

Focal mechanism construction in the north of the Colombian Central Cordillera from record the National Seismological Network of Colombia

Gustavo Posada ^{a,b}, Gaspar Monsalve ^b & Ana María Abad ^{b,c}

^a Sistema de Alerta Temprana de Medellín y Valle de Aburrá (SIATA), Medellín, Colombia. gaposadar@unal.edu.co

^b Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. gmonsalvem@unal.edu.co, amabadp@unal.edu.co

^c Integral S.A.

Received: April 26th, 2016. Received in revised form: January 30th, 2017. Accepted: March 25th, 2017

Abstract

The collection of waveforms of earthquakes between 2009 and 2015, of local magnitude greater than 4, at stations of the Seismological National Network of Colombia (in Spanish *Red Sismológica Nacional de Colombia* [RSNC]), occurred on the quadrangle 76°W-74°W and 4°N-8°N (Northern Central Cordillera, centered on the Antioquia Plateau), makes possible the construction of focal mechanisms using first motion polarities of P-wave arrivals on seismograms. The processing was conducted on the Schmidt net, yielding a total of 14 focal mechanisms that were associated with regional faults, with results that suggest two (2) main trends of stress regime: A region between 8°N and 7°N is under a NW-SE compressional stress, while in the south of the study area, between 4°N y 6°N, we mostly observe focal mechanisms that correspond to a strike slip regime.

Keywords: Focal Mechanism; Polarity; P-Wave, Take-off Angle; RSNC.

Construcción de mecanismos focales en el norte de la Cordillera Central colombiana a partir de registros de la Red Sismológica Nacional de Colombia

Resumen

La recopilación de formas de onda de sismos entre los años 2009 y 2015, de magnitud local mayor a 4, en las estaciones de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), sobre el cuadrángulo 76°W-74°W y 4°N-8°N (Norte de la Cordillera Central, centrado en el Altiplano Antioqueño), permite realizar la construcción de mecanismos focales evaluando la polaridad de la Onda P al momento en que esta es registrada en los sismogramas. Mediante procesamiento sobre la red Schmidt se obtuvieron 14 mecanismos focales que fueron asignados a fallas regionales, con resultados que muestran dos (2) tendencias principales del régimen de esfuerzo que generó los eventos. Una primera zona entre los 8°N y 7°N bajo un esfuerzo compresional NW-SE, mientras que en la zona sur del área estudiada, entre los 4°N y 6°N, se observan en su mayoría mecanismos focales que corresponden a un régimen transformante.

Palabras clave: Mecanismo Focal; Polaridad, Onda P; Ángulo de salida; RSCN.

1. Introducción

La complejidad tectónica existente en los Andes colombianos está determinada por la interacción de las placas Nazca, Caribe y Sudamericana; adicional a éstas se presentan

el Bloque Panamá-Chocó [1-3] y el Bloque Norandino [2-4], que comprende la zona Andina colombiana y gran parte de las regiones costeras en el Caribe y el Pacífico (Fig. 1). La sismicidad reportada por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) en el Bloque Norandino evidencia la

How to cite: Posada, G., Monsalve, G. and Abad, A.M., Construcción de mecanismos focales en el norte de la Cordillera Central colombiana a partir de registros de la Red Sismológica Nacional de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 42, pp. 36-44, Julio, 2017.

deformación existente producto del estado de esfuerzos que hoy en día predomina en el territorio de los Andes colombianos y en zonas vecinas [4,5].

Durante un sismo la energía elástica acumulada es liberada mediante desplazamiento físico de las masas de roca, en forma de calor y por ondas sísmicas que viajan desde el foco hacia afuera. El estudio de los mecanismos focales es de gran ayuda para entender el comportamiento tectónico global debido a que su interpretación permite deducir los tipos de esfuerzos que generan la ruptura en un sistema de fallas activo.

En este estudio se presenta una recopilación de la sismicidad para la parte norte de la Cordillera Central colombiana y zonas vecinas, entre los años 2009 y 2015, durante los cuales ha habido una densificación en el cubrimiento de la RSNC. Para sismos con magnitud mayor a 4.0 en la escala de Richter, se construyó el mecanismo focal que generó el evento, con base en las polaridades de los primeros movimientos asociados al sismo, registrados en las estaciones de la RSNC.

La región de estudio se localiza en la parte norte de los Andes colombianos, en el rectángulo de coordenadas 4°N-8°N y 76°W-74°W, cubriendo así la parte norte de la Cordillera Central y, localmente, algunas zonas en el flanco Este de la Cordillera Occidental y el flanco Oeste de la Cordillera Oriental (Fig. 2). Dicha región se centra de manera aproximada en el llamado Altiplano Antioqueño [6], una región con poca sismicidad reciente, que incluye la ciudad de Medellín y su área metropolitana, donde la amenaza sísmica obedece fundamentalmente a fuentes que están por fuera de ella [7] y, en particular, en las zonas limítrofes del Altiplano. Este estudio busca caracterizar las fuentes sísmicas recientes de mayor impacto potencial en dicho centro urbano.

A través del análisis de mecanismos focales se pueden conocer las zonas donde predominan los esfuerzos compresivos y distensivos, así como deducir la actitud de la falla que origina los sismos. Estudios anteriores han clasificado el área de interés con régimen compresivo, con un sigma 1 de 097°/9° y sigma 3 de 238°/79° [4]. Corredor (2003) separa la zona de estudio en dos bloques, al norte lo define como bloque central de Colombia con régimen compresional y, al sur, define el bloque sur de Colombia con un régimen de fallamiento de rumbo.

2. Marco geotectónico

Los Andes colombianos se distribuyen en tres cordilleras: Occidental, Central y Oriental. A menor escala existen otros sistemas montañosos como la Serranía de San Lucas, Serranía de La Macarena y La Sierra Nevada de Santa Marta (Fig. 1).

El Altiplano Antioqueño, en el norte de la Cordillera Central, se caracteriza por tener una elevación media de 2.500 msnm con subdivisiones topográficas internas representadas por colinas inferiores a los 40 metros y relieve con pendientes inferiores a 40° [6].

2.1. Geología de la zona de estudio

La Cordillera Central se compone de un basamento Paleozoico conformado principalmente por rocas metamórficas del Complejo Cajamarca [8]. Los cuerpos magmáticos que se presentan a lo largo de la Cordillera Central representan varios eventos de subducción a lo largo del Mesozoico hasta el presente, los cuales están representados principalmente por los Batolitos de Ibagué, de Sonsón y Antioqueño.

El límite existente en el sistema de fallas de Romeral (Fig. 1) separa las unidades metamórficas de la Cordillera Central al Este, de las rocas oceánicas de la Cordillera Occidental al Oeste [6-8], de las cuales se presume que se acrecieron a la margen continental a partir del Cretáceo tardío [8-10]. La cordillera Oriental corresponde a material de basamento continental cubierto por rocas sedimentarias producto de un ambiente de *Rift* en el Jurásico-Cretáceo, que permitió la deposición de sedimentos que formaron, en su mayoría, las rocas que afloran en la Cordillera [11,12]; en tal cordillera existen también rocas Cenozoicas relacionadas con la inversión tectónica sufrida en este periodo de tiempo [13,14] y unidades asociadas al levantamiento de la Cordillera Central [15].

El límite geológico entre la Cordillera Central y la Cordillera Oriental es definido por el sistema de fallas Otú-Pericos; separando así el terreno Tahamí, que corresponde al

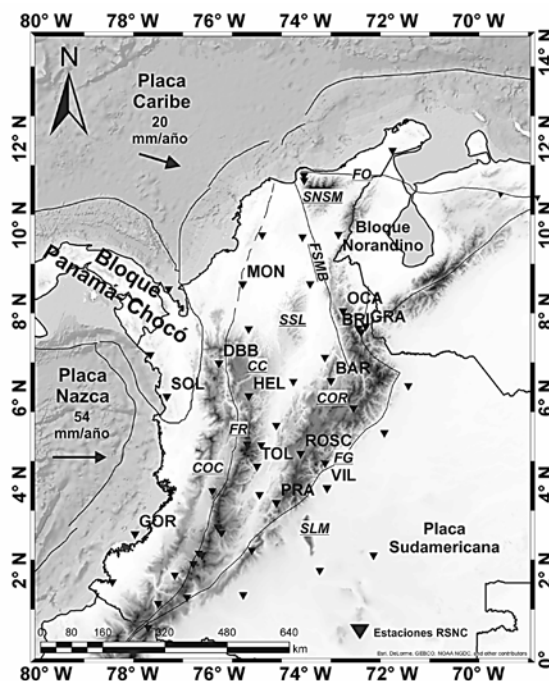


Figura 1. Marco tectónico regional de los Andes Colombianos. Los triángulos representan las estaciones de la Red Sismológica Nacional de Colombia, algunos de ellos acompañados por el código de la estación. FG: Falla Guaicaramo; FR: Falla Romeral; FSMB: Falla Santa Marta – Bucaramanga; FO: Falla Oca; COC: Cordillera Occidental; CC: Cordillera Central; COR: Cordillera Oriental; SSL: Serranía de San Lucas; SLM: Sierra de La Macarena; SNSM: Sierra Nevada de Santa Marta. Fallas compiladas de [2,4]. Vectores de velocidades tomados de [3,4]. Fuente: Elaboración propia.

núcleo polimetamórfico de la Cordillera Central del terreno Chibcha, que comprende a la Cordillera Oriental, Serranía de San Lucas y parte del flanco oriental de la Cordillera Central en el departamento del Tolima [8].

2.2. Configuración tectónica

Las Placas Caribe y Nazca subducen debajo del Bloque Norandino. Nazca subduce hacia el este con una tasa de movimiento de 54 mm/año relativa a la parte estable de Sudamérica, mientras Caribe, que se desplaza hacia el Sureste, se mueve a una velocidad de 20 mm/año relativa al mismo marco de referencia (Fig. 1) [3]. La zona de estudio parece estar bajo el régimen de esfuerzo producido por la Placa Nazca principalmente, la cual se encuentra subduciendo en el Suroccidente de Colombia con un *plunge* aproximado de 35° [16]. Recientemente se ha planteado la posibilidad de subducción plana de la placa Nazca por debajo del Altiplano Antioqueño [17]. Debido a la colisión del Bloque Panamá – Chocó en el Mioceno medio (13 – 15 Ma) [1-3,18] se registró una deformación que se manifiesta en la Cordillera Occidental, donde se presentan estructuras que evidencian deformación frágil, además de sismicidad activa [2,4,5].

La zona de estudio es atravesada por los sistemas de fallas Cauca - Romeral, Otú – Pericos y de Palestina. El sistema de fallas Cauca – Romeral posee un comportamiento de rumbo, donde se destaca la falla San Jerónimo, que separa el Complejo Cajamarca, el cual constituye el basamento metamórfico de la Cordillera Central, del Complejo Quebradagrande (unidad de rocas volcano-sedimentarias oceánicas) [8,10,20]. El sistema de fallas Otú-Pericos y la Falla Palestina tienen un comportamiento de rumbo, y se intersectan alrededor de la latitud 6.5 °N; la Falla Otú-Pericos se ha caracterizado como sinistral [19] y la Falla Palestina como dextral [21]. Restrepo y Toussaint (1988) asocian estos dos sistemas de falla a una zona de sutura que separa los terrenos Tahamí y Chibcha, ambos de naturaleza continental.

3. Sismicidad

La sismicidad actual que se registra en los Andes Colombianos es producto de los regímenes de esfuerzos producidos por la dinámica de la configuración tectónica de Colombia.

La variación en la profundidad de los sismos es indicativa de su origen, ya que éstos pueden ser producto de subducción o generarse a partir de la deformación a lo largo de las principales fallas que tienen expresión en superficie. La sismicidad superficial a intermedia sugiere que las losas (*slabs*) de las placas Nazca y Caribe subducen bajo el Bloque Norandino [16]. La sismicidad reportada por la RSNC entre los años 2009 y 2015 para Colombia muestra una distribución espacial que se puede observar en la Fig. 3.

Dos acumulaciones significativas de sismos de profundidad intermedia se encuentran en los nudos sísmicos de Bucaramanga [16,22] y Cauca [23] (Fig. 3). La distribución de sismos con magnitud local más elevada a lo

largo del territorio colombiano predomina en las márgenes de convergencia, en las principales fallas del territorio colombiano (Romeral, Ibagué, Santa Marta - Bucaramanga, Guaicaramo, Murindó, etc.) y en los nidos sísmicos (Fig. 3) [2].

4. Metodología

La recopilación de sismos de la consulta experta de la RSNC presenta para la zona de estudio un total de 18 sismos con magnitud local mínima de 4 y máxima de 4,7 (Fig. 4). La Tabla 1 muestra los sismos recopilados para el cuadrángulo 74°W – 76°W y 4°N – 8°N.

El mecanismo focal de un sismo se representa con dos planos nodales que dividen la esfera en cuatro sectores de área, dos correspondientes a esfuerzos de compresión y dos de dilatación [24]. Las zonas de compresión están atravesadas por el eje de tensión, de modo que las ondas P que son registradas en las estaciones ubicadas en estas direcciones registran un movimiento ascendente, mientras que las zonas de dilatación contienen el eje de presión, y las ondas P que se propagan en estas direcciones registran un movimiento descendente (Fig. 5).

Para la construcción del mecanismo focal de cada sismo se analiza la polaridad de la llegada de la onda P usando los registros de formas de onda obtenidos de la RSNC. Hallando el azimut evento-estación y el ángulo de salida (*take-off angle*), se procede a calcular el mecanismo focal en la red de Smith [25].

4.1. Parametros del mecanismo focal

El formato de onda adquirido es graficado en el software SEISAN [26-27], con el fin de identificar la polaridad de la onda P generada por cada uno de los eventos al momento de llegar a cada una de las estaciones, buscando clasificar el primer movimiento como ascendente o descendente (Fig. 6).

Al identificar la polaridad de la llegada en cada una de las estaciones, se procede a calcular el azimut de la estación

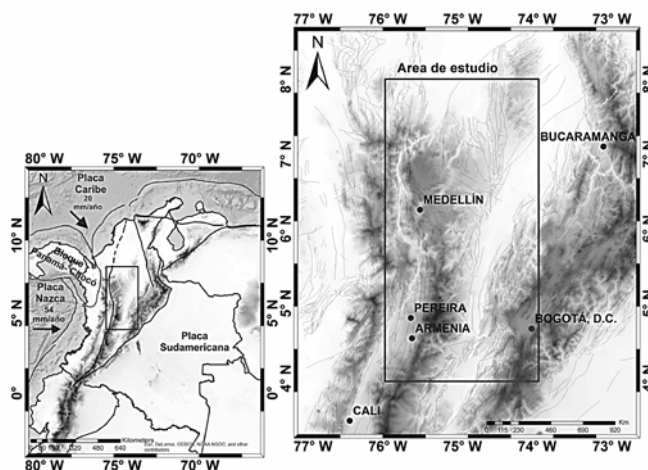


Figura 2. Localización de la zona de estudio. Fuente: Modificado de [2-4]

Tabla 1.
Sismos recopilados de la RSNC para la zona de estudio entre los años 2009 y 2015. Magnitud local (MI) mayor a 4.0. Lat.: latitud, Lon.: longitud. Cod.: Código.

Fecha	Lat.	Lon.	Profundidad (km)	Magnitud (MI)	Cod.
31/03/2009	7,81	-74,951	2	4,3	1
01/05/2009	7,156	-75,312	16,7	4,4	2
31/07/2009	7,009	-75,822	0	4,1	3
24/11/2009	5,007	-74,745	15,5	4,1	4
11/01/2010	4,301	-75,76	180	4,7	5
04/03/2010	4,938	-75,446	130	4,7	6
26/07/2010	4,524	-75,422	0	4,1	7
01/06/2011	4,875	-75,955	19,8	4,5	8
03/06/2011	7,635	-74,002	16	4	9
08/02/2012	5,373	-74,872	0,2	4,1	10
20/06/2012	6,575	-74,122	28,8	4,4	11
31/07/2012	4,553	-75,985	16,6	4,2	12
09/03/2013	7,334	-74,859	46,1	4,3	13
18/04/2013	4,95	-75,34	4	4	14
21/04/2013	4,945	-75,34	7,5	4	15
25/08/2013	7,758	-75,013	4,3	4,7	16
19/10/2014	4,966	-75,976	114,3	4,2	17
18/09/2015	4,105	-75,872	0	4,2	18

Fuente: Elaboración propia.

relativo al foco del evento. El parámetro siguiente que se debe obtener para la construcción del mecanismo focal es el ángulo de salida, el cual se mide con respecto a la vertical y es aquel con el que el rayo parte desde el hipocentro hasta la estación de registro en superficie. Éste ángulo es calculado a través del software TauP [28] usando el modelo de velocidad IASP91 [29].

4.2. Construcción del mecanismo focal

Una exposición detallada para la construcción de mecanismos focales a partir de la polaridad de la onda P puede encontrarse en Cronin (2010). La Tabla 2 ilustra un ejemplo donde se muestran los parámetros necesarios para graficar el mecanismo focal.

La elaboración manual se realiza en la red de Schmidt usando los valores de azimut y ángulo de salida hallados para cada estación; estos valores se llevan a la red tal y como se lleva un dato estructural en convención *dip/dip direction* [30].

En la Fig. 7 se ilustra la disposición de la polaridad del evento correspondiente al 01/06/2011 (Código 8 en Tabla 1) para unas estaciones definidas. Cuando se han identificado los puntos en la red se procede a aproximar los planos nodales. La solución no es única, pero el resultado sirve como un buen estimativo del mecanismo de generación del sismo. Luego de graficar los planos nodales, se finaliza el proceso al asignarle los colores negro a los cuadrantes que contienen el eje de tensión, y blanco indicando los cuadrantes en los que está el eje de presión.

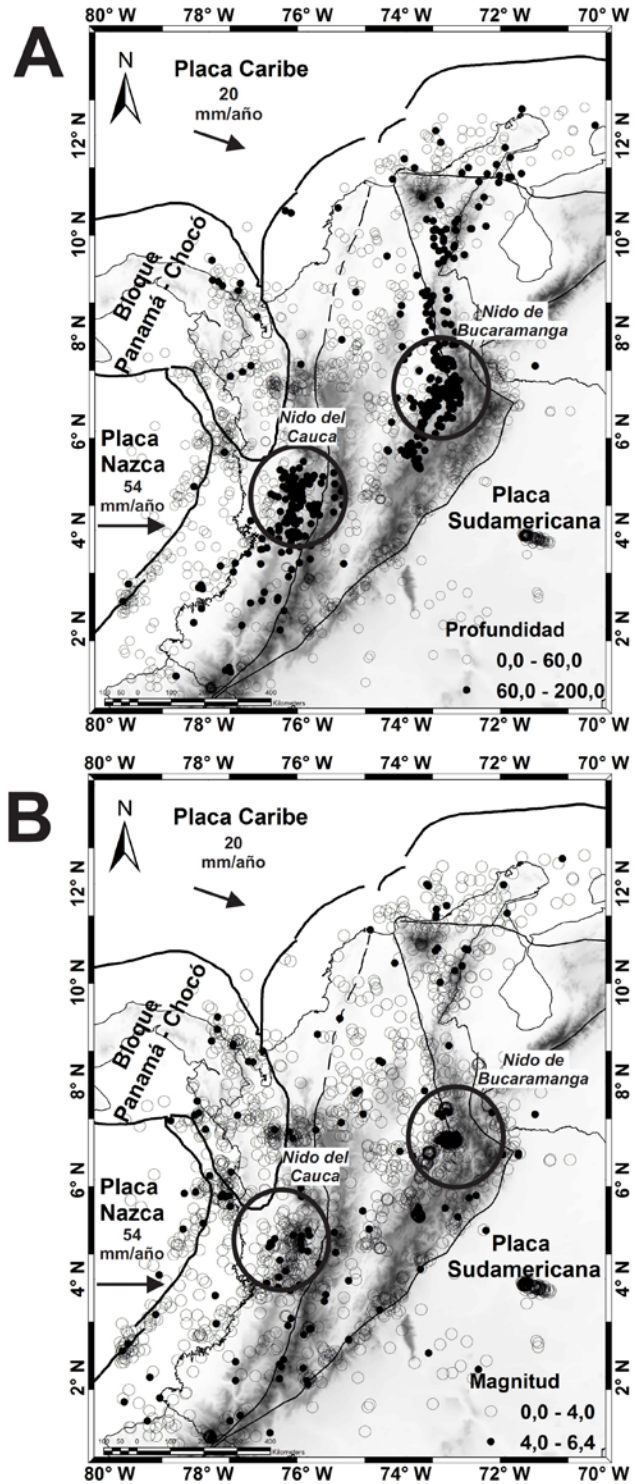


Figura 3. Distribución de la sismicidad en Colombia entre 2009 y 2014 (MI>3.0). A: Mapa sísmico discriminado por profundidad, sismos con profundidades menores a 60 km (círculos vacíos) y mayores a 60 km (círculos rellenos). B Mapa sísmico discriminado por magnitud; Sismos menores a 4.0 MI (círculos vacíos) y sismos mayores a 4.0 MI (círculos rellenos). Las regiones encerradas corresponden a los nidos sísmicos. Datos de la RSNC.

Fuente: Modificado de [3-4].

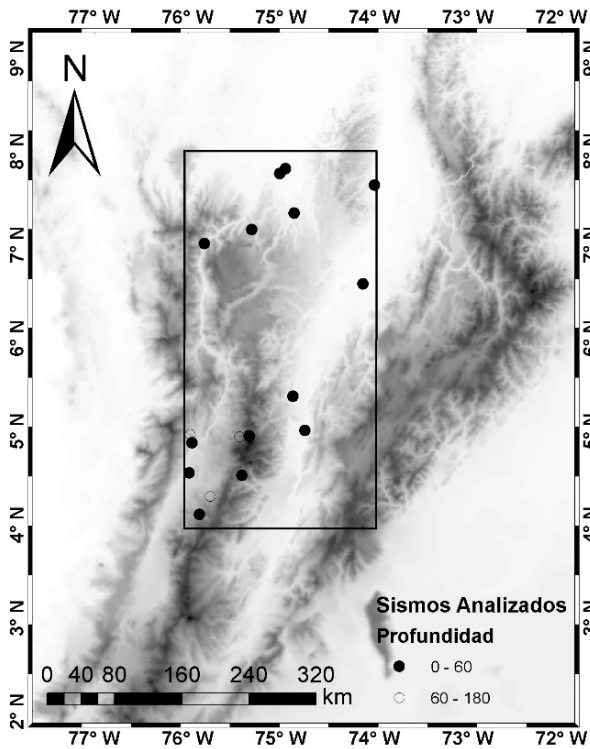


Figura 4. Epicentros de los sismos analizados, recopilados de la RSNC. Fuente: Elaboración propia.

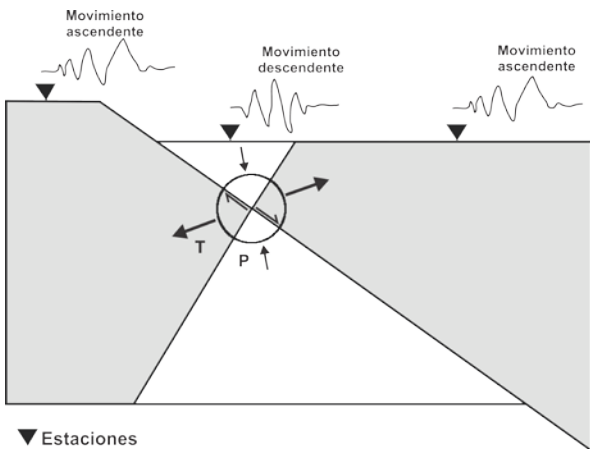


Figura 5. Registro de onda y patrón de radiación según la dirección de propagación de la onda: en dirección T movimiento ascendente (Compresión), y en dirección P movimiento descendente (Dilatación). T: eje de tensión; P: eje de Presión. Fuente: Modificado de USGS (escweb.wr.usgs.gov/share/mooney)

5. Resultados y discusión

De los 18 sismos identificados para la zona de estudios se logró obtener el mecanismo focal de un total de 14 eventos. La Fig. 8 muestra la distribución en planta de los mecanismos focales hallados; se descarta el mecanismo focal 5 debido a que no pertenece a la corteza y no corresponde a fallas con traza superficial definida, por lo cual no se incluye en los análisis.

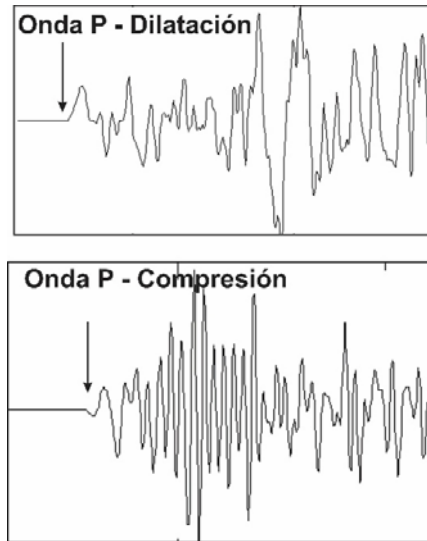


Figura 6. Formato de onda evaluado en SEISAN correspondiente al evento 01/06/2011 (Código 8 en Tabla 1). La imagen superior corresponde a la estación MON y la inferior para la estación ROSC (ver Fig. 1 para su localización). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Parámetros encontrados para el sismo del 21 de abril de 2013 (código 15 en Tabla 1).

21/04/2013			
Estación	Azimet (grados)	Angulo de salida (grados)	Polaridad
BAR	60	45	Descendente
BRI	50	45	Descendente
DBB	358	44	Ascendente
GOR	234	45	Descendente
GRA	50	45	Descendente
HEL	30	64	Descendente
MARA	179	45	Ascendente
MON	7	46	Descendente
OCA	41	45	Descendente
OTAV	208	45	Ascendente
PRA	136	45	Ascendente
ROSC	95	44	Ascendente
SOL	312	44	Ascendente
TOL	120	45	Ascendente
VIL	112	45	Ascendente

Fuente: Elaboración propia.

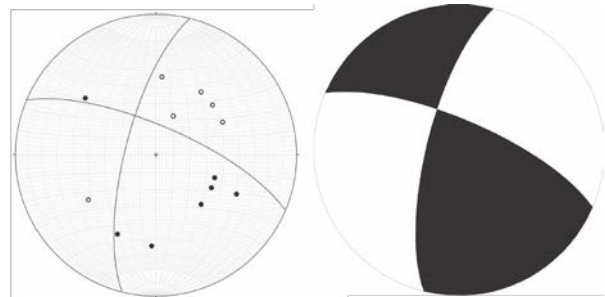


Figura 7. Mecanismo focal hallado para el evento del 01/06/2011 (código 8 en Tabla 1). Los círculos vacíos corresponden a polaridades dilatacionales; los círculos rellenos a polaridades compresionales. Fuente: Elaboración propia.

Para facilidad en el análisis, se dividió el área de estudio en dos zonas, denotadas por A y B. En la zona A del área de estudio (Fig. 8) se registran 5 eventos. La agrupación de estos mecanismos focales evidencia la posibilidad de un esfuerzo compresional de dirección NW-SE que podría estar asociado a una acomodación del Bloque Panamá – Chocó [31]. Los mecanismos focales que se observan en la zona B de la Fig. 8a ilustran un estado de esfuerzos correspondientes principalmente a fallas de componente en el rumbo.

En un sistema en el que dominan movimientos de rumbo, el sistema de esfuerzos permite la combinación de diferentes tipos de fallamiento bajo el mismo régimen y su orientación depende de la actitud de la falla de rumbo principal [32]. Es así como pueden encontrarse fallas inversas con rumbo perpendicular al esfuerzo principal máximo (sigma 1), fallas normales con rumbo perpendicular al esfuerzo principal mínimo (sigma 3) y sistemas de fracturamiento o fallamiento tipo Riedel y Antiriedel (R y R'), simétricos con respecto al esfuerzo principal máximo y con rumbos que hacen ángulo de 20°-30° y 50°-60°, respectivamente, con la falla de rumbo principal [32-34]. La Fig. 8b muestra una configuración aproximada de un elipsoide originado por un esfuerzo compresivo: los mecanismos focales asociados a fallas inversas (códigos 1 y 3) presentan planos nodales con tendencia perpendicular al esfuerzo de compresión sigma 1, mientras que los que se asocian a las fallas de rumbo (códigos 2 y 11) se acomodan a las estructuras R y R' producidas por el esfuerzo principal; el mecanismo normal (código 9) registrado presenta un plano nodal aproximadamente paralelo a la dirección de compresión.

En la Fig. 8c, correspondiente a la zona B, se observa un total de 8 mecanismos focales asociados a eventos en la corteza (códigos 10, 4, 14, 15, 8, 12, 7, 18). En cinco de estos eventos se presentan componentes de rumbo (8, 10, 15, 7, 14, 18). Se encuentran también dos mecanismos focales asociados a fallas normales con componente en el rumbo (códigos 4, 12). La disposición de los mecanismos focales ubicados en esta zona indica un régimen de fallamiento de rumbo con un posible movimiento sinistral. Así, entre 5° 30' N y 4°N, se observa una componente sinistral, lo cual es parcialmente consistente con lo encontrado por Ego (1996), quien expone la existencia de una componente sinistral en el sistema de fallas de Romeral, a partir de 5°N hacia el norte [17].

Cortés y Angelier (2005), con mecanismos focales recopilados de la base de datos de *Harvard CMT* (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>), deducen que para las zonas A y B (Fig. 8) existe un régimen de compresión con una dirección NW-SE. Para la zona B, lo mostrado por los mecanismos focales en este estudio difiere de lo expuesto por tales autores debido a la existencia de un régimen transformante en esta zona y, por lo tanto, coincide más con el bloque sur de Colombia definido por Corredor (2003), quien para cerca a los 4°N plantea un régimen transformante deducido a partir de mecanismos focales de la base de datos mencionada. Similarmente, este mismo autor, para el bloque central de Colombia, resalta la tendencia inversa de las fallas con componente en el rumbo y con tendencia hacia el noreste, lo cual es consistente con el esfuerzo NW-SE deducido para la zona A.

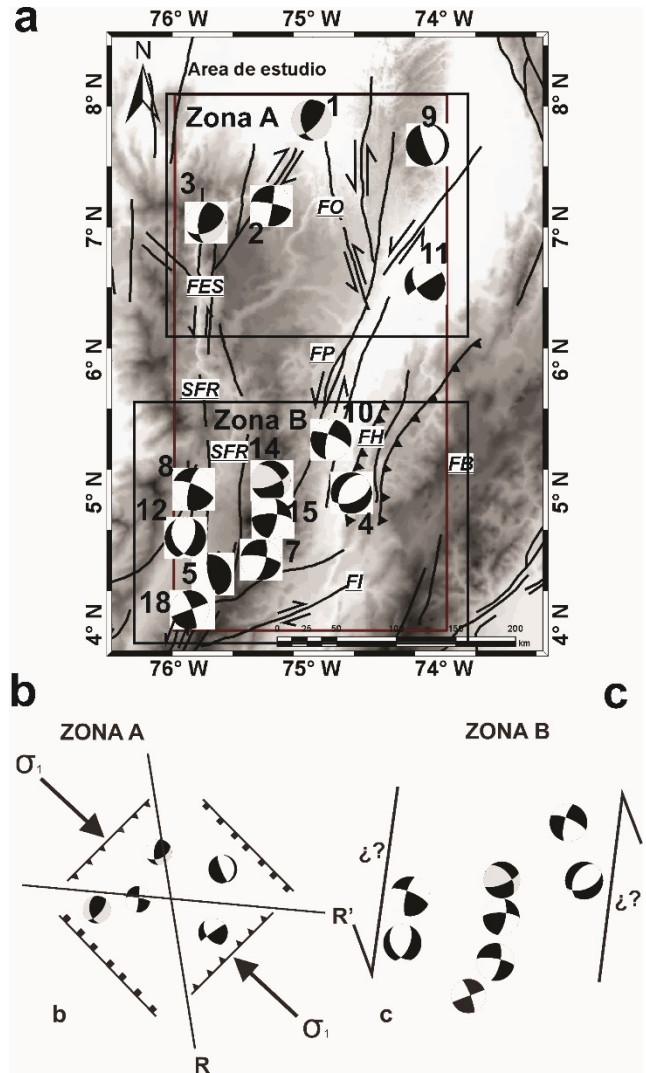


Figura 8. a) Mapa de falas regionales y mecanismos focales hallados con los datos de la RSNC; SFR: Sistema de Fallas de Romeral; FI: Falla Ibagué; FB: Falla Bituima; FH: Falla Honda; FP: Falla Palestina; FO: Falla Otú; FES: Falla Espíritu Santo; b) En la zona A predomina un esfuerzo de compresión con tendencia SE-NW; c) La zona B, para los eventos corticales, muestra una tendencia mayoritaria al fallamiento de rumbo. Fuente: Elaboración propia.

La relación de los mecanismos focales con las estructuras regionales muestra evidencia del estado de esfuerzo de la corteza. La Tabla 3 y la Fig. 9 resumen la disposición de cada mecanismo focal según la falla regional más cercana a su epicentro. Para los sismos generados sobre el Sistema de Fallas Cauca-Romeral (códigos 3, 8, 12 y 18) existe coherencia para los eventos 8 y 18, y aunque los eventos 3 y 12 sean inverso y normal respectivamente, esto se debe al comportamiento de un sistema de falla de rumbo en los que se presentan zonas asociadas a regímenes compresivos y extensivos debido a posibles inflexiones a lo largo de su traza.

La Falla Palestina (FP) presenta 4 mecanismos focales asociados, con códigos 10, 14, 15 y 7, en los cuales todos los diagramas tienen un plano nodal correspondiente al

movimiento sinistral que presenta esta falla. El mecanismo focal del evento 4 parece estar asociado a la Falla Honda (FH) que al indicar un comportamiento normal, no coincide con el campo de esfuerzo definido por Cortes y Angelier (2005) en la región donde se ubica la falla, donde debería tener una cinemática netamente inversa. El mecanismo focal muestra un posible comportamiento normal, de carácter local, que podría estar asociado a inflexiones o cambios en la curvatura de la traza de la falla, que generan desplazamientos locales de rumbo que pueden repercutir en la generación de áreas sometidas a transtensión. En la Falla Espíritu Santo (FES) se observan dos mecanismos focales: para el diagrama del evento 2 existe coherencia con el movimiento dextral de la falla, mientras que el diagrama del evento 1, al presentar componente inverso, no coincide con el componente normal asignado a la falla y puede representar una zona donde se localizan esfuerzos transpresivos. Los eventos 9 y 11 en su epicentro no coinciden exactamente con fallas regionales, pero presentan una asociación con los sistemas de fallas de

Tabla 3.

Relación del mecanismo focal del sismo con la falla regional más cercana a su epicentro, para los sismos con código 9 y 11 no fue posible asignar una falla que se asocie al evento.

FES: Falla Espíritu Santo, SFR: Sistema de Fallas de Romeral, FH: Falla Honda, FP: Falla Palestina.

Código Sismo	Falla	Régimen Falla	Régimen Mecanismo
1	FES	Régimen Sinistral con componente normal	Régimen compresivo con componente de rumbo
2	FES	Régimen Sinistral con componente normal	Régimen de rumbo
3	SFR	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen compresivo con componente de rumbo
4	FH	Componente Inverso	Régimen extensional
7	FP	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen de rumbo
8	SFR	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen de rumbo
9	-	-	Régimen extensional
10	FP	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen de rumbo
11	-	-	Régimen de rumbo
12	SFR	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen extensional
14	FP	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen de rumbo
15	FP	Régimen Sinistral con componente inverso	Régimen de rumbo
18	SFR	Régimen sinistral con componente inverso	Régimen de rumbo

Fuente: Elaboración propia.

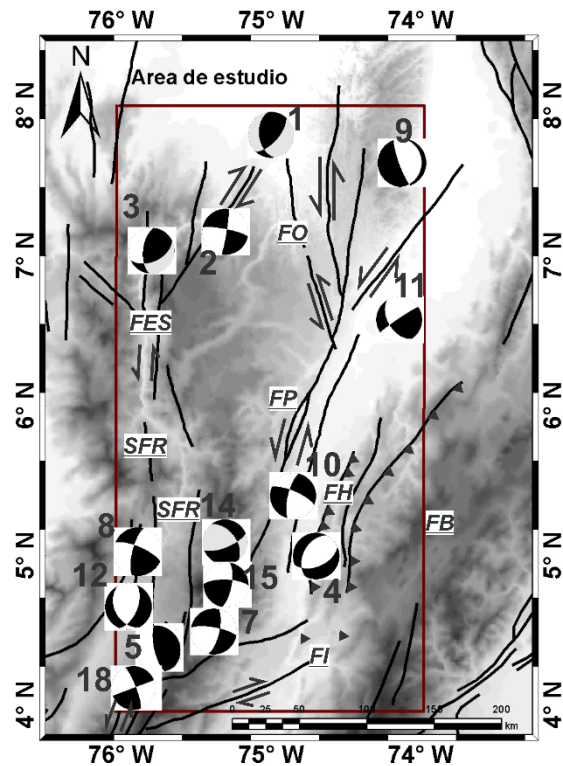


Figura 9. Mapa de mecanismos focales hallados y su relación con fallas regionales. SFR: Sistema de Fallas de Romeral; FI: Falla Ibagué; FB: Falla Bituima; FH: Falla Honda; FP: Falla Palestina; FO: Falla Otú; FES: Falla Espíritu Santo

Fuente: Elaboración propia.

Palestina y Otú. En particular, el evento 11, que sugiere un movimiento predominantemente de rumbo, muestra un posible plano de falla paralelo a la estructura regional, donde se infiere movimiento sinistral; el evento 9 puede corresponder a una zona transtensión localizada.

6. Conclusiones

Después de recopilar sismos alrededor del Altiplano Antioqueño, registrados por la RSNC desde su densificación en el período 2008-2009, se identificaron dos zonas sísmicas, al norte y al sur de dicho altiplano, con regímenes predominantemente compresivo para la zona del norte y transcurrente para la zona del sur. El cuadrángulo 76°W – 74°W y 8°N – 6°N, asociado a las fallas Espíritu Santo, Otú y norte de Palestina, corresponde a un régimen compresivo de dirección NE-SW, el cual puede asociarse a una acomodación del bloque Panamá-Chocó. El cuadrángulo 5° 30' N – 4° N y 76°W – 74°W, relacionado con el sistema de fallas de Romeral, el sistema de fallas de Palestina al sur y la falla Honda, representa una zona con un régimen en el rumbo de componente sinistral.

El régimen compresivo establecido para la zona A (Fig. 8), al norte del Altiplano Antioqueño, con dirección NW-SE, es consistente con estudios anteriores de la distribución de esfuerzos en el Bloque Nor-Andino (Corredor, 2003, Cortes y Angelier, 2005). Para la zona B (Fig. 9), al sur del Altiplano

Antioqueño, se deduce un régimen transformante que genera fallas predominantemente sinistralas, a diferencia de la dominancia de la compresión propuesta por Cortés y Angelier (2005), y más consistente con lo propuesto para esta zona por Corredor (2003).

La parte central de la zona de estudio, donde se sitúan el Altiplano Antioqueño y la ciudad de Medellín y su Área Metropolitana, se encuentra libre de sismicidad frecuente de magnitud suficiente para establecer la presencia de fallas activas. Con un mejoramiento y densificación de la instrumentación sismográfica y acelerográfica allí presente, podrá establecerse la posible actividad de fallas en la zona y la presencia de sismicidad.

Referencias

- [1] Duque-Caro, H., The choco block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic and paleogeographic implications, *J. South Am. Earth Sci.*, 3(1), pp. 71-84, 1990. DOI: 10.1016/0895-9811(90)90019-W
- [2] Taboada, A., Rivera, L., Fuenzalida, A. and Cisternas, A., Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia), *Tectonics*, 19(5), pp. 787-813, 2000. DOI: 10.1029/2000TC900004
- [3] Trenkamp, R., Kellogg, J.N., Freymueller, J.T. and Mora, H.P., Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations, *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), pp. 157-171, 2002. DOI: 10.1016/S0895-9811(02)00018-4
- [4] Cortés, M. y Angelier, J., Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes, *Tectonophysics*, 403(1-4) pp. 29-58, Jul. 2005. DOI: 10.1016/j.tecto.2005.03.020
- [5] Corredor, F., Seismic strain rates and distributed continental deformation in the northern Andes and three-dimensional seismotectonics of northwestern South America, *Tectonophysics*, 372(3-4), pp. 147-166, Sep. 2003. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00276-2
- [6] Restrepo-Moreno, S.A., Foster, D.A., Stockli, D.F. and Parra-Sánchez, L.N., Long-term erosion and exhumation of the 'Altiplano Antioqueño', Northern Andes (Colombia) from apatite (U-Th)/He thermochronology, *Earth and Planetary Science Letters*, 278(1), pp. 1-12, 2009. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.09.037
- [7] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Microzonificación y evaluación del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá, 2007.
- [8] Restrepo, J.J. and Toussaint, J.F., Terranes and continental accretion in the Colombian Andes, *IGCP*, 11(3), pp. 189-193, 1988.
- [9] Restrepo, J.J., Ordoñez-Carmona, O., Martens, U. y Correa, M., Terrenos, complejos y provincias en la cordillera central de Colombia, *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 9(2), pp. 49-56, 2009.
- [10] Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W. and Beltrán, A., Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia, *Lithos*, 125(3-4), pp. 875-896, Aug. 2011. DOI: 10.1016/j.lithos.2011.05.003
- [11] Corredor, F., Eastward extent of the Late Eocene–Early Oligocene onset of deformation across the northern Andes: Constraints from the northern portion of the Eastern Cordillera fold belt, Colombia, *Journal of South American Earth Sciences*, 16(6), pp. 445-457, Dec. 2003. DOI: 10.1016/j.jsames.2003.06.002
- [12] Mora, A., Parra, M., Strecker, M.R., Kammer, A., Dimaté, C. and Rodríguez, F., Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia, *Tectonics*, 25(2), TC2010, pp. 1-19, 2006. DOI: 10.1029/2005TC001854
- [13] Mora, A., Reyes-Harker, A., Rodríguez, G., Tesón, E., Ramirez-Arias, J.C., Parra, M., Caballero, V., Mora, J.P., Quintero, I., Valencia, V., Ibañez, M., Horton, B.K. and Stockli D.F., Inversion tectonics under increasing rates of shortening and sedimentation: Cenozoic example from the Eastern Cordillera of Colombia, *Geological Society, London, Special Publications*, 377(1), pp. 411-442, 2013. DOI: 10.1144/SP377.6
- [14] Parra, M., Mora, A., Jaramillo, C., Torres, V., Zeilinger, G. y Strecker, M.R., Tectonic controls on Cenozoic foreland basin development in the north-eastern Andes, Colombia, *Basin Research*, 22(6), pp. 874-903, 2010. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2009.00459.x
- [15] Gómez, E., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W. and Cardozo, N., Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes, *Geological Society of America Bulletin*, 117(9-10), pp. 1272, 2005. Doi: 10.1130/B25456.1
- [16] Pennington, W.D., Subduction of the Eastern Panama basin and seismotectonics of northwestern South America, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11), pp. 10753-10770, 1981. DOI: 10.1029/JB086iB11p10753.
- [17] Chiarabba, C., De Gori, P., Faccenna, C., Speranza, F., Seccia, D., Dionicio, V. and Prieto, G.A., Subduction system and flat slab beneath the Eastern Cordillera of Colombia, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(1), pp. 1-12, 2015. DOI: 10.1002/2015GC006048
- [18] Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Pardo, A., Silva, J.C., Valencia, V., Ayala, C., Pérez-Angel, L.C., Rodríguez-Parra, L.A., Ramirez, V., and Niño, H., Middle Miocene closure of the Central American Seaway, *Science*, 348(6231), pp. 226-229, 2015. DOI: 10.1126/science.aaa2815
- [19] Álvarez, M., Ordóñez-Carmona, O.V. Marín, M. y Hernández, A.R., Geología de la zona de influencia de la Falla Otú en el distrito minero Segovia-Remedios, *DYNA*, 74(153), pp. 41-51, 2007.
- [20] Ego, F., Sébrier, M., Lavenue, A., Yepes, H. and Egues, A., Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes, *Tectonophysics*, 259(1-3), pp. 101-116, 1996. DOI: 10.1016/0040-1951(95)00075-5
- [21] Cortes, R., Observaciones y descripciones petrologicas y estructurales asociadas al tramo meridional de la Falla Palestina, *Geología Colombiana*, 17, pp. 211-218, 1990. DOI: 10.15446/gc
- [22] Dewey, J.W., Seismicity and tectonics of western Venezuela. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(6), pp. 1711-1751, 1972.
- [23] Franco, E., Rengifo, F., Llanos, D., Pérez, J., Bedoya, N., Bermúdez, M.L., Martínez, S., Duarte, J., Rengifo, R. e INGEOMINAS, S. D. A. G Sismicidad registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia durante el tiempo de operación: Junio de 1993 hasta agosto de 2002. En 1er Simposio Colombiano de Sismología, Bogotá., 2002
- [24] Shearer, P.M., *Introduction to seismology*. Cambridge University Press., 2009
- [25] Cronin, V., *A primer on focal mechanism solutions for geologists*. Science Education Resource Center, Carleton College, 2010.
- [26] Havskov, J. and Ottemoller, L., SEISAN earthquake analysis software. *Seismological Research Letters*, 70(5), pp. 532-534, 1999.
- [27] Crowell, H.P., Owens, T.J. and Ritsema, J., The TauP Toolkit: Flexible seismic travel-time and ray-path utilities. *Seismological Research Letters*, 70(2), pp. 154-160, 1999.
- [28] Kennett, B.L.N. and Engdahl, E.R., Traveltimes for global earthquake location and phase identification, *Geophysical Journal International*, 105(2), pp. 429-65, 1991. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x
- [29] McClay, K.R., *The mapping of geological structures*. John Wiley & Sons, 1987.
- [30] Vargas, C.A. and Mann, P., Tearing and breaking off of subducted slabs as the result of collision of the panama arc-indenter with Northwestern South America, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(3), pp. 2025-2046, 2013. DOI: 10.1785/0120120328
- [31] Twiss, R.J. and Moores, E.M. *Structural geology*. Macmillan. 1992.

- [32] Marshak, S. and van der Pluijm, B.A., Earth structure: An introduction to structural geology and tectonics. New York: W.W. Norton & Company, Inc., 2004.
- [33] Fossen, H., Structural geology. Cambridge University Press., 2016.

G. Posada, obtuvo su grado en Ing. Geológica de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) en 2015. En la actualidad trabaja en el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y Valle de Aburrá (SIATA) y cursa la Maestría en Ingeniería – Recursos Minerales en la Facultad de Minas de la UNAL Sede Medellín.

ORCID: orcid.org/0000-0002-0797-7864

G. Monsalve, se graduó como Ing. Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) en el año 2001, y obtuvo su PhD en Geofísica de la Universidad de Colorado en Boulder, USA, en 2007. Actualmente trabaja como profesor asociado en la Facultad de Minas de la UNAL Sede Medellín.

ORCID: orcid.org/0000-0002-6029-3058

A.M. Abad, obtuvo su diploma en Ing. Geológica de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) en 2002, y su título de MSc. en Geología de la Universidad Federal de Oro Preto, Brasil, en 2005. Actualmente trabaja en la empresa de ingeniería INTEGRAL S.A., y además es profesora de cátedra en la Facultad de Minas de la UNAL Sede Medellín.

ORCID: orcid.org/0000-0001-6312-2484