

Las acumulaciones de gas y condensado en los niveles profundos del Devónico de las Sierras Subandinas

Por Pedro J. Lesta
y Estanislao Kozlowski

I. Introducción

La faja plegada conocida como Sierras Subandinas, en el Norte Argentino y en Bolivia, puede ser considerada como uno de los más atractivos campos para la exploración y explotación de gas y condensado en niveles devónicos, en esta región de Sudamérica.

Todo comenzó en el año 1977 con la perforación exitosa por parte de YPF del primer pozo de exploración profunda, el Ramos x-11, destinado a lo que entonces se consideró la F. Santa Rosa, por analogía con las areniscas, atribuidas al Devónico Inferior, que producían hidrocarburos en los yacimientos de Caigua y Los Monos. Referencias sobre estos yacimientos fueron publicadas por D'Arlach (1976), y Quevedo Velasco (1977).

El modelo obtenido inspiró la perforación del mencionado pozo Ramos x-11 que se ubicó en base a una idea geológica, pero sin su correspondiente corroboración sísmica, pues en ese tiempo resultaba imposible registrar en el área, ya que en el país no existían equipos para atacar una topografía tan accidentada, cubierta por espesa selva.

De la bondad de la idea geológica habla a las claras el alto porcentaje de éxitos que tuvieron los restantes pozos exploratorios, que llevaron también al descubrimiento del Yacimiento de Aguarañe.

Fundamentalmente esta nueva idea geológica sostenía que algunas de las culminaciones superficiales de los ejes anticlinales, en sedimentos carbónicos y la profunda, en sedimentos del Devónico Inferior, estaban casi superpuestas sin grandes desplazamientos. Lo admitido hasta ese entonces, consideraba a todos los ejes superficiales

muy desplazados hacia el E de las culminaciones profundas por sobrecorrimientos.

La nueva idea se cumplió ampliamente y a ella se sumó, desde el punto de vista de la capa recipiente, que la porosidad de las areniscas del Devónico Inferior se hallaba incrementada por micro fisuras debidas al plegamiento, lo que mejoraba sus características petrofísicas.

En fecha más reciente, acumulaciones descubiertas en Argentina y Bolivia confirman la persistencia de esta situación y la importancia y extensión de esta faja plegada como albergue de importantes reservas de gas y condensado en esos niveles.

Se debe destacar empero, que en los últimos tiempos, algunos colegas de YPF Bolivianos están poniendo en duda que lo que se llama F. Santa Rosa en Argentina corresponda a lo que se denomina de la misma forma en Bolivia. Sin que esto signifique abrir un juicio sobre el tema, por razones de claridad seguiremos llamando F. Santa Rosa a los niveles arenosos productores de gas y condensado en el Devónico de la Cuenca del Noroeste.

El objeto de este artículo es, en consecuencia, analizar la conformación de las acumulaciones en la llamada F. Santa Rosa; exponiendo un modelo de plegamiento, generación de microfracturas, migración y acumulación de los hidrocarburos, basado en el análisis de la estructura de Aguarañe ubicada en el sector externo de las Sierras Subandinas del norte de la provincia de Salta, próxima a la localidad de Tartagal. (Fig. 1)

II. El mecanismo de plegamiento

La estructura que presenta la F. Santa Rosa en el Yacimiento de Aguarañe y en los restantes conocidos corresponde a braquianticlinales elongados en una dirección aproximada N-S. En el caso de la estructura de Aguarañe hay numerosos trabajos de profesionales de YPF, algunos publicados (Mombrú y Aramayo Flores, 1985; Aramayo Flores, 1989 y Grieco, 1991) que aporten abundantes datos. La reconstrucción de la cresta del anticlinal y en especial la parte más alta del ala oriental está basada en sondeos que atraviesan parcialmente a la F. Santa Rosa. El ala occidental tiene buena definición en la sísmica de reflexión obtenida por Bidas. La información sísmica para la culminación y ala oriental es pobre.

El basamento no está involucrado en la deformación y su actitud real es subhorizontal. En la línea BRA-027 (Fig. 2) se observan sus reflexiones ascendiendo fuertemente al E. Esta situación es causada por el aumento en las velocidades sísmicas promedio, en esa dirección, debido al reemplazo de las capas terciarias preservadas en los sinclinales con velocidades bajas, por las capas paleozoicas que se apilan en la zona de culminación con velocidades altas.

Este anticlinal se considera originado por el mecanismo de flexión de falla (Fault-bend fold; Suppe, 1983) debido a las relaciones que se establecen entre la geometría escalonada del corrimiento y la configuración de las alas del anticlinal. (Fig. 3)

La geometría del corrimiento está definida por un plano inferior ubicado en la base del Paleozoico inferior, un plano superior en la F. Los Monos y una rampa que conecta a ambos planos cortando al Paleozoico inferior y a la F. Santa Rosa.

En el pliegue asociado, el limbo occidental copia la rampa del bloque yacente y el limbo oriental resulta de apoyar la rampa del bloque colgante sobre el plano superior. Esta solución en lo esencial ya fue utilizada en los cortes estructurales de las publicaciones citadas.

El buzamiento del ala occidental según el mapa estructural publicado (Momburí y Aramayo Flores, 1985) varía entre 15° y 20°, Grieco (1991) le asigna un valor de 20°. Estos valores son compatibles con los que se observan en las líneas sísmicas.

Los buzamientos para el ala oriental también pueden ser tomados del plano estructural publicado (Momburí y Aramayo Flores, 1985), donde varían entre 15°, a la latitud de Tranquitas, y 30° a la latitud de Quebrada de Galarza. Grieco (1991) le asigna un buzamiento de 37° en este último lugar. Suppe (1983) presenta una metodología que permite calcular estas anteinclinaciones (Limbo oriental) a partir del ángulo de corte y del ángulo de quiebre de la rampa. En el caso del anticlinal de Aguaraque el ángulo de corte es igual al de quiebre. Su valor varía entre 15° y 20°, correspondiéndole una anteinclinación entre 16,2° y 23,2°.

Como se ve, estos valores teóricos están en el rango de lo determinado en los trabajos anteriores. Valores más altos pueden atribuirse a alguna complicación adicional de menor orden.

La geometría escalonada del corrimiento, determina que estos pliegues se integren mediante dominios de buzamiento uniforme; cada dominio está representado por un sector con inclinación constante, que refleja el ángulo de corte de la rampa. Al pasar de un dominio a otro se establecen los planos axiales. Estos pueden o no ser activos. Los planos axiales activos afectan progresivamente

a la sección estratigráfica a medida que crece el pliegue, en cambio los inactivos permanecen fijos en la sección estratigráfica.

En el caso del anticlinal de Aguaraque se reconocen tres planos axiales: (Fig. 4) Plano axial I: Se ubica en el límite inferior del ala occidental del anticlinal. Es un plano axial activo durante todo el desarrollo del pliegue.

Plano axial II: vincula el ala occidental con la cresta subhorizontal. Permaneció inactivo mientras el rechazo del corrimiento era menor que la longitud de la rampa.

Plano axial III: separa la cresta del ala oriental del anticlinal. Su comportamiento fue activo solamente cuando el rechazo del corrimiento era inferior a la longitud de la rampa.

A partir de la línea sísmica BRA-027 (Fig. 2) puede determinarse que la longitud de la rampa es equivalente al rechazo del corrimiento, correspondiéndole un valor de 8 km medido sobre la rampa del bloque yacente. Si se supone un ángulo de corte inicial de 19° el desplazamiento sobre la rampa del bloque colgante es de 5,5 km.

Este mecanismo de plegamiento conserva el balance de materiales durante toda la evolución del pliegue, condición básica para las reconstrucciones restaurables. Ello implica que los planos axiales y la cresta han modificado su posición durante la deformación.

III. Origen de la porosidad

La porosidad por fractura en la F. Santa Rosa es un hecho ampliamente aceptado. En este trabajo se trata de relacionar la generación de estas fracturas con la evolución cinemática del anticlinal.

El plegamiento paralelo se caracteriza por conservar los espesores de las capas y producir el acomodamiento de las longitudes estratales por deslizamiento flexural; el pliegue por flexión de falla cumple estos requisitos.

El deslizamiento flexural es el mecanismo que permite compensar las variaciones de las longitudes estratales dentro del pliegue mediante cizalla paralela a la estratificación, de este modo cuanto más delgadas y mejor estratificadas sean las capas más efectiva es la compensación.

En el caso de capas gruesas y masivas la compensación se produce con una apreciable deformación interna que se resuelve en fracturas tensionales en la parte convexa de la curvatura y fracturas compresivas y presión de solución en la parte cóncava. Esta última situación se aplica a la F. Santa Rosa compuesta por espesas y masivas ortocuarcitas de comportamiento frágil. El volumen de fractura es directamente proporcional al espesor de la capa e inversamente proporcional al radio de curvatura.

Por lo antes expresado las zonas de mayor volumen de fractura coinciden con los sectores donde el radio de cur-

vatura disminuye. Esto sucede en los planos axiales. Los planos axiales activos son los que producen mayor volumen de fractura al deformar dos veces la capa, primero curvándola y luego rectificándola (Dahlstrom, 1990). Los planos axiales inactivos mantienen fija la curvatura durante todo el desarrollo del pliegue. (Fig. 5)

El desplazamiento que se postula para levantar el anticlinal de Aguaragüe prácticamente determina que toda la sección de la F. Santa Rosa ha estado o pasado por algún plano axial, en particular toda el ala oeste ha pasado por un plano axial de tipo activo.

Mitra (1988) menciona factores estructurales que pueden aumentar o disminuir la porosidad de la roca; la disminuyen la cataclasis y la presión de solución, la aumentan la fracturación y el brechamiento. En un sistema cerrado la porosidad que se incrementa por fracturación debe disminuir por la presión de solución. Los fluidos mineralizados producidos circulan y recrystalizan minerales en los poros y fracturas preexistentes, de modo que la relación de la fracturación con la presión de solución es la que determina la porosidad en última instancia.

Un ingreso temprano de hidrocarburos en la fractura inhibe la recrystalización. El escaso aporte de agua en el pozo Laguna del Cielo x-1 a pesar de hallarse sobre la cresta del anticlinal sería causado por disminución de la porosidad debido a la recrystalización de cuarzo en las fisuras al hallarse por debajo de la zona hidrocarbúfera.

Además de la fracturación que es consecuencia del mecanismo del plegamiento existen fallamientos adicionales. Este es el caso de la repetición parcial de la F. Santa Rosa que afecta el flanco oeste del Yacimiento de Ramos (Grieco, 1991). Estas fallas llamadas "back limb thrusts" (Dahlstrom, 1970) son bien conocidas en cinturones corridos como las Montañas Rocallosas de Alberta, Canadá. Un claro ejemplo de su existencia se observa en el limbo tendido (aproximadamente 20°) del anticlinal del Yacimiento Turner Valley, (Fox, 1959). En el flanco oeste de la estructura de Aguaragüe la línea sísmica BRA-027 muestra en los niveles de la F. Santa Rosa dislocaciones que pueden asociarse con este tipo de fallas.

IV. Origen, migración y acumulación de hidrocarburos en la Formación Santa Rosa

La única forma lógica de explicar la acumulación de hidrocarburos en la F. Santa Rosa es admitir que la vía principal de la migración de gas proviene de la cubeta sinclinal situada al occidente de los ejes anticlinales, ascendiendo por el camino que ofrece dicha arenisca, hasta la zona de culminación.

Si bien el proceso de la migración no es enteramente

conocido ya que, como dice Levorsen (1967) "nadie ha visto jamás cómo se forma un yacimiento petrolífero o gasífero", el mismo autor destaca que existe una serie de hechos universalmente aceptados, que permiten tener una idea clara de los mecanismos que actúan.

Aunque resulten repetitivos, por conocidos, no está de más destacarlos, ya que son aplicables al caso que nos ocupa. Algunos de estos hechos básicos son:

- 1) Es universalmente admitido que la generación de los hidrocarburos está vinculada al tiempo de enterramiento de la materia orgánica y a la temperatura a que es sometida, y que el gas necesita de mayores temperaturas. Wapples (1985) dice: "En los últimos estados de catagénesis y en el estado final de transformación llamado metagénesis, el principal producto consiste en las moléculas de gas más livianas".
- 2) Los fluidos empiezan a ser expelidos de la roca madre cuando comienza la diagénesis (Levorsen op. cit.).
- 3) El gas y el petróleo son básicamente inmiscibles en el agua, y ambos tienen una densidad inferior al agua que los rodea (Levorsen op. cit.).
- 4) La migración primaria se produce después de la génesis de los hidrocarburos desde las rocas de grano fino hasta un reservorio, y no se produce más que sobre cortas o muy cortas distancias, del orden de un metro a la decena de metros (Perrodon, 1985).

En consecuencia, teniendo en cuenta que:

- A) Existen grandes volúmenes de gas atrapados en la estructura de Aguaragüe.
- B) Todos los hidrocarburos conocidos en ese sector argentino de la Cuenca Noroeste son de origen Devónico. A este respecto, Rosso (1983) expresa sobre el análisis geoquímico de una muestra de fluido perteneciente al pozo B.Yc.x-1001 (Yacuy): "La relación Pristano/Fitano (Isoprenoide con 19 átomos de carbono/isoprenoide con 20 átomos de carbono), es 1,5, valor próximo al calculado para los de petróleos de los Yacimientos de Madrejones y Campo Durán, lo que presupondría un ambiente de generación similar".
- C) La única superficie de contacto de gran extensión entre la roca generadora (lutitas devónicas) y la roca recipiente (F. Santa Rosa) que justifique los volúmenes mencionados en el punto A) y en las condiciones establecidas en el punto 4) son los flancos occidentales de los ejes anticlinales, que pasan a ser los flancos orientales de los sinclinales ubicados entre

los alineamientos positivos. En efecto, estos flancos presentan una gran continuidad, y extensión, cosa que no sucede en el flanco oriental del anticlinal.

Por su disposición inclinada permiten que el gas ingrese de una formación estratigráficamente superior a una formación estratigráficamente inferior, siguiendo un camino desde la base de las lutitas generadoras al tope de la capa recipiente.

- D) Existe una porosidad intercomunicada, que permite la migración dentro del reservorio, tal como surge del análisis del mecanismo de plegamiento.

Esta porosidad, está probada aun para posiciones en el flanco occidental según se desprende de los estudios petrográficos sobre cortes delgados realizados en coronas de la F. Santa Rosa del pozo Macueta 1002 ubicado en un flanco occidental. Bottcher (1984) analiza un trozo de corona del pozo mencionado, que muestra claramente la existencia de microfisuras y porosidad por disolución, lo que coincide con lo que se espera con un mecanismo de plegamiento como el descripto.

- E) El contenido de la F. Santa Rosa es casi exclusivamente gasífero y dado el bajo grado geotérmico de la zona (2,5° a 3° cada 100 mts.) el gas se debió formar en profundidades sólo alcanzables en los sinclinales profundos.

Se establece sin lugar a dudas que:

- Las formaciones arcillosas devónicas son la roca generadora de los hidrocarburos.
- El gas sólo se puede haber generado a profundidades tales que estas rocas generadoras deben estar vinculadas desde el punto de vista estructural con los sinclinales.
- El único camino disponible para ascender desde allí a las culminaciones anticlinales es por la misma F. Santa Rosa, que conforma el flanco oriental de los sinclinales.
- El tipo de plegamiento conduce a una extensa microfracturación de la F. Santa Rosa, tanto en el flanco oriental como en el occidental.

V. Conclusiones

Este modelo de acumulación permite admitir la existencia de tablas de agua horizontales en las culminacio-

nes, una distribución más regular de los hidrocarburos y reservas realmente importantes. Un modelo propiciado recientemente (Grieco, 1991) sostiene que los hidrocarburos en Aguara Güe están sólo concentrados en la mitad oriental de la culminación y en el flanco oriental, lo que implicaría una tabla de agua fuertemente inclinada. En nuestra opinión ese modelo, que reduciría grandemente la posibilidad de encontrar reservas substanciales, no concide con la realidad.

Como existe un sondeo, el R 1002, perforado en el flanco occidental del anticlinal de Ramos, por la compañía Pluspetrol, que presenta una producción similar a los sondeos perforados en la culminación, el mencionado autor sostiene que esto se debe a que existe una gran diferencia entre la conformación estructural de las estructuras de Ramos y Aguara Güe y a la existencia de una falla que mejoraría la porosidad en el mencionado pozo.

En opinión de los autores, no existe una gran diferencia entre ambas estructuras en la faja de su culminación en lo que respecta a su simetría. Además el hecho que exista una falla que mejore la productividad en Ramos, dados los esfuerzos tectónicos en juego, es más una norma que una excepción, que se debe generalizar a todos los pliegues.

Algunos pozos, muy escasos, han demostrado baja producción. Esto parece estar ligado más a problemas de perforación (daño a la formación) que a su ubicación en un determinado flanco de la estructura.

Los pliegues subandinos, en consecuencia, son un objetivo de enorme importancia para la exploración de yacimientos gigantes de gas y condensado en los niveles del Devónico conocidos en Argentina como F. Santa Rosa.

Lista de Trabajos Citados

- Aramayo Flores F., 1989, el cinturón plegado y sobreco-
rrido del Norte Argentino: Boletín informaciones pe-
troleras N° 17, p. 2-16.
- Bottcher, G., 1984. Caracterización petrográfica de una
muestra de testigo corona del pozo St.B.M.-1002 (Ma-
cueta): YPF, Laboratorio Geológico, inédito.
- Dahlstrom, C.D.A., 1970, Structural geology in the eastern
margin of the Rocky Mountains: Bulletin of Canadian
Petroleum Geology, v. 18, p. 332-406.
- Dahlstrom, C.D.A., 1990, Geometric Constraints Derived
from the Law of Conservation of Volume and Applied
to Evolutionary Models for Detachment Folding: AAPG
Bulletin, v. 74 p. 336-334.
- D'Arach C., 1976, Contribución al conocimiento de la Fm.
Santa Rosa en el subsuelo del Subandino Sur Bolivia-
no: Tesis Facultad de Ciencias Naturales y Museo, La

Plata, inédito.

Fox, F.G., 1984, Structure and Accumulation of Hydrocarbons in Southern Foothills, Alberta, Canada: AAPG Reprint Series Nº 27, p. 296-329.

Grieco, L.F., 1991: Distribución de fluidos en la estructura de Aguaragüe. Boletín informaciones petroleras Nº 26, p. 61-66.

Lvorsen, A.I., 1973, Geología del petróleo. Editorial Universitaria de Buenos Aires, 452 p.

Mitra, S., 1988, Effects of Deformation Mechanisms on Reservoir Potential in Central Appalachian Overthrust Belt: AAPG Bulletin v. 72, p. 536-554.

Mombrú, C. y F. Aramayo Flores, 1986, Geología del Yacimiento Aguaragüe: Boletín informaciones petroleras Nº 6, p. 53-64, Buenos Aires.

Perrodon, A., 1985, Geodynamique Petroliere. Masson, París.

Quevedo Velasco, J., 1977, Geología de los Yacimientos de Hidrocarburos en Bolivia: Revista Técnica de Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos, Nº 1 y 2.

Rosso, M., 1983, Análisis geoquímico de una muestra de fluido perteneciente al pozo B.Yc.x-1001 (Yacuy): YPF. Laboratorio Geológico. Inédito.

Suppe, J., 1983, Geometry and kinematics of fault-bend folding: American Journal of Science, v. 283, p. 684-721.

Wapples, D.W., 1985, Geochemistry in Petroleum Exploration: International Human Resources Development Corporation, Boston, 232 p.

Pedro Lesta

El Dr. Pedro Lesta es geólogo, especializado en petróleo.

Inició su carrera con YPF en Tierra del Fuego, en el año 1949 y se desempeñó por 13 años en la Cuenca Austral y Cuenca del Golfo San Jorge.

En 1963 luego, de una actuación en el exterior regresa a YPF donde ocupa sucesivamente los cargos de Jefe del Departamento de Geología, Gerente de Exploración y Gerente de Exploración Costa Afuera.

Fue asesor del Ministerio de Relaciones Exteriores sobre Malvinas, Atlántico Sur y Antártida y profesor universitario.

Ha sido acreedor al premio Sociedad Científica Argentina sobre Ciencias de la Tierra en el año 1975 y es autor de numerosas publicaciones y conferencias.

En la actualidad es Director de Exploración de la empresa Bidas SAPIC.

Estanislao Kozlowski

El licenciado Kozlowski es geólogo egresado de la Universidad de Buenos Aires (1976). Efectuó un postgrado en el Instituto de Petróleo (1977).

Ingresó en YPF donde se desempeñó en exploración (1978-1990) desarrollando tareas de campo en zonas estructuralmente complejas, en especial en el sector andino de la Cuenca Neuquina, y como instructor en la Escuela de Campo de Geología Estructural (1984-1990).

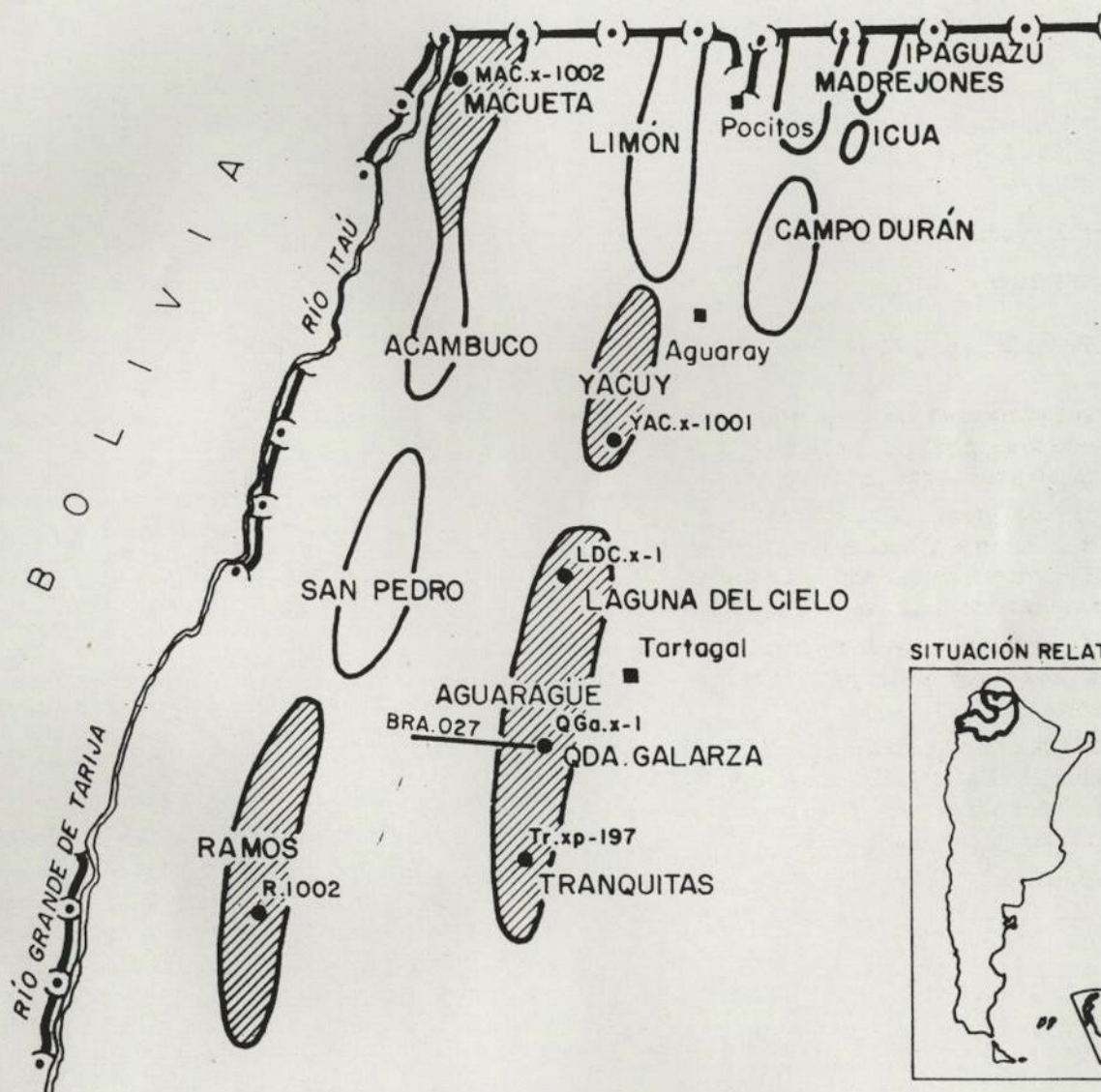
Es autor de varios trabajos publicados sobre la estructura y geología regional de la Cuenca Neuquina.

Actualmente desarrolla su actividad profesional en Bidas SAPIC, como responsable de áreas de tectónica compleja.

Figura 1: Plano de ubicación

PLANO DE UBICACIÓN

ESCALA
0 20 km



ANTICLINALES PRODUCTIVOS
DE LA F. SANTA ROSA

Figura 2: Perfil sísmico del anticlinal de Aguaragüe a la latitud de Qda. de Galarza. Referencia: 1. Base del Terciario Subandino, 2. Techo de la F. Santa Rosa, 3. Base de la F. Santa Rosa, 4. Corrimiento, 5. Techo del basamento.

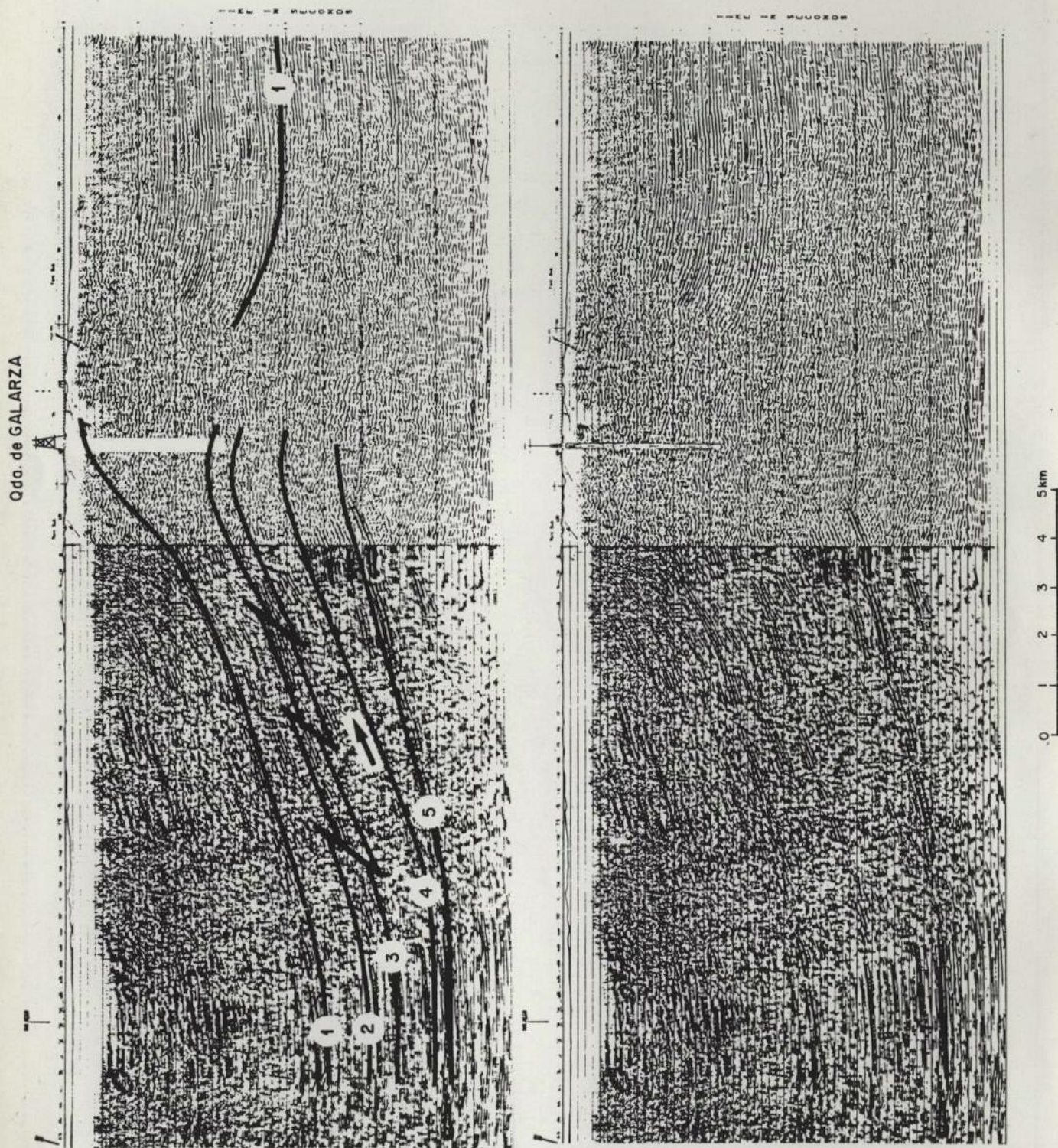


Figura 3: Configuración balanceada del anticlinal de Aguaragüe a la latitud de Qda. de Galarza. a: Plano inferior, b: Ramp;

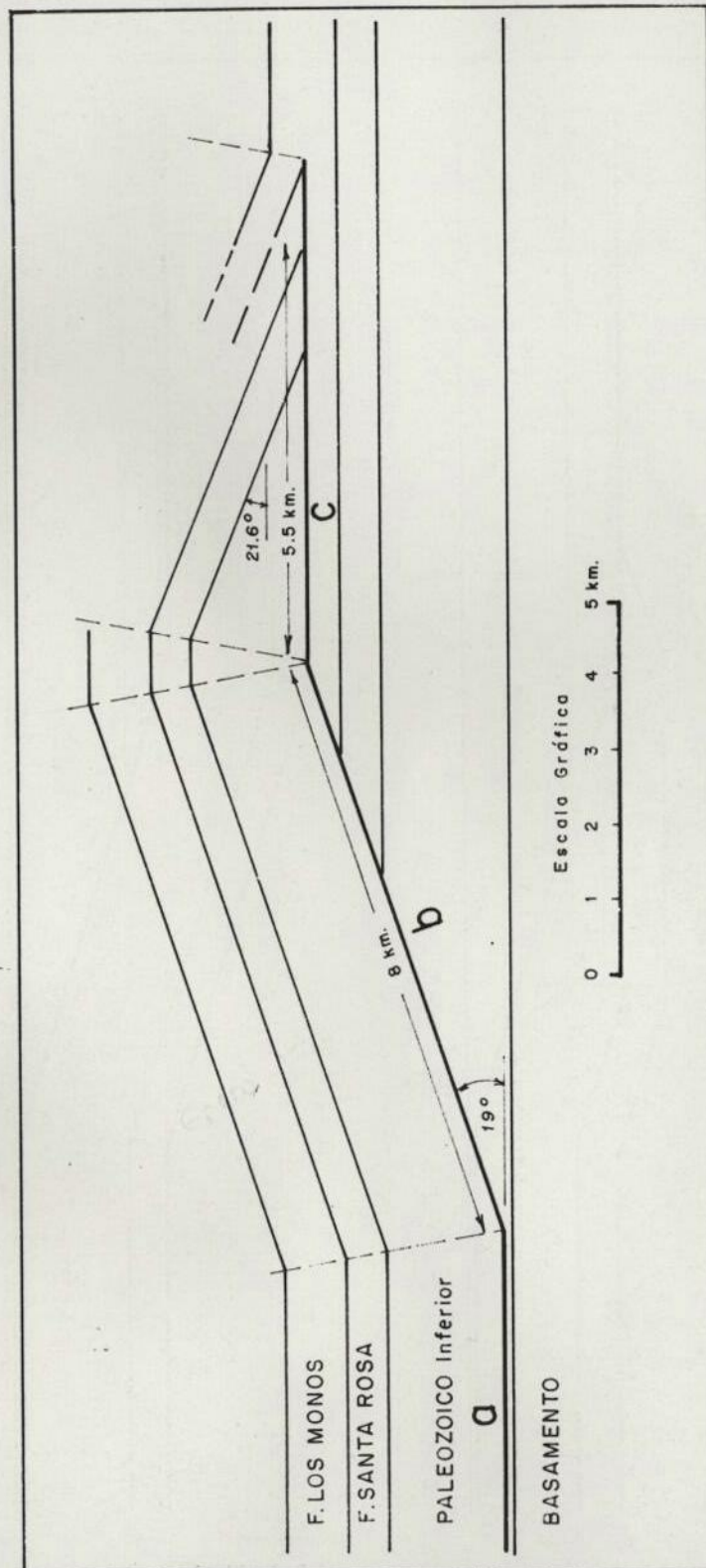


Figura 4: Comportamiento de los planos axiales en un anticlinal originado por flexión de falla. Caso 1: El rechazo del corrimiento (R) es menor a la longitud de la rampa (L), los planos axiales I y III son activos y el plano axial II permanece inactivo. Caso 2: El rechazo del corrimiento (R) supera a la longitud de la rampa (L), los planos axiales I y II son activos y el plano axial III pasa a ser inactivo.

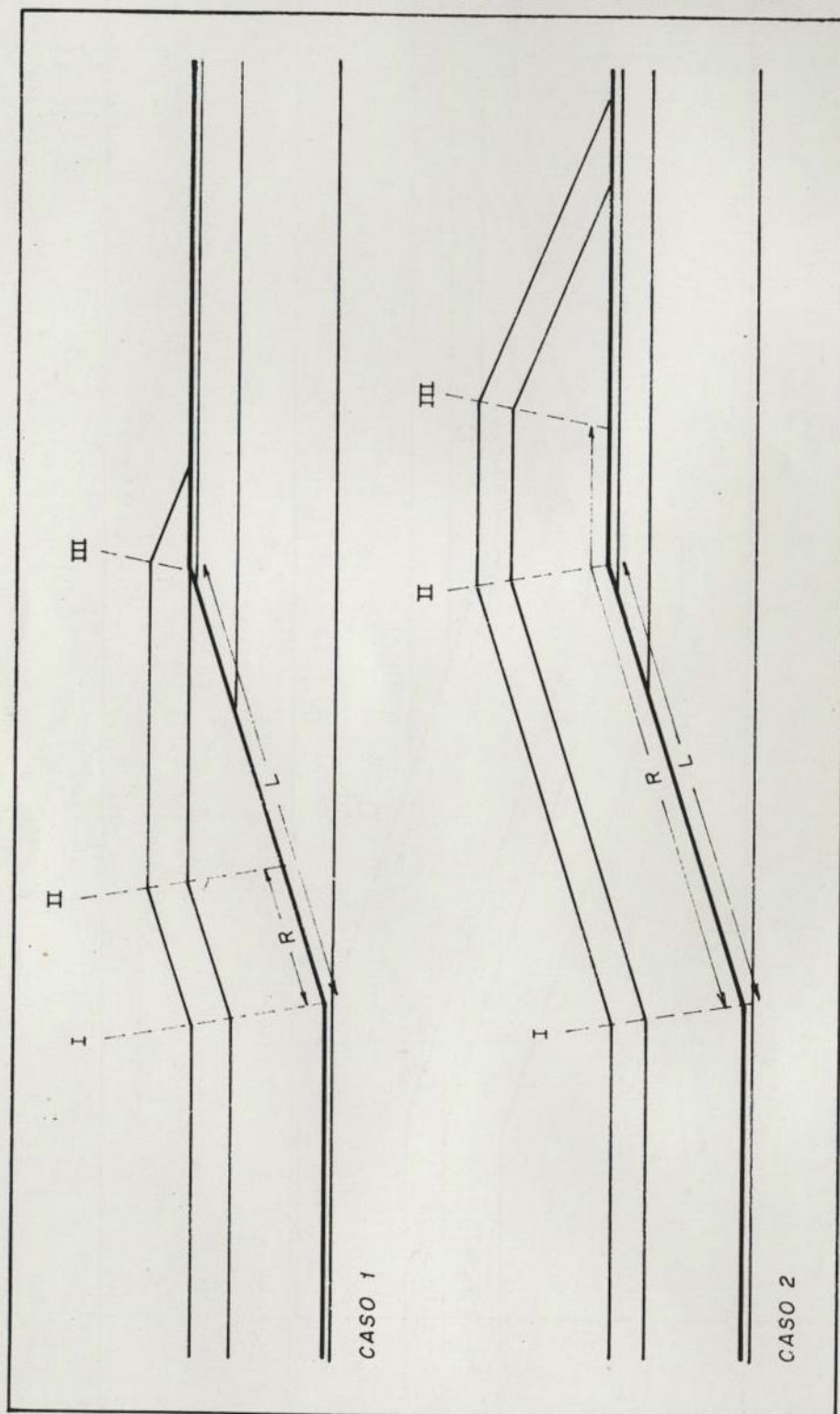


Figura 5: Comportamiento de las capas al ser curvadas. a. Capa con estratificación delgada: las variaciones de longitud estratal se compensan mediante deslizamiento flexural, b. Capa masiva y frágil: El exceso de longitud estratal en la curva cóncava se compensa mediante fracturas extensivas. c. En el plano axial activo la capa se fractura dos veces, una al curvarse (A-B) en el plano axial y otra al rectificarse (A'-B') al salir. d.

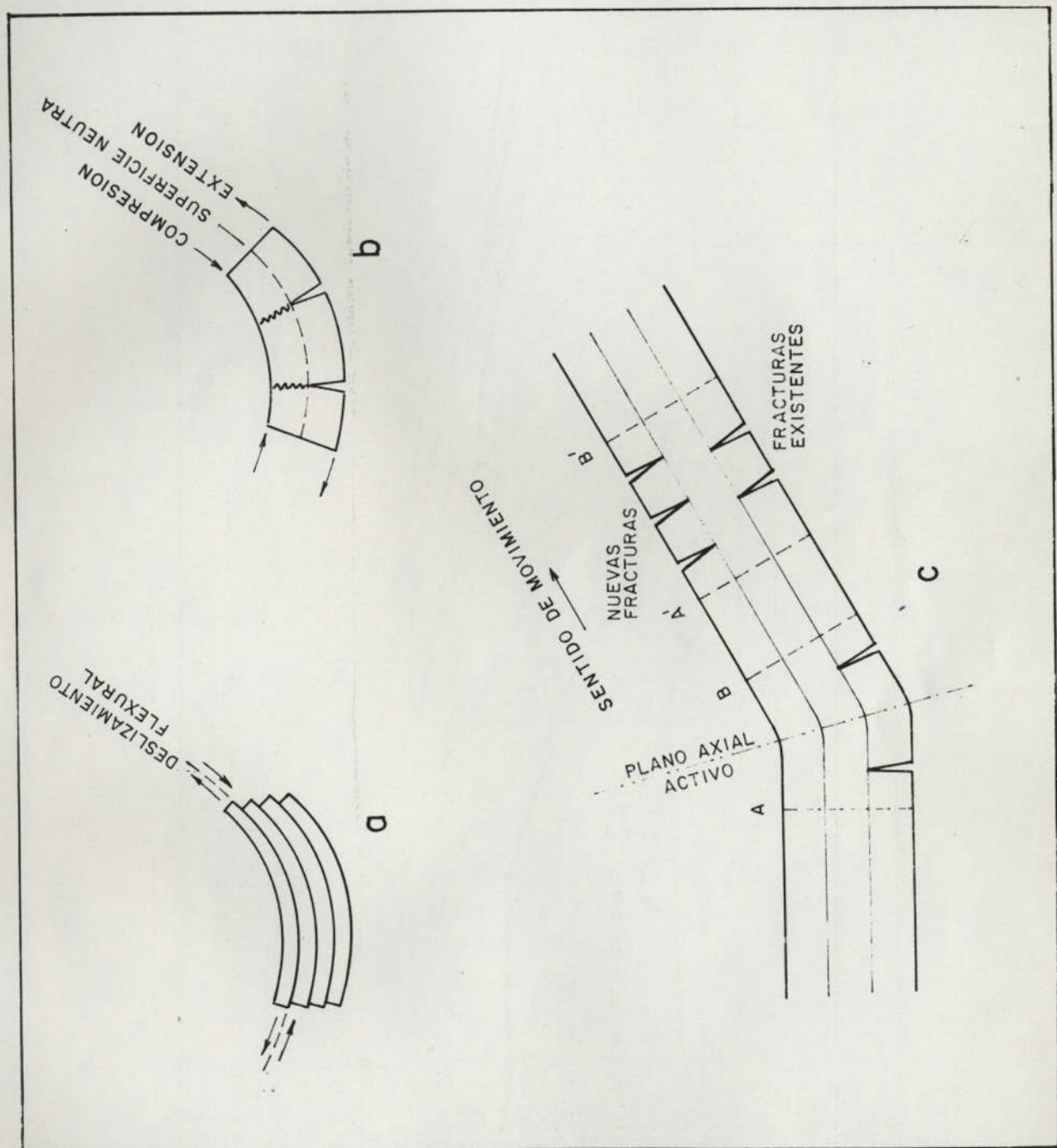


Figura 6: Corte estructural del Yacimiento de Turner Valley, Alberta, Canadá. Se observa al limbo tendido afectado por "back limb thrusts".

