

# PLIEGUES SOBREPUESTOS EN EL ANTICLINAL DE BUENAVISTA, PIEDEMONTE LLANERO.

Kammer, A. <sup>1</sup>; Támara, J. <sup>2</sup>; Beltrán, A. <sup>3</sup>; Robles, W. <sup>4</sup>

## RESUMEN

La evolución del frente de deformación del piedemonte llanero se caracteriza por la reactivación de fallas corticales cuyo origen se debe a eventos distensivos del Paleozoico Superior y del Cretáceo Inferior. Estas fallas son típicamente ciegas y se asocian a pliegues con una vergencia pronunciada hacia el E. Una posible simulación cinemática para su formación se apoya en el mecanismo de una zona de cizalla triangular (“tri-shear”). Para el área de estudio presentamos un análisis estructural a nivel de mapa por medio de un contorneo de la interfase basamento-cobertera y observaciones relacionadas a los afloramientos. En ambas escalas se evidencian pliegues de dirección N-S y de dirección E-W. Para explicar los pliegues de dirección E-W discutimos tres hipótesis, una primera evocando un acortamiento N-S regional, otra atribuyendo el acortamiento N-S a una reactivación sinistral de fallas mayores y una última basada en movimientos de masa de las unidades lodosas del Cretáceo Inferior.

**Palabras clave:** Fallas ciegas, reactivación de fallas, pliegues sobrepuestos, contracción oblicua, piedemonte llanero.

## SUPERPOSED MESOSCOPIC FOLDS IN THE BUENAVISTA ANTICLINE, COLOMBIAN LLANOS FOOTHILLS.

## ABSTRACT

The structural evolution of the Llanos foothills, Eastern Cordillera of Colombia, involves the reactivation of deep-seated faults, the origin of which has to be sought for in Late Paleozoic and Early Cretaceous rift events. These faults are blind and refer to major, E-vergent anticlines which make up the eastern deformation front of this mountain chain. Their geometry can be simulated using the “tri-shear” model. For our study area we perform a structural analysis at map scale by the contouring of the basement-cover interface and compare observations at outcrop scale. Both scales display N-S and E-W trending folds. E-W trending folds have not been reported so far from the Eastern Cordillera and, discussing their origin, we evoke three hypotheses: 1) a regional N-S contraction; 2) their formation in a relay zone during a sinistral fault reactivation; and 3), local down-slope mass movements on the flanks of a major E-W trending structural high.

**Key Words:** Blind faults, fault reactivation, superposed folds, oblique contraction, Llanos foothills of Colombia.

## INTRODUCCIÓN

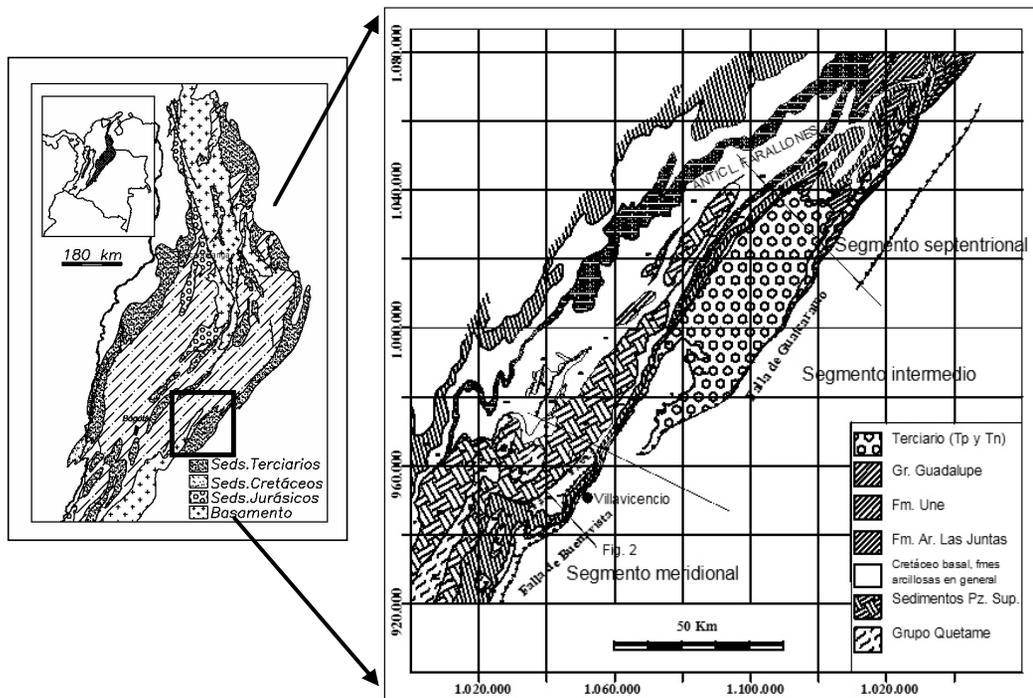
La Falla del Borde Llanero está compuesta por varios planos de falla, los cuales se relevan, de S a N, definiendo saltos hacia el oriente. Ellos indican con este patrón una contracción que es oblicua al frente de deformación del borde llanero. Estos sectores estructurales mayores, a su vez, están divididos en segmentos caracterizados por diferentes estilos de plegamiento. Es así que la Falla de Guaicaramo involucra el basamento en su segmento septentrional (FIGURA 1.), definiendo un estilo de plegamiento de piel gruesa. En su segmento meridional (designado como segmento intermedio en la FIGURA 1), esta misma falla se limita a transportar un manto de cobertera sedimentaria hacia el antepaís, evidenciándose aquí un estilo de piel delgada. Hacia la parte interna esta misma falla corta el frente de deformación principal del Anticlinal de Farallones a manera de una falla “fuera de secuencia”. Conforme a esta reorganización en el estilo estructural se registra un cambio en la respuesta sísmica en estos segmentos: En el

segmento de piel delgada los focos sísmicos son superficiales, mientras que en los sectores adyacentes los sismos alcanzan profundidades corticales intermedias.

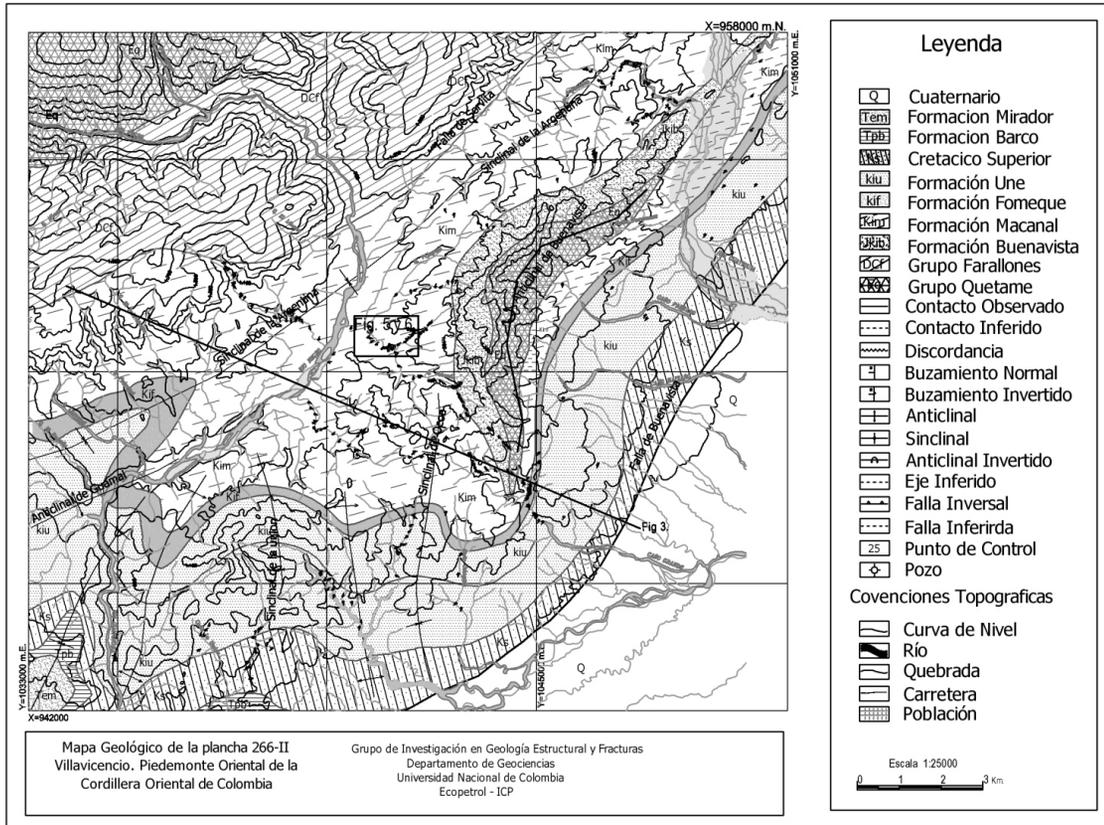
En esta contribución desarrollamos unos lineamientos generales acerca de la tectónica del frente de deformación del segmento meridional de la FIGURA 1 y relacionamos la estructura de un pliegue frontal a dos generaciones de pliegue, que se presentan a escala de afloramiento. No aspiramos a dar una explicación exhaustiva acerca de la razón de estos pliegues sobrepuestos; llamamos más bien la atención a estos fenómenos por su belleza y su carácter enigmático.

## MARCO TECTÓNICO

El segmento meridional de las FIGURAS 1 y 2 se caracteriza por fallas relacionadas a un intenso plegamiento kilométrico con flancos orientales fuertemente inclinados



**FIGURA 1.** Mapa geológico de la Cordillera Oriental y mapa sinóptico del piedemonte llanero entre Villavicencio y Tauramena, mostrando la segmentación de los frentes de deformación. Se indica la localización de la sección geológica de la FIGURA 3 en el segmento sur.

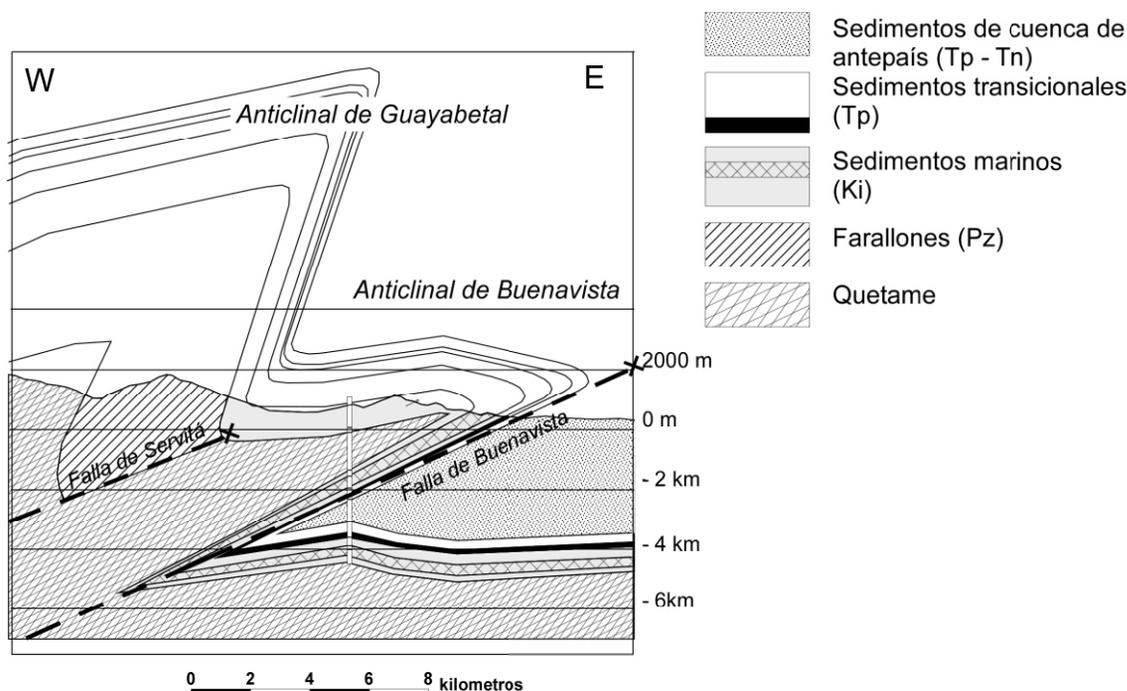


**FIGURA 2.** Mapa geológico del Anticlinal de Buenavista. El recuadro interior muestra la localización de las FIGURAS 6 y 7. La línea de corte representa la FIGURA 3.

hasta invertidos. Estas fallas no cortan los sedimentos y definen, por lo tanto, fallas ciegas.

Las fallas de basamento están prefiguradas por eventos tectónicos distensivos del Paleozoico Superior y del Cretáceo Inferior. Entre las primeras se destaca la *Falla de Servitá* que se inicia al N del Río Ariari, para seguir probablemente hasta la región de Chámeza, abarcando una distancia de más 400 Kms. La existencia de esta falla está documentada a través de una secuencia sin-rift de sedimentos continentales (Grupo “Farallones”), cuya columna alcanza un espesor de 3000 m en el bloque colgante de dicha falla, pero se reduce a unos cien metros a poca distancia hacia el occidente. Con este registro sedimentario la Falla de Servitá conserva su geometría aún después de haber sido involucrado en el plegamiento del frente de deformación durante la fase andina del Mioceno Superior o Plioceno (FIGURA 3).

Un ejemplo para una falla reactivada y originada durante el Neocomiano es la *Falla de Buenavista* que limita el flanco invertido del Anticlinal de Buenavista al W de Villavieja (FIGURAS 2 y 3). Esta falla contiene en su bloque colgante una espesa secuencia de brechas compuesta exclusivamente por componentes del basamento metamórfico subyacente del grupo “Quetame” (FIGURAS 2 y 3)(Dorado, 1990). Para esta falla suponemos una inclinación original hacia el E, ya que las brechas no contienen componentes del Paleozoico del Escudo de Guayana, que al oriente de Villavieja debería presentarse en espesores sobrepasando los 3000 m. Con esta inclinación el bloque yacente se basculó hacia el W y suministró el material de las brechas desde su límite oriental. A la vez actuó como barrera sedimentológica, separando una cuenca oriental con los sedimentos Paleozoicos preservados de una cuenca occidental, en la cual el basamento se exhumó antes del proceso extensivo (o de “rift”).



**FIGURA 3.** Sección estructural a través del frente de deformación del piedemonte a la altura de Villavicencio. Con el trazo vertical se indica la proyección del pozo exploratorio de Anaconda.

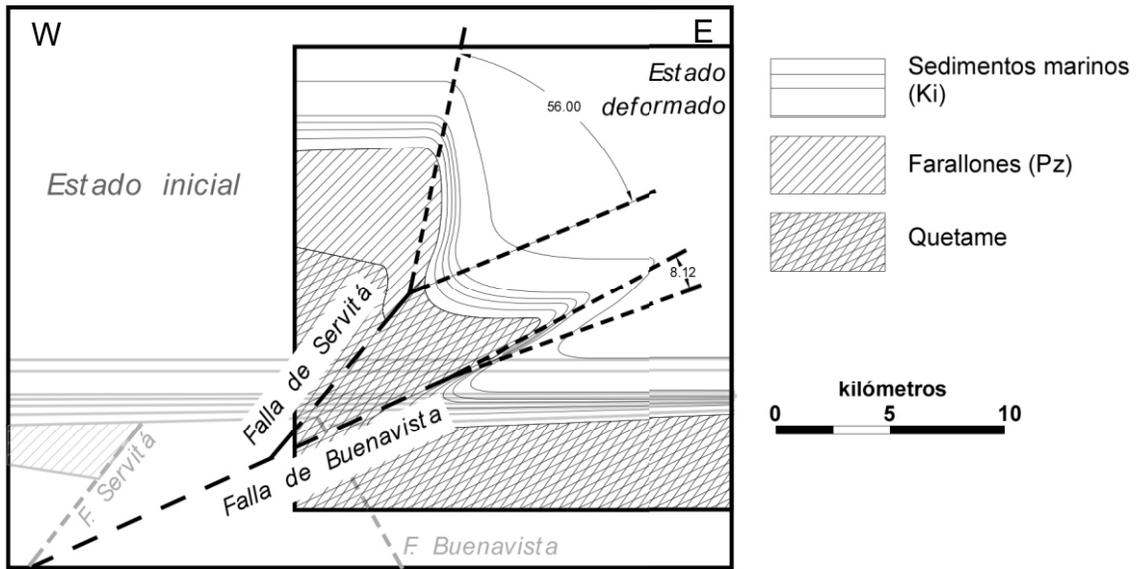
El desnivel estructural que resultó a partir de la reactivación de estas dos fallas sobrepasa los 10.000 m y documenta la progresión del frente de deformación hacia el antepaís en dos etapas. De acuerdo al perfil de la FIGURA 3, las deformaciones son muy intensas en los flancos verticalizados a invertidos, implicando alargamientos de hasta un 200%. En los flancos poco inclinados las deformaciones son, sin embargo, incipientes, a concluir de un desarrollo esporádico de un clivaje transversal en capas poco inclinadas y de amonitas poco o no deformadas. Por su inclinación moderada la Falla de Buenavista actuó, luego, como estructura de escape, desplazando los sedimentos hacia la superficie libre de un frente de deformación fuertemente inclinado. En el núcleo del Anticlinal de Buenavista el basamento está afectado por innumerables zonas de filonita y un clivaje de plano axial, evidenciándose deformaciones de muy altos grados.

Conceptualizamos la presencia de fallas ciegas relacionadas a un plegamiento intenso del basamento a través

de una simulación cinemática, aplicando el modelo de “tri-shear”. La replica de la FIGURA 4 se produjo para el caso de la Falla de Servitá utilizando un ángulo apical para la zona de “tri-shear” de 50° y descartando una propagación de la falla, conforme a su reactivación como falla normal. Para reproducir el pliegue estrecho del Anticlinal de Buenavista se redujo el ángulo de “tri-shear” a 10° y se utilizó una relación de propagación a desplazamiento de 1.8, interpretando la Falla de Buenavista como falla fuera de secuencia que se originó en la parte media de la corteza.

### PLIEGUES SOBREPUESTOS EN EL FLANCO NORMAL DEL ANTICLINAL DE BUENAVISTA

La estructura del flanco normal del Anticlinal de Buenavista está enmarcada por el curso divergente de la Falla de Buenavista con respecto al tren de las estructuras principales, aquí representado por el rumbo SW-NE de la Falla de Servitá (FIGURAS 2 y 5). Al acercarse a la



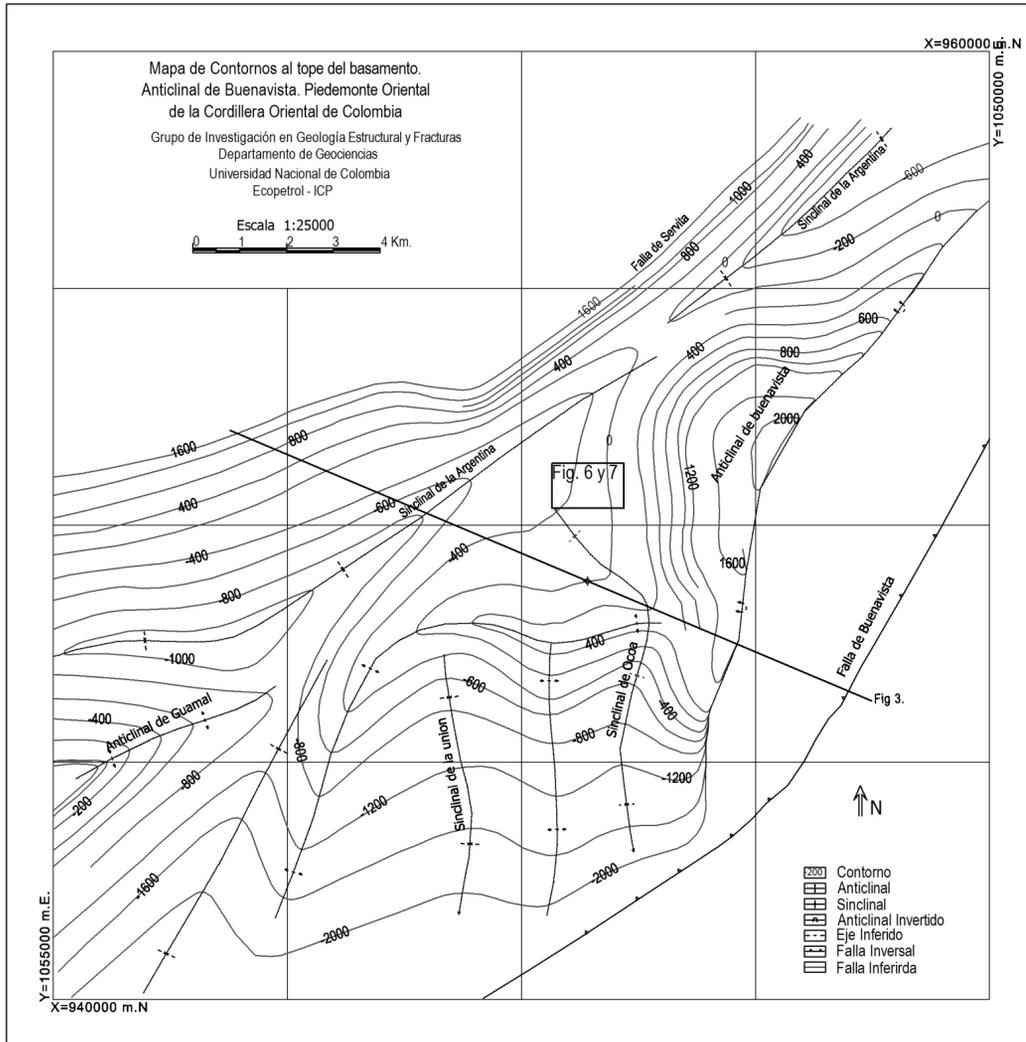
**FIGURA 4.** Simulación cinemática de los pliegues del frente de deformación por medio del modelo de “*tri-shear*” (Allmendinger, 1998). Las líneas grises indican la posición inicial de los estratos no plegados. Entre ellas se destacan las fallas de Servitá (izquierda) y de Buenavista (derecha) en trazos discontinuos. El cuadro insertado hacia la derecha ilustra la forma resultante de los pliegues modelados. El límite a la derecha de ambos cuadros es una línea de referencia, que es fija tanto para el estado plegado como inicial.

Falla del Borde Llanero, falla que separa estratos planos del escudo de estratos implicados en el plegamiento de la Cordillera, la Falla de Buenavista pierde de su salto y termina por completo. Al S de esta terminación, la Falla del Borde Llanero forma un puente (posiblemente sin seguir el tramo de una falla reactivada) hacia un segmento meridional, en el cual la falla resume el tren general del frente de deformación. La misma FIGURA 5 muestra un relevo entre el Anticlinal de Buenavista al E, el cual se destaca por un rumbo N-S, y el Anticlinal del Río Guamal al W, el cual retoma el rumbo SW-NE. Estos dos pliegues son parcialmente conectados por un alto transversal de dirección E-W.

Con el rumbo N-S divergente de la falla de Buenavista se amplía el flanco occidental del Anticlinal de Buenavista. En esta zona se presentan pliegues abiertos de dirección N-S (FIGURAS 2 y 5). Indicios para una contracción E-W y oblicua al rumbo general de la Cordillera Oriental son recurrentes y se manifiestan en el piedemonte a través de la sobreposición de fracturas de dirección N-S a fracturas

que se formaron paralelamente al tren estructural. Este hecho, así como el patrón escalonado de los pliegues en consideración, sugieren una fase de contracción de dirección E-W y oblicua a una proto-Cordillera, que se individualizó posiblemente desde el Oligoceno.

Las estructuras evidenciadas por los contornos del tope del basamento metamórfico tienen su equivalencia a escala de afloramiento, en la cual se presentan pliegues con bisagras E-W, replegando pliegues con bisagras N-S. Entre los pliegues de dirección N-S se observaron pliegues abiertos en capas relativamente competentes con venas de tensión, que radian de su periferia exterior hacia el interior (FIGURA 6), sugiriendo deformaciones longitudinales originadas por un proceso de tipo “*buckling*”. Cuanto más cerrados, cuanto más asumen una geometría “*chevrón*”. Planos axiales son verticales o perpendiculares al buzamiento de la interfase basamento-sedimentos, buzando al E en el flanco normal del Anticlinal de Buenavista. A estos pliegues se asocia localmente una leve crenulación de capas limosas.



**FIGURA 5.** Mapa de contornos del tope del basamento metamórfico. Equidistancias comprenden 400 m o 200 m. El recuadro interior muestra la localización de las FIGURAS 6 y 7. La línea de corte representa la FIGURA 3.

Los pliegues mesoscópicos de dirección E-W se presentan en los dos flancos del anticlinal transversal. Hacia la depresión estructural al N de esta estructura, ellos constituyen pliegues parados y generalmente abiertos con longitudes de onda de unas decenas hasta un centenar de metros. Existen zonas afectadas por un plegamiento intenso, en las cuales las capas exhiben una alta ductilidad (FIGURA 7). En estas zonas capas arcillosas ostentan un clivaje de plano axial.

Venas de tensión paralelas a los planos axiales se observaron solamente en la primera generación de pliegues. En las

zonas altamente deformadas de la segunda generación estas mismas venas se presentan como venas perpendiculares a las bisagras, dando lugar a un alargamiento axial.

## DISCUSIÓN

A nivel microestructural se identifican múltiples evidencias para una rotación anti-horaria del campo de esfuerzo durante el plegamiento andino, tales como diaclasas sobrepuestas, que indican una compresión tardía de dirección E-W. En estas condiciones finales discontinuidades



**FIGURA 6.** Pliegue abierto en capas limolíticas de la Formación Lutitas de Macanal. Obsérvese las venas de tensión que radian desde la superficie externa del banco grueso hacia su interior. Este pliegue pertenece a la familia de pliegues con bisagras de dirección N-S.



**FIGURA 7.** Plegamiento apretado en una alternancia limosa-lodosa, Formación Lutitas de Macanal. Estos pliegues pertenecen a la familia de pliegues con bisagras de dirección E-W.

corticales de alto ángulo pueden haberse reactivado como fallas de rumbo con desplazamientos dextrales. Este es el caso para la Falla de Servitá. En el flanco invertido del Anticlinal de Guayabetal (FIGURA 3.) se observan en los sedimentos Neocomianos zonas intensamente milonitizadas con bandas de cizalla oblicuas a la foliación principal, las cuales indican un desplazamiento dextral. Para el área de estudio podemos descartar la descomposición completa de la deformación en un componente paralelo y perpendicular a la Falla de Servitá (conforme a un proceso de “strain partitioning”), ya que el Anticlinal de Buenavista se vio afectado por una contracción E-W que es oblicua a tren estructural.

El caso del plegamiento E-W es más enigmático y su elucidación es aún prematura. A manera de discusión proponemos tres hipótesis, las cuales podrían complementarse mutuamente. Ellas son:

*1. La contracción N-S es un fenómeno regional.*

En estratos parados del Cretáceo basal entre Cáqueza y Puente Quetame pliegues con ejes verticales son bastante ubicuos y se sobreponen al plegamiento regional de dirección SW-NE. Con su asimetría estos pliegues indican un acortamiento N-S. Otra evidencia para esta hipótesis se refiere a un clivaje vertical de dirección E-W, que afecta tanto rocas del basamento metamórfico como del Cretáceo basal del Macizo de Quetame. Este clivaje puede ser tan intenso como el clivaje de plano axial que acompaña los pliegues de dirección SW-NE.

La validez de esta hipótesis está cuestionada por un alargamiento axial frágil que caracteriza las deformaciones de las formaciones arenosas del Cretáceo Superior. Estos alargamientos implican rotaciones de bloques y causan elongaciones de hasta un 10%.

*2. La contracción N-S se relaciona a zonas de relevo de fallas direccionales.*

Una supuesta reactivación de las fallas regionales como fallas sinestrales suministra una explicación elegante para explicar la presencia de un acortamiento N-S localizado alrededor de relevos de falla, como el que se presenta en el corte sobre la vía de Puente Quetame a Villavicencio. En este escenario se esperaría, sin embargo, una reactivación sinistral de las fallas mayores, la cual sería contraria a la que se registra actualmente, hecho que hasta ahora no se corroboró por observaciones directas.

*3. La contracción N-S es un fenómeno local.*

La construcción del mapa de contornos de la FIGURA 5. fue motivado inicialmente por la incoherencia entre el patrón regional de las estructuras y los buzamientos medidos en afloramiento. La posterior observación de pliegues de dirección E-W con planos axiales poco inclinados y una vergencia en dirección de la vertiente estructural podría suministrar una explicación para esta discrepancia. Este escenario presupone un movimiento de masa desde la cumbre de la estructura de dirección E-W de la zona de relevo hacia las depresiones estructurales adyacentes, que sería desencadenado por gravedad y una contracción N-S. La combinación de estos dos procesos podría resultar en una organización bastante complicada o “caótica” de zonas de mayor deformación (FIGURA 7). Esta hipótesis se relaciona a la problemática del plegamiento secundario e inversiones que afectan los pliegues parcialmente erodados de la Sabana, solamente que en estos últimos pliegues las migraciones de las masas lodosas se hacía hacia las charnelas en analogía de movimientos diapíricos.

## CONCLUSIONES

Una dificultad en la evaluación estructural de un área determinada es perfeccionar las observaciones hechas a diferentes escalas hasta hacerlas converger hacia un modelo sintético. En nuestro caso la observación de dos familias de pliegue a nivel de afloramiento se correlaciona con anticlinales de una misma dirección a escala de mapa en una zona de relevo de fallas. Hasta ahora no sabemos por cierto, si los acortamientos deducidos a partir de estas estructuras obedecen a factores locales o regionales. Un problema de fondo y hasta ahora desconocido, pero muy significativo para el entendimiento estructural de la Cordillera Oriental, se refiere a movilizaciones sin-cinématicas de masas lodosas, las cuales desencadenaron fenómenos diapíricos en el altiplano o, por el contrario, pueden haberse movilizado hacia las depresiones estructurales en el caso particular del alto transversal del área de estudio. Para entender mejor esta problemática necesitamos diseñar experimentos análogos en una combinación de materiales dúctiles y frágiles.

## AGRADECIMIENTOS

Gran parte de los trabajos de campo fueron realizados con recursos del Convenio de Cooperación Tecnológica

entre el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, enmarcado dentro del proyecto: “*Evolución estructural de los Frentes de deformación del borde llanero*”. Agradecemos a Miriam Caro, Alberto Ortiz y a Nestor Saavedra del Instituto Colombiano del Petróleo (ECOPETROL) por su constante apoyo.

#### REFERENCIAS

Allmendinger, R.W. (1998). Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics*, Vol. 17, No. 4, pp. 640–656.

Dorado, J. (1990). Contribución al conocimiento estratigráfico de la Formación Brechas de Buenavista (límite Jurásico-Cretácico), región noreste de Villavicencio (Meta). *Geología Colombiana*, No. 17, pp. 7-39.

---

---

Trabajo recibido: abril 10 de 2007

Trabajo aceptado: julio 30 de 2007