

NUEVAS EVIDENCIAS ACERCA DE LA PRESENCIA DE UNA BANDA DE CIZALLAMIENTO EN LA SECUENCIA METAPELITICA DE LA FORMACIÓN SILGARÁ, SECTOR ARATOCA-PESCADERO (REGION SUROCCIDENTAL DEL MACIZO DE SANTANDER).

Mantilla Figueroa, L. C.¹; Ríos Reyes, C. A.¹; Gélvez Llanes, J. R.¹; Márquez Romero, R. E.¹; Ordóñez Calderón, J. C.¹; Cepeda Espitia, S.¹

RESUMEN

La secuencia metamórfica de la Formación Silgará que aflora en el sector Pescadero-Aratoca (región suroccidental del Macizo de Santander), presenta evidencias de haber sufrido un importante cizallamiento durante su etapa de exhumación, el cual afectó gran parte de las rocas metamórficas de las zonas del granate y de la estauroлита-дистена. Esta deformación dúctil de carácter extensional generó estructuras tales como lineaciones, sombras de presión, zonas de milonización, pliegues isoclinales recumbentes, pliegues sin raíz, boudines, así como la elongación de cristales de granate y el truncamiento de su zonación química, lo cual apunta a un colapso gravitacional del paleoorógeno Caledoniano en dirección techo hacia el Este. Estos elementos deformacionales, sumados a las evidencias de una importante circulación de fluidos hidrotermales, hacen que esta región del Macizo de Santander merezca especial atención para trabajos de exploración de depósitos mesotermales, especialmente por presentar condiciones favorables para la removilización de oro.

Palabras clave: Formación Silgará, cizallamiento, colapso gravitacional, deformación dúctil, depósitos mesotermales.

ABSTRACT

The metamorphic sequence of the Silgara Formation that crops out in Pescadero-Aratoca area (southwestern region of the Santander Massif), presents evidences of having suffered an important shear deformation during its exhumation path, which affected great part of the metamorphic rocks from the garnet and staurolite-kyanite zones. This ductile deformation of extensional character generated structures such as lineations, pressure shades, milonitization zones, isoclinal recumbent folds, rootless folds, boudins, as well as the elongation of garnet crystals and the truncation of their chemical zonation, which suggest a process of gravitational collapse with an East motion, that affected the Caledonian paleo-orogen. These deformational elements, along with the evidences of an important circulation of hydrothermal fluids, make this region of the Santander Massif an important place to pay attention to explore mesothermal deposits, especially for its favorable conditions for the removization of gold.

Keywords: Silgará Formation, shear deformation, gravitational collapse, ductil structures, mesothermal deposits.

¹Escuela de Geología. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
A. A. 678. Correo electrónico: lcmantil@uis.edu.co

INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO

El sector Pescadero-Aratoca (FIGURA 1), localizado a unos 50 Km al sur de la ciudad de Bucaramanga (Dpto. de Santander), forma parte del imponente paisaje del Cañón del Río Chicamocha, cuya formación ha expuesto las rocas metamórficas de las formaciones Neis de Bucaramanga y Silgará, así como el Granito de Pescadero, principalmente.

La Formación Silgará presenta una composición litológica de cuarcitas con algunas intercalaciones de

esquistos semipelíticos y lentes de anfibolitas en su parte inferior y de esquistos pelíticos, cuarcitas, filitas y metalimolitas en su parte superior. La edad asignada a esta unidad metamórfica se encuentra entre el Precámbrico Superior (edad del protolito) y el Ordovícico (edad del pico metamórfico), según Ward *et al.*, (1973).

Las condiciones del pico de metamorfismo que afectó al protolito de la Formación Silgará corresponden a las facies de los esquistos verdes y de la anfibolita. La estructura termal derivada de este evento esta representada, según Ríos (1999), por isógradas de

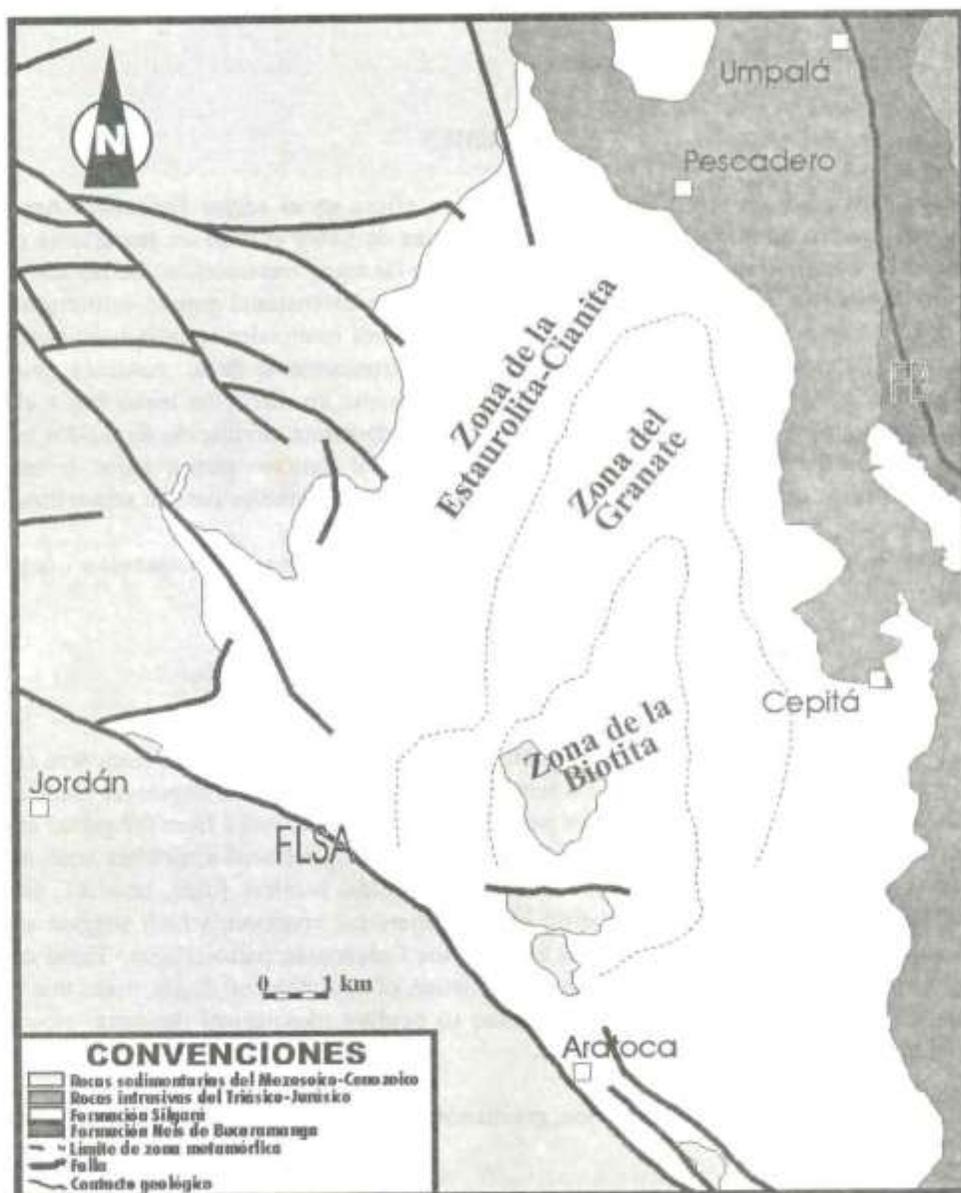


FIGURA 1. Mapa geológico generalizado del área de estudio, modificado de Ward *et al.* (1973). FB, Falla de Bucaramanga; FLSA, Falla Los Santos - Aratoca.

reacción que marcan el límite entre las zonas metamórficas de la biotita, el granate y la estauroлита-distena, las cuales definen un descenso hacia el sur (Aratoca) de las condiciones máximas de presión (P) y temperatura (T) alcanzadas durante el pico metamórfico.

Estudios recientes realizados por Mantilla *et al.* (2001 y 2002), con base en datos físico-químicos de paleofluidos atrapados como inclusiones fluidas en cuarzos de rellenos de venas, así como en datos de geotermometría de cloritas, sugieren la presencia de una importante banda de cizallamiento, la cual afecta gran parte de las rocas localizadas hacia la base de la zona del granate y posiblemente con mayor intensidad las rocas de la zona de la estauroлита-distena.

Un mejor conocimiento de esta banda de cizallamiento en la Formación Silgará aporta un gran valor geológico no sólo por contribuir a dilucidar la evolución tectono-termal de esta unidad metamórfica sino también por permitir evaluar su importancia en la formación de posibles depósitos de interés económico. En este sentido se presenta este trabajo.

ESTRUCTURAS DE DEFORMACIÓN

En el área de estudio, la Formación Silgará muestra una gran variedad de estructuras de deformación que evidencian su paso por ambientes tanto dúctiles como frágiles. Por su relación con el objetivo del presente trabajo, sólo se describen aquellas estructuras que por sus características parecer ser originadas bajo un régimen de deformación dúctil. Entre estas se destacan las siguientes: (a) lineaciones de estiramiento de porfidoblastos, fundamentalmente de granate y estauroлита; (b) pliegues isoclinales recumbentes; (c) pliegues sin raíz ó "*rootless folds*"; (d) venas de cuarzo intensamente boudinadas; (e) lentes de esquistos a manera de relictos con una esquistosidad interna discordante con relación a la esquistosidad regional; (f) zonas de milonitización y; (g) la esquistosidad regional de las rocas metamórficas.

Salvo por la esquistosidad regional, la cual evidentemente se manifiesta en toda la pila metamórfica del Silgará, las estructuras de

deformación arriba mencionadas se reconocen fundamentalmente en la base de la zona del granate y en la zona de la estauroлита-distena.

A continuación se describen las estructuras, citadas (FIGURA 2).

Las *lineaciones* identificadas parecen alcanzar un mejor desarrollo en esquistos pelíticos con granate y estauroлита, los cuales ocasionalmente presentan intercalaciones de anfibolitas de carácter lenticular. Estos minerales presentan un fuerte estiramiento que genera lineaciones en sentido E-W (FIGURA 2a), las cuales se reconocen muy bien a la altura del kilómetro 47+925, localizado en el tramo Pescadero-Caucayá. El análisis de estas lineaciones en secciones delgadas orientadas muestra como los porfidoblastos de granate han sido estirados, desarrollando sombras de presión, las cuales desde el punto de vista cinemático sugieren un movimiento del techo al Este (FIGURA 2b).

Los *pliegues isoclinales recumbentes* (FIGURA 2c) presentan su plano de simetría en sentido antihorario y una dirección aproximadamente E-W de su plano axial. Otros pliegues, aunque de escala centimétrica, se observan igualmente en esquistos micáceos cuarzofeldespáticos, manteniendo por lo general el mismo patrón estructural de los anteriores (FIGURA 2d).

Los pliegues sin raíz ó "*rootless folds*" (FIGURA 2e), espacialmente están estrechamente ligados con las estructuras tipo "*boudin*". Su manifestación se relaciona principalmente con venas de cuarzo y se interpretan en el sentido de Passchier y Trouw (1996), como charnelas de antiguos pliegues estrangulados por rompimiento debido a la fuerte extensión experimentada.

Las estructuras identificadas como "*boudines*" (FIGURA 2f) están representadas fundamentalmente por venas de cuarzo, las cuales se disponen en forma paralela a la esquistosidad regional y presentan formas discoidales y de tipo "*pinch and swell*", con un espesor entre 0.1 y 0.4 m y una longitud hasta de 1.5 m.

Localmente, se observan pequeños lentes (20cm de longitud x 10cm de espesor) que presentan una esquistosidad interna (Sn-1), atrapados por la

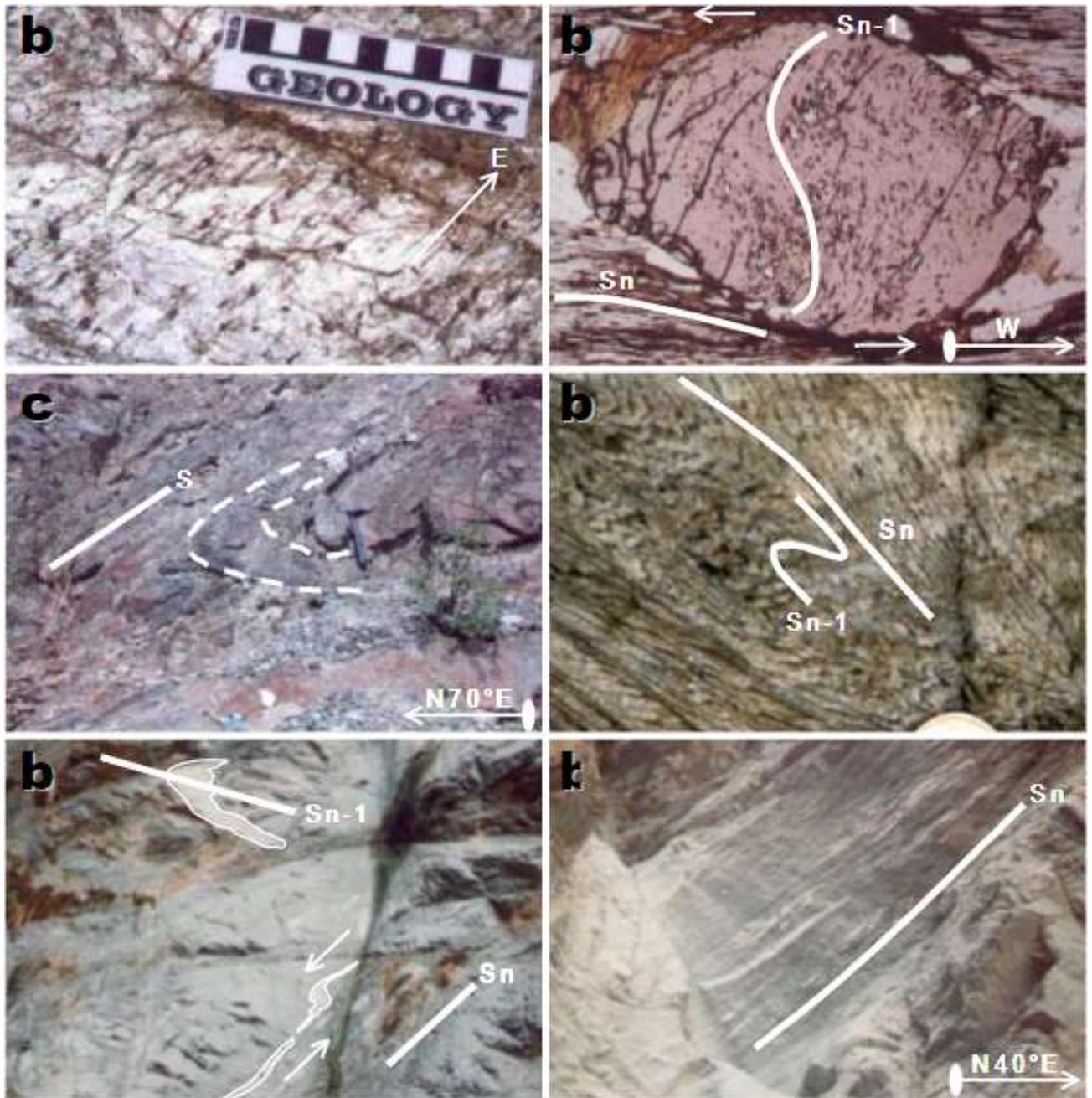


FIGURA 2. (a) Porfidoblastos de granate alargados en la dirección E-W, definiendo una lineación propia de un evento extensivo en ambiente dúctil (b) Porfidoblastos de granate con sombras de presión, mostrando un patrón de inclusiones sigmoidales (Sn-1), debido a una rotación en sentido antihorario con respecto a Sn. (c) Aspecto de los pliegues isoclinales recumbentes a escala de afloramiento. (d) Pliegues de escala centimétrica en niveles esquistos micáceos cuarzofeldespáticos, (e) Pliegues tipo "rootless folds" (f) Venas de cuarzo boudinadas muy abundantes, dispuestas paralelamente a la esquistosidad regional.

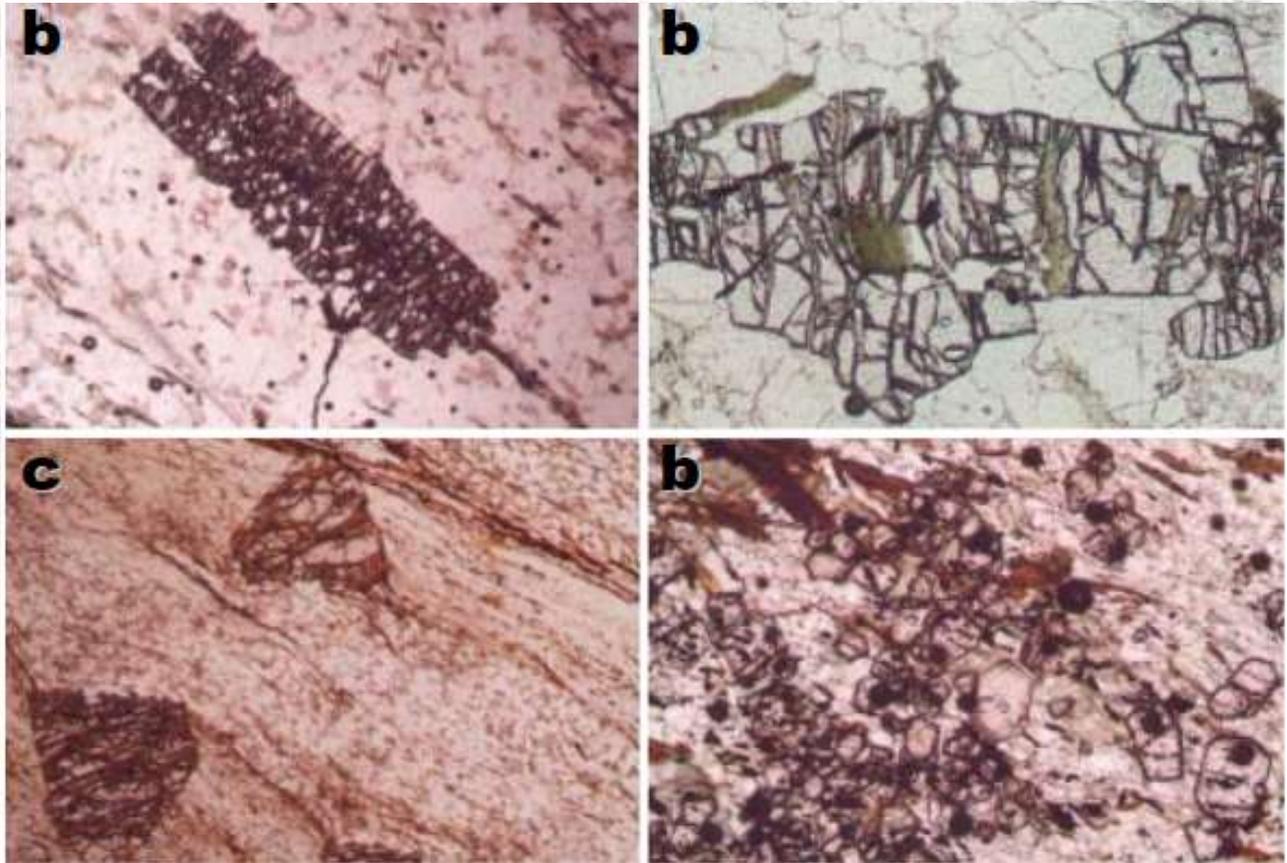


FIGURA 3. Microfotografías ilustrando la tipología de granates en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará en la región suroccidental del Macizo de Santander. (a) y (b) Porfidoblastos de granate de carácter elongado y tabular, con numerosas fracturas generalmente perpendiculares a su dirección de elongación, con evidencias de una importante disolución tectónica por cizallamiento. Aumento 8x. (c) Porfidoblastos de granate de carácter euhedral, el cual ha sufrido una disolución tectónica moderada, tal como lo revela el abrupto truncamiento de su forma en el contacto con la Sn. Aumento 8x. (d) Numerosos cristales de granate de carácter euhedral y de tamaño de grano muy fino, sin evidencias de cizallamiento. Aumento 8x.

esquistosidad regional (Sn) que exhibe por lo general buzamientos más suaves (15°SW), siendo claramente discordante con la que exhiben dichos lentes. Este tipo de contraste entre dos familias distintas de esquistosidades, ha sido observado en la zona de la estauroлита-distena y especialmente asociada a la abundante presencia de venas de cuarzo en su mayoría boudinadas.

Algunos niveles de la Formación Silgará y, al igual que en los casos anteriores, confinados hacia la base de la zona del granate y en la zona de la estauroлита-distena, exhiben zonas de milonitización que evidencian nuevamente la existencia de importantes episodios de deformación dúctil.

TIPOLOGÍA DE GRANATES

Considerando aspectos tales como forma, tamaño, presencia y patrón de inclusiones, grado de alteración y elementos cinemáticos asociados (p. ej., sombras de presión), es posible dividir dos grandes grupos de granates, dependiendo de si presentan o no evidencias de cizallamiento (véase FIGURA 3). Los granates con evidencias de haber sido disueltos tectónicamente son cristales que se caracterizan por su aspecto euhedral a anhedral y por disponerse de forma paralela a la foliación metamórfica regional. Las inclusiones minerales en este tipo de granates en su mayoría corresponden a ilmenita y en menor proporción cuarzo, turmalina, plagioclasa, muscovita, biotita y rutilo.

Dependiendo de su aspecto visto bajo el microscopio petrográfico, es posible sugerir el grado de intensidad

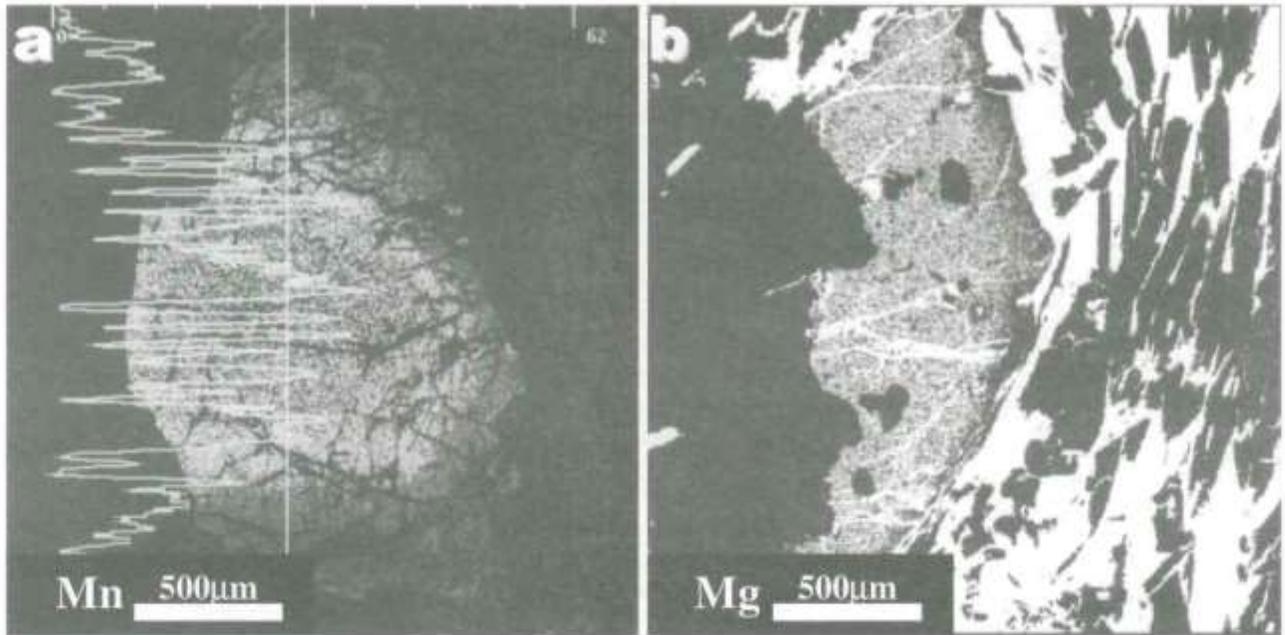


FIGURA 4. Evidencia de disolución tectónica en cristales de granate a partir de mapas de rayos-X en escala de grises que ilustran las distribuciones de Mn en (a) y Mg en (b). Las áreas oscuras y claras representan bajas y altas concentraciones, respectivamente, de Mn o Mg. Obsérvese como la zonación química del granate en ambos casos ha sido truncada hacia la izquierda en una zona de cizallamiento. (Tomado de Ríos, 1999).

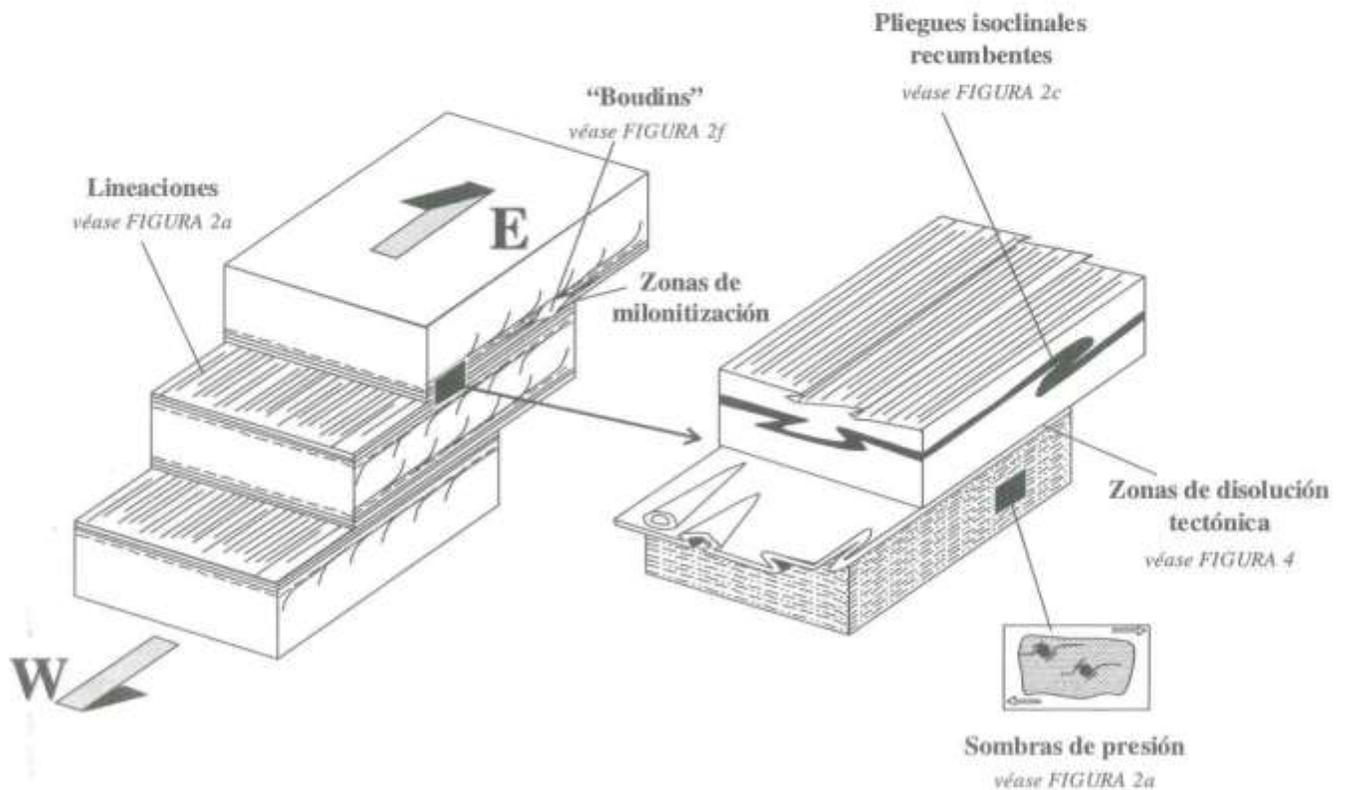


FIGURA 5. Esquema que ilustra el desarrollo de un sistema de planos de cizallamiento que constituyen las banda de cizallamiento. (Modificado de Passhier y Trouw, 1996).

de la disolución tectónica sufrida por los porfidoblastos de granate; por ejemplo, aquellos granates desde euhedrales hasta anhedrales disueltos en los bordes, con sombras de presión y fracturas paralelas a la esquistosidad regional de la roca, las cuales facilitan su reemplazamiento parcial o total por clorita, parecen estar claramente relacionados con una disolución tectónica incipiente a moderada (FIGURA 3C). Contrariamente, aquellos granates con morfologías tabulares y alargadas, los cuales se disponen en forma paralela a la esquistosidad regional de la roca, envueltos por la matriz de ésta y por lo general con un intenso fracturamiento interno (FIGURA 3A, 3B), se relacionarían con niveles de la pila metamórfica afectados por un cizallamiento de mayor intensidad, en comparación con los granates anteriormente mencionados.

Con relación a la localización de estas variedades de granates con la zonalidad metamórfica arriba citada, se destaca el hecho de que su presencia sólo se relaciona con la zona de la estauroлита-distena, así como con la base la zona del granate.

Entre las otras variedades de granate presentes en las rocas metamórficas, que al parecer no han sufrido la intensidad de la disolución tectónica del grupo anteriormente mencionado, se reconocen las siguientes: (a) grandes porfidoblastos de carácter euhedral a anhedral y contorno hexagonal o redondeado, con tamaños que varían entre 9.30 y 1.55mm de longitud y entre 7.30 y 1.05mm de ancho; (b) granates de grano muy fino (diámetro entre 0.42 y 0.03mm), los cuales ocurren como individuos generalmente de carácter euhedral y contorno hexagonal (FIGURA 3D); y (c) granates con textura en "atolón", en cuyo núcleo aparecen cristales de cuarzo o biotita (reemplazada por clorita), con carácter subhedral a anhedral, de forma pentagonal a elíptica, cuya longitud varía entre 6.80 y 2.40mm y el ancho entre 3.40 y 1.70 mm.

Una evidencia adicional que soporta el desarrollo de planos de cizallamiento y de procesos de disolución tectónica proviene de la zonación química que muestra el granate, tal como se ilustra es la FIGURA 4. Obsérvese que el Mn (FIGURA 4a) y el Mg (FIGURA 4b) muestran una distintiva disminución hacia el borde de los cristales de granate. En ambos

casos, la zonación química del granate ha sido truncada hacia sus bordes, a consecuencia de su disolución tectónica causada el avance del cizallamiento que afectó las rocas.

IMPLICACIONES METALOGÉNICAS

La formación de los depósitos de oro en contextos metamórficos tiene lugar mayoritariamente en zonas de cizallamiento (*shear-zone hosted ore deposits ó gold lodes*), en donde además ha habido una importante circulación de fluidos hidrotermales, los cuales se encargan de lixiviar los metales de la secuencia regional de rocas y transportarlos hasta los lugares de depositación. Estos últimos, por lo general forman un sistema de venas principalmente de cuarzo-oro (Oliver, 1996). Las condiciones de presión y temperatura de la gran mayoría de depósitos de oro, indican que este se deposita a profundidades entre 5 Km y 15 Km.

Los terrenos metamórficos más favorables para la formación de este tipo de depósitos son aquellos que presentan rocas de facies esquistos verdes o amfibolita (p. ej.: Río Itapicuru-Bahía y Cuiabá en Brasil) y en donde la presencia de rocas metamáficas son un factor litológico importante (Pérez, 1997).

Adicionalmente, en niveles mesozonales de la corteza asociados con este tipo de depósitos de oro, es decir, en condiciones similares a las que debió desarrollar el proceso de cizallamiento reportado para la Formación Silgará, las soluciones mineralizantes son soluciones acuosas de baja salinidad, con temperaturas mayores a 200°C, ricas en CO₂ y cantidades variables de CH₄ y N₂. Estas soluciones se presentan por lo general se reconocen en estos terrenos en inclusiones fluidas acuoso-carbónicas en cuarzos de rellenos de venas (Groves *et al.*, 1989; Phillips, 1993).

Un rasgo llamativo de la Formación Silgará en el sector estudiado, consiste en: a) la presencia de una banda de cizallamiento, formada por varios planos de cizalla que afectan niveles concretos de rocas pelíticas y metamáficas de la zona del granate y estauroлита-distena; b) la gran profusión de venas hidrotermales asociadas a esta banda y; c) su relación con

percolación de fluidos acuosos salinos con cantidades variables de CO_2 , CH_4 y N_2 , asociados a ambientes mesotermales (Mantilla *et al.*, 2001).

Por todas las anteriores razones, la banda de cizallamiento que se reconoce en la Formación Silgará y especialmente aquellos sectores con abundantes venas de cuarzo boudinadas, son sectores que merecen un estudio de mayor detalle en aras de evaluar su potencial aurífero.

INTERPRETACIÓN Y CONCLUSIONES

Las estructuras de deformación dúctil de la Formación metamórfica Silgará, apuntan a la presencia de planos de cizalla que en conjunto constituyen una importante banda de cizallamiento que abarca la base la zona del granate y la zona de la estaurolita-distena (FIGURA 5). Su formación se relaciona con la etapa de exhumación de estas rocas metamórficas, tal como lo evidencian los procesos disolución tectónica y deformación (estiramiento de granates y estaurolitas) de los minerales metamórficos, que según Ríos (1999) corresponden al pico metamórfico.

El desarrollo de esta banda de cizallamiento, debe relacionarse con un régimen extensional, tal como lo indican sus estructuras de deformación asociadas en tiempo y espacio. Por esta razón, su registro debe responder al momento del colapso gravitacional del paleoorógeno Caledoniado, es decir, posterior al momento del pico metamórfico que afectó a las rocas de la Formación Silgará durante la orogenia Caledoniana (Ward *et al.*, 1973). Este colapso gravitacional, según las evidencias cinemáticas en lineaciones y sombras de presión, principalmente, debió ocurrir con un sentido de movimiento de techo al Este (dirección del transporte tectónico durante el evento extensional).

Si se tiene en cuenta que las condiciones máximas de presión para el pico metamórfico de la Formación Silgará en el sector de estudio fue de 678°C a 6.2 Kbar (Ríos, 1999), es decir, cuando la roca estaba a una profundidad de 23-24 Km. (hoy día esta en superficie), resulta evidente el hecho que estas rocas han sufrido una importante exhumación.

Adicionalmente, considerando que el espesor

aproximado de toda la unidad es de 3.700m desde Pescadero a la Mesa de San Pedro (Ward *et al.*, 1973), se debe interpretar este espesor como el producto de un intenso adelgazamiento de la antigua columna de rocas de 23-24 Km., con su correspondiente condensación de las isógradas de reacción, el cual debió tener lugar en ese contexto extensional dúctil citado repetidas veces, con un desarrollo importante de planos de cizalla o banda de cizallamiento (FIGURA 5).

Ejemplos similares de colapsos gravitacionales de paleorógenos se reportan de manera amplia en la bibliografía especializada, entre otros, en Thompson y England (1984), Spear (1993) y Martínez *et al.* (1996).

En este contexto, es posible explicar el truncamiento de la zonalidad químico de los granates localizados en los planos de cizalla. Esto a su vez, implica que debieron generarse simultáneamente condiciones favorables para el desarrollo de zonas de sobrecrecimiento en antiguos porfiroblastos y la nucleación de nuevos minerales. Para el caso de los granates, un estudio detallado de su zonalidad química, especialmente del Ca, Mn, Mg, entre otros elementos, podría permitir una mejor visualización de este proceso simultáneo de destrucción y crecimiento en la etapa retrógrada de la Formación Silgará en el área de estudio.

La presencia de planos de cizalla, venas hidrotermales boudinadas, fluidos acuoso salinos-carbónicos atrapados en inclusiones fluidas en niveles mesotermales de la corteza y la presencia de rocas pelíticas con intercalaciones de rocas metamáficas, son condiciones geológicas favorables para que tengan lugar procesos de removilización, transporte y posiblemente acumulación de elementos, especialmente de oro, tal como sucede en otros terrenos metamórficos con características similares y donde se reporta la presencia de depósitos de oro mesotermal.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al conocimiento que se ha generado desde varios proyectos de investigación, financiados por la Universidad Industrial de Santander (UIS), el Instituto Colombiano del

Petróleo (ICP) y COLCIENCIAS, titulados 'Estudio sobre el origen de los filones de fluorita en los Municipios de Cepitá, Los Santos, Piedecuesta y su relación con la historia hidrotermal del flanco suroeste del Macizo de Santander' y 'Metamorfismo y metalogenia asociada del Macizo de Santander, Cordillera Oriental (COLOMBIA)'.

REFERENCIAS

- Groves, D. I., Barley, M. E., HO, S. E. (1989). The nature, genesis and tectonic setting of mesothermal gold mineralization in Yilgarn Block, Western Australia. *Econ. Geol. Monogr.*, Vol. 6, pp. 71-85.
- Mantilla Figueroa, L. C., Ordóñez, C., Cepeda, S., Río, C. (2001). Estudio de los paleofluidos en la Formación Silgará y su relación con procesos de deformación. Sector Aratoca-Pescadero (SW del Macizo de Santander) *Boletín de Geología. UIS*, pp. 69-76.
- Mantilla, L., Ríos, C., Castellanos, O. (2002). Estudio del proceso de rehidratación de la Formación Silgará a partir del análisis composicional de la clorita, región suroccidental del Macizo de Santander. *Boletín de Geología*, Vol. 24, No. 39, pp. 7-17.
- Martínez Catalán, J. R., Arenas, R., Días, G. F., Rubio, P. F., Abati, J., Marquínez, J. (1996). Variscan exhumation of a subducted paleozoic continental margin: the basal units of the Ordenes Complex, Galicia, NW Spain. *Tectonics*, Vol. 15, No. 1, pp. 106-121.
- Oliver, N. H. S. (1996). Review and classification of structural controls on fluid flow during regional metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, Vol. 14, pp. 477 – 492.
- Passier, C. and Trouw, R. (1996). *Microtectonics*. Springer, Berlin. 289p.
- Pérez Xavier, R. (1997). *Técnicas de Estudio de Fluidos Hidrotermales e Aplicações na Modelagem de Depósitos auríferos*. UNICAM edits.
- Phillips, G.N. (1993). Metamorphic fluids and gold. *Mineralogical Magazine Society*, Vol. 57, pp. 365 – 374.
- Ríos, C. (1999). Chemical Compositions of the Constituent Minerals and P-T Conditions of the Low-grade Silgará Formation Metamorphic Rocks in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. MSc Tesis, Shimane University, Matsue (Japan), 207p.
- Spear, F.S. (1995). *Metamorphic Phase Equilibria And Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineralogical Society of America, MONOGRAPH, Washington, D.C., 799p.
- Thompson A. B., England, P. C. (1984). Pressure-temperature-time path of regional metamorphism II: Their influence and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. *J. Petrol.*, Vol. 25, pp. 929-955.
- Ward, D. et al. (1973). Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. U.S. Geological Survey e Ingeominas. *Boletín Geológico*, Vol. 21, No. 1-3.

Trabajo recibido: noviembre 26 de 2002

Trabajo aceptado: febrero 26 de 2003