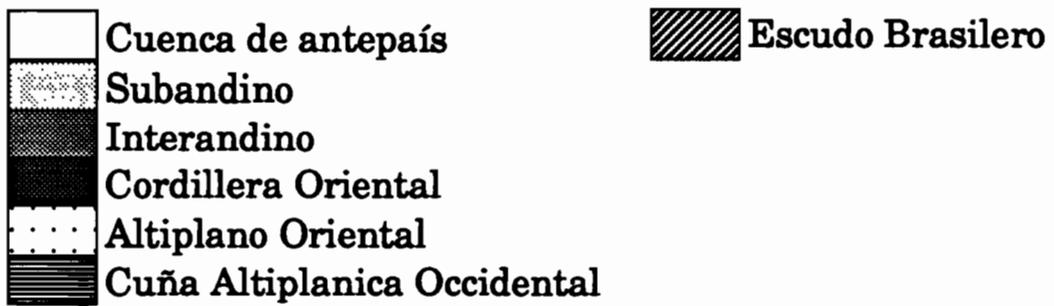
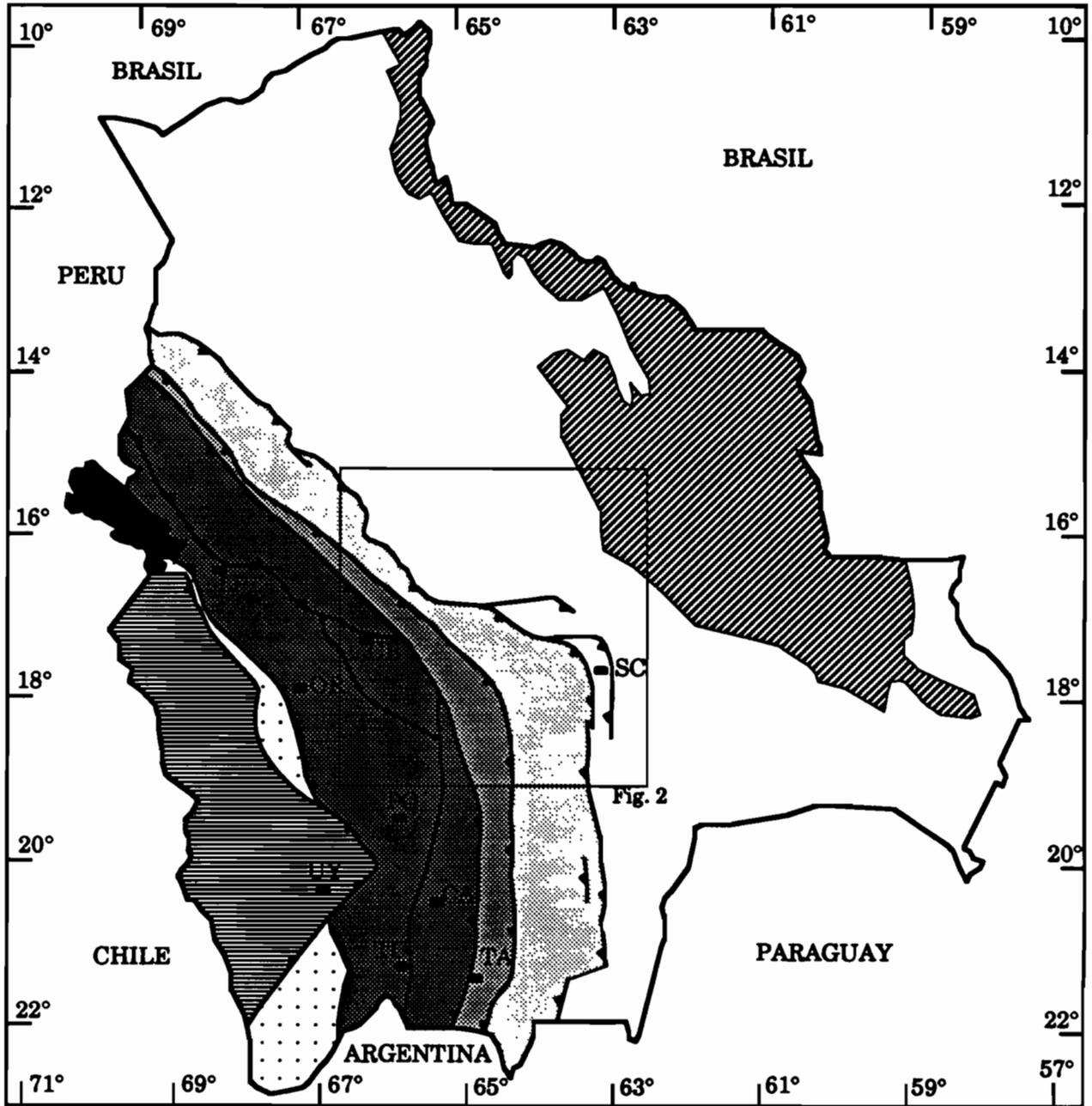
## **LA ZONA DE TRANSFERENCIA DEL BOOMERANG (BOLIVIA): INTERPRETACION Y ACERCAMIENTO EXPERIMENTAL**

### **INTRODUCCION:**

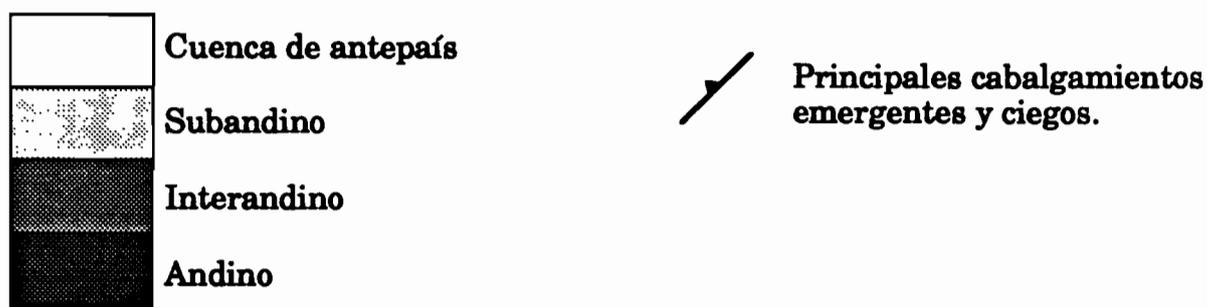
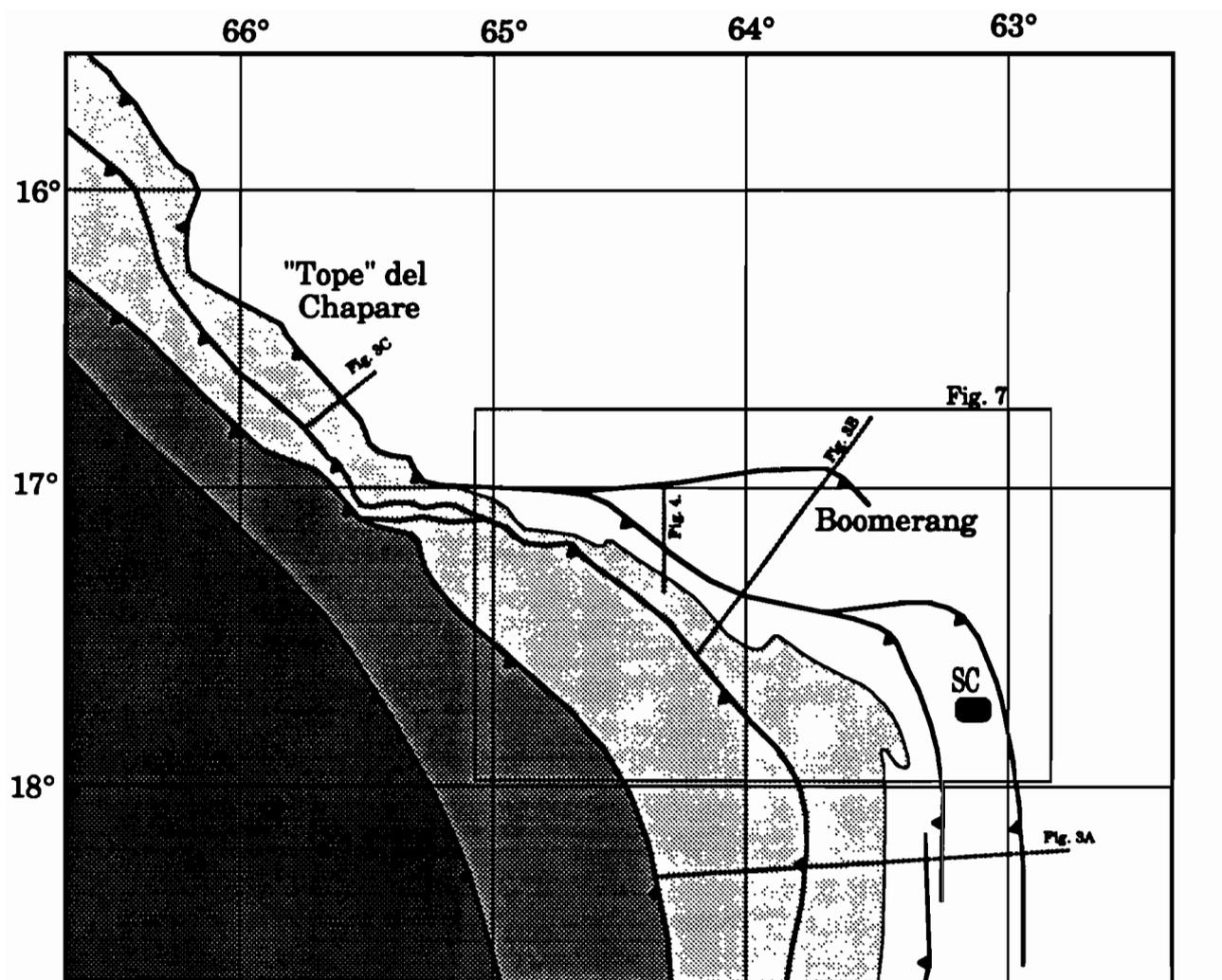
En su parte central (entre 16° S y 18° S), los Andes forman una importante "virgación" llamada el Codo de Santa Cruz (fig. 1). Al Sur de Santa Cruz (entre 17,5° S y 18° S), el frente de los Andes esta orientado N-S y presenta estructuras imbrincadas clásicas (fig. 2 y 3A). Al Norte de Santa Cruz (entre 16° S y 17,5° S), las estructuras frontales llegan a ser globalmente NW-SE y cartograficamente más complejas (fig. 2). En efecto, la geometría de los sistemas de cabalgamiento presenta grandes variaciones laterales (fig. 3A y 3B).

El frente de deformación de esta parte septentrional del Codo de Santa Cruz se caracteriza por dos zonas importantes de transferencia de acortamiento. Se trata de zonas oblicuas que constituyen los límites NW y SE del "Tope" del Chapare (fig. 2). El límite SE corresponde a la zona del Boomerang que coincide con un conjunto de pequeños campos de hidrocarburos (aceite y gas) que fueron recientemente descubiertos. El límite NW, mucho menos explorado, constituye una zona importante de relevo entre los cabalgamientos frontales del "Tope" del Chapare y del Subandino norte.

En este informe, se propone presentar, a partir de datos petroleros de YPFB una síntesis sobre la estructura de la zona de transferencia del Boomerang, de igual manera que una interpretación y un acercamiento experimental de su modo de deformación. El estudio experimental, que fue efectuado en el Instituto Frances del Petroleo, consistuyo en realizar una serie de modelizaciones analógicas vislumbradas en 3D por scannerización. Esto permitio no solamente modelizar la zona del Boomerang, sino tambien el "Tope" del Chapare a pesar de los pocos datos de sub-superficie.



**Fig. 1:**  
**Mapa tectónico de Bolivia y localización del**  
**Codo de Santa Cruz.**



**Fig. 2: Mapa estructural del Codo de Santa Cruz.**

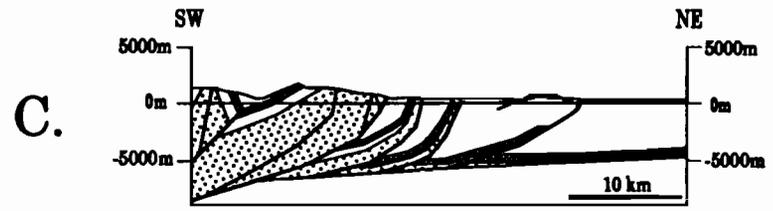
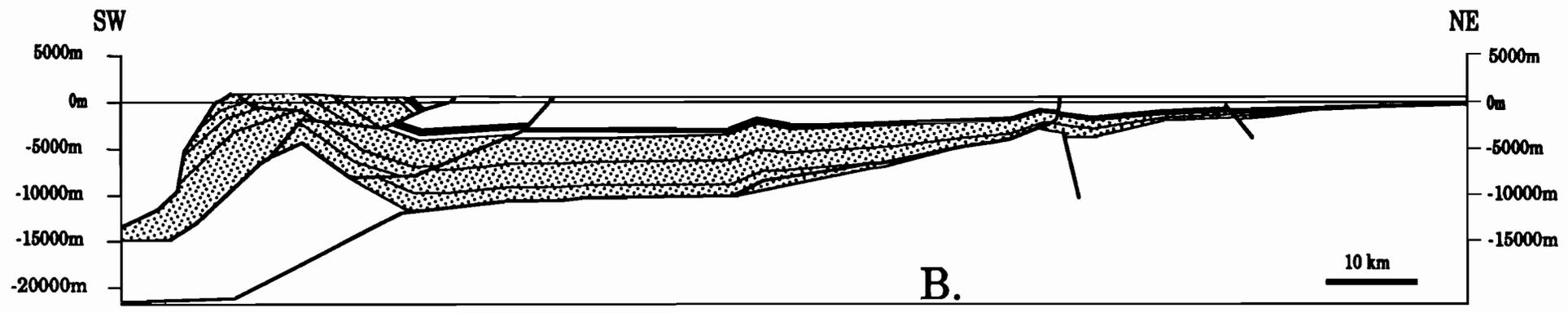
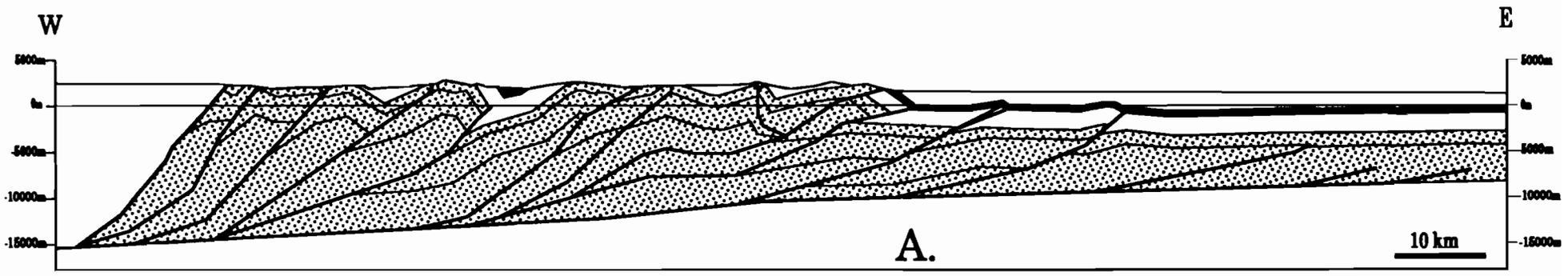


Fig. 3: Cortes estructurales equilibrados:  
(localización en la fig. 2)

A. A través del Subandino de la parte meridional del Codo de Santa Cruz;  
B. A través de la zona del Boomerang;  
C. A través del "Tope" del Chapare.

## **ESTRATIGRAFIA Y ESTRUCTURA DE LA ZONA DEL BOOMERANG:**

### **Estratigrafía y litología de series implicadas:**

La deformación del frente de los Andes bolivianos empezó durante el Oligoceno superior y continúa actualmente (Martínez, 1980; Oller, 1986; Baby et al., 1989; Sempere et al., 1990).

El espesor de la serie sedimentaria implicada en los cabalgamientos de la zona del Boomerang varía del Sur hacia el Norte (fig. 4). En las partes sur y central de la zona del Boomerang, el material implicado en los cabalgamientos corresponde a una serie prácticamente continua de edad ordovícica a mesozoica y a sedimentos terrígenos sintectónicos (sincabalgamientos) de edad oligocena superior a actual (Padula, 1959; López, 1974). En el borde norte de la zona del Boomerang, la serie paleozoica está fuertemente reducida. En efecto, se nota al mismo tiempo una disminución de los espesores sedimentarios y una desaparición de la parte superior del Paleozoico por efecto de la discordancia de la base de la Formación Ichoa (Jurásica). Al Norte del borde septentrional del Boomerang, el Paleozoico desaparece completamente.

En consecuencia, la zona del Boomerang está caracterizada por una cuña sedimentaria paleozoica que se estrecha hacia el Norte (fig. 4) y que definitivamente parece corresponder no más al borde septentrional de la cuenca paleozoica. Esta cuña paleozoica descansa sobre formaciones cambrias o precambrias mucho más competentes y está tapada por 500 m de sedimentos mesozoicos y por más de 1650 m de sedimentos terrígenos sintectónicos de edad oligocena superior a actual.

### **Estructuras:**

Las estructuras de la zona del Boomerang casi no tienen afloramientos, pero están bien definidas por sísmica de reflexión (varios millares de km de sísmica) y por perforación (más de 500 pozos). Es a partir de la malla relativamente apretada de las líneas sísmicas y de los numerosos pozos, que hemos podido construir un mapa isobático del techo del Mesozoico, es decir un mapa de las estructuras andinas (fig. 5). En efecto, el techo del Mesozoico fue deformado únicamente por la deformación andina que empezó

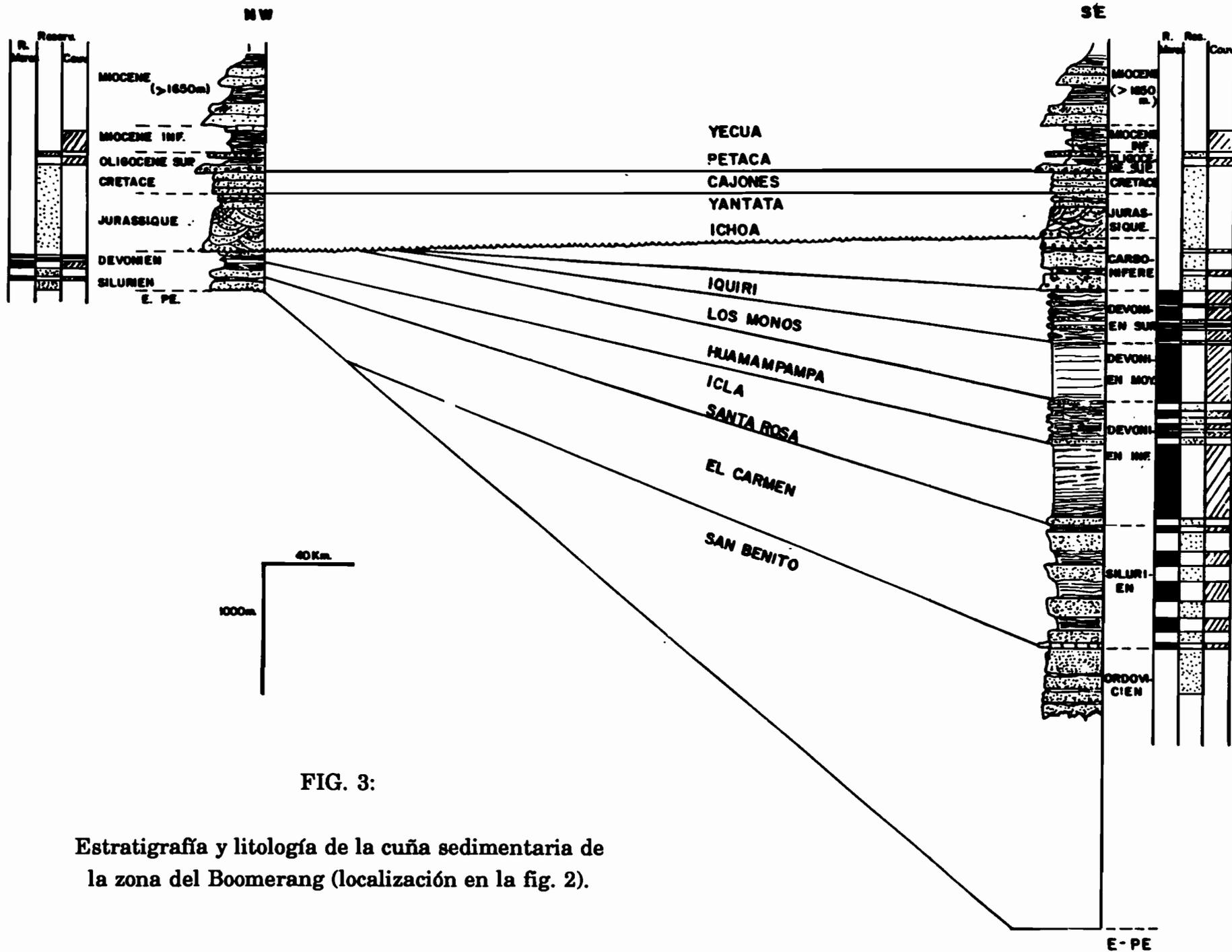


FIG. 3:

Estratigrafía y litología de la cuña sedimentaria de la zona del Boomerang (localización en la fig. 2).

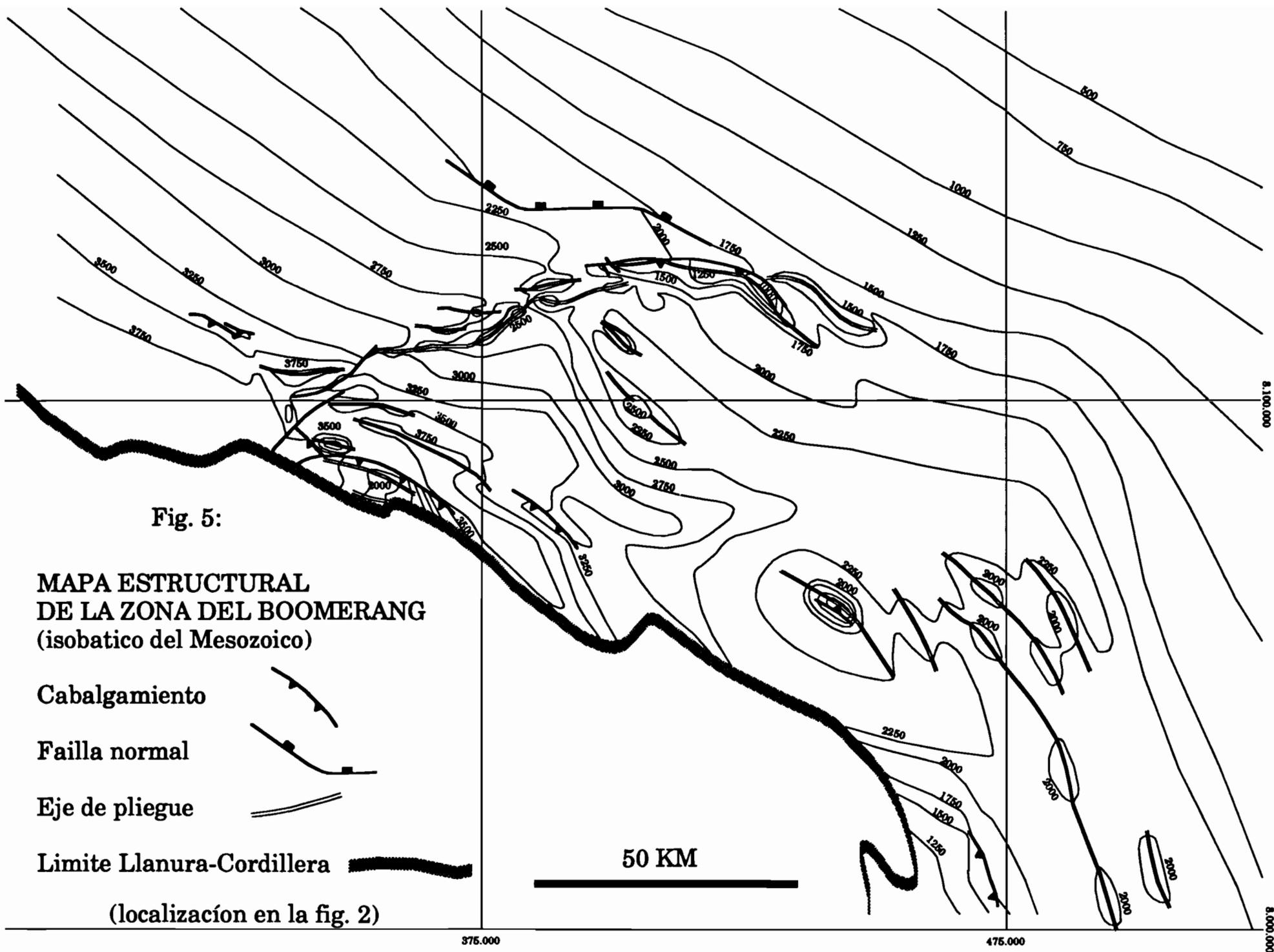


Fig. 5:

**MAPA ESTRUCTURAL  
DE LA ZONA DEL BOOMERANG  
(isobatico del Mesozoico)**

Cabalgamiento

Failla normal

Eje de pliegue

Limite Llanura-Cordillera

(localización en la fig. 2)

50 KM

375.000

475.000

8.100.000

durante el Oligoceno superior. Sobre este mapa del techo del Mesozoico, la mayor parte de los cabalgamientos son ciegos y la deformación se manifiesta esencialmente con pliegues.

Este mapa estructural pone en evidencia una dirección SW-NE de la deformación andina que esta en pleno acuerdo con las estructuras y las micro-estructuras observadas directamente al Sur del Boomerang, en la parte aflorante del Subandino. El borde norte de la zona del Boomerang, orientada globalmente E-W, corresponde a un frente de deformación oblicuo en relación a esta orientación de acortamiento. Este frente de deformación se amortigua bruscamente hacia el este orientandose NW-SE (Anticlinal Palometas). Se puede constatar entonces un retroceso del frente de deformación de 37 km hacia el Sur (Anticlinal Caranda), lo que nos demuestra hay un fenomeno de transferencia de acortamiento espectacular. Al interior de la zona del Boomerang, es decir entre su borde norte y los primeros relieves de los Andes, las estructuras estan orientadas NW-SE.

Hemos podido construir, a partir de las mejores lineas sismicas, cortes a traves de las estructuras mayores que han sido objeto de perforaciones exploratorias. Las estructuras oblicuas (NE-SW) son estrechas, paradas y apretadas contra el frente de deformación (pl. 2, 3 y 4). En cambio, las estructuras NW-SE son aisladas y anchas, y deformadas por cabalgamientos cuyo el buzamiento no sobrepasa 30° (pl. 5 y 6).

Con estas observaciones se puede concluir en que, el frente de deformación de la zona del Boomerang corresponde a una rampa lateral que se amortigua bruscamente hacia el este despues de haber evolucionado localmente en rampa frontal. Al Oeste, la rampa lateral del Boomerang se engancha sobre la rampa frontal del "Tope" del Chapare (fig. 2).

#### **INTERPRETACION DEL ORIGEN DE LA ZONA DEL BOOMERANG:**

El corte regional de la figura 3B y los cortes precedentes muestran que las estructuras de la zona del Boomerang pertenecen a un sistema de cabalgamientos cuyo despegue basal se encuentra en el contacto Paleozoico-Cambrico o Paleozoico-Precambrico. Según esos cortes, parece que existe una relación fundamental entre la geometría de la cuña paleozoica y la deformación andina. Para poner en evidencia esta relacion, hemos construido, siempre a partir de la sismica y de los datos de pozo, el mapa

isopaco de la cuenca paleozoica (fig. 6). La relación entre la deformación andina y la geometría de la cuña paleozoica aparece claramente cuando se sobrepone este mapa al mapa estructural (fig. 7). Se puede constatar que la rampa lateral del Boomerang esta, en gran parte, coincidente al borde de la cuña paleozoica. En su extremidad este, el frente de deformación del Boomerang se amortigua propagandose hacia el centro de la cuenca paleozoica.

Entonces, se puede interpretar la zona de transferencia del Boomerang como un conjunto de estructuras cuya deformación fue controlada por el borde septentrional de una cuenca paleozoica oblicua en relación a la dirección regional de acortamiento. A 200 kilometros al Este del Boomerang, este borde aflora (Pareja and Ballon, 1978 ) y continua según una dirección WNW-ESE. Al oeste del Boomerang, esta desaparece bajo el cabalgamiento frontal del "Tope" del Chapare.

## **ACERCAMIENTO EXPERIMENTAL:**

### **Descripción del modelo:**

Para testar la interpretación del origen de la zona del Boomerang, forzar las condiciones a los límites y estudiar la secuencia de propagación de los cabalgamientos, hemos efectuado una serie de modelizaciones analógicas visualizadas en 3D por scannerización.

Esas experiencias constituyeron en construir modelos gravitatorios deformados progresivamente al interior de la caja de acortamiento "Structurator" puesto en punto por el IFP (pl. 7). La norma y los detalles tecnicos de este tipo de modelización y de su analisis en 3D por scannerización estan descritos en Coletta et al. (1991).

El fondo de la caja de acortamiento fue modificada de manera que se reproduzca la cuña sedimentaria paleozoica de la zona del Boomerang (fig. 6) y sus relaciones geométricas con la dirección regional del acortamiento. Por eso, hemos concebido un zócalo de madera (pl. 8) que representa el substratum cambrico o precambrico de la cuenca paleozoica. Ese zócalo, puesto en el centro de la caja (pl. 7), ha permitido simular tres tipos de borde de cuenca : un borde tal como lo hemos definido en la zona del Boomerang, es decir con una pendiente de 10° y orientada oblicuamente en relación a la

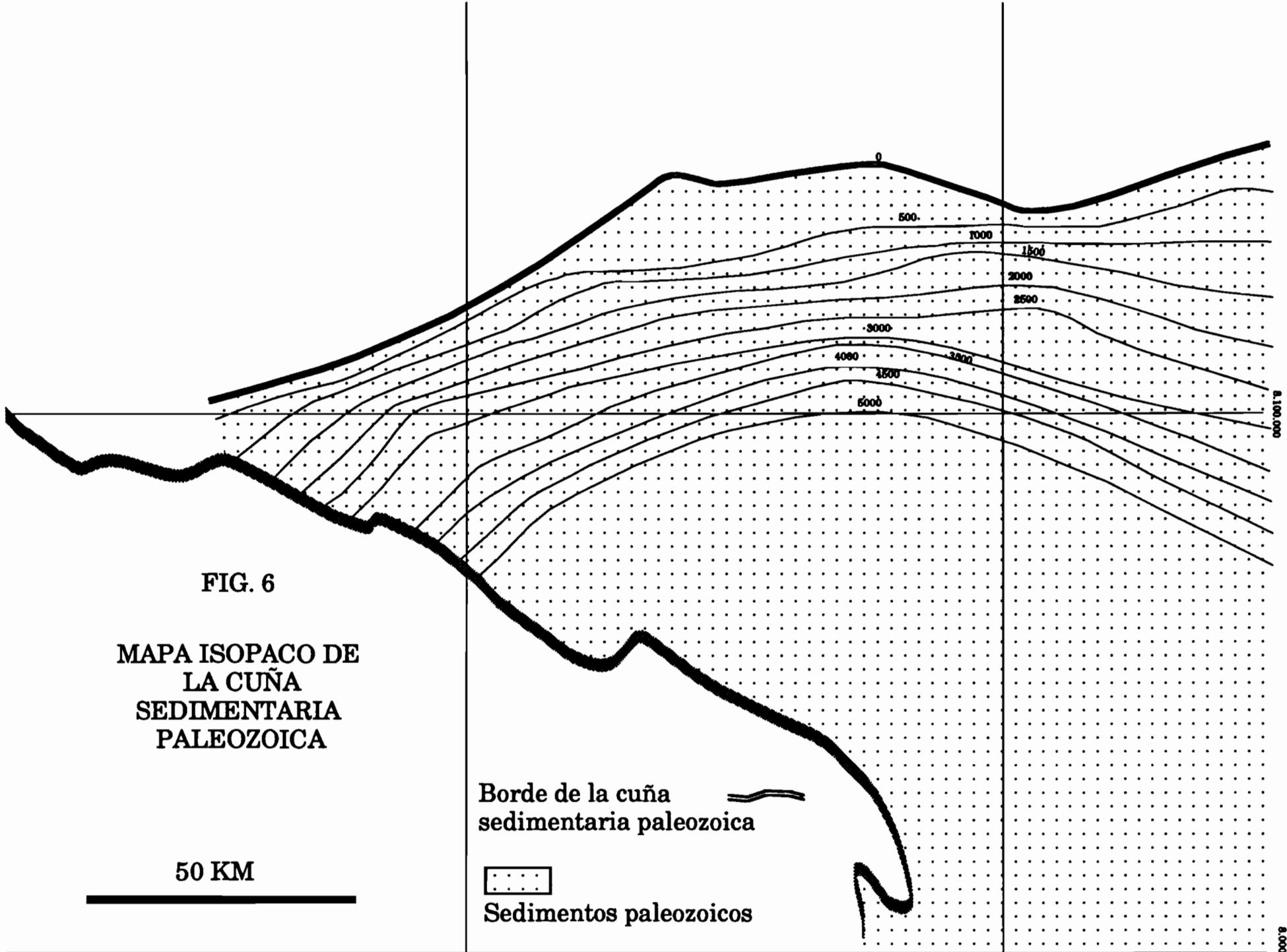


FIG. 6

MAPA ISOPACO DE  
LA CUÑA  
SEDIMENTARIA  
PALEOZOICA

50 KM

Borde de la cuña  
sedimentaria paleozoica



Sedimentos paleozoicos

375.000

475.000

8.100.000

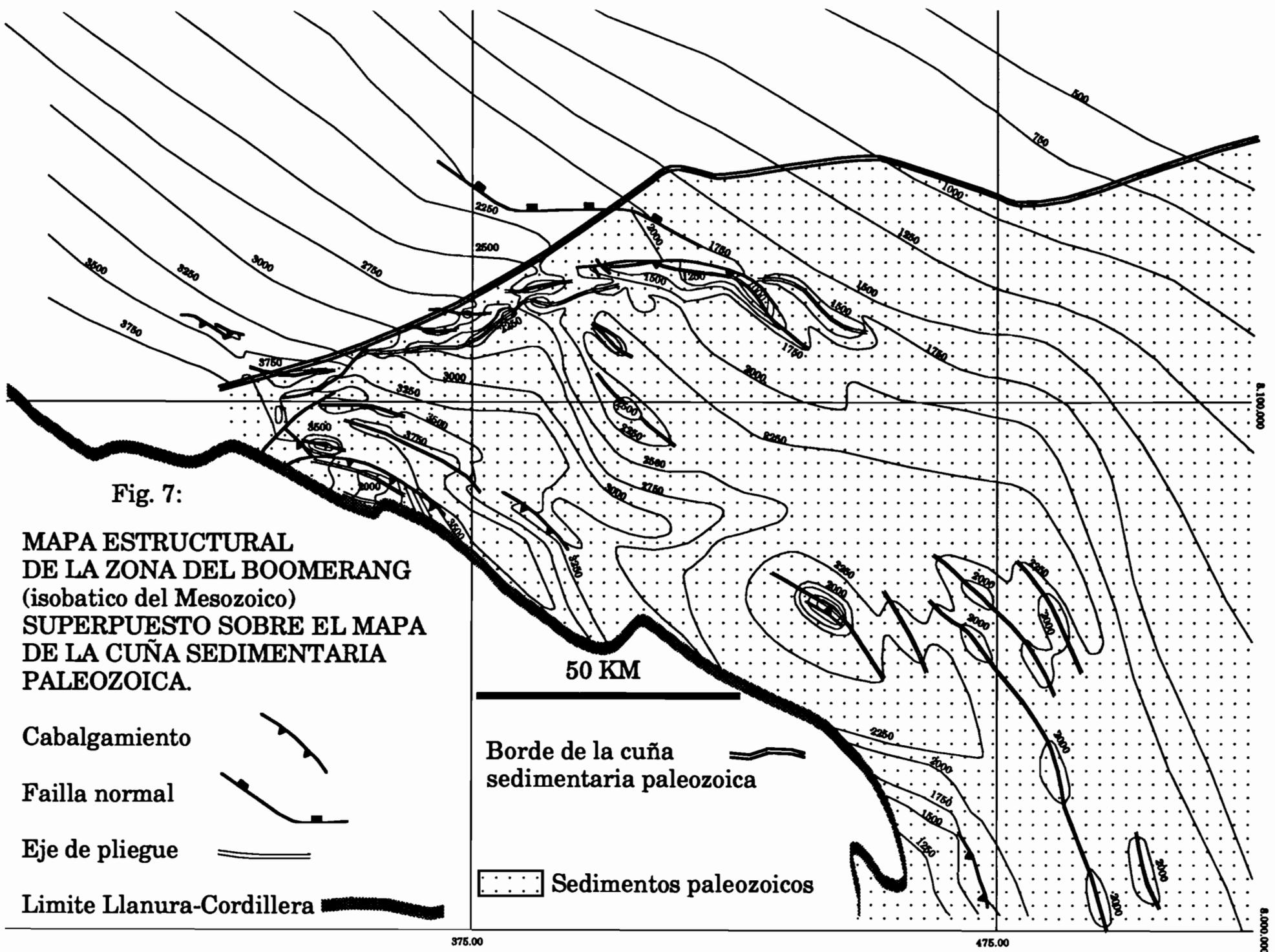


Fig. 7:

**MAPA ESTRUCTURAL  
DE LA ZONA DEL BOOMERANG  
(isobatico del Mesozoico)  
SUPERPUESTO SOBRE EL MAPA  
DE LA CUÑA SEDIMENTARIA  
PALEOZOICA.**

Cabalgamiento



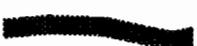
Failla normal



Eje de pliegue



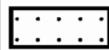
Limite Llanura-Cordillera



Borde de la cuña  
sedimentaria paleozoica



Sedimentos paleozoicos



375.00

475.00

8,000,000

8,100,000

dirección de acortamiento ( $40^\circ$ ); un segundo borde que prolonga el anterior, idéntico en corte pero orientado perpendicularmente a la dirección de acortamiento, tal como se lo puede imaginar debajo del cabalgamiento frontal del "Tope" del Chapare (fig. 2 y 3C); un tercer borde que corta el anterior, vertical y paralelo a la dirección de acortamiento, destinado en general el límite NW del "Tope" del Chapare (fig. 2). En la parte inclinada de este zócalo, la cuña paleozoica fue reproducida con la ayuda de tres niveles que hemos extendido en el fondo de la caja sobre un espesor igual a la altura del zócalo. Esos tres niveles corresponden a : una capa de polvo de vidrio, una capa de arena y, en la base, una capa delgada de silicona o de microbolas para simular el nivel de despegue de la intersuperficie Paleozoico-Cámbrico o Paleozoico-Precámbrico. La parte plana del zócalo de madera ha sido cubierto de papel de vidrio para marcar la ausencia del nivel de despegue al norte de la cuenca paleozoica. El conjunto (parte plana del zócalo y cuña sedimentaria ) fue cubierto por una última capa de arena que representa los sedimentos mesozoicos sellando la cuña paleozoica.

El conjunto de este modelo está representado en la figura 8.

### **Resultados :**

Varios experimentos fueron realizados : tres con silicona y una con microbolas.

Los tres experimentos con silicona que fueron realizados cada uno con una velocidad diferente (1 cm/h; 2 cm/h y 4 cm/h), han dado la formación de una rampa lateral que se propaga casi instantáneamente de un lado al otro de la caja sobre el borde de la cuña sedimentaria. Se necesitó utilizar la microbola para obtener la propagación de una rampa lateral comparable geoméricamente a aquella del Boomerang. Vamos a presentar entonces aquí solamente los resultados y la interpretación de este último experimento.

La modelización con microbolas fue realizada con una velocidad de 4 cm/h durante una duración de 56 mn. Dos estadios de deformación fueron estudiados en 3D por scannerización.

### **Estadio 27 mn., o sea 6,8% de acortamiento:**

Este estadio de deformación fue estudiado en detalle, pues en

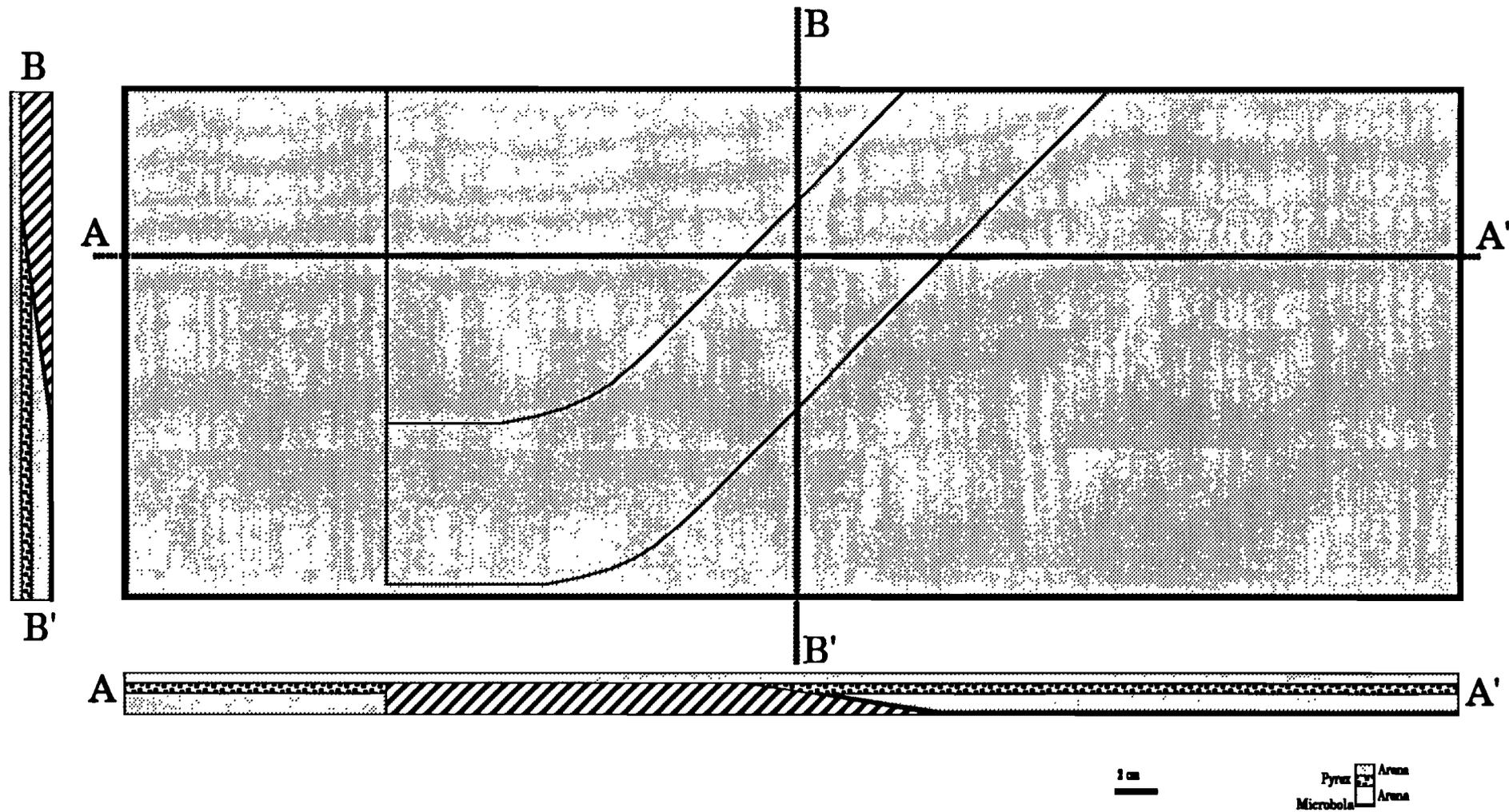


Fig. 8: Dispositivo del modelo analógico.

superficie (lámina 9), el modelo presenta una estructura muy comparable a la zona de transferencia del Boomerang (fig. 5). En efecto, con este estadio de deformación, se obtiene en el centro del modelo (lámina 10A) una rampa lateral que hace un ángulo de más o menos 40° con la dirección de acortamiento. De igual manera que en la zona del Boomerang (fig. 5), esa rampa lateral se amortigua bruscamente en su parte más externa con una rampa frontal. A partir de la rampa lateral otras rampas frontales se han propagado al interior de la zona de transferencia. La visualización en 3D por scannerización (lámina 11) confirma esa geometría cartográfica. Muestra también que la rampa lateral se desarrolló sobre el borde de la cuña sedimentaria, y que las rampas frontales asociadas a la zona de transferencia se han desarrollado al interior de la cuña sedimentaria. En el corte, las estructuras asociadas a la zona de transferencia (corte C-C, lámina 11) difieren de las otras estructuras (corte B-B, lámina 11). Por una parte, tenemos dos pliegues por flexión de falla que evolucionaron en "pop-up" (corte C-C, lámina 11) y, por otra parte (corte B-B, lámina 11), un pliegue por flexión de falla escamado.

La extremidad superior del modelo (lámina 10B) se caracteriza por una segunda zona de transferencia de acortamiento mucho menos marcada. En efecto, se nota un pequeño rechazo del frente de deformación que se hace por intermedio de pequeñas rampas laterales. Esta segunda zona de transferencia se desarrolló en la zona donde hemos hecho desaparecer bruscamente la cuña sedimentaria.

Las dos zonas de transferencia están separadas por una rampa frontal, caracterizada por un indicio de acortamiento relativamente importante, que se desarrolló sobre la porción del borde de la cuña sedimentaria perpendicular a la dirección de acortamiento.

#### Estadio 56 mn., o sea 14% de acortamiento:

Después de haber visto que con el estadio 27 mn. se formaban dos tipos de zonas de transferencia sobre el modelo, nos ha parecido interesante proseguir el experimento para seguir la evolución de esas estructuras oblicuas. En el estadio 56 mn., con dos veces más de acortamiento que en el estadio 27 mn., las dos zonas de transferencia están intensamente desarrolladas (lámina 12). La importante rampa lateral que se amortiguaba durante el estadio 27 mn. por una rampa frontal, siguió en propagarse sobre

el borde de la cuña sedimentaria antes de transformarse en una importante rampa frontal que alcanza el borde de la caja (lámina 13A). La visualización de 3D por scannerización muestra que las estructuras asociadas a toda la zona oblicua son "pop-up" (corte C-C, lámina 15).

La segunda zona de transferencia (lámina 13B) es mucho más desarrollada que en el estadio 27 mn. y aparece nítidamente. Se trata de una zona oblicua que hace un ángulo de 45° con la dirección de acortamiento. A la inversa de la primera, esta controlada por la desaparición brusca del borde de la cuña sedimentaria y no por el borde mismo. La visualización en 3D por scannerización muestra que esta constituida por dos rampas laterales que evolucionan en rampas frontales (lámina 16). Las estructuras asociadas son pliegues por flexión de falla que evolucionan en "pop-up" (corte B-B, lámina 16). Los cortes longitudinales D-D, E-E y F-F (lámina 16) ponen en evidencia el buzamiento bajo de esas rampas laterales y el control de la deformación por el zócalo.

Las relaciones entre las dos zonas de transferencia están ilustradas en la lámina 14. Esas dos zonas oblicuas están separadas por una zona de deformación frontal rectilínea y estrecha y presenta un indicio de acortamiento relativamente elevado. La visualización por scannerización muestra que, en aquel estadio de la modelización, la deformación se extendió más allá del borde de la cuña sedimentaria con el desarrollo de una nueva escama sobre la parte plana del zócalo (cortes B-B., lámina 15 y C-C, lámina 16).

#### Cronología de la deformación:

Para entender mejor los mecanismos de la deformación de una zona de transferencia "tipo Boomerang", hemos analizado la cronología de la propagación de los cabalgamientos. Fotos tomadas durante diferentes estadios de la deformación que ponen en evidencia varias etapas de propagación de la rampa lateral (lámina 17).

En un primer estadio (hasta 18 mn., 4,5% de acortamiento), la rampa lateral se extiende sobre la mitad del borde de la cuña sedimentaria antes de amortiguarse lateralmente por una rampa frontal al interior de la cuña sedimentaria. Un retro-cabalgamiento asociado al sistema de la rampa lateral se forma paralelamente y da origen de un "pop-up". Entre 18 y 27 mn. (4,5% y 6,8% de acortamiento), la rampa lateral deja de funcionar, se

desarrolla entonces detrás de ésta un cabalgamiento frontal que cubre en parte el "pop-up" (propagación "out of sequence"). De 27 mn. a 39 mn. (6,8 a 9,8% de acortamiento), la rampa lateral empieza a funcionar y a extenderse sobre el borde de la cuña sedimentaria . A partir de 39 mn. (9,8% de acortamiento), este evoluciona lateralmente en rampa frontal hasta el final de la modelización. Sigue formándose en paralela un retro-cabalgamiento, y como consecuencia un "pop-up".

## **DISCUSION:**

Se analiza aqui los principales resultados de la modelización.

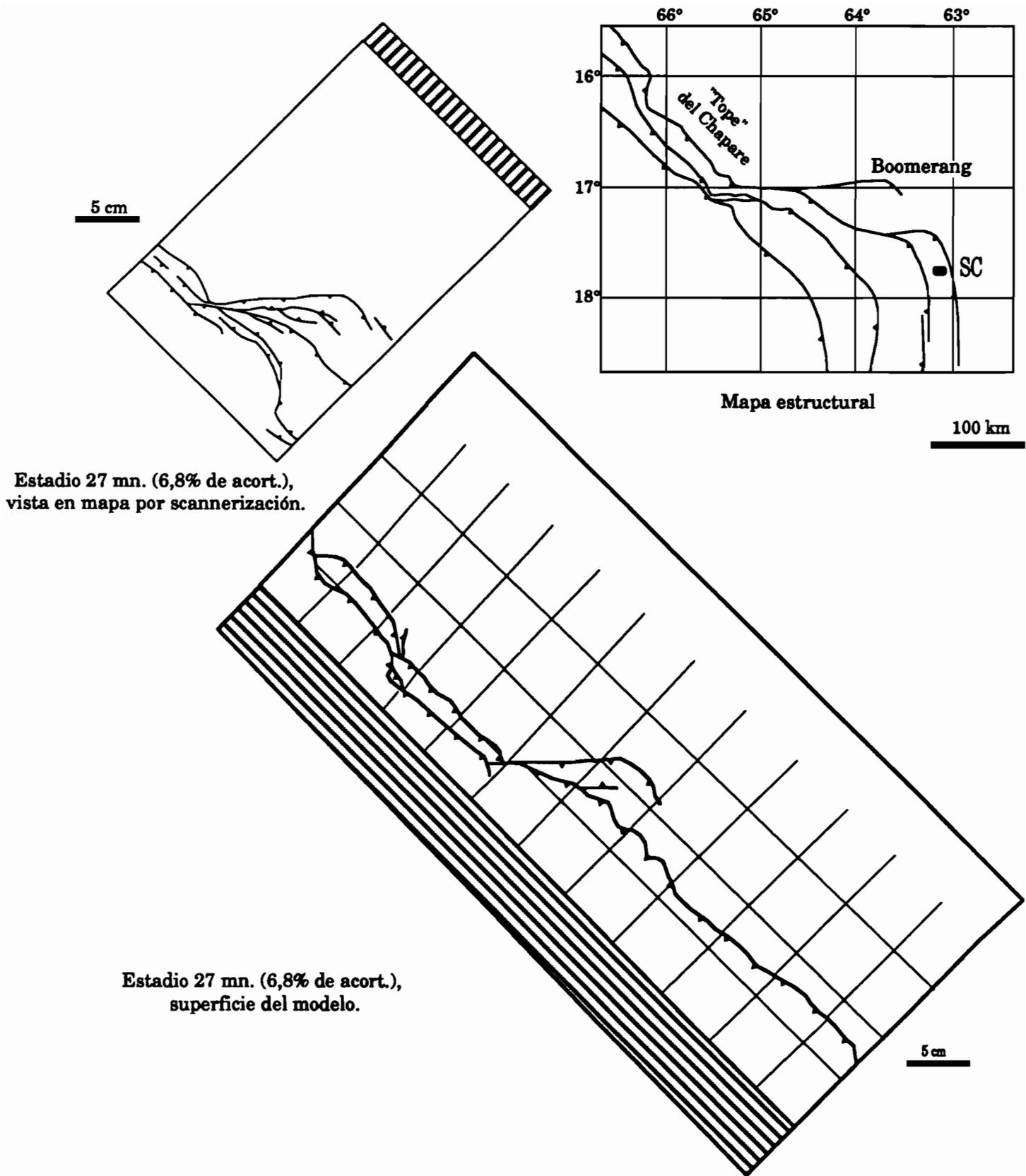
### **Microbolas y silicona:**

La propagación de una rampa lateral comparable con aquella del Boomerang no ha podido ser modelizada con la silicona, ni siquiera con una velocidad muy baja. La microbola sola parece poder simular el nivel de despegue de la zona del Boomerang. Esto se explica muy bien cuando se observa la litología de la cuña sedimentaria paleozoica de la zona del Boomerang (fig. 4). Los niveles de despegue potenciales corresponden a las lutitas, es decir a un tipo de roca que simula la microbola con su ángulo de fricción interna de 20° (Coletta et al., 1991). Por el contrario, la silicona esta utilizada en general para reproducir deformaciones viscosas y simular, entonces, rocas tal como la sal (Malavielle, 1984; Cobbold et al., 1989) que no existen en el Paleozoico de la zona del Boomerang.

### **Estadio 27 mn:**

En el mapa, es el estadio de la modelización que corresponde más a lo que se puede observar en el Subandino del Codo de Santa Cruz (fig. 9).

Por una parte, se nota (fig. 10A) que se llego a modelizar una zona de transferencia idéntica a aquella del Boomerang y, por otra parte, que el indicio de acortamiento es muy bajo (6,8%) y comparable en aquel calculado en la zona del Boomerang (4%). Como ya lo hemos mostrado, el frente de esta zona de transferencia es una rampa lateral que se amortigua bruscamente a su extremidad más externa transformándose en rampas frontales. Al



**Fig. 9: Comparación en mapa del estadio 27 mn. de la modelización al Subandino del Codo de Santa Cruz.**

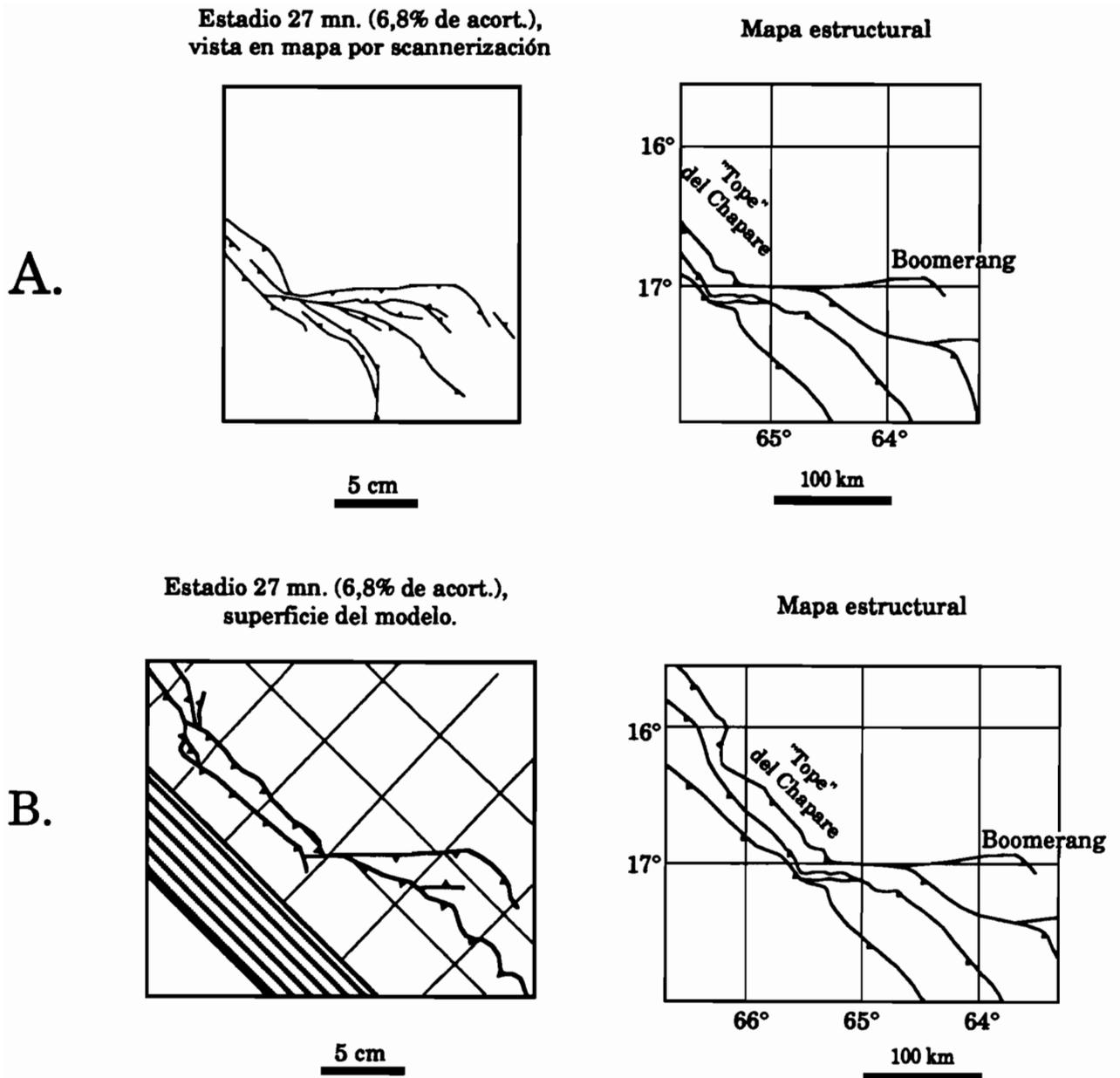


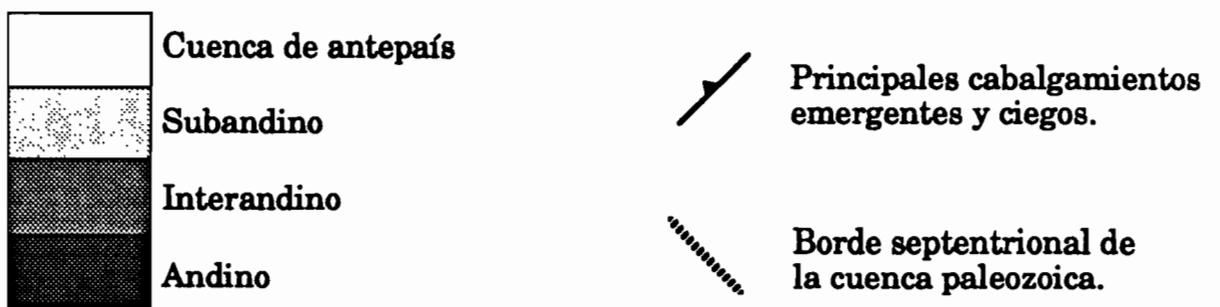
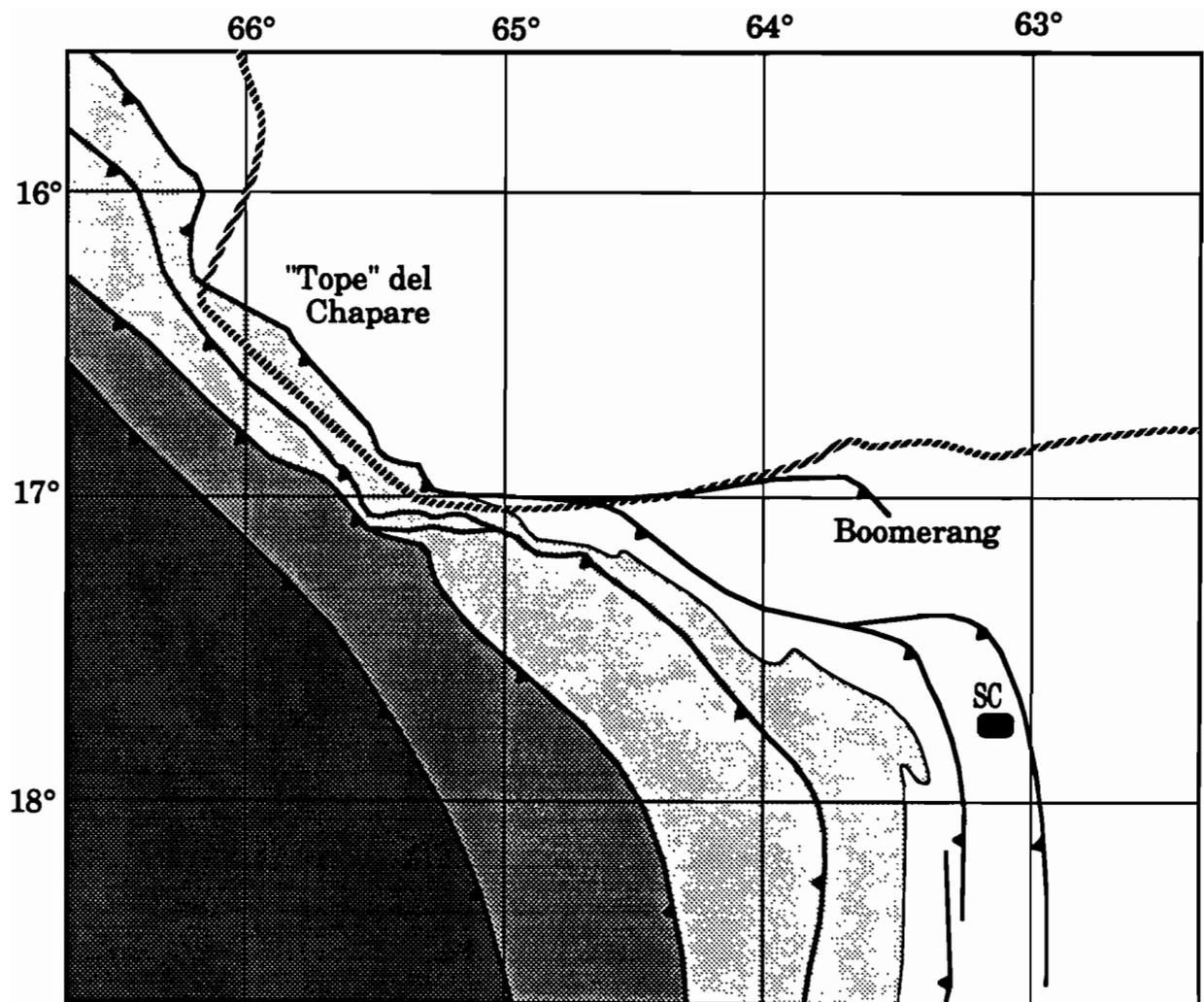
Fig. 10:

A. Comparación de la vista en mapa por scannerización de la rampa lateral obtenida en el estadio 27 mn. de la modelización con el mapa estructural de la zona del Boomerang;  
 B. Comparación de la superficie del modelo en el estadio 27 mn. con el mapa estructural del Subandino del Codo de Santa Cruz.

interior de la zona de transferencia, otras rampas frontales se extienden a partir de la rampa lateral. Esta zona de transferencia y sus características constituyeron el punto esencial de nuestro estudio. El hecho de que ayamos logrado la modelización a partir de la interpretación que hemos deducido de los datos de pozo y sísmica proporcionados por YPF (ver más arriba) muestra que esta interpretación es viable. Entonces se puede concluir que la zona de transferencia del Boomerang es ciertamente la consecuencia del control de la deformación andina por el paleoborde septentrional de una cuenca paleozoica, oblicua en relación a la dirección del acortamiento.

En una escala más regional (fig. 10B), se nota también una similitud del conjunto del frente de deformación. En efecto, la continuidad septentrional de la zona de transferencia del Boomerang, que forma el "Tope" del Chapare, aparece igualmente en la modelización. En esta parte del modelo, el frente de deformación no hizo otra cosa que seguir el borde de la cuña sedimentaria impuesto por nuestra interpretación que se encuentra aquí mucho más especulativa (falta de datos de sub -superficie). Se sabía solamente que el borde de la cuenca paleozoica desaparecía bajo el frente de cabalgamiento y, entonces, se tuvo que especular sobre el trazado de este borde para intentar la modelización. El hecho de haber logrado la modelización a partir de esta especulación muestra que la interpretación es viable. Se puede, entonces, deducir que el control de la deformación andina, a través del paleoborde septentrional de la cuenca paleozoica, es probablemente la que se persigue al nivel del "Tope" del Chapare, y entonces la geometría dada arbitrariamente en esta parte del paleoborde es posible. Se puede, entonces, intentar colocar este paleoborde a la escala del Codo de Santa Cruz (fig. 11).

En corte (fig. 12), se nota aún importantes semejanzas. En la zona del Boomerang como en el modelo, el frente de la rampa lateral está formado (salvo en su parte más externa) por dos estructuras anticlinales muy juntas, que pueden evolucionar en "pop-up". Se nota entonces una importante concentración de la deformación sobre el borde de la cuña sedimentaria. Esto confirma nuestra interpretación sobre el papel predominante de este borde en el desarrollo de la rampa lateral.



**Fig. 11: Trazado del borde de la cuenca paleozoica sobre el mapa estructural del Codo de Santa Cruz.**

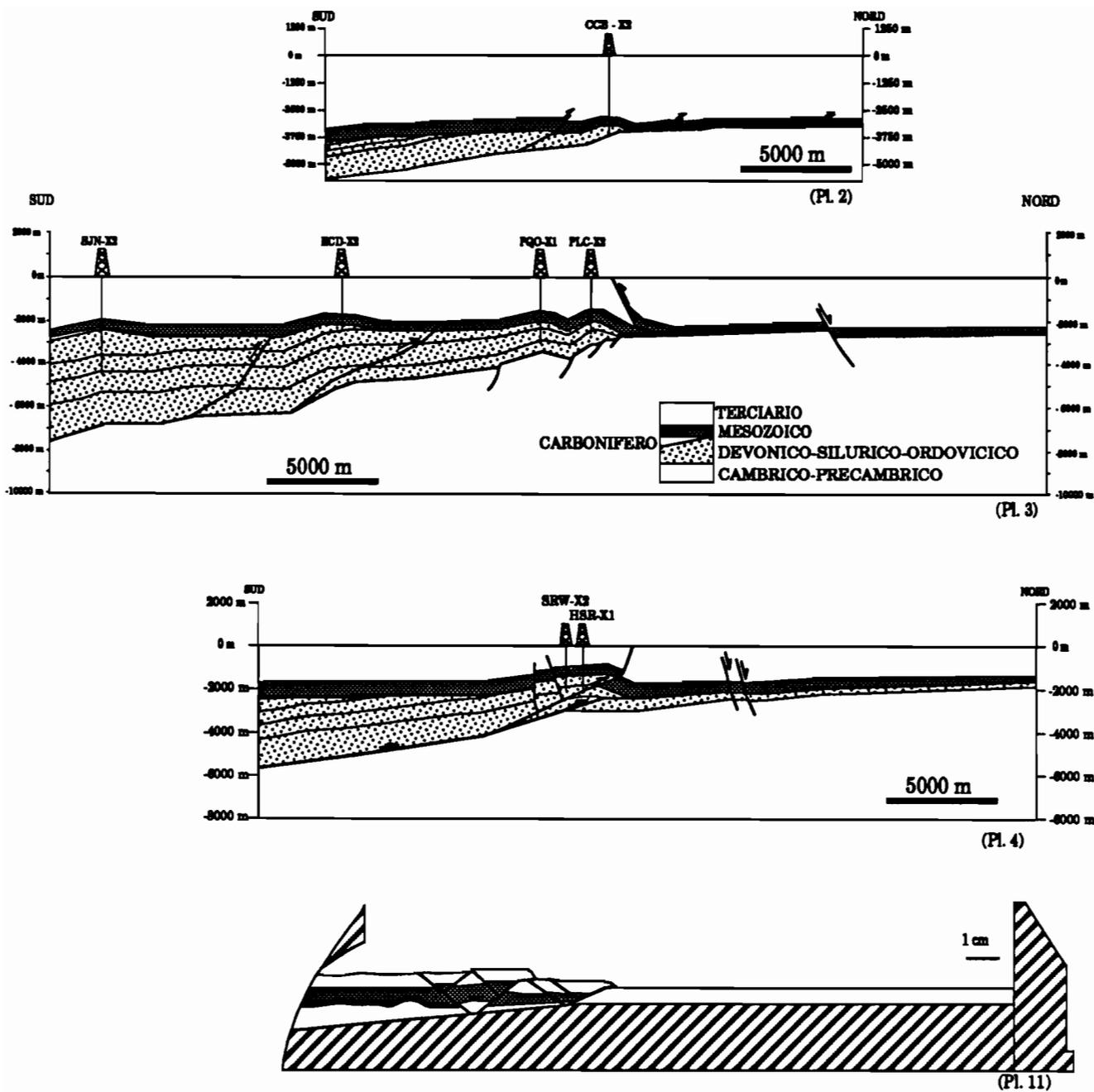


Fig. 12: Comparación en corte de la rampa lateral obtenida en el estadio 27 mn. de la modelización con la rampa lateral del Boomerang.

### **Estadio 56 mn:**

Aquí el indicio del acortamiento es mucho más elevado (14%) que en la zona del Boomerang (4%), es por lo tanto difícil comparar esta parte del Codo de Santa Cruz con este estadio de la modelización. En cambio, es interesante comparar este último con el estadio 27 mn. (láminas 9 y 12). Se constata un importante desarrollo de las dos zonas de transferencia en relación al tramo de cabalgamientos rectilíneos que los separa, pero la geometría de estas queda, lo mismo en su conjunto. Los mecanismos de la deformación de estas dos zonas de transferencia parecen constantes. Las rampas laterales continúan en propagándose de la misma manera; se terminan y se amortiguan en rampa frontal en su parte más externa.

### **Cronología de la deformación:**

El estudio cronológico de los cabalgamientos de la zona de transferencia, controlada por el borde de la cuña sedimentaria (lámina 17), nos muestra uno de los puntos más importantes de la modelización: la propagación no conforme ("out of sequence") de una rampa frontal al interior mismo de la zona de transferencia. En otros términos, en nuestro modelo, se ha conformado primero una rampa lateral que constituye en todo momento el frente de deformación, después una rampa frontal detrás de ésta.

Si se admite que nuestro modelo, que reproduce ya la geometría de los cabalgamientos de la zona del Boomerang, esta en medida de reproducir la secuencia de propagación de estos cabalgamientos, se puede muy bien imaginar que el anticlinal frontal de San Juan se ha formado posteriormente a la rampa lateral del Boomerang (cf. lámina 1 para localizaciones). Esto podría explicar que la estructura de San Juan sea seca a pesar de su geometría estructural muy favorable, y que prácticamente todas las estructuras de la rampa lateral del Boomerang producen hidrocarburos. En efecto, se puede interpretar este fenómeno considerando que los hidrocarburos que se encuentran actualmente al nivel de la rampa frontal, han migrado entre el desarrollo de esta última y el de la estructura de San Juan.

## **CONCLUSION:**

Los resultados de este estudio pueden ser considerados como positivos puesto que uno de los modelos ha reproducido geoméricamente no solamente el dispositivo estructural de la Zona del Boomerang, si no también el del "Tope" del Chapare. El papel predominante del borde septentrional de la cuenca paleozoica en la estructuración de los frentes de cabalgamientos del Codo de Santa Cruz parece así confirmarse. Es la oblicuidad de ciertos tramos de este borde en relación a la dirección de acortamiento andino que da origen a las zonas de transferencia que se encuentra de un lado al otro del "Tope" del Chapare.

En el caso de la zona del Boomerang, la influencia del borde de la cuenca paleozoica en la estructuración de la rampa lateral ha podido ser mostrada gracias a los datos sísmicos y de pozo. En el caso del "Tope" del Chapare y de la zona de transferencia que constituye su límite norte, donde los datos de sub-superficie son mucho más escasos, ha sido la modelización que nos permitió posteriormente comprender la geometría del borde de la cuenca paleozoica.

El otro punto esencial de este estudio es la puesta en evidencia, en la modelización de la zona del Boomerang, de una propagación "out of sequence" de las rampas frontales que se encuentran al interior de la zona de transferencia. Esto permite proponer una explicación en lo que concierne a la ausencia de hidrocarburos en algunas estructuras muy favorables. En efecto, los hidrocarburos podrían haber migrado, antes del desarrollo de esas estructuras internas, hacia las estructuras más externas de la rampa lateral del Boomerang.

## BIBLIOGRAFIA

Baby P., G. Hérail, J. M. Lopez, O. Lopez, J. Oller, J. Pareja, T. Sempere et D. Tufiño. 1989. Structure de la Zone Subandine de Bolivie : influence de la géométrie des séries sédimentaires antéorogéniques sur la propagation des chevauchements, *C. R. Acad. Sci.*, t. 309, S. II, p. 1717-1722.

Cobbold P., E. Rosselo, and B. Vendeville. 1989. Some experiments on interacting sedimentation and deformation above salt horizons, *Société Géologique de France, Bull.*, t. 8, v. 3, p. 453-460.

Coletta, B., J. Letouzey, R. Pinedo, J. F. Ballard and P. Balé. 1991. Computed X-ray tomography analysis of sandbox models : Examples of thin-skinned thrust systems, *Geology*, v. 19, p. 1063-1067.

López, J. M. 1974. Correlación estratigráfica longitudinal de la Faja Subandina entre las fronteras del Peru u Argentina, *Rep. 1906, Yacimientos Fiscales Petroliferos Bolivianos, Santa Cruz*.

Malavielle, J. 1984. Modélisation expérimentale des chevauchements imbriqués : Application aux chaînes de montagnes, *Société Géologique de France, Bull.*, v. 7, p. 129-138.

Martinez, C. 1980. Structure et évolution de la chaîne hercynienne et de la chaîne andine dans le Nord de la Cordillère des Andes de la Bolivie, *Trav. Doc. Orstom 119, 352 p., Paris*.

Oller, J. 1986. Consideraciones generales sobre la geología y estratigrafía de la Faja Subandina norte, *Thèse de l'Université mayor de San Andres, La Paz*, p. 120.

Pádua, E. L. 1959. valoración de las discordancias en las Sierras Subandinas, *Bull. Tech. Y.P.F.B.*, t. 1, p 7-28.

Pareja, J. et R. Ballón. 1978. Mapa geológico de Bolivia, échelle 1/1.000.000, *Yacimientos Fiscales Petroliferos Bolivianos and Geobol, La Paz*.

Sempere, T., G. Hérail, J. Oller and M. G. Bonhomme. 1990. Late Oligocene-Early Miocene major tectonic crisis and related basins in Bolivia, *Geology*, v. 18, p. 946-949.

## **LISTA DE LAS FIGURAS**

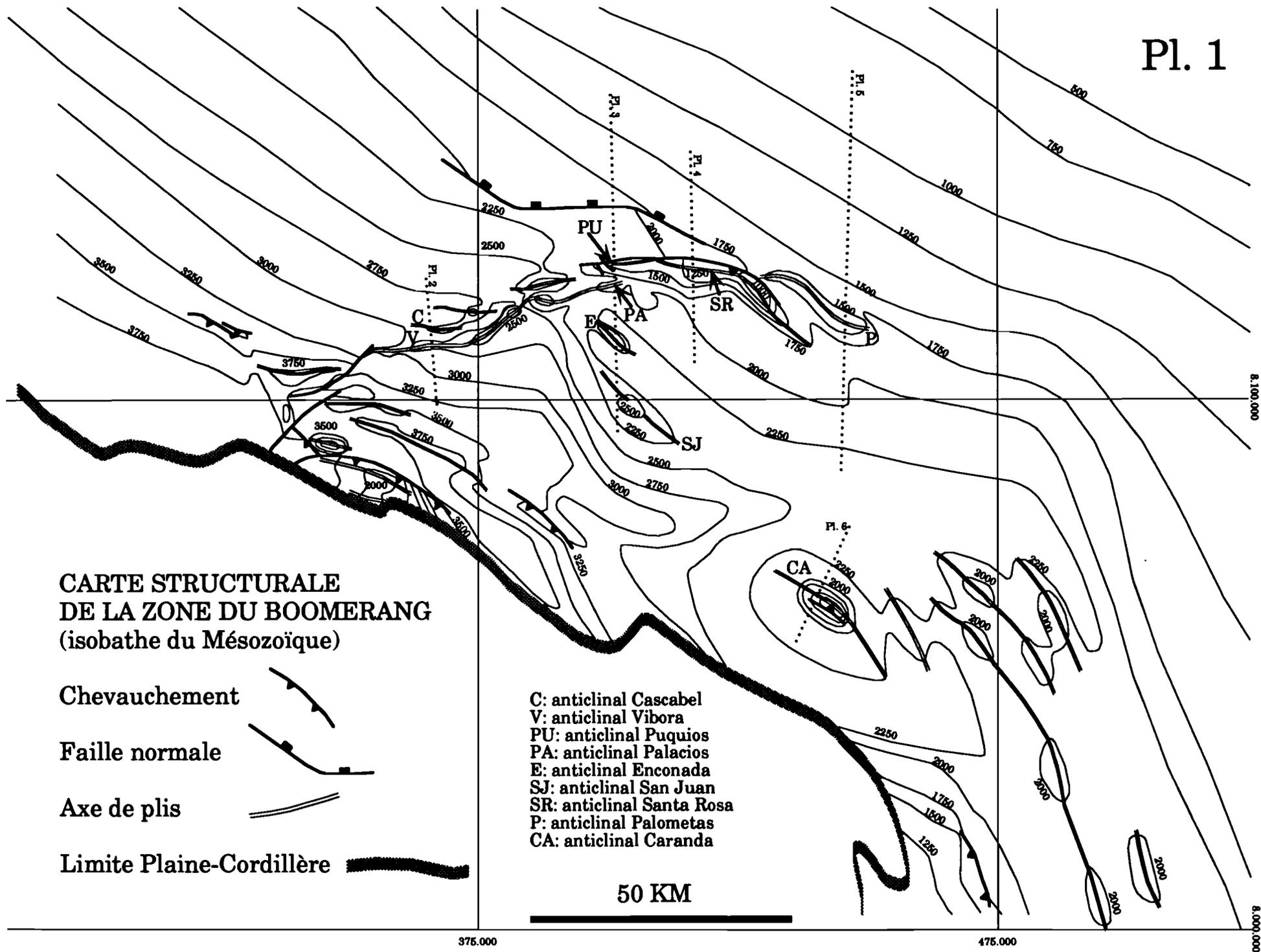
- Figura 1 : p- 2** Mapa tectónico de Bolivia y localización del Codo de Santa Cruz.
- Figura 2 : p- 3** Mapa estructural del Codo de Santa Cruz (localización en la fig.1).
- Figura 3 : p- 4** A. Corte estructural (equilibrado) a través del Subandino de la parte meridional del Codo de Santa Cruz (localización en la fig.2).  
B. Corte estructural (equilibrado) a través de la zona del Boomerang (localización en la fig. 2).  
C. Corte estructural (equilibrado) a través del "Tope" del Chapare (localización en la fig. 2).
- Figura 4 : p- 6** Estratigrafía y litología de la cuña sedimentaria de la zona del Boomerang (localización en la fig. 2).
- Figura 5 : p- 7** Mapa estructural de la zona del Boomerang : isobático del techo del Mesozoico (localización en la fig. 2).
- Figura 6 : p-10** Mapa isopaco de la cuña sedimentaria paleozoica de la zona del Boomerang.
- Figura 7 : p-11** Mapa estructural de la zona del Boomerang superpuesto sobre el mapa de la cuña sedimentaria paleozoica.
- Figura 8 : p-13** Dispositivo del modelo analógico.
- Figura 9 : p-17** Comparación en mapa del estadio 27 mn. de la modelización al Subandino del Codo de Santa Cruz.
- Figura 10 : p-18** A. Comparación de la vista en mapa por scannerización de la rampa lateral obtenida en el estadio 27 mn. de la modelización con el mapa estructural de la zona del Boomerang.  
B. Comparación de la superficie del modelo en el estadio 27 mn. con el mapa estructural del Subandino del Codo de Santa Cruz.
- Figura 11 : p-20** Trazado del borde de la cuenca paleozoica sobre el mapa estructural del Codo de Santa Cruz.
- Figura 12 : p-21** Comparación en corte de la rampa lateral obtenida en el estadio 27 mn. de la modelización con la rampa lateral del Boomerang.

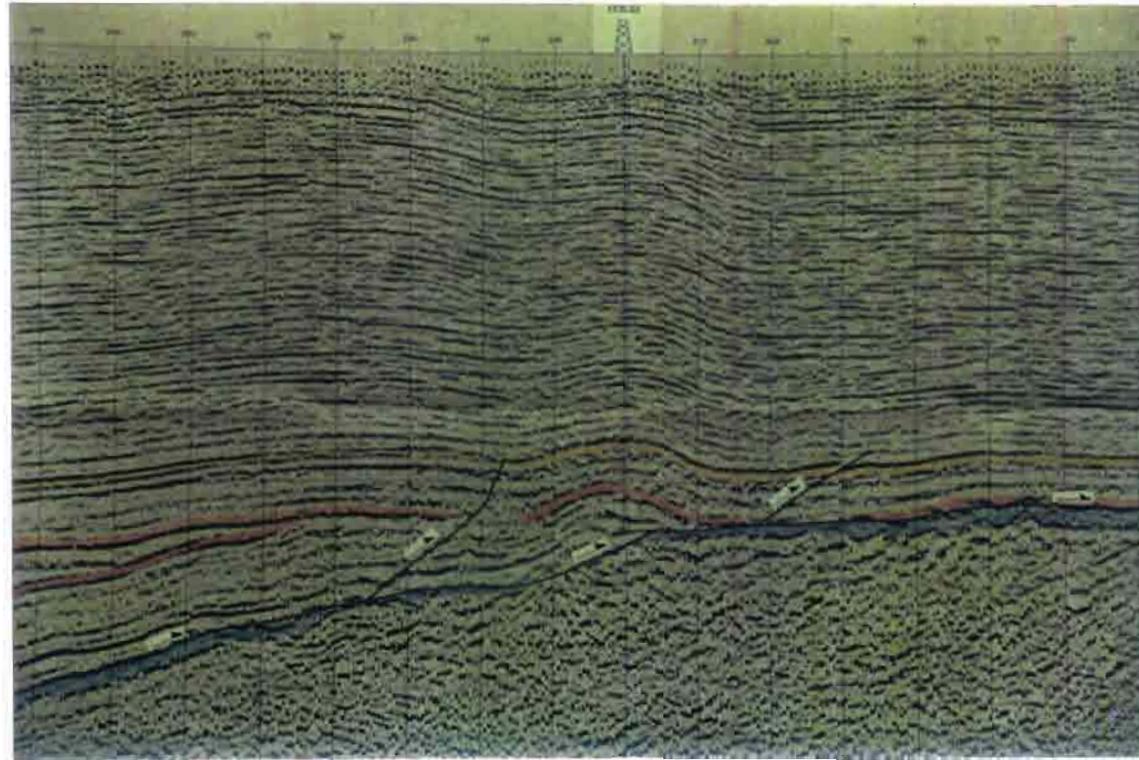
## **LISTA DE LAS LAMINAS**

- Lámina 1 :** Localización de los cortes estructurales de las láminas 2, 3, 4, 5 y 6 sobre el mapa estructural de la zona del Boomerang.
- Lámina 2 :** Sección sísmica y corte estructural a través de la rampa lateral del Boomerang : anticlinales Cascabel y Vibora (localización en la lámina 1).
- Lámina 3 :** Sección sísmica y corte estructural a través de la rampa lateral del Boomerang (anticlinales Palacios y Puquio) y las estructuras frontales de Enconada y San Juan (localización en la lámina 1).
- Lámina 4 :** Sección sísmica y corte estructural a través de la rampa lateral del Boomerang : anticlinal Santa Rosa (localización en la lámina 1).
- Lámina 5 :** Sección sísmica y corte estructural a través de la rampa frontal del Boomerang : anticlinal Palometas (localización en la lámina 1).
- Lámina 6 :** Sección sísmica y corte estructural a través de la estructura frontal de Caranda (localización en la lámina 1).
- Lámina 7 :** Foto A : Fondo de la caja de acortamiento ("Structurator").  
Foto B : Ubicación de la caja de acortamiento en el scanner.
- Lámina 8 :** Plano del zócalo de madera que simula el substratum de la cuña sedimentaria paleozoica de la zona del Boomerang.
- Lámina 9 :** Superficie del modelo analógico a 27 mn., o sea a 6,8% de acortamiento (foto e interpretación).
- Lámina 10 :** A : Foto e interpretación de la rampa lateral obtenida a 27 mn. (6,9% de acortamiento), localización en la lámina 9.  
B : Foto e interpretación de la segunda zona de transferencia obtenida a 27 mn. (6,9% de acortamiento), localización en la lámina 9.
- Lámina 11 :** 1 : Visualización en 3D por scannerización de la rampa lateral del estadio 27 mn. (6,9% de acortamiento), localización en la lámina 9.  
2 : Interpretación de la visualización en 3D por scannerización de la rampa lateral del estadio 27 mn.

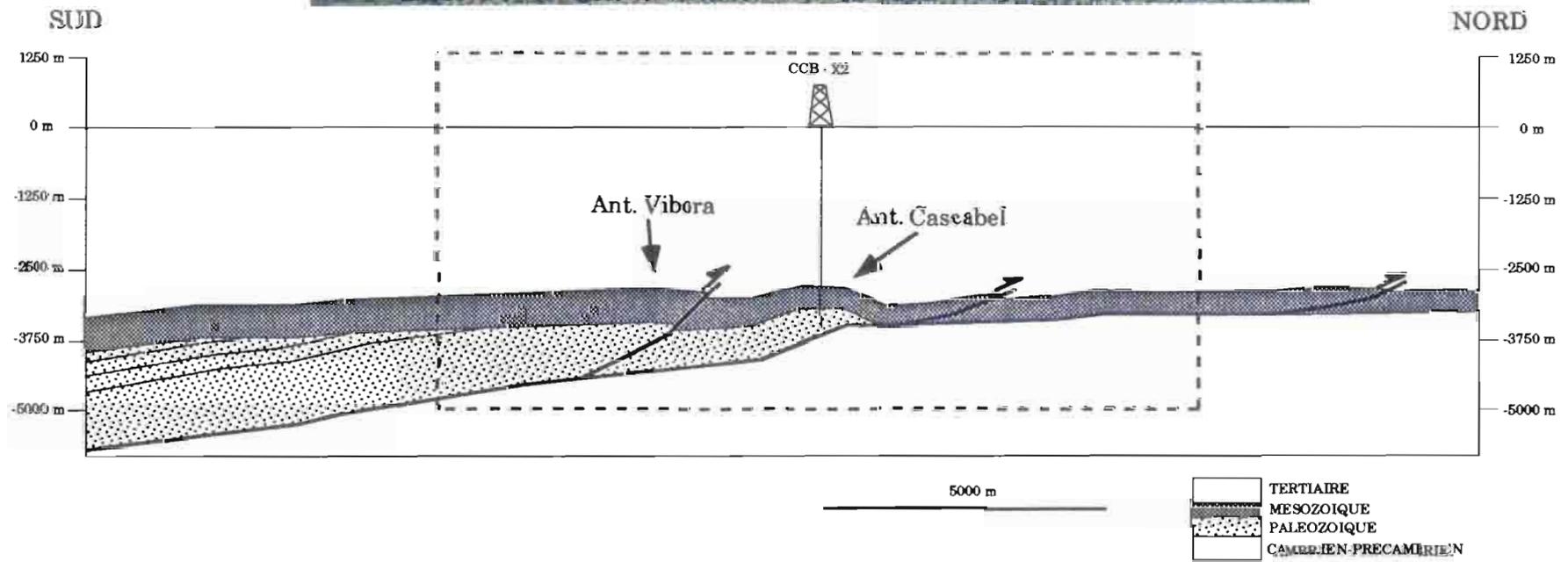
# **LAMINAS**

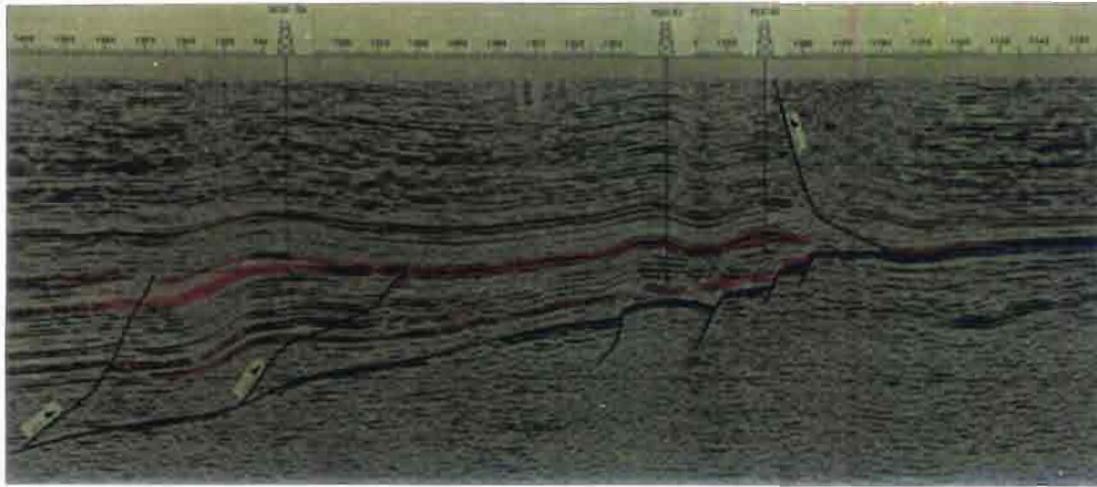
- Lámina 12 :** Superficie del modelo analogico a 56 mn., o sea a 14% de acortamiento (foto e interpretacion).
- Lámina 13 :** A : Foto e interpretación de la rampa lateral obtenida a 56 mn. (14% de acortamiento), localización en la lámina 12.  
B : Foto e interpretación de la segunda zona de transferencia obtenida a 56 mn. (14% de acortamiento), localización en la lámina 12.
- Lámina 14 :** Foto e interpretación de las relaciones entre las 2 zonas de transferencia del estadio 56 mn. (14% de acortamiento), localización en la lámina 12.
- Lámina 15 :** 1 : Visualización en 3D por scannerización de la rampa lateral del estadio 56 mn. (15% de acortamiento), localización en la lámina 12;  
2 : Interpretación de la visualización en 3D por scannerización de la rampa lateral del estadio 56 mn.
- Lámina 16 :** 1 : Visualización en 3D por scannerización de la segunda zona de transferencia del estadio 56 mn. (14% de acortamiento), localización en la lámina 12;  
2 : Interpretación de la visualización en 3D por scannerización de la segunda zona de transferencia del estadio 56 mn.
- Lámina 17 :** Cronologia de la propagación de cabalgamientos asociados a la rampa lateral : 1. tres fotos de 0 a 33 mn.; 2. tres fotos de 33 a 56 mn.



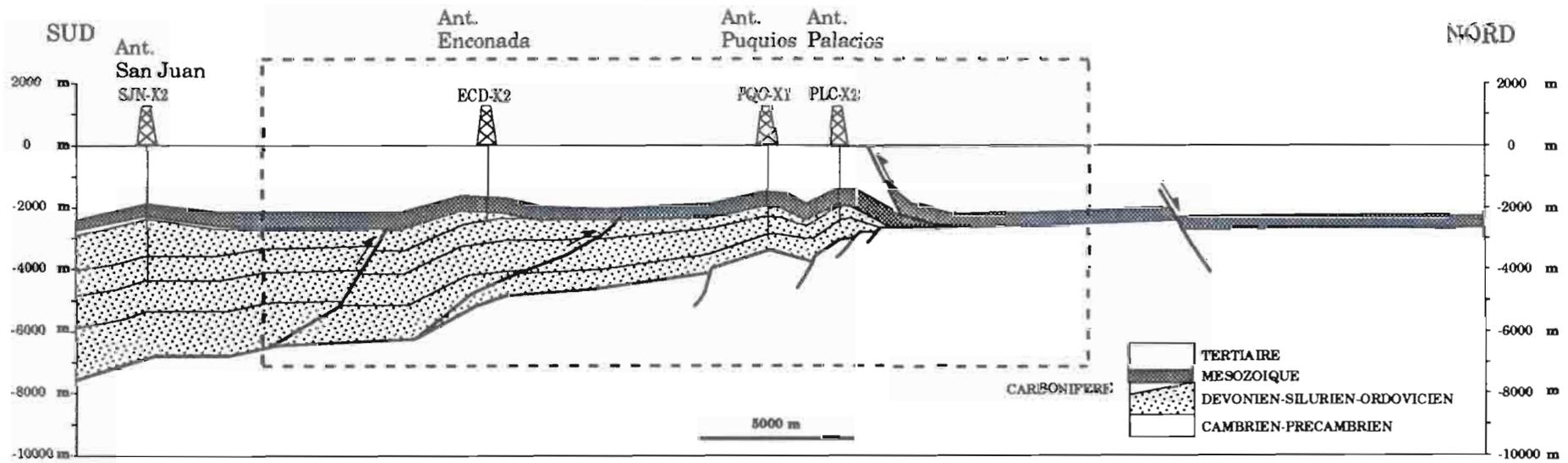


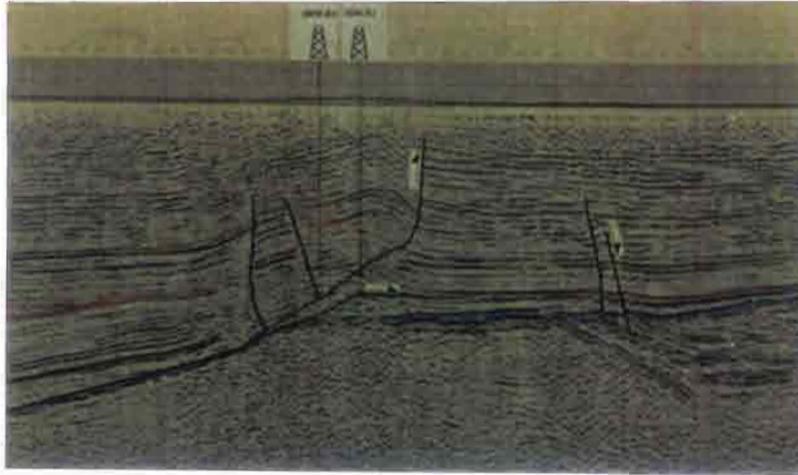
Pl. 2



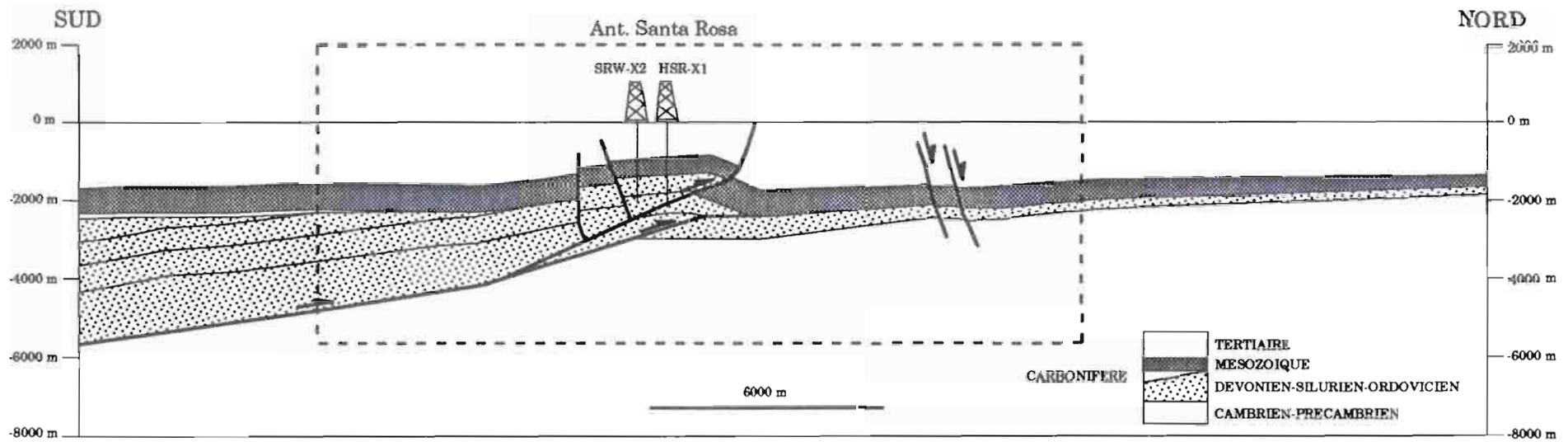


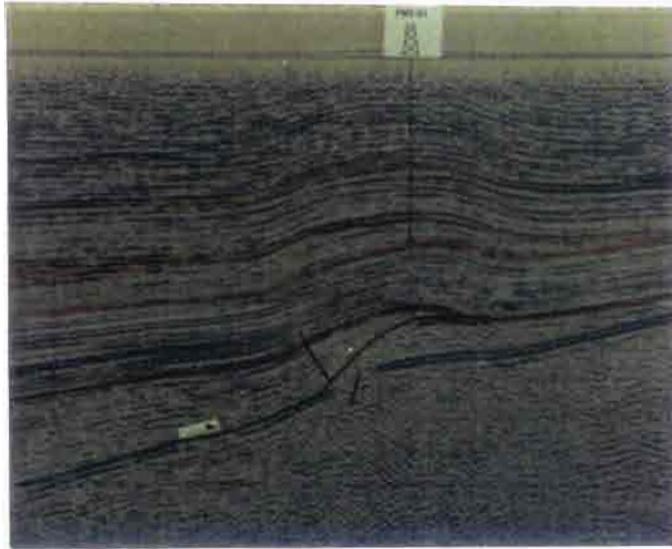
Pl. 3



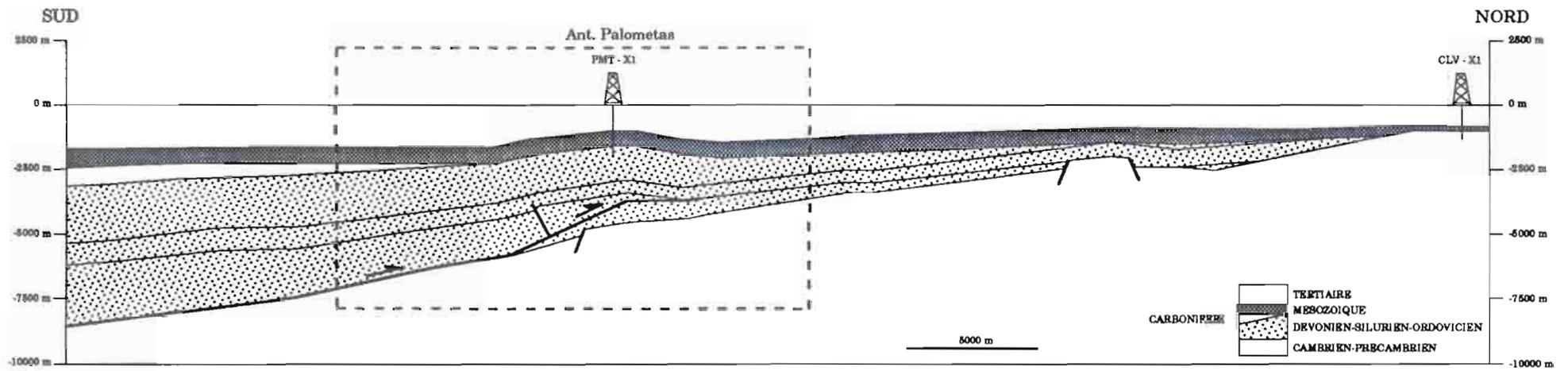


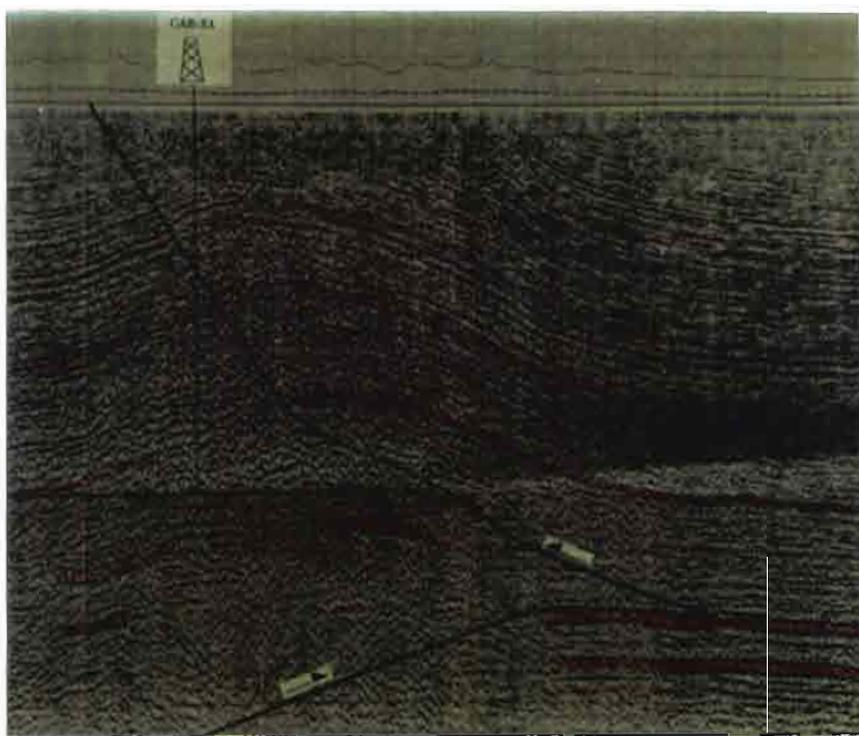
Pl. 4





Pl. 5





Pl. 6

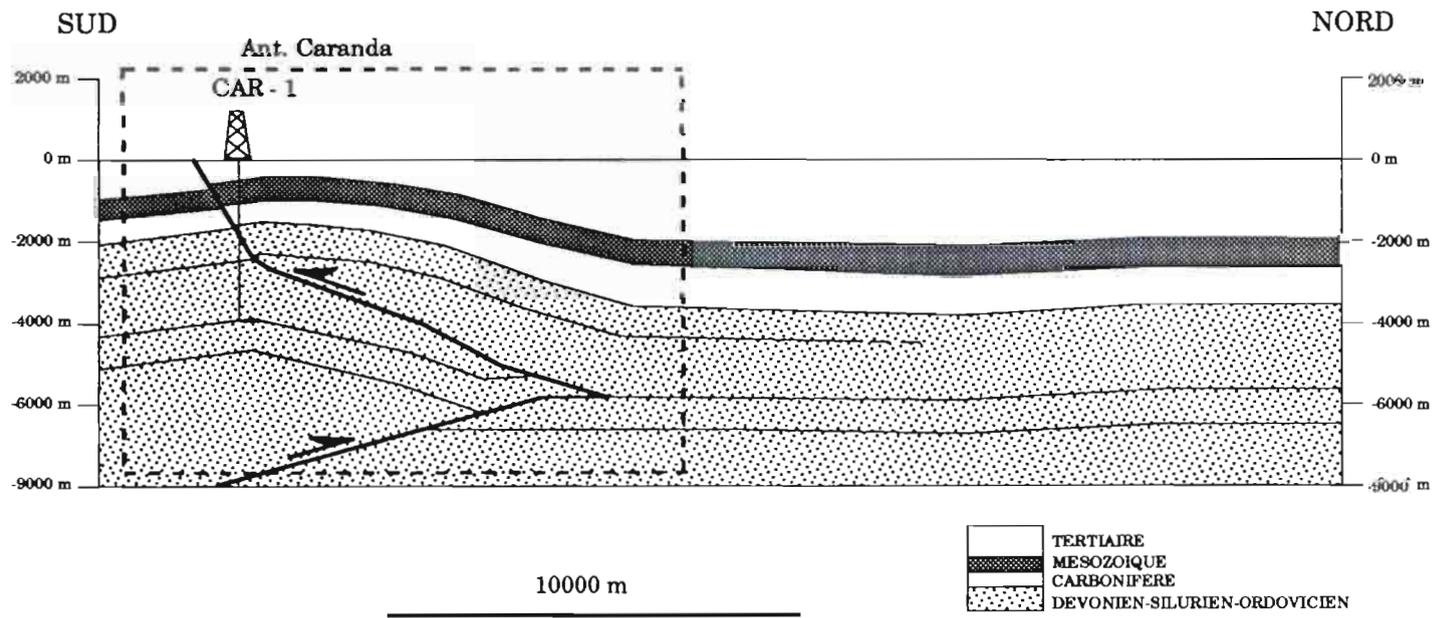


Photo A

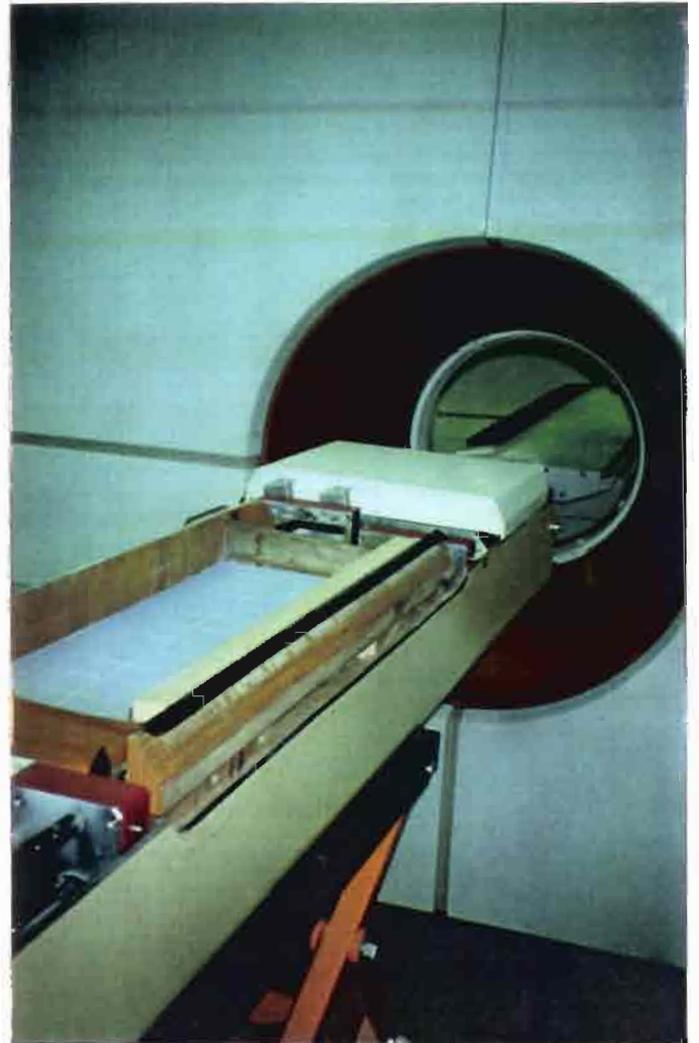
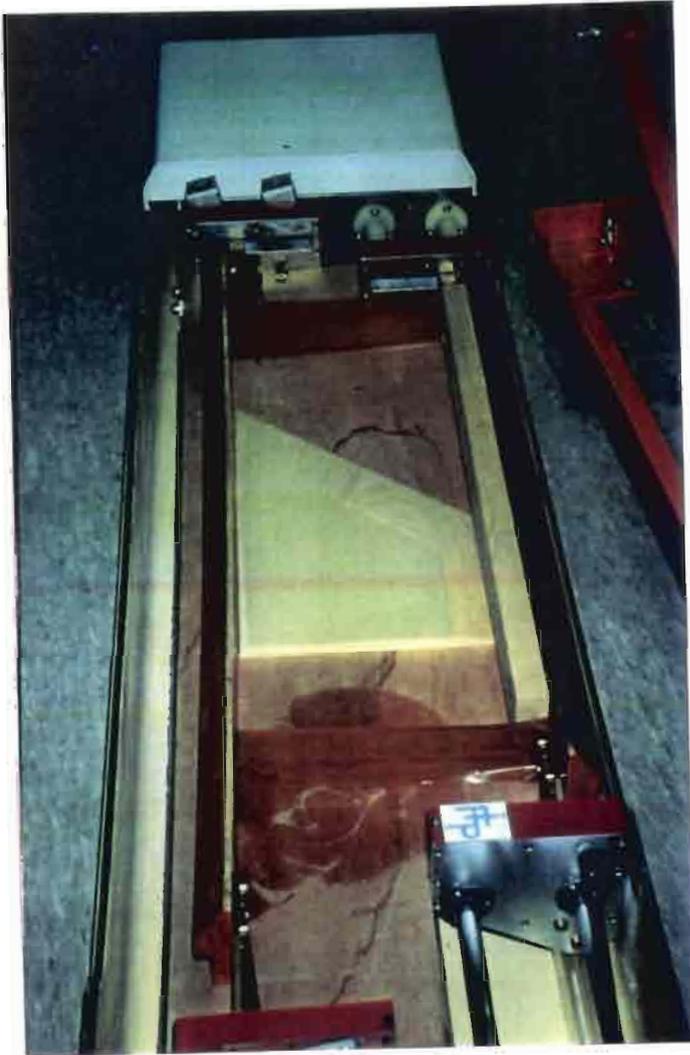
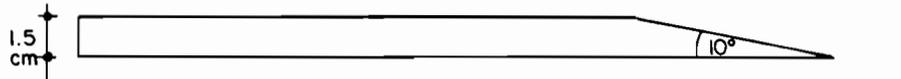
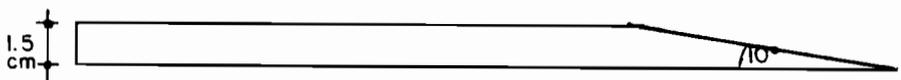
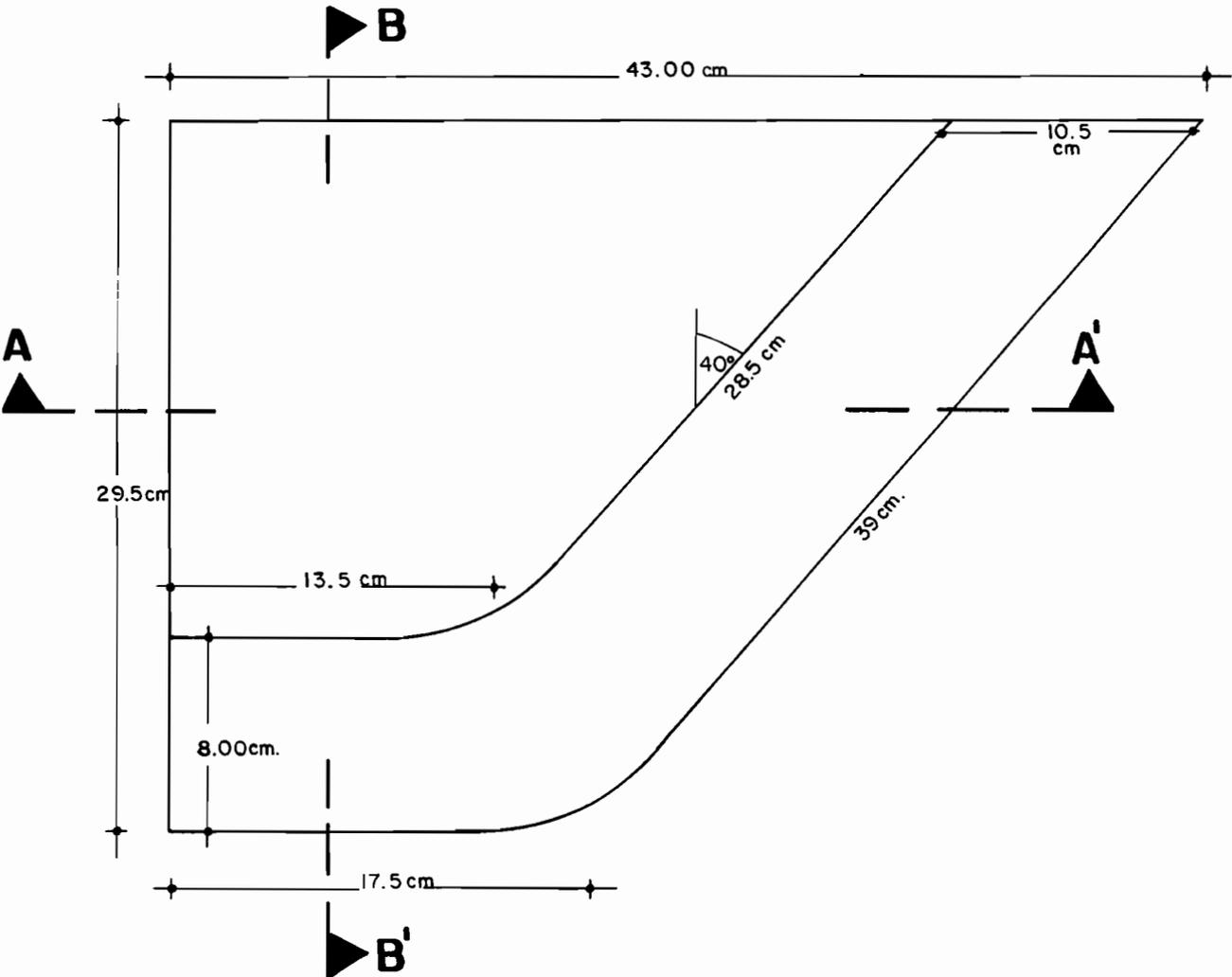
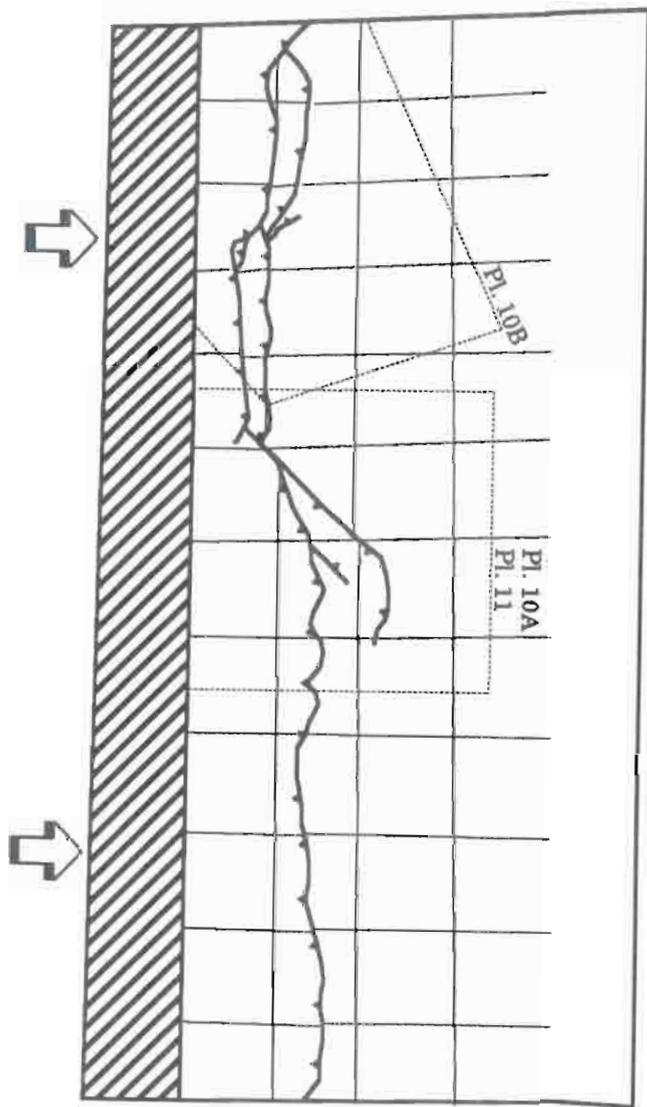


Photo B



# Pl. 9

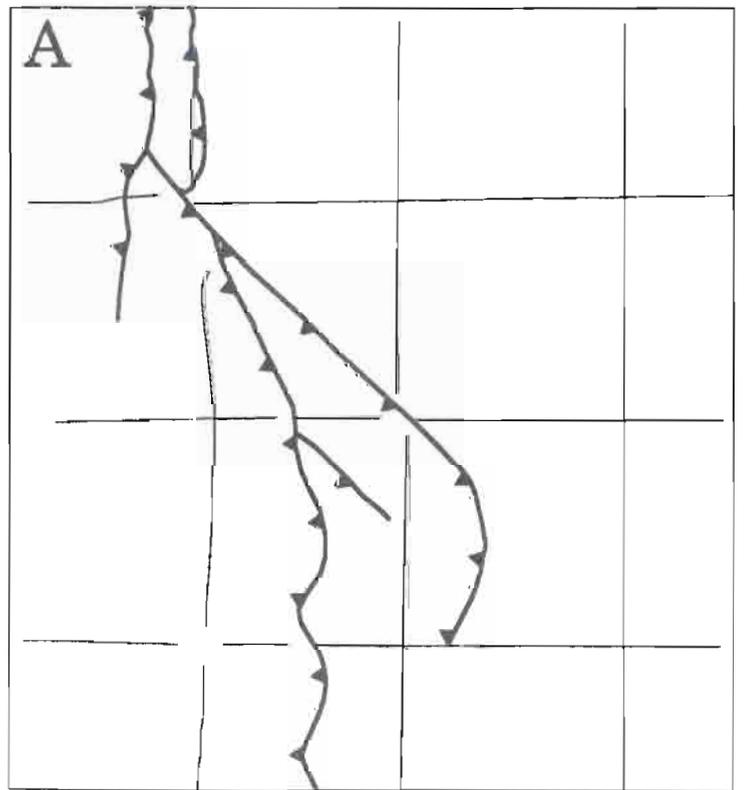
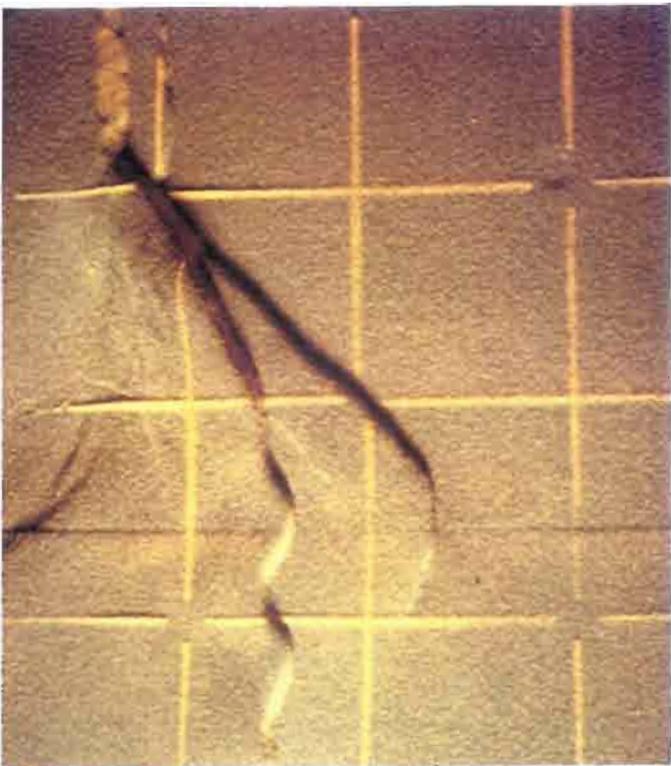
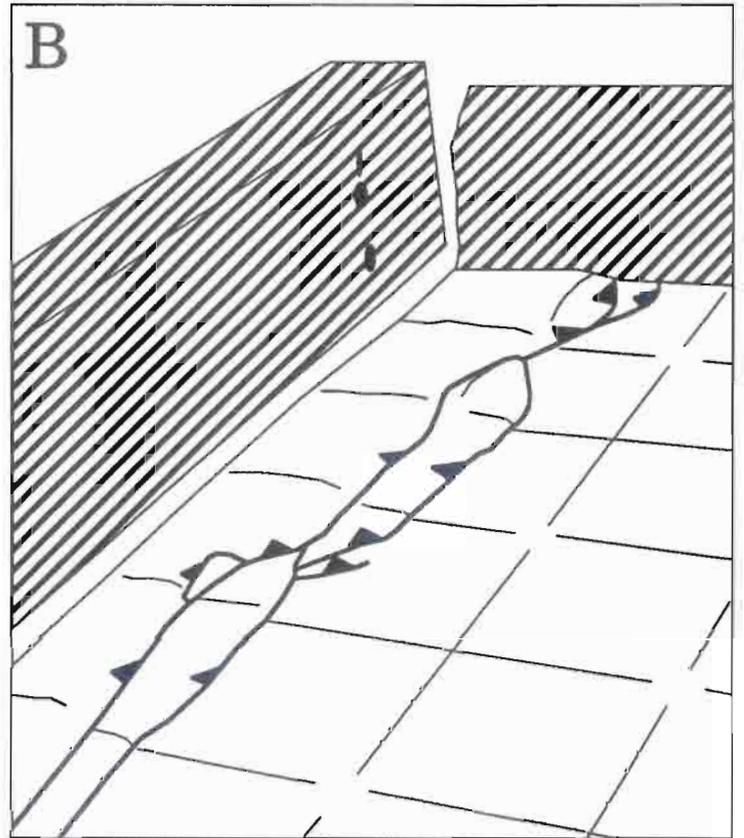
6,8 % OF SHORTENING



5 cm



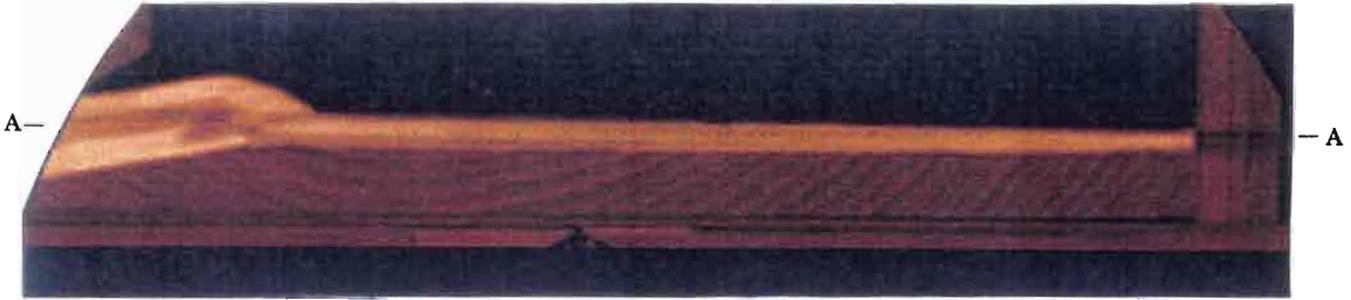
Pl. 10  
SHORTENING = 6,8 %



6,8 % OF SHORTENING

Pl. 11.1

B-B



A-A

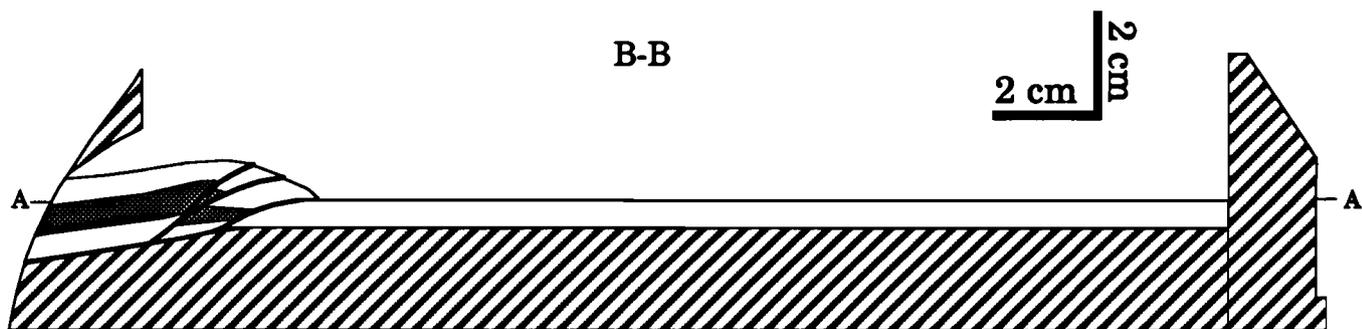


C-C

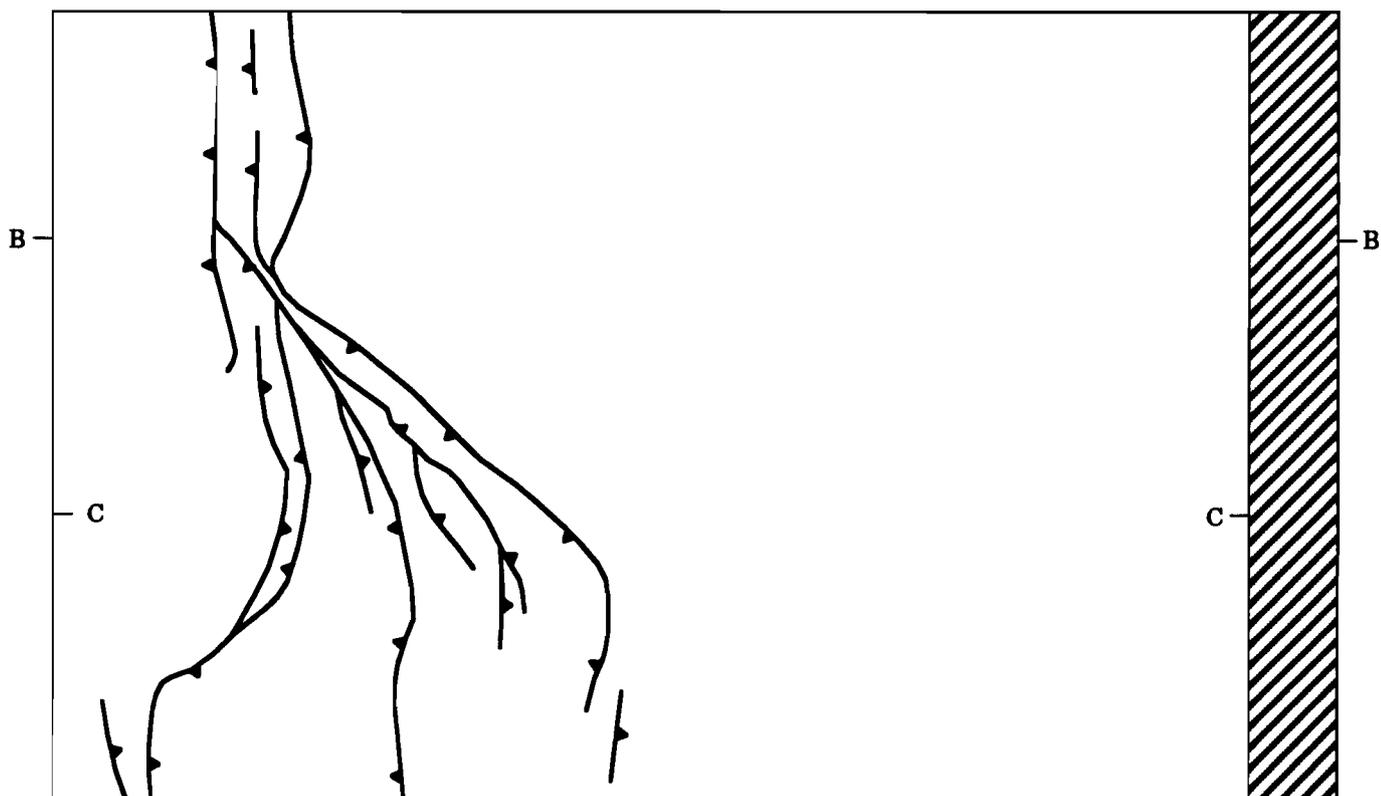


SHORTENING = 6,8 %

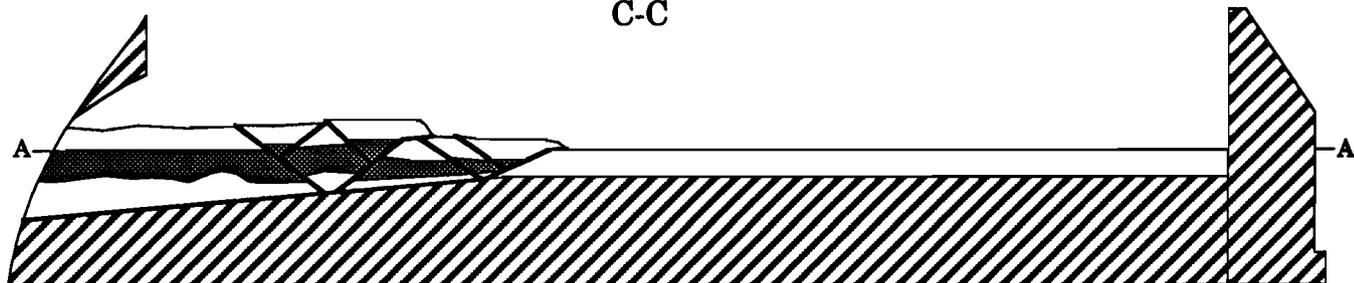
Pl. 11.2



A-A

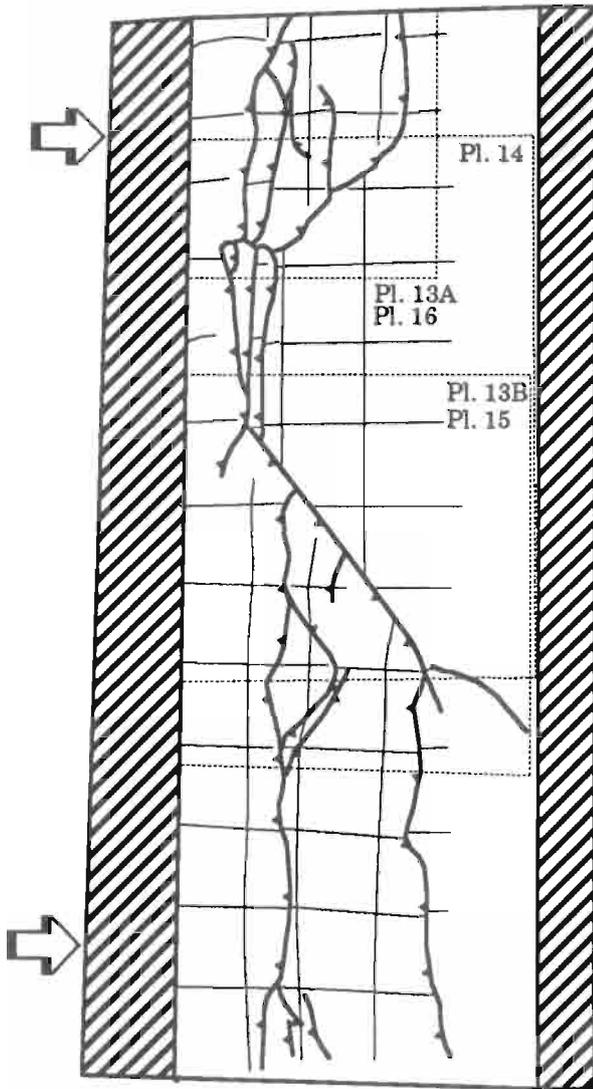


C-C



# Pl. 12

SHORTENING = 14 %

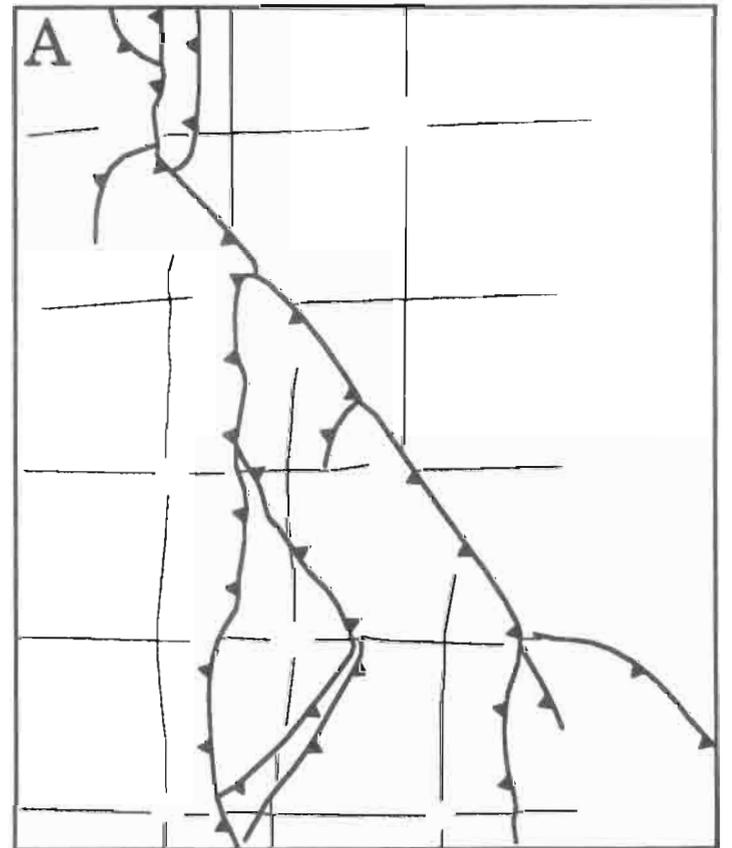
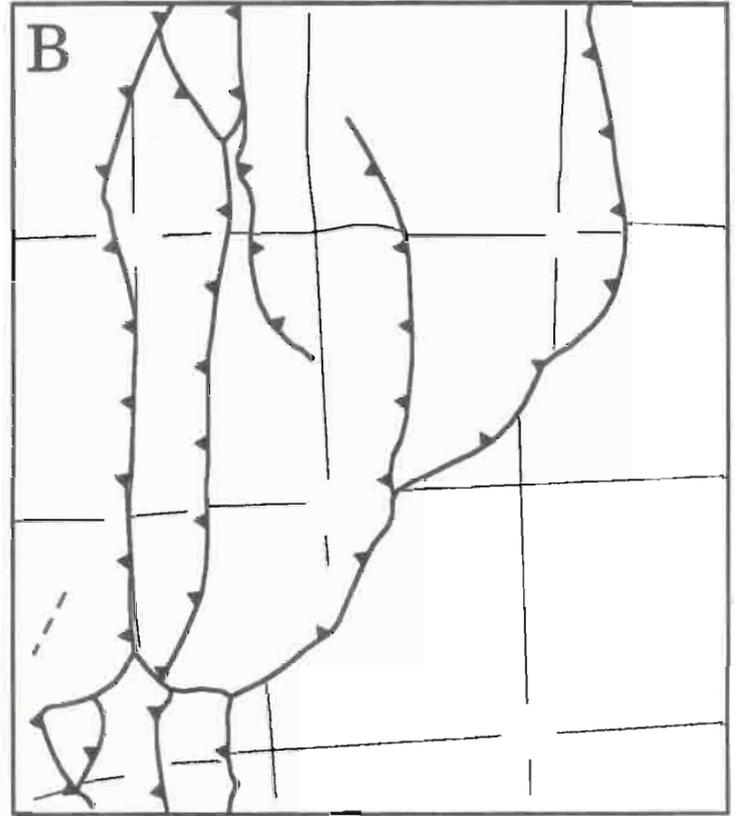
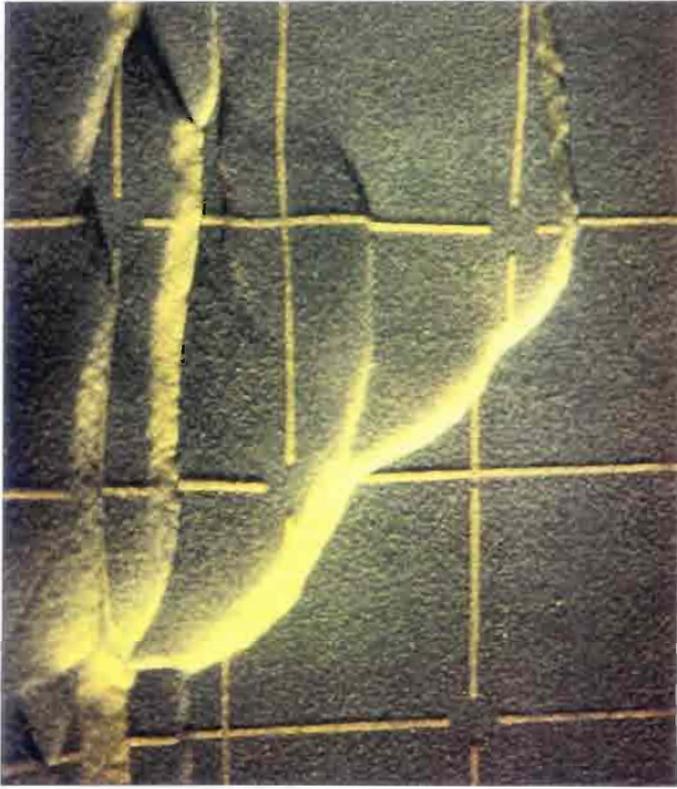


5 cm



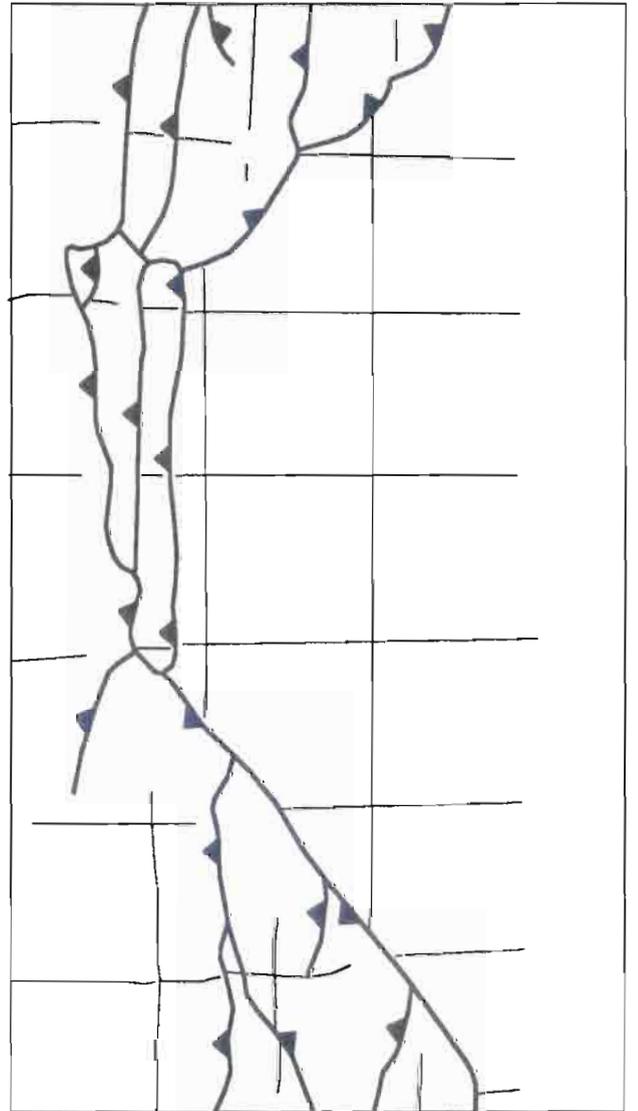
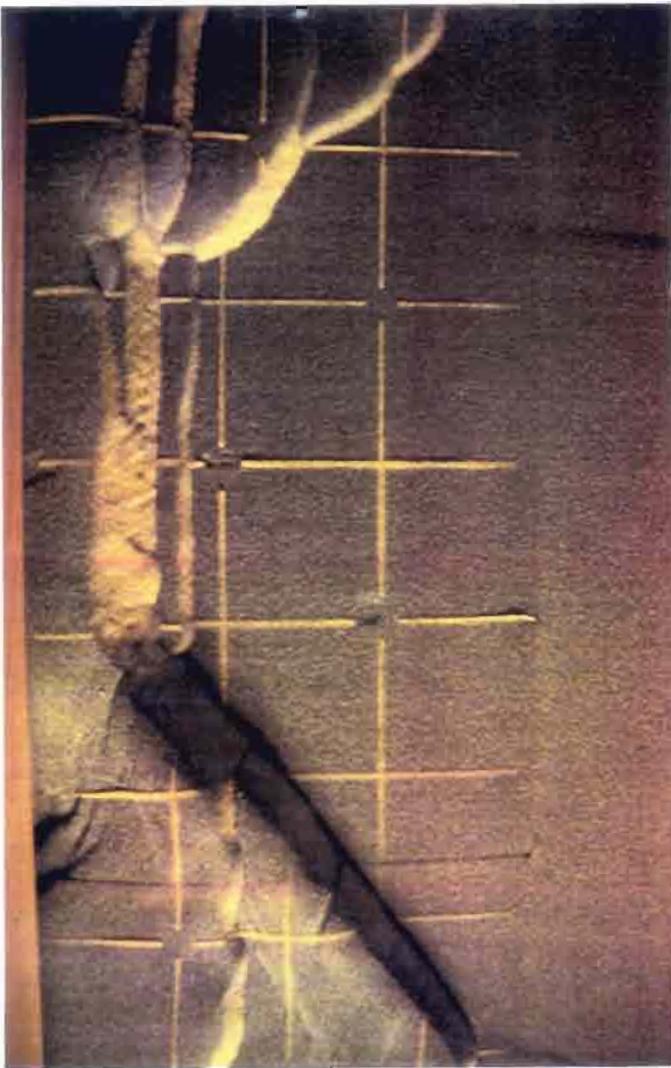
Pl. 13  
SHORTENING = 14 %

5 cm



# Pl. 14

56 mn., 14% de raccourcissement



5 cm

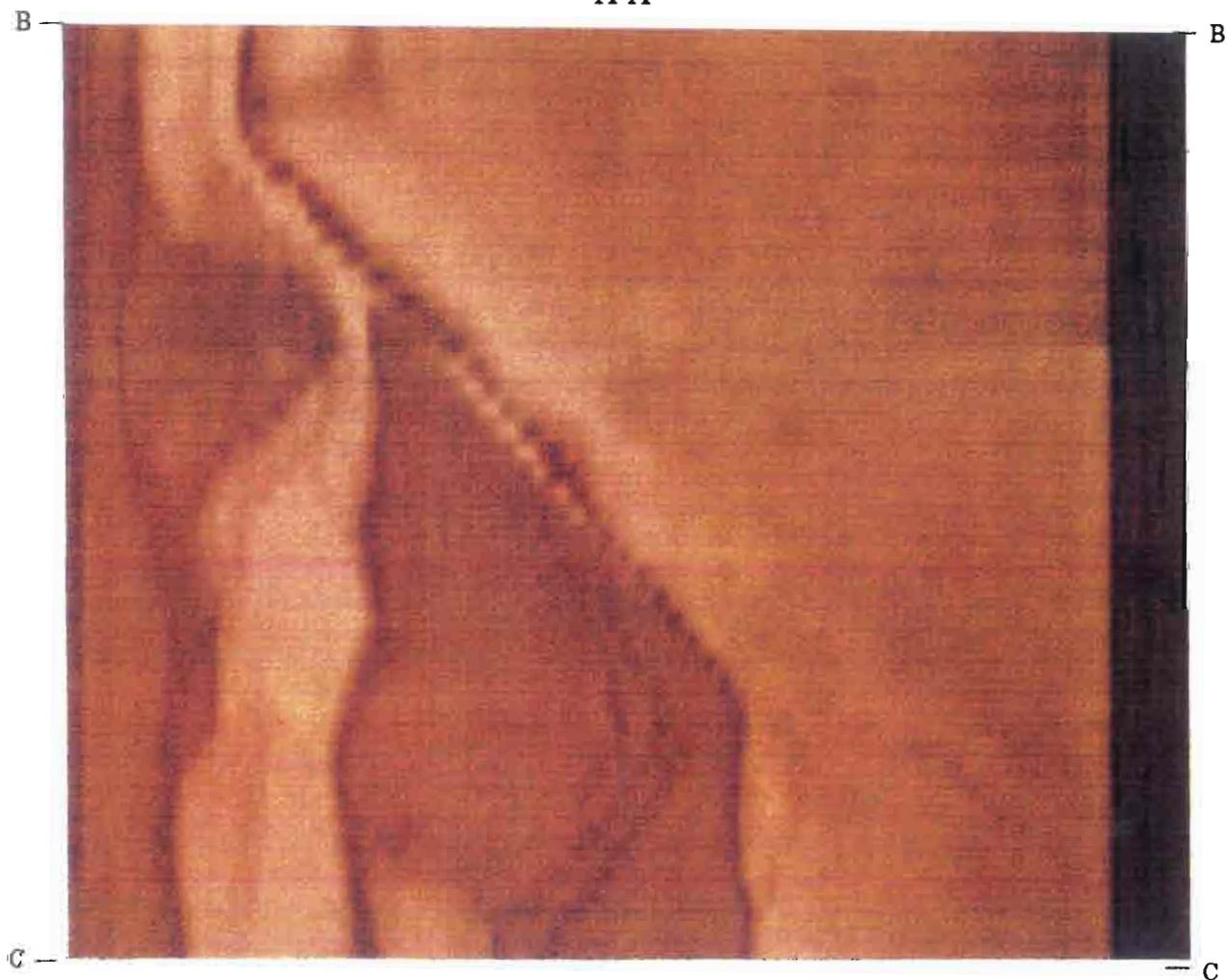
SHORTENING = 14 %

Pl. 15.1

B-B



A-A



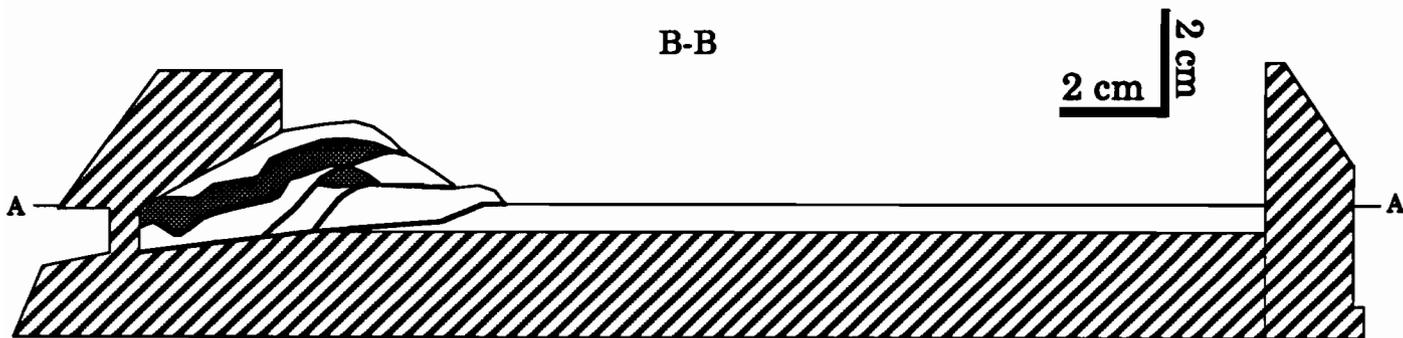
C-C



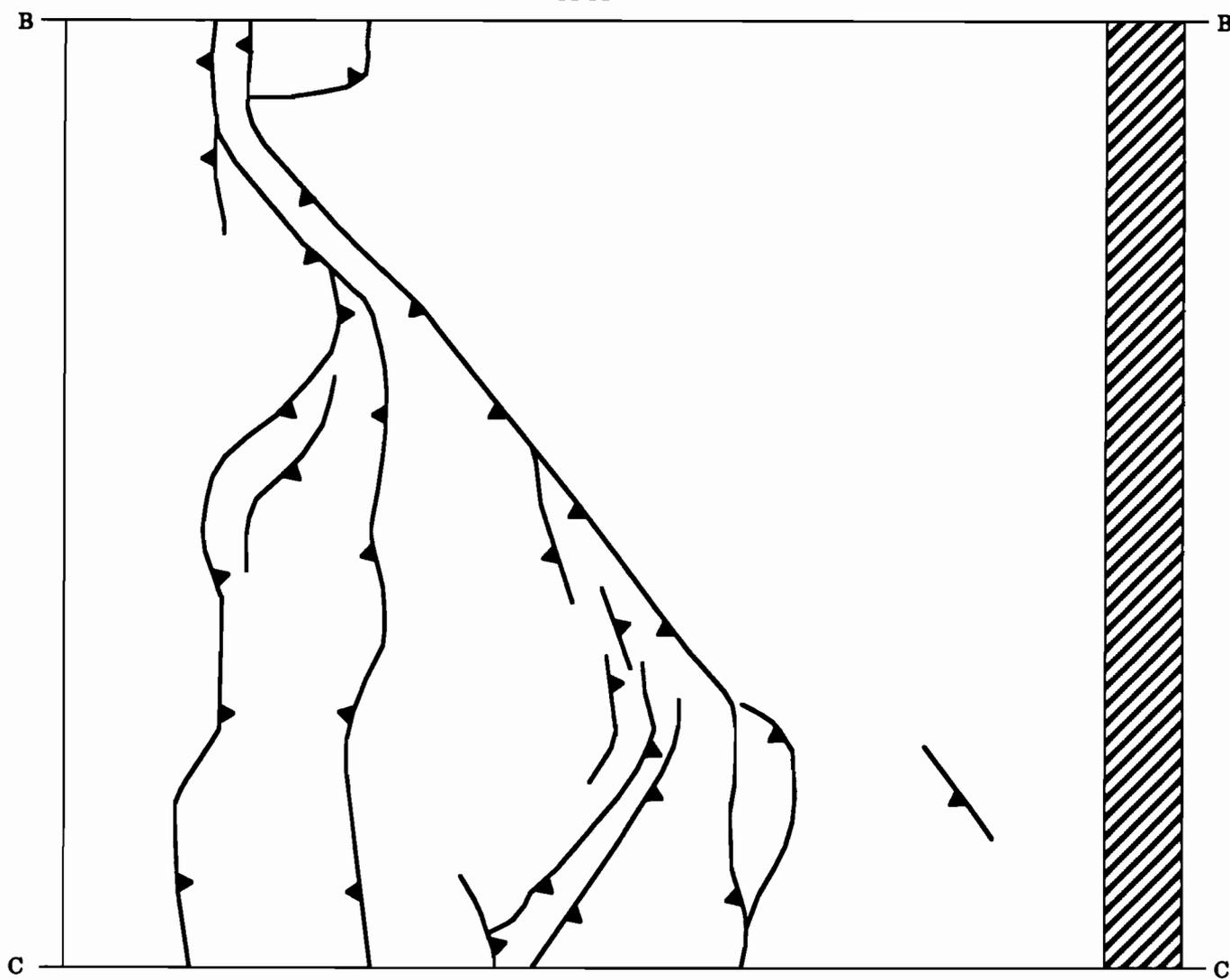
SHORTENING = 14 %

Pl. 15.2

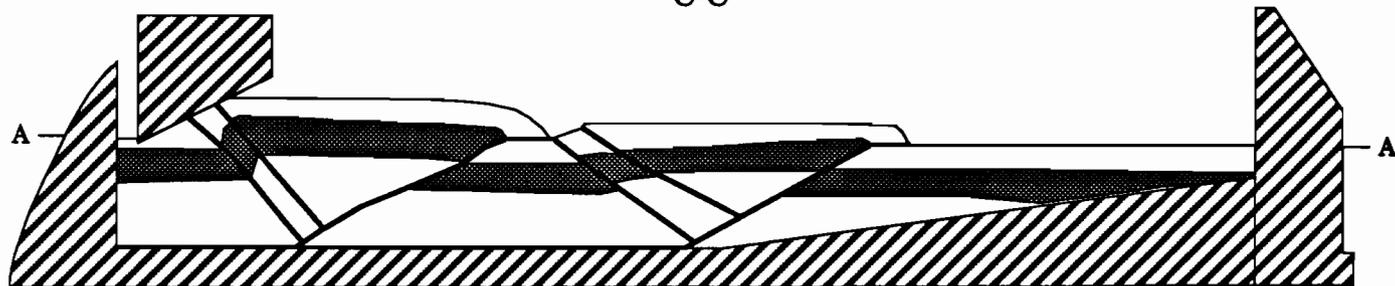
B-B



A-A

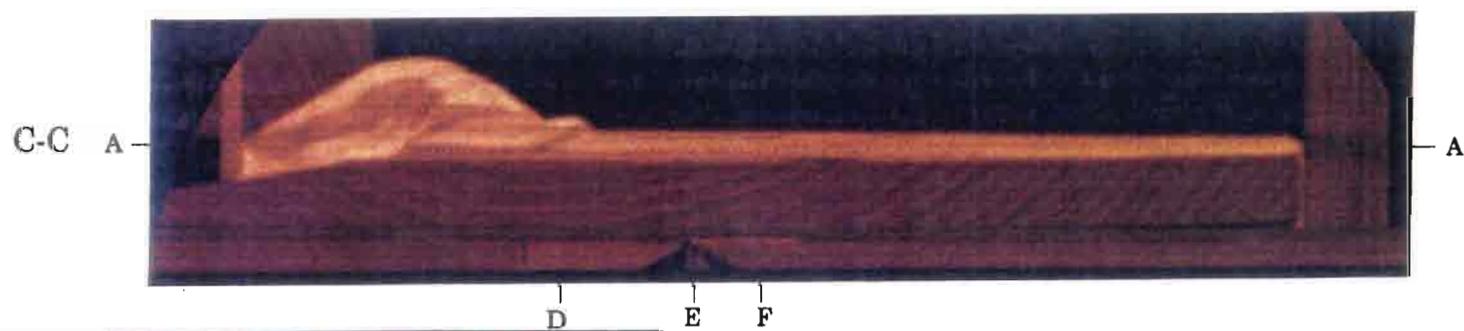
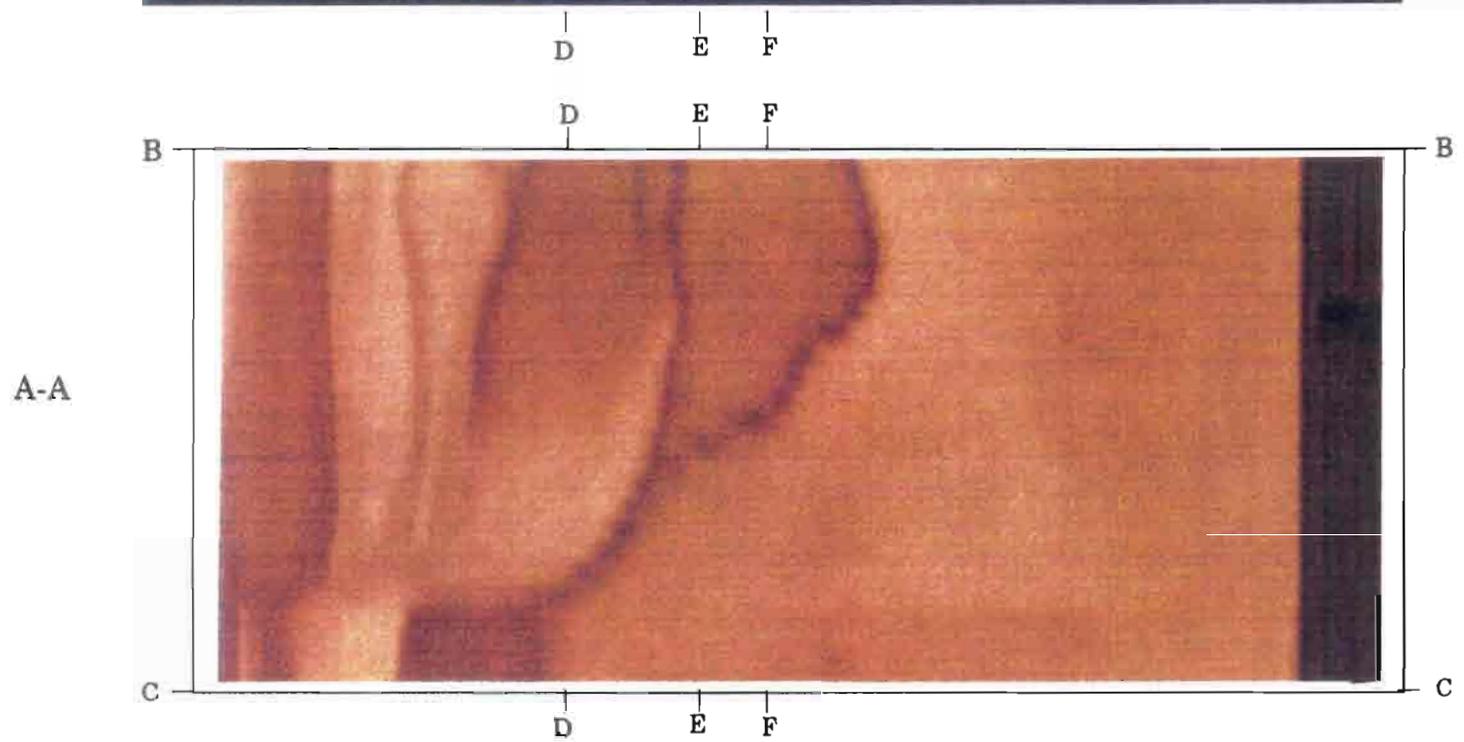


C-C



56 mn., 14% de raccourcissement

Pl. 16.1





Pl. 17.1



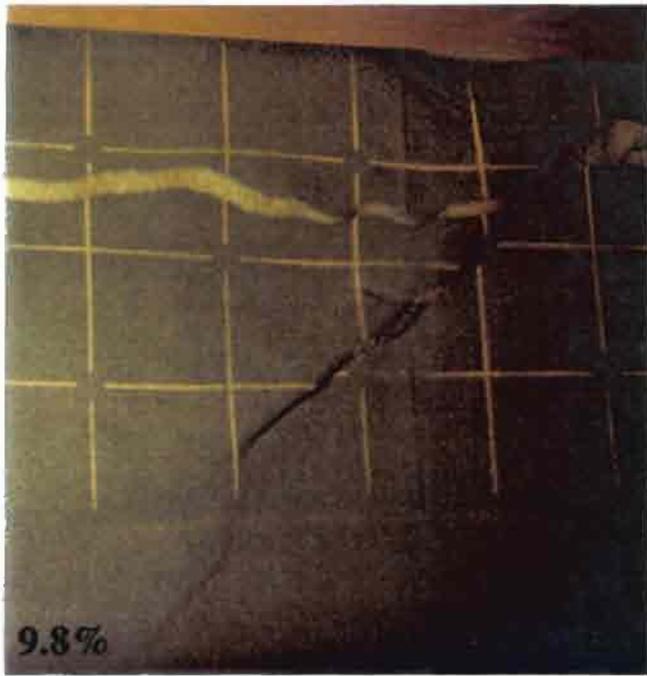
4,5 % OF SHORTENING



6,8 % OF SHORTENING

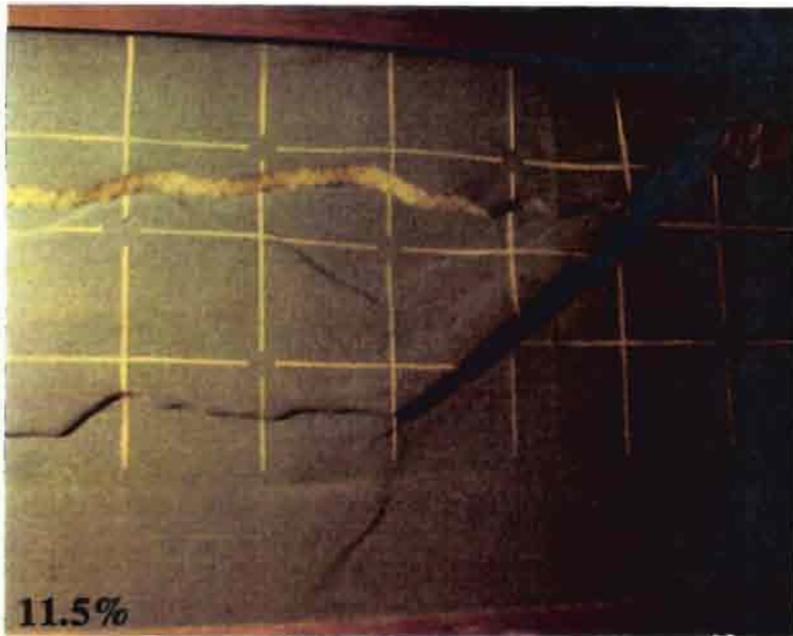


8 % OF SHORTENING

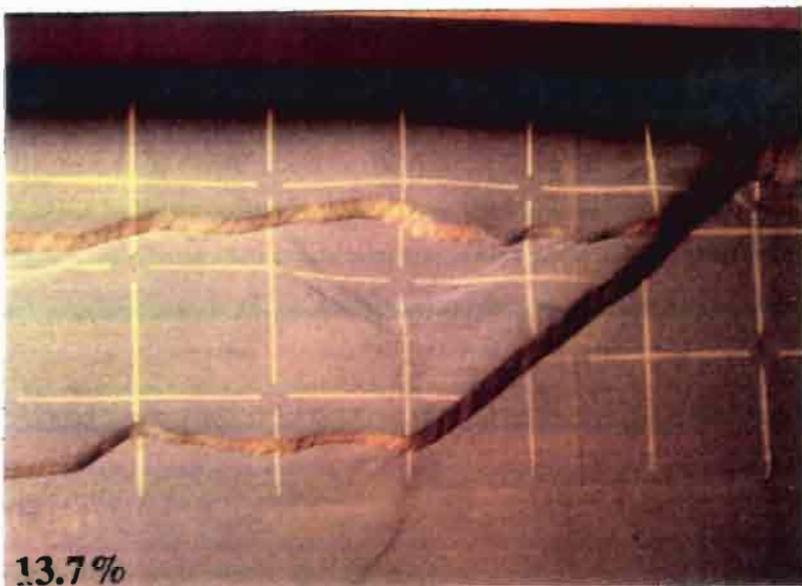


Pl. 17.2

9,8 % OF SHORTENING



11,5 % OF SHORTENING



13,7 % OF SHORTENING

**INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE**

B.P. 311

92506 Rueil-Malmaison Cedex - France

Tél. : national (1) 47 49 02 14

international 33 (1) 47 49 02 14

Télex : IFP 634202 F

Télécopieur : 33 (1) 47 52 70 00