

EVOLUCIÓN TECTÓNICA DE LA CORDILLERA ORIENTAL DE COLOMBIA. 1. DEL OCÉANO IAPETO A LA PANGEA: UNA VISIÓN PRELIMINAR.

SEGUNDA PARTE: EVOLUCIÓN GEODINÁMICA

TECTONIC EVOLUTION OF THE EASTERN CORDILLERA OF COLOMBIA. 1. FROM THE IAPETUS OCEAN TO THE PANGAEA: A PRELIMINARY PERSPECTIVE

SECOND PART: GEODYNAMIC EVOLUTION

Germán Chicangana^{1,2}, Andreas Kammer²

¹ Centro de Investigaciones, Escuela de Arquitectura, Ciencias Básicas e Ingenierías,
Corporación Universitaria del Meta, Villavicencio, Colombia.
gechicanganam@bt.unal.edu.co

² Grupo de Geofísica, Departamento de Geociencias,
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C. Colombia.
akammer@unal.edu.co

Chicangana, G.; Kammer, A. (2013). *Evolución tectónica de la cordillera oriental de Colombia. 1. Del océano Iapeto a la pangea: una visión preliminar. Segunda parte: Evolución geodinámica*. GEOLOGIA COLOMBIANA, Vol. 38. Bogotá, Colombia. pp. 75-88.

Manuscrito recibido: 13 de octubre de 2012; aceptado: 1 de junio de 2013

Resumen

En este artículo se muestra la evolución geodinámica de la región noroccidental de Gondwana desde el Mesoproterozoico Superior hasta el Pérmico. Esta se realizó desde un reconocimiento geológico – estructural del centro de Colombia, correspondiente a la región que está delimitada entre la Cordillera Central y la cuenca de antepaís de los Llanos. Se destaca en esta reconstrucción geotectónica, el origen de las grandes estructuras que se presentan en la corteza continental y los procesos geodinámicos que dieron origen a su aparición durante el transcurrir de éste lapso de tiempo geológico, el cual se caracteriza por la ocurrencia de varios episodios relacionados a la inversión de cuencas.

Palabras Clave: Andes del Norte, Evolución Geotectónica, Inversión de Cuencas, Centro de Colombia, Evolución Geodinámica.

Abstract

In this paper is showing the geodynamic evolution of northwestern Gondwana area from Late Mesoproterozoic until Permian times. This exercise was realized from geologic - structural overview of Colombia central area between Central Cordillera and the foreland Llanos Basin. In this geotectonic restitution stand out the origin of large geologic structures that present in continental crust, and geodynamics process that was originated his occurrence during the course of geologic time lapse, which is characterized by the occurrence of several episodes related with the basins inversion.

Key Words: Northern Andes, Geotectonic Evolution, Basin Inversion, Colombia central region, Geodynamic evolution.

INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo es la evolución geodinámica a un modo preliminar del noroccidente de Gondwana durante el lapso Mesoproterozoico Superior – Pérmico, la cual indica su papel con la evolución de los océanos Iapeto, y Rheico y el camino que siguieron las diversas placas que hoy conforman la litosfera continental de los Andes del Norte. Éste trabajo se basa en los aspectos geológicos que corresponden a éste lapso de tiempo geológico, ya publicados en la primera parte de éste artículo en éste volumen.

METODOLOGÍA

Hemos tratado aquí de reconstruir la historia geológico - estructural del Paleozoico para los Andes del Norte, teniendo en cuenta el desarrollo del marco geodinámico regional de este sector de Gondwana, el cual se fundamenta en la literatura sobre la evolución geodinámica de los supercontinentes de Rodinia y Pannotia, y en modelos de evolución tectónica en cuencas y cinturones orogénicos. Para lograr este propósito, se tuvo en cuenta informa-

ción secundaria relacionada con la cartografía geológica elaborada por INGEOMINAS (Figura 1), de la región central de Colombia (2° N - 7° N, 71° W - 77° W), la observación de campo, y en algunos casos, el análisis con sensores remotos de las regiones en donde la cartografía geológica regional señala los afloramientos de las unidades litológicas mencionadas aquí, junto con la aplicación de modelos teóricos sobre evolución tectónica, teniendo presente su origen y posterior disposición tectono - estratigráfica. Los resultados del análisis geológico - estructural con los modelos muy generales mostrados aquí se soportan de trabajos publicados en modelación análoga de cuencas, explicando el origen de sus depocentros con el desarrollo de mecanismos del tipo rift/graben, como con su posterior inversión tectónica en un sentido regional como por ejemplo los modelos de Brun y Nalpas (1996), McClay (1997), Fossen (2000) y Amilibia et al. (2005), entre otros. Dicha inversión tectónica, sigue los esquemas de evolución de la tectónica compresiva relacionada a colisiones continentales o a acortamientos litosféricos tales como, los mostrados por ejemplo en los trabajos de Friedrich y Bartley (2003), Murphy y Yin (2003), Robl et al. (2008) o Willingshofer y Sokoutis (2009).

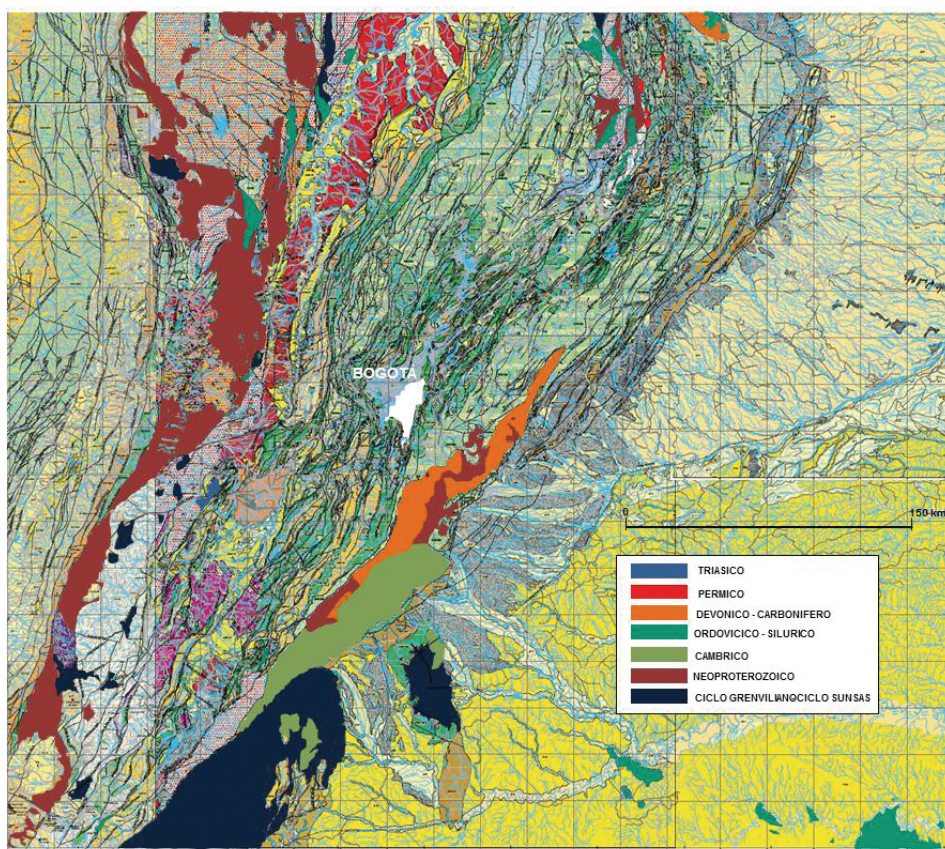


Figura 1. Mapa geológico general de la región de estudio de acuerdo al mosaico elaborado aquí a partir de las planchas Escala 1:500000 del Atlas Geológico de Colombia. (INGEOMINAS, 2007).

RESULTADOS OBTENIDOS

1. *Lapso Mesoproterozoico Tardío - Cryogénico*

Para conseguir desarrollar los modelos mostrados aquí, se pone como condición la existencia de elementos estructurales de primer orden que poseen una historia geológica prolongada que en nuestro caso son las fallas Algeciras, Guayuriba - Guaicaramo y Servitá - Santa María entre otras, las cuales pertenecen al SFFFCO (París et al., 2000). Estas grandes fallas de cabalgamiento que se ubican entre la Cordillera Oriental y la cuenca de antepaís de los Llanos – Amazonía, son el punto de apoyo (Backstop)

del frente de deformación que define la actual Cordillera Oriental en este sector de Colombia ya que son el límite entre dos basamentos cristalinos de diferente origen (Chicangana et al., 2007). El origen de estas estructuras se remonta a la colisión de fines del Mesoproterozoico que se presentó en el margen occidental de Suramérica entre los escudos Báltico, Laurentia y Gondwana, con la cual se dio origen al supercontinente Rodinia desarrollando con ésta la orogenia Grenville y el ciclo Sunsas (Dalziel, 1997; Dalziel et al., 2000; Keppie et al., 2001, 2003; Santos, 2003, Ramos, 2010). Para finales del Cryogénico (635 Ma), se observa una intromisión oceánica en el Escudo Báltico, mientras que los terrenos Carolina, Oaxaquia

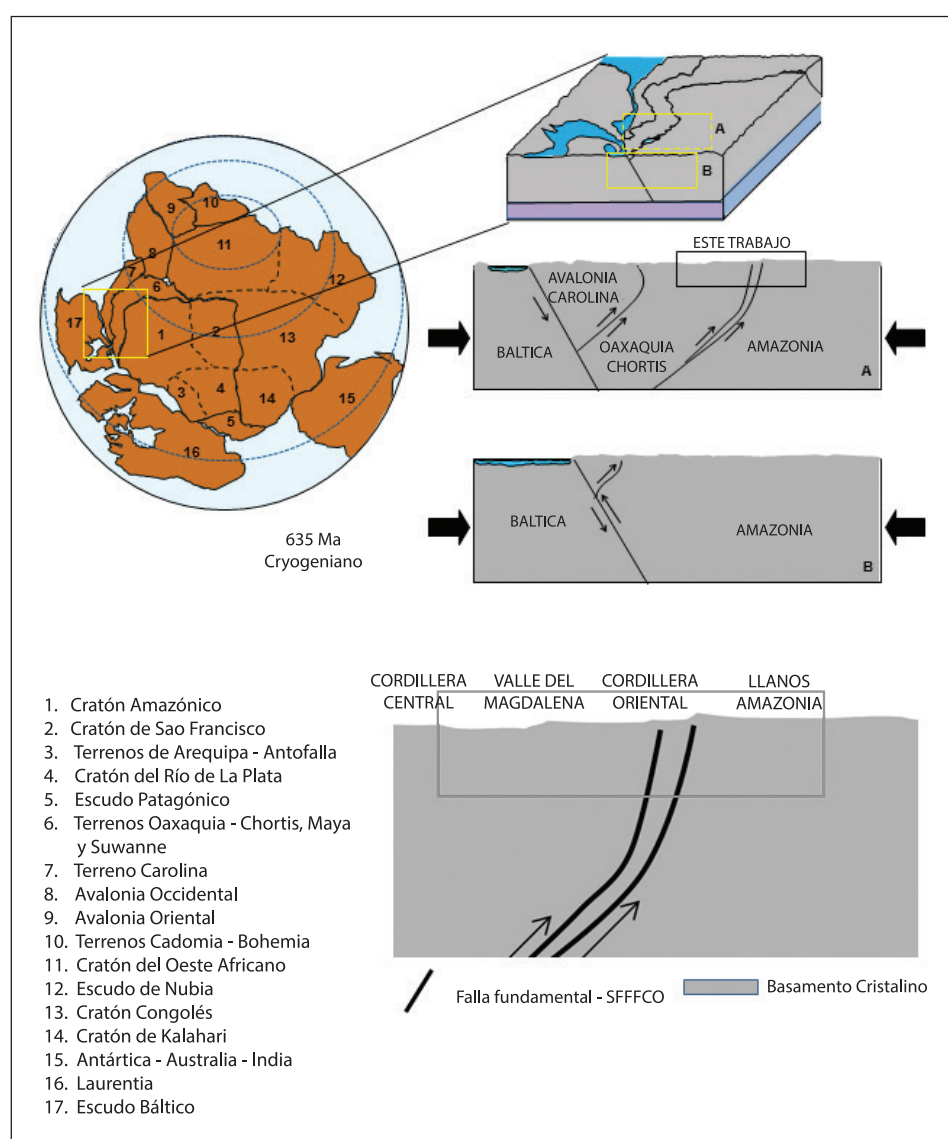


Figura 2. Arriba, Esquema paleogeográfico hipotético global para el Neoproterozoico Medio (Cryogénico), indicando los terrenos, escudos y cratones que definían al megacontinente Pannotia, en la lista inferior izquierda. En este se muestra un bloque diagrama con el perfil regional correspondiente del sector noroccidental de Gondwana. Abajo, detalle del perfil especificando la región de análisis de éste trabajo (Figura 1). Sin escala.

- Chortis y el Cratón Amazónico se encuentran emergidos, ya que estaban regidos por un campo de esfuerzos compresivos (Figura 2). En este escenario, el Terreno Oaxaquia - Chortis tiende a cabalgar sobre el Cratón Amazónico, el cual a su vez junto con los Terrenos Carolina y Avalonia Occidental respectivamente, son empujados desde el oeste por el Escudo Báltico, el cual se encuentra subduciendo parcialmente bajo estos en su empuje colisional con el margen occidental de Gondwana. Las fallas que buzcan hacia el oeste entre el terreno Oaxaquia - Chortis y el Cratón Amazónico son el límite estructural que da origen al SFFFCO (Figura 2). Para esta época hay que tener presente que la mayoría de los terrenos y cratones estaban emergidos, por lo que se encontraban sufriendo un proceso erosivo fuerte que estaba afectando su basa-

mento cristalino (Keppie et al., 2003; Santos, 2003). Esto último se afirma porque no existe o aún no se ha determinado en estos terrenos, un registro estratigráfico claro que represente esta época para este sector de Gondwana. Con base en esto, en nuestro sector de estudio, se observan únicamente los basamentos cristalinos expuestos limitados por las estructuras falladas que les sirven de contacto, las cuales son las que representan al actual SFFFCO.

2. Lاپso Cryogénico - Ediacárico

Para este lapso (Figura 3), se observa una sedimentación para los terrenos anexados al Cratón Amazónico producida por un régimen de esfuerzos extensivo. En nuestro

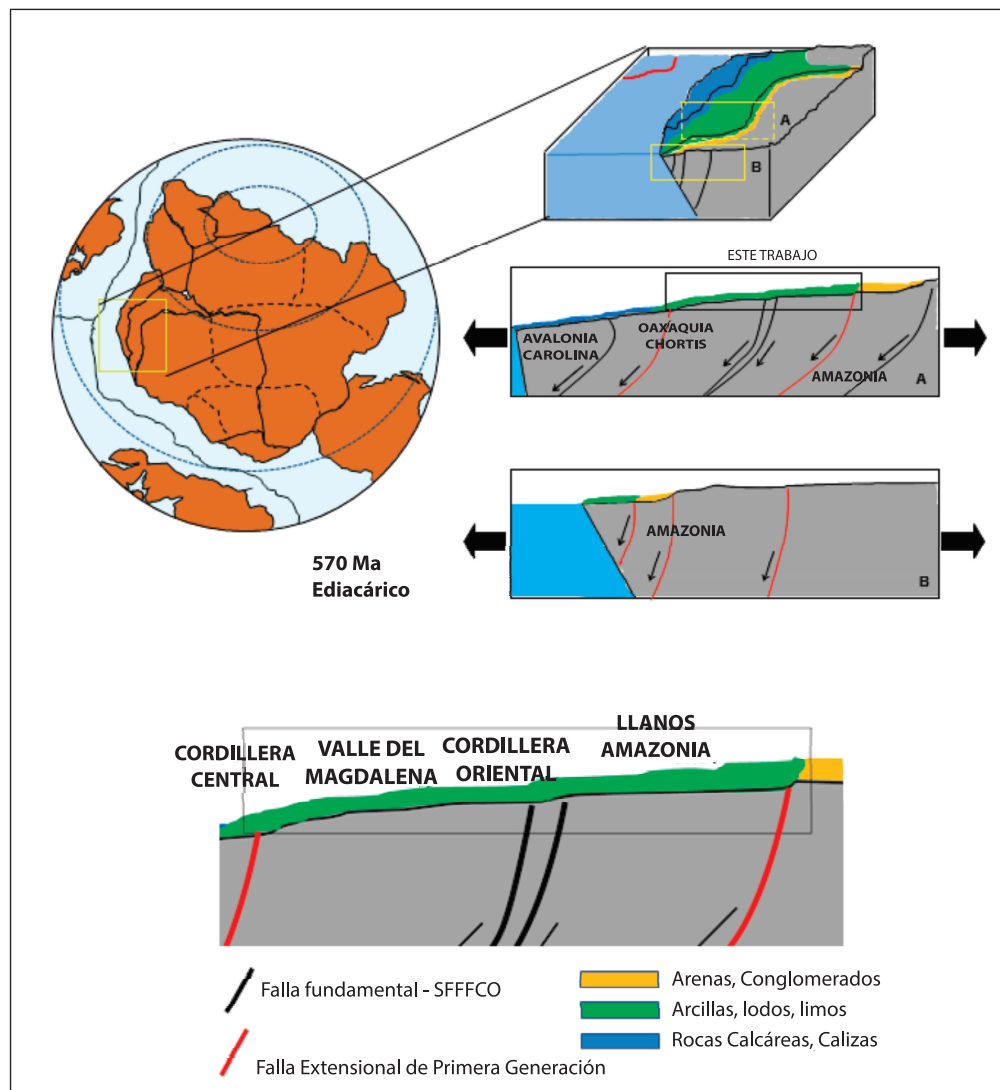


Figura 3. Arriba, Esquema paleogeográfico hipotético global para el Neoproterozoico Superior (Ediacárico). En este se muestra un bloque diagrama con el perfil regional correspondiente del sector noroccidental de Gondwana. Abajo, detalle del perfil especificando la región de análisis de éste trabajo (Figura 1). Sin escala.

sector de estudio, este lapso se verifica con la deposición de sedimentos finos clásticos como lodolitas y limonitas enmarcados a un ambiente marino de plataforma somero, y sedimentos siliciclásticos gruesos tipo arenas relacionados a un ambiente emergido y progradante que se presentó solo hacia el este en el Cratón Amazónico. La conducta de las fallas relacionadas al SFFFCO fue de carácter extensivo, siguiendo estas una inversión tectónica negativa (McClay, 1997), que dio lugar al desarrollo de una primera generación de fallas extensivas sub - paralelas al SFFFCO, que producen con su aparición grábenes. Aquí se pueden inferir ambientes de transgresión marina relacionados a esta fase extensiva que para el Ediacárico Medio, se relacionan al desarrollo de un rift que produjo la separación del Escudo Báltico y Laurentia de Gondwana,

dando inicio a la apertura al océano Iapeto (Cawood et al., 2001; Keppie et al., 2003).

3. Lاپso Ediacárico – Cámbrico Inferior

Para este lapso (Figura 4), se restablece un campo de esfuerzos compresivo, produciendo inversión en las fallas del SFFFCO junto con las fallas extensivas de la primera generación, que derivó de una zona de subducción presente al oeste de Gondwana que se originó como resultado de la expansión del Océano Iapeto (Cawood et al., 2001). Este proceso se manifiesta con un levantamiento orogénico que expone de nuevo los basamentos cristalinos y elimina parcialmente con la erosión las secuencias clásticas y siliciclásticas depositadas previamente. La preser-

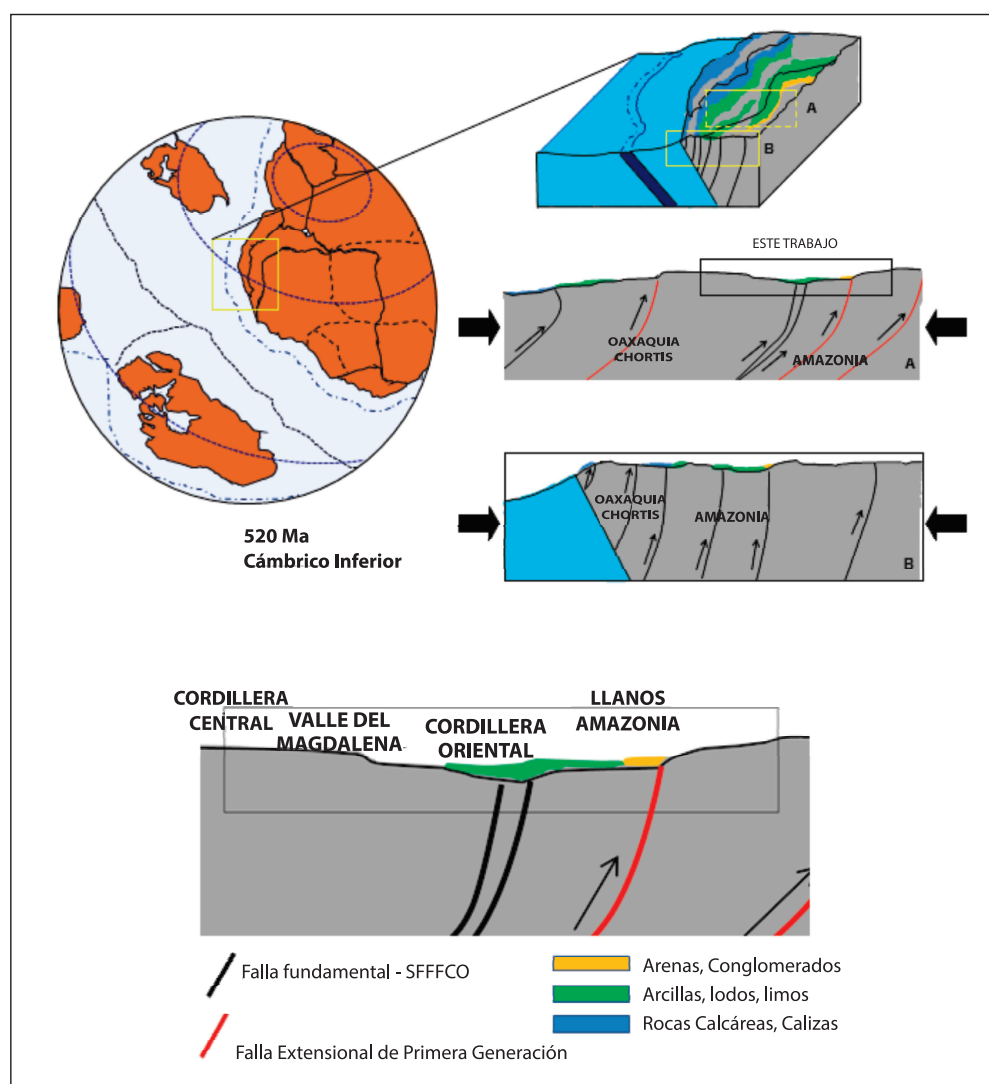


Figura 4. Arriba, Esquema paleogeográfico hipotético global para el Cámbrico Inferior. En este se muestra un bloque diagrama con el perfil regional correspondiente del sector noroccidental de Gondwana. Abajo, detalle del perfil especificando la región de éste trabajo (Figura 1). Sin escala.

vacación en algunos sectores de los sedimentos, los cuales dejan testimonio de la acumulación de material detrítico precedente, se relaciona con los grábenes desarrollados en el lapso inmediatamente anterior, destacándose aquí de forma muy restringida hacia el borde oriental de la Cordillera Oriental la unidad litológica denominada por Trümpy (1943) como Calizas del Ariari (Julivert, 1968), que representaría un ambiente de mar epicontinental que éste muy posiblemente relacionado de acuerdo a este modelo de subducción a una cuenca tras arco. Sin embargo, su edad aún es dudosa, porque su origen bien puede obedecer al lapso inmediatamente anterior, el cual estaba igualmente bajo un régimen de esfuerzos extensivo, ya que la carencia de fósiles impide relacionarla al marco geodinámico regional de finales de este lapso. Es de destacar para este lapso, el arco volcánico que se desarrolló en los Terrenos Carolina, Avalonia Occidental y Avalonia Oriental (Keppie et al., 2003).

4. Lapso Cámbrico Inferior – Ordovícico Medio

En este lapso (Figura 5), comienza a accionar el rift que da lugar a la separación de los terrenos Carolina y Avalonia Occidental de los terrenos Oaxaquia – Chortis, Maya y Suwannee dando origen con esto al Océano Rheico (von Raumer et al., 2003; Murphy et al., 2006; Nance y Linnemann, 2008). En nuestro sector de estudio, se observa que la conducta de las fallas del SFFFCO y de la primera generación es extensional. En este lapso igualmente de manera sincrónica a este accionar de las fallas, se produce una segunda generación de fallas extensionales acompañada de sedimentación clástica y siliciclástica, en donde también predominan rocas calcáreas que dejan un claro testimonio de la invasión del mar para el final de este lapso en la zona de contacto entre el Terreno Oaxaquia – Chortis y el Cratón Amazónico. Para éste lapso se

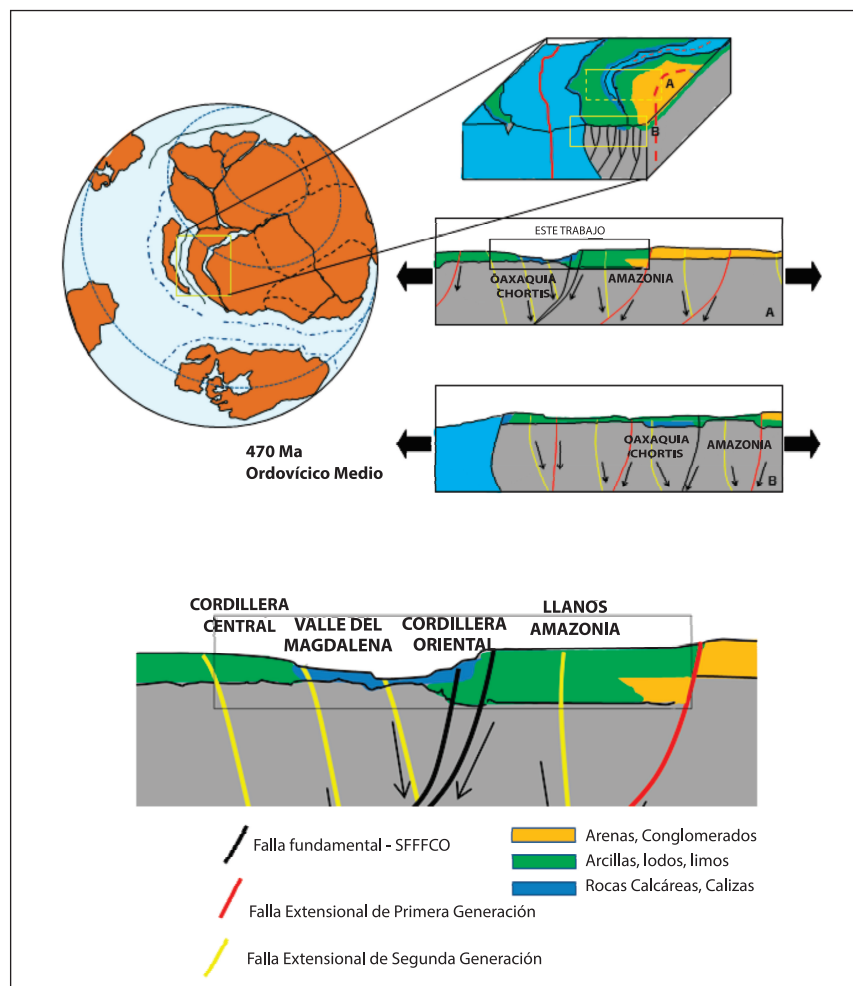


Figura 5. Arriba, Esquema paleogeográfico hipotético global para el Ordovícico Medio. En este se muestra un bloque diagrama con el perfil regional correspondiente del sector noroccidental de Gondwana. Abajo, detalle del perfil especificando la región de éste trabajo (Figura 1). Sin escala.

destaca la actividad ígnea relacionada al accionar del rift, que en nuestra región de estudio se evidencia con la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare en la Amazonía colombiana. Igualmente, esta actividad magmática asociada al desarrollo del rift queda registrada en el Terreno Oaxaquia –Chortis tal como lo indican Vega– Granillo et al. (2007) y Keppie et al. (2008). Para la Cordillera Oriental en nuestro caso, no es claro un magmatismo asociado contemporáneo y las unidades ígneas como el Gabro del Ariari y la Cuarzomonzonita de Santa Rosita junto con el Stock Chuscales, no presentan criterios estratigráficos y geocronológicos bien definidos para que por el momento se asocien a este magmatismo de rift con seguridad.

5. Ordovícico Medio – Silurico Inferior

Durante este lapso (Figura 6), se presenta de nuevo una contracción litosférica que obedece al inicio de una nueva subducción que se desarrolló luego de la apertura del

Océano Rheico en el margen occidental de Gondwana desde las vecindades de los Terrenos Oaxaquia – Chortis en el norte hasta el Escudo de Patagonia en el sur. En esta época continúa desarrollándose al norte del Terreno Oaxaquia – Chortis, el magmatismo relacionado al rift que dio apertura al Océano Rheico, desprendiéndose hacia el noreste los Terrenos Avalonia Occidental, Avalonia Oriental y Cadomia - Bohemia de los cratones Amazónico y del Oeste Africano (von Raumer et al., 2003; Murphy et al., 2006; Nance y Linnemann, 2008). En nuestro sector de estudio, el campo de esfuerzos compresivo produce una inversión tectónica positiva (McClay, 1997) tanto para las fallas extensivas de la primera y la segunda generación, como para las fallas pertenecientes al SFFFCO. En este proceso se presenta la depositación de sedimentos siliciclásticos y clásticos, indicando con esto un paulatino retiro del mar de esta región con la consecuente emergencia de la corteza, que conllevará a generar hacia

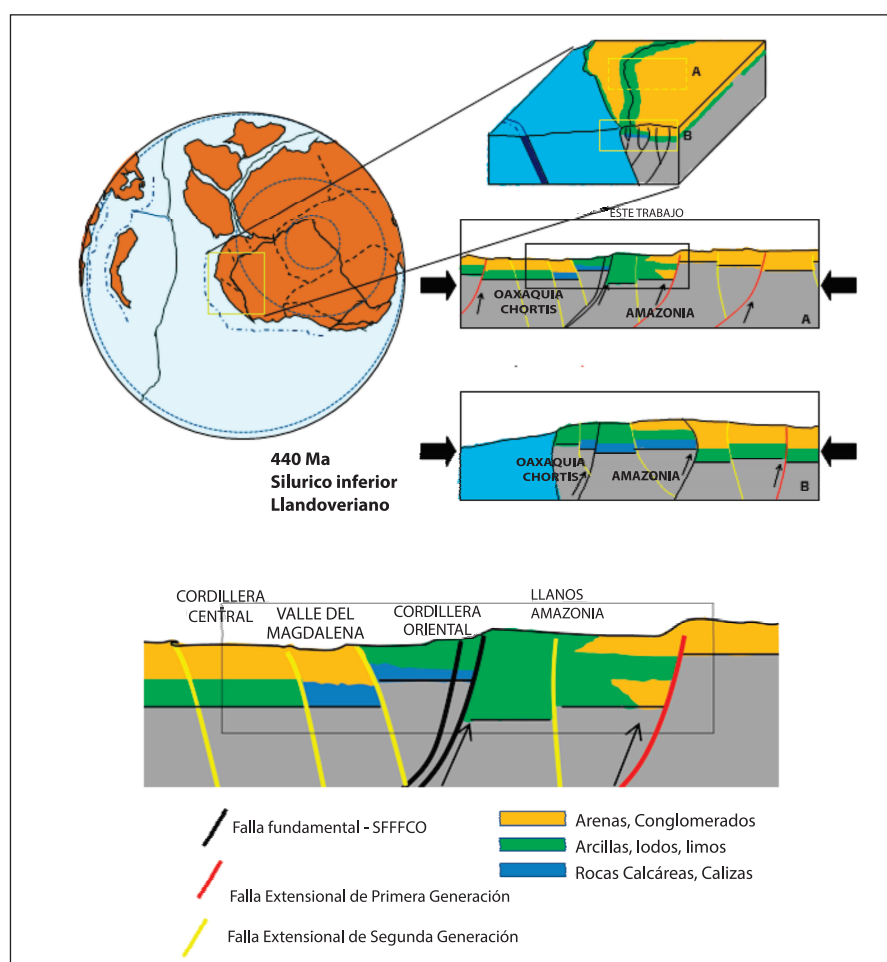


Figura 6. Arriba, Esquema paleogeográfico hipotético global para el Silúrico Inferior. En este se muestra un bloque diagrama con el perfil regional correspondiente del sector noroccidental de Gondwana. Abajo, detalle del perfil especificando la región de éste trabajo (Figura 1). Sin escala.

el final de este lapso un fuerte proceso erosivo, el cual borrará el registro estratigráfico perteneciente al Silúrico.

6. Silúrico Inferior – Devónico Superior

En este lapso (Figura 7), se observa que el Océano Rheico ha alcanzado su máxima expansión y se ha completado la extinción del Océano Iapeto (von Raumer et al., 2003; Murphy et al., 2006; Nance y Linnemann, 2008). Para el margen noroccidental de Gondwana durante este lapso, se presenta un régimen extensivo que obedece posiblemente a un cambio en la dirección de la subducción bajo este sector, inducida por una rotación en sentido horario del continente para este tiempo. Para nuestro sector de estudio, se produce de nuevo el desarrollo de grábenes al generar de nuevo una inversión tectónica negativa en las fallas del SFFFCO, lo que a su vez produce que las fallas extensivas de la primera y segunda generación presenten de nuevo una conducta extensiva. En este escenario se

produce una sedimentación relacionada a un mar epicontinental estrecho que se ubicaba en la zona de contacto entre el Bloque Andino y el Cratón Amazónico. Esta sedimentación consta de limonitas y arcillolitas con esporádicos niveles de calizas en donde su mejor representante son las Lutitas de Pipiral (Pulido y Gómez, 2001), que se consolidan hacia el final de este lapso. Hacia los bordes de la recién formada cuenca epicontinental se presentan sedimentos clásticos con un fuerte predominio de sedimentos siliciclásticos tipo arenas y conglomerados representados por las Formaciones El Tibet, y La Floresta, aflorantes hacia el norte de la Cordillera Oriental junto con la Formación Arenisca de Ambica (Fuquen y Osorno, 2002) que aflora al sur. Se destaca para este lapso la presencia en la Cordillera Oriental de una unidad ígnea la cual es el Batolito de Mogotes - Monzonita de Onzaga, pero ésta tanto desde un punto de vista estratigráfico como geocronológico, no da seguridad sobre si su magmatismo tiene que ver con el escenario de tectónica extensiva descrito aquí.

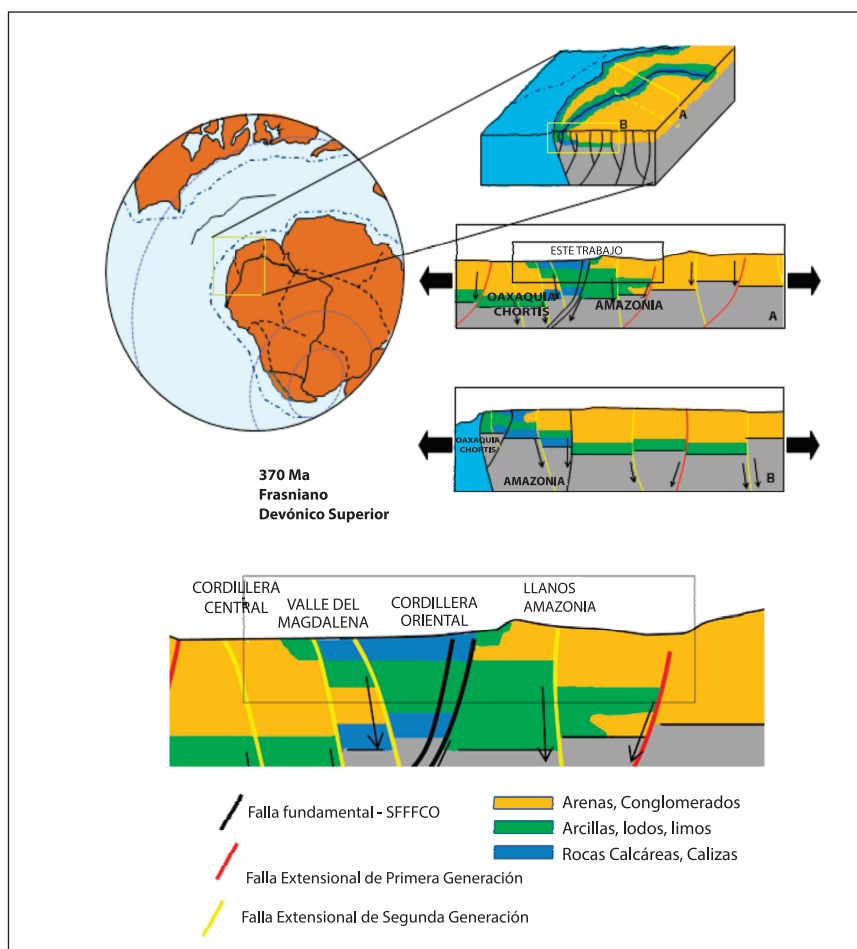


Figura 7. Arriba, Esquema paleogeográfico hipotético global para el Devónico Superior. En este se muestra un bloque diagrama con el perfil regional correspondiente del sector noroccidental de Gondwana. Abajo, detalle del perfil especificando la región de éste trabajo (Figura 1). Sin escala.

7. Devonico Superior – Carbonífero Superior

Para este lapso (Figura 8), se produce de nuevo una fase compresiva para este sector de Gondwana que se relaciona con la evolución de la subducción del margen occidental de Gondwana. Durante esta fase, comienza definitivamente el cierre del Océano Rheico (Murphy et al., 2006; Nance y Linnemann, 2008), cuando de nuevo Laurentia comienza a acercarse a Gondwana. En la zona de nuestro estudio, observamos que la cuenca epicontinental incipiente que se desarrolló en el lapso anterior se ha ido ampliando, extendiendo un mar epicontinental en la zona de contacto entre el Bloque Andino y el Cratón Amazónico. Este fenómeno está claramente documentado por unidades litológicas como el denominado “Paleozoico de La Jagua” (Gómez – Cruz et al., 2007), las Formaciones Capas Rojas del Guatiquía, y Diamante, junto con las Series Confinas y Rio Nevado. Dicho proceso de sedimentación, en donde son exclusivos sedimentos arcillosos junto

con rocas calcáreas con la esporádica presencia de rocas siliciclásticas, obedece a un marco geotectónico que se asocia a una cuenca tras arco, en donde hacía el oeste y el este de la cuenca se presenta una inversión tectónica positiva para las fallas extensivas de la primera y la segunda generación, mientras que hacía el depocentro de la cuenca, que se ubicaba en la actual Cordillera Oriental y el Valle del Magdalena, se presenta una conducta extensional para las fallas antes mencionadas y las pertenecientes al SFFFCO, porque en éste sector sufren un proceso de inversión tectónica negativo.

8. Carbonífero Superior – Pérmico Medio

Para este último lapso de nuestro análisis (Figura 9), se completa la acreción entre Laurentia y Gondwana, conformándose de esta manera la última Pangea y desapareciendo definitivamente el Océano Rheico. La colisión

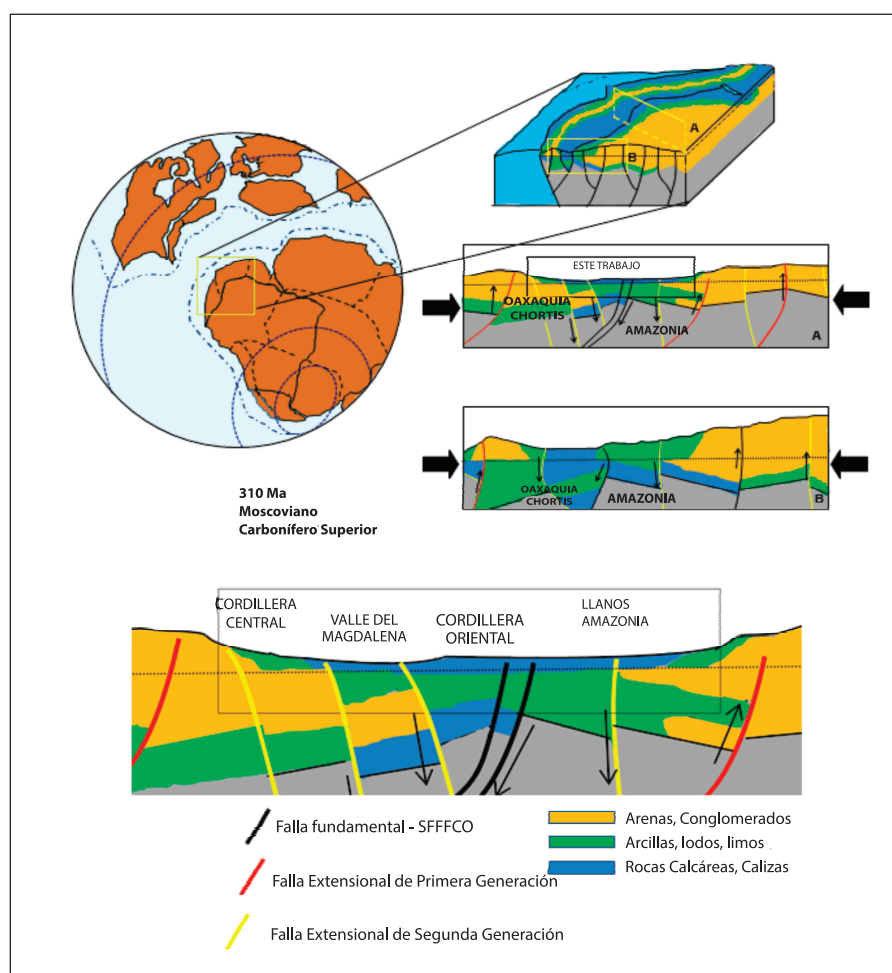


Figura 8. Arriba, Esquema paleogeográfico hipotético global para el Carbonífero Superior. En este se muestra un bloque diagrama con el perfil regional correspondiente del sector noroccidental de Gondwana. Abajo, detalle del perfil especificando la región de éste trabajo (Figura 1). Sin escala.

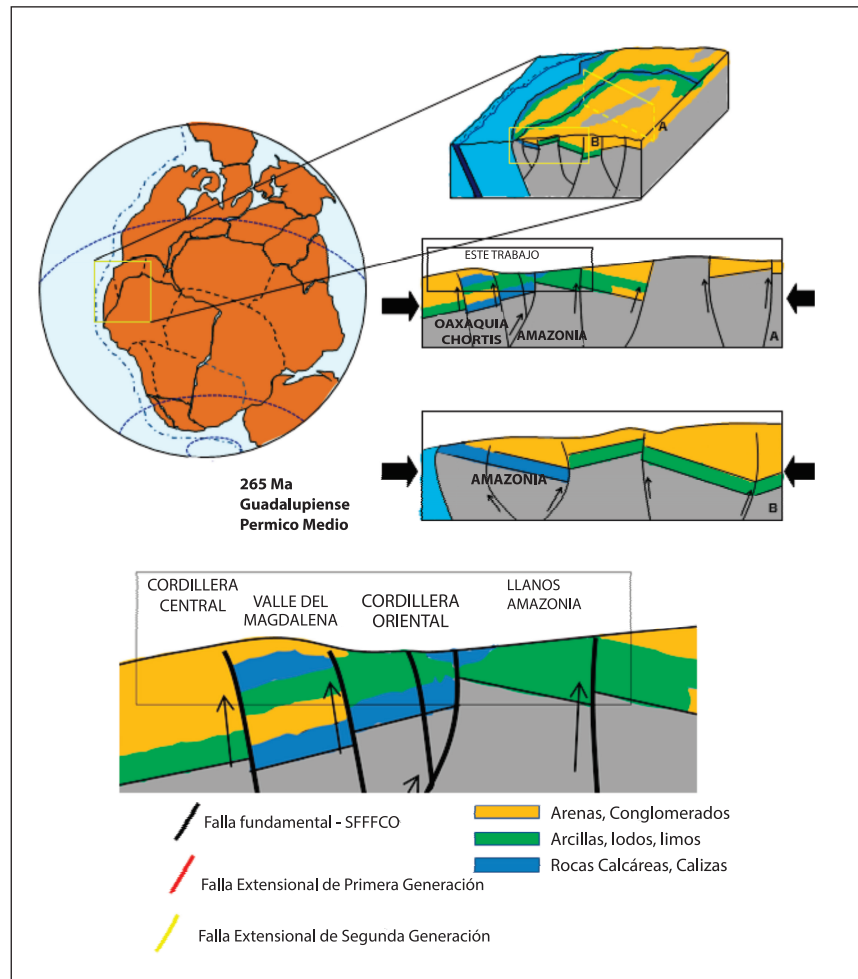


Figura 9. Arriba, Esquema paleogeográfico hipotético global para el Pérmico Medio. En este se muestra un bloque diagrama con el perfil regional correspondiente del sector noroccidental de Gondwana. Abajo, detalle del perfil especificando la región de éste trabajo (Figura 1). Sin escala.

continental desarrolló aquí un nuevo cinturón orogénico paralelo al sector de contacto entre el Bloque Andino y el Cratón Amazónico, el cual generó un máximo efecto de acortamiento y deformación cortical en nuestro sector de estudio. El comportamiento para las fallas del SFFFCO es compresiva al igual que la de las fallas extensionales de la primera y segunda generación, que de nuevo sufren un proceso de inversión tectónica positiva. El escenario aquí es el de una emergencia permanente, en donde se erosionan de manera parcial los sedimentos asentados durante el lapso inmediatamente anterior, y en algunos casos para la región de los Llanos y la Amazonía, comienza a exhibirse de nuevo el basamento cristalino de manera parcial. Este escenario geodinámico se desarrolla de esta manera para este sector de Gondwana hasta que a inicios del Mesozoico arranca de nuevo la fragmentación de Pangea dando por culminado el ciclo de Wilson respectivo que la creó.

DISCUSIÓN SOBRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El estilo estructural inicial que se desarrolló aquí es posible que se asemejara en su evolución geotectónica al planteado por Murphy y Yin (2003), para explicar la evolución Meso - Cenozoica de una sección de la Cordillera Himalaya en el suroeste del Tibet en Asia. La colisión dio origen a un cinturón orogénico transcontinental (Cinturón de Grenville), el cual posiblemente consiguió exhumar basamentos cristalinos cuyas edades pueden remontarse hasta el Paleoproterozoico o inclusive hasta el Neoproterozoico (Restrepo – Pace et al., 1997; Keppie et al., 2003; Santos, 2003). Para conseguir los procesos de exhumación surgen aquí en una etapa sincrónica al desarrollo de la colisión, otras estructuras paralelas en su rumbo a las fallas fundamentales del SFFFCO como la falla Servitá – Santa María, para definir un modelo cabalgante tipo

duplex (McClay, 1997). Este mecanismo de exhumación que favoreció el levantamiento orogénico, es posible que se facilitara cuando la falla fundamental de contacto entre los terrenos pertenecientes a Laurentia, consiguiera que este continente cabalgara sobre el Cratón Amazónico (Figura 2) al estilo del experimento B que exhibe el modelo de desacoplamiento cortical fuerte, que Willingshofer y Sokoutis (2009), aplican para explicar la evolución orogénica de los Alpes orientales. Solo con este modelo es posible explicar la actual tendencia geométrica de las fallas del SFFFCO, cuyo buzamiento hacia el NW y su carácter lístrico hacia la litosfera profunda (Mora et al., 2006; Chicangana et al., 2007) se han conservado desde su origen. La situación de amalgamación de los terrenos se mantiene durante un gran lapso de tiempo, sin afectar para nuestra región de estudio la fragmentación de la Rodinia y la reunificación de Pannotia que en Brasil han señalado con los episodios orogénicos y tafrogénicos del ciclo Brasiliano (Shobenhauss y Brito Neves, 2003). En este modelo el cual se extiende hasta el Ediacárico, en donde se esboza aquí un primer episodio de rift que tiene que ver con la separación de Pannotia (Dalziel, 1997), no se tiene presente la temprana separación de Laurentia de los terrenos más occidentales como Carolina, Avalonia Occidental, Avalonia Oriental, Cadomia y Bohemia, lo cual seguramente acaeció durante el Criogénico temprano, tal como lo han reportado Shobenhauss y Brito Neves, (2003), en Brasil. La ausencia, o el todavía no reconocido registro estratigráfico para esta última época en nuestra zona de estudio y para los terrenos anexados al Cratón Amazónico durante este tiempo (Keppie et al., 2003), nos hacen llegar a la conclusión de que la conducta del SFFFCO fue compresiva, o que no existió ningún cambio importante en el régimen de esfuerzos regional, que conllevara a un cambio de escenario tectónico drástico como los que luego ocurren durante el Paleozoico.

El primer régimen extensional que acontece durante el Ediacárico produce lo que llamamos aquí una primera generación de fallas extensionales, que deriva del efecto de un rift relativamente cercano a nuestra región de estudio. La extensión en este primer caso, desarrollo un tipo de falla sin - rift cuya tendencia de ruptura, al predominar en esta época un medio cristalino o frágil, fue con un buzamiento sub - paralelo al de las fallas fundamentales iniciales en un estilo de escalonamiento descendente tipo ramp - flat o de rampa y despegue (Figura 3), la cual basculó hacia el margen pasivo que definía la plataforma continental de la fosa tectónica que daba origen en ese tiempo al naciente Océano Iapeto.

Estas fallas para inicios del Cámbrico, sufren un proceso de inversión tectónica positiva como resultado de una contracción derivada del desarrollo de una zona de subducción. Con respecto a una contracción litosférica relacionada a una zona de subducción, Schellart (2008), muestra diversos ejemplos para el actual caso de los Andes, sobre el papel de la subducción frente a la contracción litosférica. El escenario paleogeográfico del borde noroeste de Gondwana es el apropiado para explicar este régimen compresivo durante esta época, donde al parecer por razones de la variación en la flotabilidad litosférica de la corteza del Océano Iapeto, este margen pasa de ser pasivo a activo.

Durante el Ordovícico Medio, el ambiente tectónico es de extensión en este sector de Gondwana. La explicación es el desarrollo del rift igualmente contiguo a nuestra zona de estudio, el cual separa los Terrenos Carolina y Avalonia Occidental de Gondwana, dando origen al Océano Rheico. El estilo estructural de las fallas extensionales que se originan para esta época y las cuales también son sin - rift y que aquí denominamos de segunda generación, es el del desarrollo de grábenes como resultado del sucesivo colapso y basculamiento de bloques, en donde aquí la presencia del medio plástico, producto de las deposiciones sedimentarias, es igual de importante que el medio frágil que representa el basamento cristalino. La geometría de estas fallas extensionales de segunda generación para nuestra región de estudio (Figura 5), es el de fallamiento lístrico en buzamiento hacia el continente, el cual desarrolla pequeños bloques basculantes de corta extensión, en el sentido de McClay (1997).

Para los lapsos siguientes el marco geodinámico regional es el de un margen activo para el sector noroccidental de Gondwana. Durante el lapso Silúrico - Devónico, el registro estratigráfico deja constancia de un ambiente compresivo, sin embargo, aquí no se estima que éste obedezca a la colisión de un continente, tal como varios autores como Forero - Suarez (1990) y Dalla Salda et al. (1992), entre otros, han indicado para este sector de los Andes. Si bien es claro que para Argentina en la Precordillera, hay constancia de la acreción de un fragmento continental alóctono correspondiente a Laurentia durante este lapso de tiempo geológico (Rapela et al., 1998), aquí indicamos que dicha orogénesis en los Andes del Norte, obedeció al desarrollo de una zona de subducción, tal como Schellart (2008) plantea para explicar el fenómeno orogénico de los Andes. Luego para el Devónico, Tardío, se observa de nuevo un régimen extensivo, que se trata de explicar aquí con un cambio en la dirección

de la subducción, obedeciendo a una rotación en sentido horario de la masa continental. Ante esto último, es claro que el registro sedimentario pone en evidencia para un contexto regional una incursión marina esporádica (Figura 7), pero la explicación de ésta también puede obedecer al desarrollo de un frente orogénico, del cual el proceso extensivo bien puede obedecer igualmente a un proceso sin - orogénico por colapso de meseta u orogéno (Fossen, 2000), debido a un proceso de convergencia oblicua tal como se ha planteado aquí. Estos cambios de dirección en la convergencia, producen igualmente cambios en la velocidad de la convergencia en la zona de subducción, llevando a una situación que implica que cuando la convergencia se torna lenta, se produce igualmente extensión (Schellart, 2008). En este marco geodinámico, el cual se mantiene durante el Paleozoico Superior para este sector de Gondwana, llama la atención la extensión fuerte que de nuevo nuestro sector de estudio sufre para el Carbonífero Superior, el cual a pesar de presentar un ambiente de tectónica compresiva, es evidente la fuerte invasión del mar en el sector. La extensión dentro de un esquema de margen activo, obedece a un cambio de angularidad de la losa de subducción, la cual en bajo ángulo genera acortamiento cortical y en alto ángulo genera extensión tal como lo demostró Schellart, (2008) y muchos otros autores. Se hace evidente que una baja angularidad en la subducción produce engrosamiento litosférico, y un alto ángulo en la losa subducida favorece el desarrollo de la cuña astenosférica que se extiende casi hasta el frente de la trinchera, generando tras el frente de acreción (zona deformada) una cuenca tras arco con la presencia de magma básico. Aunque en nuestro sector de estudio, no se ha encontrado evidencia para el Carbonífero de un episodio de magmatismo básico sincrónico al desarrollo de este escenario geodinámico, con él que se demuestre un fuerte adelgazamiento cortical derivado de la presencia de una cuña astenosférica, en México esta situación sí se ha evidenciado recientemente en el Complejo Acatlán perteneciente al Terreno Oaxaquia – Chortis, con los diques toleíticos de edad Missisipiense que intruyen a la Unidad Salada del Carbonífero Temprano (Morales – Gámez et al., 2009; Ortega – Obregón et al., 2010).

En síntesis, desde el Ordovícico Medio, cuando se originó la segunda generación de fallas extensionales, éstas, al igual que las de la primera generación y las del SFFFCO, respondían tectónicamente a las condiciones impuestas por la evolución del marco geodinámico, que desde fines del Paleozoico Inferior llevó a la consolidación de Pangea durante el Pérmico. Las fallas extensionales denominadas aquí de la primera y segunda generación, en

la actualidad, sobre todo para nuestra zona de estudio, son quizás las que definen rasgos muy importantes tanto en el basamento cristalino del Bloque Andino como en el del Cratón Amazónico. Dichos rasgos son los piedemontes cordilleranos, como p. e. el piedemonte oriental de la Cordillera Central, el piedemonte occidental de la Cordillera Oriental, y quizás el eje de la fosa o actual Valle del Río Magdalena, en el bloque Andino. En el Cratón Amazónico estas estructuras definen los límites entre la altillanura y las tierras bajas o llanuras, al igual que algunos lineamientos regionales, que pueden tener su origen en estas fallas extensionales, los cuales en algunos casos exhuman también bloques de basamento, definiendo con estos, pequeños cinturones de serranías conformadas por colinas bajas para las regiones de la Orinoquía y la Amazonía, como el caso de la Serranía de la Macarena. El futuro de la investigación geológica y geofísica nos llevara a descubrir cuál fue el origen de estas estructuras de primer orden, si éstas fueron inicialmente extensionales y si pertenecieron a los lapsos de tiempo indicados aquí.

CONCLUSIONES

Las Fallas del SFFFCO se originaron durante la orogénesis de Grenville, cuando se anexó el Bloque Andino a Gondwana y se dio origen al supercontinente de Rodinia.

Las fallas extensionales denominadas aquí de la primera y segunda generación se originaron de acuerdo a este trabajo, por efecto del desarrollo de dos ambientes de rift. El rift que originó el Océano Iapeto, cuando se fragmentó el megacontinente Pannotia durante el Ediacárico, y el rift que dio origen al Océano Rheico durante el Ordovícico Medio.

Se destaca aquí que la evolución del basamento del Bloque Andino ha estado ligada a la del Cratón Amazónico desde el Mesoproterozoico Superior.

Se presentaron durante el Paleozoico el desarrollo de al menos tres orogenias importantes para los Andes del Norte de acuerdo a lo determinado en este trabajo. Estas fueron, la del Cámbrico Inferior, la que cubre el lapso Silúrico - Devónico Inferior y la que se extendió desde el Devónico Superior hasta finales del Pérmico.

De acuerdo a lo anterior, estas orogenias obedecieron a un marco geodinámico correspondiente a la evolución de una zona de subducción, y en ninguna época durante el Paleozoico colombiano se presentó la colisión con un terreno alóctono continental, como en el caso de Argentina y Chile en los Andes Australes con la acreción del terreno

Patagonia a Gondwana durante el Paleozoico Superior (Pankhurst et al., 2006; Ramos, 2010), y la acreción de los terrenos Chilenia y Cuyania en los Andes Centrales durante el lapso Paleozoico Inferior a Paleozoico Superior (Dalziel et al., 1994; Ramos, 2010).

Las diferentes orogenias y procesos extensivos que se originaron durante el lapso Neoproterozoico Superior – Paleozoico Superior, dan respuesta a la geometría compleja del “basamento” Paleozoico del centro de Colombia. Futuros estudios geológico - estructurales con experimentos a partir de modelos análogos, verificados a partir de la investigación geológica y geofísica, podrán valorar o descartar los resultados mostrados aquí.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es resultado de las investigaciones realizadas entre los Grupos de Investigación “Estudios sobre Riesgo Sísmico y Amenazas Naturales del Piedemonte Llanero” de la Corporación Universitaria del Meta de Villavicencio y el Grupo de Geofísica, del Departamento de Geociencias, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. El agradecimiento es para los profesores y estudiantes de ambas instituciones que nos han acompañado y colaborado en las diversas visitas de campo realizadas en los últimos años por las regiones contempladas en este trabajo y con las cuales se ha facilitado la toma de datos para poder construir esta investigación. Igualmente se agradece al Dr. Franck Audemard de FUNVISIS, Venezuela, por sus aportes y sugerencias para el mejoramiento del manuscrito, y al Dr. Jorge Eliecer Mariño de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por su revisión al manuscrito. Esta investigación forma parte de los proyectos de investigación “Evolución Geotectónica de los Andes del Norte” y Evaluación Neotectónica para Bogotá y Villavicencio” del primer autor.

REFERENCIAS

- Amilibia, A., McClay, K. R., Sabat, F., Muñoz, J. A., Roca, E., 2005. Analogue Modelling of Inverted Oblique Rift Systems. *Geológica Acta*, 3, 3, 251 – 271.
- Brun, J – P., Nalpas, T. 1996. Graben inversion in nature and experiments. *Tectonics*, 15, 2, 677 – 687..
- Cawood, P. A., McCausland, P. J. A., Dunning, G. R., 2001. Opening Iapetus: Constraints from Laurentian margin in Newfoundland. *GSA Bulletin*, 113, 4, 443 - 453.
- Chicangana, G., Vargas, C. A., Kammer, A., Hernández Hernández, T. A., Ochoa Gutiérrez, L.H., 2007. Caracterización Sismotectónica Regional Preliminar de un sector del Piedemonte Llanero colombiano: Corredor San Juan de Arama – Cumaral, Meta: *Boletín de Geología – UIS*, 29, 61 – 74.
- Dalla Salda, L. H., Cingolani, C., Varela, R., 1992. Early Paleozoic orogenic belt of the Andes in southwestern South America: result of Laurentia – Gondwana collision?. *Geology*, 20, 617 – 620.
- Dalziel, I. W. D., 1997. Neoproterozoic – Paleozoic geographic and tectonics: Review, Hypothesis, environmental speculations. *GSA Bulletin*, 109, 1, 16 – 42.
- Dalziel, I. W. D., Dalla Salda, L.H., Gahagan, L.M., 1994. Paleozoic Laurentia – Gondwana interaction and the origin of the Appalachian – Andean mountain system. *GSA Bulletin*, 106, 243 - 252.
- Dalziel, I. W. D., Mosher, S., Gahagan, L.M., 2000. Laurentia – Kalahari collision and the assembly of Rodinia. *Journal of Geology*, 108, 499 – 513.
- Friedrich, A. M., Bartley, J. M., 2003. Three – dimensional structural reconstruction of a thrust system overprinted by postorogenic extension, Wah Wah thrust zone, southwestern Utah. *GSA Bulletin*, 115, 12, 1473 – 1491.
- Forero – Suarez, A., 1990. The basement of the Eastern Cordillera, Colombia: An allocthonous terrane in northwestern South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 3, 2 - 3, 141 – 151.
- Fossen, H., 2000. Extensional tectonics in the Caledonides: Synorogenic or postorogenic?. *Tectonics*, 19, 2, 213 – 224.
- Gómez – Cruz, A. de J., Moreno – Sánchez, M., Castillo – González, H., 2007. Ciclos de sedimentación durante el Carbonífero superior (Morrowan) en el “Paleozoico de La Jagua”, Huila, Colombia. *XI Congreso Colombiano de Geología*, Volumen de Memorias (CD – room).
- INGEOMINAS., 2007. Atlas Geológico de Colombia. Planchas 5 – 05, 5 – 06, 5 – 07, 5 -08, 5 – 09, 5 – 10, 5 – 13, 5 – 14 y 5 – 15, Escala: 1: 500000, INGEOMINAS, Bogotá D.C.
- Julivert, J. M., 1968. Lexique Stratigraphique. Amérique Latine. Vol. 5, Fasc. 4ª. Colombie (première partie) Précambrien, Paléozoïque, Mésozoïque, et intrusions d’âge mésozoïque – tertiaire. Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, France. 575 p.
- Keppie, J. D., Dostal, J., Ortega – Gutierrez, F., Lopez, R., 2001. A Grenvillian arc on the margin of Amazonia: evidence from the southern Oaxacan Complex, southern Mexico. *Precambrian Research*, 112, 165 – 181.
- Keppie, J. D., Nance, R. D., Murphy, J. B., Dostal, J., 2003. Tethyan, Mediterranean, and Pacific analogues for the Neoproterozoic – Paleozoic birth and development of peri –

- Godwanan terranes and their transfer to Laurentia and Laurussia. *Tectonophysics*, 365, 195 – 219. doi: 10.1016/S0040 – 1951(03)00037 – 4
- Keppie, J. D., Dostal, J., Miller, B. V., Ramos – Arias, M. A., Morales – Gámez, M., Nance, R. D., Murphy, J. B., Ortega – Rivera, A., Lee, J. W. K., Housh, T., Cooper, P., 2008. Ordovician – earliest Silurian rift tholeiites in the Acatlan Complex, southern Mexico: Evidence of rifting on the southern margin of the Rheic Ocean. *Tectonophysics*, 461, 1 – 4, 130 – 156. doi: 10.1016/j.tecto.2008.01.010
- McClay, K. R., 1997. *Sipetrol Short Course*: K. R. Mc Clay, 313p.
- Mora, A., Parra, M., Strecker, M. R., Kammer, A. Dimaté, C., Rodríguez, F., 2006. Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. *Tectonics*, 25, 2, TC2010 doi: 10.1029/2005TC001854
- Morales – Gámez, M., Keppie, J. D., Dostal, J., 2009. Carboniferous tholeiitic dikes in the Salada Unit, Acatlán Complex, southern Mexico: a record of extension on the western margin of Pangea. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26, 1, 133 – 142.
- Murphy, J. B., Gutiérrez – Alonso, G., Nance, R. D., Fernández – Suarez, J., Keppie, J. D., Quesada, C., Strachan, R. A., Dostal, J. 2006. Origin of the Rheic Ocean: Rifting along a Neoproterozoic suture?. *Geology*, 34, 5, 325 – 328. doi: 10.1130/G22068.1
- Murphy, M. A., Yin, A., 2003. Structural evolution and sequence of thrusting in the Tethyan fold – thrust belt and Indus – Yalu suture zone, southwest Tibet. *GSA Bulletin*, 115, 1, 21 – 34.
- Nance, R. D., Linnemann, U., 2008. The Rheic Ocean: Origin, Evolution, and Significance. *GSA Today*, 12, 4 -12. doi: 10.1130/GSATG24A.1
- Ortega - Obregón, C., Keppie J.D., Murphy, J.B., 2010. Geochemistry of Carboniferous low metamorphic grade sedimentary and tholeiitic igneous rocks in the western Acatlán complex, southern Mexico: deposition along the active western margin of Pangea. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 27, 2, 238-253.
- Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., Fanning, C.M., Márquez, M., 2006. Gondwanide continental collision and the origin of Patagonia. *Earth Science Reviews* 76, 235–257.
- París, G., Machette, R., Dart, R. L., Haller, K. M. 2000. Database and Map of Quaternary faults and folds of Colombia and its offshore regions, Open – File Report 00 – 0284: <http://pubs.usgs.gov/of/2003/opf-00-0284>.
- Ramos, V. A., 2010. The Grenville – age basement of the Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 29, 77 – 91.
- Rapela, C. W., Pankhurst, R. J., Casquet, C., Baldo, E., Saavedra, J., Galindo, C., 1998. Early evolution of Proto Andean margin of South America. *Geology*, 26, 8, 707 – 710.
- Robl, J., Stüwe, K., Hergarten, S., Evans, L., 2008. Extension during continental convergence in the Eastern Alps: The influence of orogen – scale strike – slip faults. *Geology*, 36, 12, 963 – 966. doi: 10.1130/25294A.1
- Santos, J. O. S., 2003. Geotectonica dos Escudos os Guianas e Brasil – Central. In: *Geologia, Tectonica e Recursos Minerais do Brasil, Texto, Mapas & SIG*. Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., Goncalves, J. H., (eds.), CPRM, Brasilia, 2003. 169 – 227.
- Schellart, W. P., 2008. Overriding plate shortening and extension above subduction zones: A parametric study to explain formation of the Andes Mountains. *GSA Bulletin*, 120, 11/12, 1441 – 1454. doi: 10.1130/B26360.1
- Schobbenhaus, C., Brito Neves, B. B., 2003. A Geologia do Brasil no contexto de plataforma Sul – Americana. In: *Geologia, Tectonica e Recursos Minerais do Brasil, Texto, Mapas & SIG*. Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., Goncalves, J. H., (eds.), CPRM, Brasilia, 2003. 5 – 55.
- Trümpy, D., 1943. Pre-Cretaceous of Colombia. *GSA Bulletin*, 54, 9, 1281-1304
- Vega – Granillo, R., Talavera – Mendoza, O., Meza – Figueroa, D., Ruíz, J., Gehrels, G. E., López – Martínez, M., Cruz – Vargas, J., 2007. Pressure – temperatura – time evolution of Paleozoic high – pressure rocks of the Acatlán Complex (southern Mexico): Implications for the evolution of the Iapetus and Rheic Oceans. *GSA Bulletin*, 119, 9/10, 1249 – 1264. doi: 10.1130/B226031.1
- von Raumer, J. F., Stampfli, G. M., Bussy, F., 2003. Gondwana – derived microcontinents – the constituents of the Variscan and Alpine collisional orogens. *Tectonophysics*, 365, 7 – 22.
- Willingshofer, E., Sokoutis, D., 2009. Decoupling along plate boundaries: Key variable controlling the mode of deformation and the geometry of collisional mountains belts. *Geology*, 37, 1, 39 – 42. doi: 10.1130/G25321A.1