
CAMPO DE VELOCIDADES GPS EN EL OCCIDENTE DE VENEZUELA: COMPONENTE LATERAL DERECHA ASOCIADA A LA FALLA DE BOCONÓ Y COMPONENTE CONVERGENTE PERPENDICULAR A LOS ANDES

OMAR J. PÉREZ, ROGER BILHAM, MICHELL SEQUERA, LUISELVIC MOLINA, PATRICIA GAVOTTI, HENRY CODALLO, CARLOS MONCAYO, CARLOS RODRÍGUEZ, RODOLFO VELANDIA, MERCEDES GUZMÁN y PETER MOLNAR

RESUMEN

La zona de deformación entre las placas del Caribe y Suramérica en el noreste de Venezuela, a lo largo del sistema de fallas de San Sebastián-El Pilar de rumbo este-oeste, es relativamente angosta (~100km), con el Caribe desplazándose hacia el este en forma lateral derecha respecto a Suramérica a 20 ± 2 mm/año. En el occidente de Venezuela y norte de Colombia esa zona se ensancha hasta más de 400km, estando delimitada al sureste por el sistema de fallas de Boconó, de rumbo noreste, a lo largo de los Andes en el occidente de Venezuela, y al noroeste por una fosa oceánica costa afuera del norte de Colombia, la cual marca la subducción de la placa del Caribe por debajo de la región más noroeste de Suramérica. Nuevas mediciones con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) revelan que los 20 ± 2 mm/año de desplazamiento lateral derecho del Caribe

con respecto a Suramérica se parten en dos componentes: uno con 12 ± 2 mm/año de movimiento lateral derecho puro a lo largo de la falla de Boconó, con buzamiento vertical y reptando por debajo de una profundidad de bloqueo de 14 ± 4 km; y otro de 12-16mm/año de convergencia perpendicular a los Andes. De esta convergencia, ~1/3 se concentra cerca de la falla de Boconó y resulta en fallamientos inversos de orientación paralela a ella a lo largo de ambos piedemontes andinos, con buzamiento hacia la cordillera, como ha sido deducido de secciones y volúmenes sísmicos exploratorios con fines petroleros, y del estudio de mecanismos focales de terremotos asociados a esas fallas. Aunque el campo convergente de velocidades no está bien constreñido por los datos GPS, éstos sugieren que ~4mm/año de convergencia ocurren costa afuera al norte de Colombia.

El borde sur de la placa del Caribe (Figura 1) en el centro-norte y noreste de Venezuela está asociado al sistema de fallas transcurrente lateral derecho de San Sebastián y El Pilar (Molnar y Sykes, 1969), a lo largo de las cuales el Caribe se desplaza en sentido aproximado oeste-este con respecto a Suramérica a una tasa de 20 ± 2 mm/año (Pérez *et al.*, 2001; Weber *et al.*, 2001). El borde suroeste de la placa, al oeste de 68° O, se ramifica (Pen-

nington, 1981; Beltrán, 1993; Pérez *et al.*, 1997; Audemard *et al.*, 2000; Taboada *et al.*, 2000) y se ensancha (>400km), y varios sistemas de fallas sísmicamente activos acomodan el movimiento relativo entre el Caribe y Suramérica (Beltrán, 1993; Deng y Sykes, 1995; Audemard *et al.*, 2000). El más prominente de éstos es el sistema de fallas transcurrente lateral derecho de Boconó (Rod, 1956; Cluff and Hansen, 1969; Schubert y Sifontes, 1970; Bellizzia *et al.*, 1976), de rumbo suroeste-

noreste, que ocurre a lo largo del eje central de los Andes venezolanos (Figura 1), junto con una serie de fallas inversas subparalelas que buzanan hacia la cordillera, localizadas en ambos flancos de la misma (Bellizzia *et al.*, 1976; Audemard, 1991; Beltrán, 1993). Por otro lado, a una distancia >400km hacia el noroeste, en las regiones costeras del norte de Colombia, una fosa oceánica marca la subducción de la placa del Caribe en dirección sureste por debajo de la placa surameri-

PALABRAS CLAVE / Borde Sur del Caribe / Falla de Boconó / GPS / Partición de Desplazamiento /

Recibido: 17/07/2009. Modificado: 15/12/2010. Aceptado: 19/12/2010.

Omar J. Pérez. Ingeniero, Universidad Central de Venezuela. Ph.D. en Geofísica, Columbia University, EEUU. Profesor, Universidad Simón Bolívar, Venezuela. Dirección: Departamento de Ciencias de la Tierra, USB. Caracas 1080A, Venezuela. e-mail: ojperez@usb.ve

Roger Bilham. Ph.D. en Geofísica, Cambridge University, RU. Profesor, University of Colorado, EEUU.

Michell Sequera. Ingeniero y M.Sc. en Geofísica, USB, Venezuela.

Luiselvic Molina. Ingeniero Geofísico, USB, Venezuela.

Patricia Gavotti. Ingeniero Geofísico, USB, Venezuela.

Carlos Moncayo. Ingeniero Geofísico, USB, Venezuela.

Carlos Rodríguez. Ingeniero Geofísico, USB, Venezuela.

Mercedes Guzmán. Ingeniero Geofísico, USB, Venezuela.

Henry Codallo. Ingeniero Geodesta, La Universidad del Zulia (LUZ), Venezuela.

Rodolfo Velandia. Ingeniero Geodesta, LUZ, Venezuela.

Peter Molnar. PhD en Geofísica, Columbia University, EEUU. Profesor, University of Colorado, EEUU.

cana (Kellogg y Bonini, 1982; Van der Hilst y Mann, 1994; Kellogg y Vega, 1995; Malavé y Suárez, 1995; Pérez *et al.*, 1997; Trenkamp *et al.*, 2002), subducción que alcanza profundidades de hasta 150-

170km en las regiones adyacentes al Lago de Maracaibo (Pérez *et al.*, 1997; Audemard *et al.*, 2005).

A los efectos de investigar el rol del sistema de fallas de Boconó en el acomodo de parte del movimiento relativo entre las placas del Caribe y Suramérica, así como para cuantificar el campo de velocidades en el noroeste del continente y occidente de Venezuela, entre 1999 y 2006 fue realizada una serie de observaciones GPS en sitios localizados a lo largo de tres líneas que cruzan los Andes (Figura 2). Además de los vectores de veloci-

dad subsecuentemente conseguidos, se compiló otros vectores de velocidad GPS previamente obtenidos para la región norte de Colombia y en el propio occidente Venezolano por otros investigadores (Kellogg y Vega, 1995; Pérez *et al.*, 2001; Trenkamp *et al.*, 2002). Los vectores utilizados son dados en la Tabla I, y son todos relativos al cratón Suramericano fijo al este de la cordillera andina.

Los resultados, que incluyen modelajes elásticos, indican que en la región noroeste de Suramérica los 20 ± 2 mm/año de desplazamiento relativo hacia el este de la placa del Caribe con respecto a la Suramericana se parten en dos componentes, a saber: por un lado, en 12 ± 2 mm/año de movimiento transcurrente lateral derecho confinados en una zona de deformación de ~100km de ancho centrada aproximadamente a lo largo de la traza principal de la falla de Boconó, de rumbo N50°E, la cual repta por debajo de una profundidad de bloqueo de 14 ± 4 km; y por otro lado, una componente de convergencia perpendicular a los Andes, la cual se calcula entre

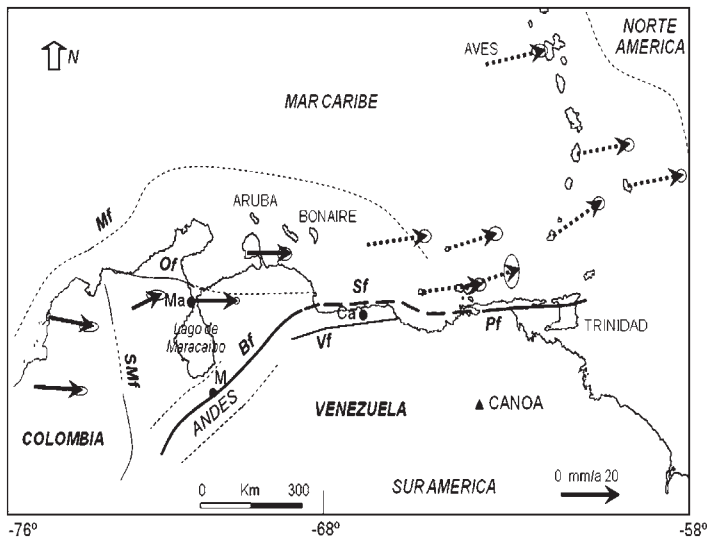


Figura 1. Marco tectónico regional mostrando los vectores de velocidad GPS obtenidos en la región noroeste de Suramérica (flechas sólidas) por Trenkamp *et al.* (2002) y en este estudio, a distancias mayores de 200km de la falla de Boconó (Bf). Los datos son presentados numéricamente en la Tabla I. Los datos de velocidad en la región del Caribe (flechas quebradas) son tomados de Pérez *et al.* (2001). Las elipses son los errores correspondientes a cada vector en 2D, ± 1 desviación estándar ($\pm 1\sigma$). Fallas geológicas mayores son Bf: Boconó, Sf: San Sebastián, Pf: El Pilar, Of: Oca, Vf: La Victoria, Mf: marginal del Caribe sur, y SMf: Santa Marta. M, Ma y Ca señalan las ciudades de Mérida, Maracaibo y Caracas, respectivamente.

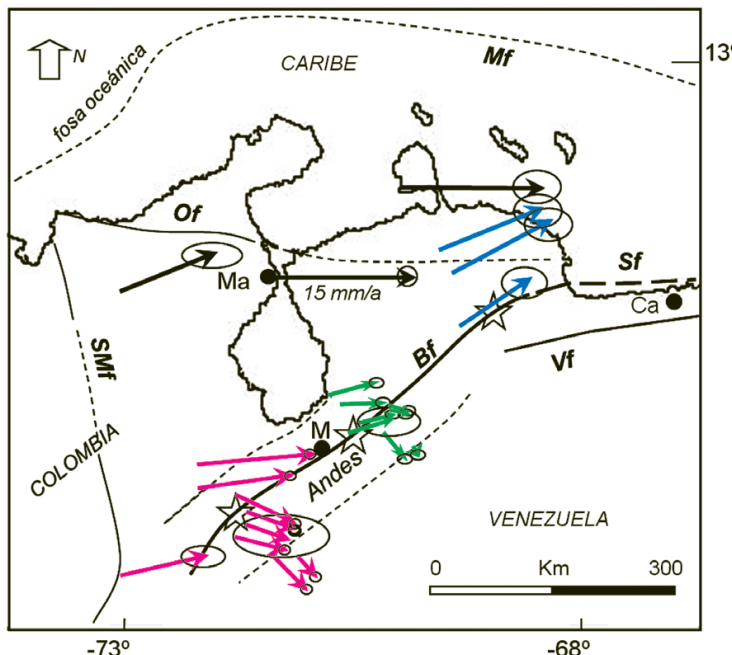


Figura 2. Velocidades GPS relativas a Canoa (Figura 1) en el cratón Suramericano, de sitios localizados en el occidente de Venezuela. Los datos son presentados numéricamente en la Tabla I. Las estrellas son terremotos históricos (magnitud 7.1-7.4) asociados a diferentes segmentos de la falla de Boconó (Bf), que ocurrieron, de izquierda a derecha, en 1894, 1674 y 1812, respectivamente (Palme *et al.*, 2005; Audemard, 2005; Audemard *et al.*, 2008; Choy *et al.*, 2009). Los colores están vinculados a las Figuras 3 y 4. Los demás símbolos están definidos en la leyenda de la Figura 1.

TABLA I
COMPONENTES NORTE Y ESTE ($\pm 1\sigma$) DE LOS VECTORES DE VELOCIDAD GPS DE SITIOS EN EL NOROESTE DE SURAMÉRICA Y ANDES VENEZOLANOS, CON EL CRATÓN SURAMERICANO FIJO COMO REFERENCIA

| Sitio ID | Long (°E) | Lat (°N) | Ve (mm/año) | Vn (mm/año) |
|--------------------|-----------|----------|----------------|----------------|
| CART* ¹ | -75,50 | 10,36 | 15,1 \pm 3,2 | -2,3 \pm 1,3 |
| MONT* ¹ | -75,68 | 8,89 | 16,5 \pm 2,4 | -0,9 \pm 1,2 |
| VDUP* ¹ | -73,25 | 10,44 | 10,1 \pm 3,1 | 4,0 \pm 1,3 |
| MARA ¹ | -71,62 | 10,67 | 15,0 \pm 0,5 | 0,0 \pm 0,5 |
| AMUA‡ ¹ | -70,19 | 11,75 | 14,9 \pm 2,5 | 1,4 \pm 1,7 |
| GUAY ² | -72,33 | 8,51 | 12,5 \pm 0,6 | 1,1 \pm 0,5 |
| DALI ² | -72,30 | 8,26 | 10,1 \pm 0,6 | 1,4 \pm 0,5 |
| GRIT ² | -71,98 | 8,15 | 6,3 \pm 0,6 | -3,0 \pm 0,5 |
| PREG ² | -71,76 | 8,01 | 6,1 \pm 0,6 | -2,1 \pm 0,5 |
| URIB* ² | -71,74 | 7,91 | 4,6 \pm 5,2 | -1,6 \pm 2,2 |
| FUND ² | -71,85 | 7,78 | 5,6 \pm 0,6 | -1,4 \pm 0,5 |
| PEDR ² | -71,55 | 7,53 | 2,3 \pm 0,5 | -5,1 \pm 0,5 |
| GUAC ² | -71,30 | 7,45 | 2,1 \pm 0,6 | -2,3 \pm 0,5 |
| BUCM* ² | -73,18 | 7,12 | 9,3 \pm 2,3 | 2,2 \pm 1,1 |
| BATE ³ | -71,10 | 9,16 | 5,4 \pm 0,3 | 1,4 \pm 0,2 |
| TORO ³ | -71,00 | 9,01 | 4,7 \pm 0,4 | 0,2 \pm 0,3 |
| MERI‡ ³ | -70,87 | 8,79 | 5,0 \pm 3,5 | 1,7 \pm 1,5 |
| FRAI ³ | -70,80 | 8,85 | 3,7 \pm 0,4 | 0,9 \pm 0,3 |
| PIED ³ | -70,63 | 8,88 | 2,9 \pm 0,4 | -1,2 \pm 0,3 |
| STOD ³ | -70,63 | 8,86 | 2,3 \pm 0,4 | -0,2 \pm 0,3 |
| ALTA ³ | -70,50 | 8,80 | 2,6 \pm 0,2 | -3,1 \pm 0,6 |
| BART ³ | -70,39 | 8,76 | 3,7 \pm 0,6 | 4,4 \pm 0,6 |
| BARI ³ | -70,25 | 8,63 | 0,7 \pm 0,4 | -1,2 \pm 0,3 |
| GOYA‡ ⁴ | -69,71 | 11,00 | 11,3 \pm 3,0 | 3,9 \pm 1,7 |
| CHUR‡ ⁴ | -69,54 | 10,82 | 10,6 \pm 3,0 | 5,7 \pm 1,7 |
| QUIB‡ ⁴ | -69,65 | 9,87 | 7,6 \pm 2,5 | 5,2 \pm 1,6 |

* Trenkamp *et al.* (2002), ‡ Pérez *et al.* (2001), otros: este estudio. Súper-índices 1 a 4 señalan sitios localizados en el noroeste de Suramérica (1), y en las regiones suroeste (2), central (3) y noreste (4) de los Andes venezolanos, i.e., vectores y puntos negros, rojos, verdes y azules en las Figuras 1 a 4, respectivamente.

los 12 y 16mm/año. Aproximadamente un tercio de esta convergencia (4-5mm/año) ocurre en las cercanías de la falla de Boconó, a lo largo de fallas inversas subparalelas a la misma que buzan hacia la cordillera, localizadas a una distancia de ~25 m a ambos flancos de la falla.

A continuación se describe la manera como fueron obtenidos y procesados los datos GPS, y se presentan los vectores de velocidad subsecuentemente derivados. Luego se presentan los detalles del campo de velocidades observado en el noroeste de Suramérica y a través de los Andes venezolanos, y del modelaje elástico realizado para emular la componente transcurrente del mismo. Finalmente, se discute el aporte de los resultados geodésicos obtenidos en el conocimiento de la tectónica regional actual y en la cuantificación del riesgo sísmico en la región occidental de Venezuela.

Adquisición de los Datos GPS y Vectores de Velocidad Obtenidos

Los datos satelitales fueron obtenidos usando receptores GPS de doble frecuencia. Las observaciones iniciales fueron hechas en forma simultánea en junio 1999 (en 11 puntos) y marzo 2000 (en 10 puntos), en sitios localizados a lo largo y ancho de los Andes venezolanos, así como en Caracas, Maracaibo y Canoa (Figuras 1 y 2) como puntos de control. Dichas mediciones fueron repetidas en diciembre 2004 y abril 2006, respectivamente. En todos los casos las mediciones se realizaron durante cinco días, 12h por día, muestreando cada 30s y con una máscara de elevación de 15°, con el objeto de minimizar los efectos del gradiente atmosférico regional (Dixon *et al.*, 1998). Los sitios Canoa, Maracaibo y Caracas han sido observados durante todas las sesiones a partir de 1999. Canoa, ubicado en el cratón Suramericano, suficientemente alejado del borde sur de la placa del Caribe (Figura 1) fue utilizado como punto fijo de referencia. De esta manera los vectores de velocidad obtenidos para cada punto GPS son en esencia relativos a la placa Suramericana fija.

Los datos fueron procesados usando el paquete computa-

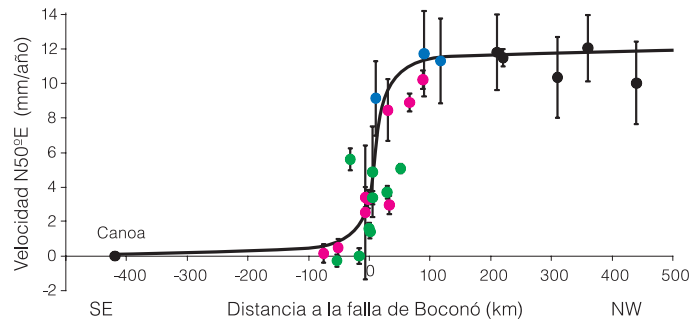


Figura 3. Componente del campo de velocidades en el occidente de Venezuela y norte de Colombia en la dirección paralela a la falla de Boconó, con el cratón Suramericano fijo como marco de referencia. Los colores en las Figuras 3 y 4 están vinculados a los vectores en la Figuras 1 y 2 y señalan la ubicación de los puntos en las mismas. El 80% de la deformación está centrada ~40km al noroeste y sureste de una línea ~10km al noroeste de la traza principal de la falla de Boconó. La línea sólida es el modelo elástico arcotangencial (Okada, 1985) correspondiente a una desplazamiento rumbo-deslizante lateral derecho de 12mm/a ocurriendo por debajo de una profundidad de bloqueo de 14km, en una falla vertical de orientación N50°E. Las barras en las Figuras 3 y 4 indican los errores ($\pm 1\sigma$) correspondientes a cada punto en la dirección respectiva.

cional Bernese de la Universidad de Berna (Hugentobler *et al.*, 2005). A los efectos de comparar las posiciones geodésicas precisas obtenidas a partir de Canoa para cada punto en 1999/2000 y 2004/2006, se utilizaron las efemérides satelitales precisas y archivos de reloj y de polos provistos por el Servicio GNSS Internacional (IGS), y se siguieron los procedimientos estándar descritos en detalle por Blewitt *et al.* (1992), Dixon *et al.* (1998) y Dragert *et al.* (2001), entre otros. De la misma manera, se compiló una serie de 10 vectores adicionales de velocidad GPS reportados previamente para sitios localizados en el norte de Co-

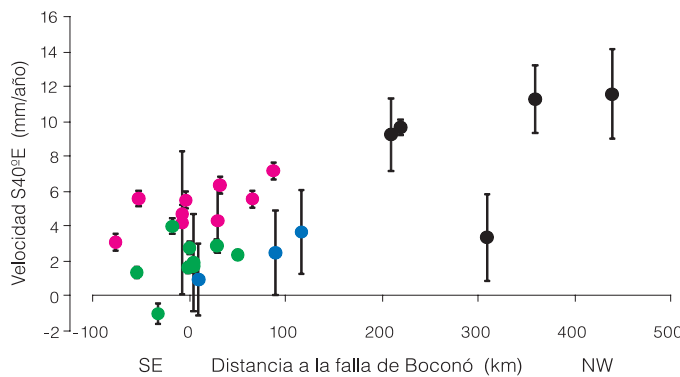


Figura 4. Componente de las velocidades GPS en la dirección normal a la falla de Boconó y Andes venezolanos, con el cratón Suramericano fijo como referencia. La mayoría de la convergencia hacia el cratón ocurre en la costa norte colombo-venezolana (puntos negros), a distancias mayores de 200km al noroeste de los Andes (ver los vectores de velocidad correspondientes en la Figura 1). La convergencia al cruzar los Andes, a distancias de ~100km a ambos flancos de la falla de Boconó, varía de $2,0 \pm 1,4$ mm/año en las regiones central y noreste de los Andes (puntos verdes y azules), a $5,0 \pm 1,2$ mm/año en la región suroeste de los mismos (puntos rojos). A pesar de la dispersión, los datos para las diferentes secciones de los Andes sugieren un gradiente de 1-2mm/año, en una distancia de ~200km. El significado de los colores y barras se da en la leyenda de la Figura 3.

lombia y en los Andes venezolanos por Pérez *et al.* (2001) y Trenkamp *et al.* (2002), todos relativos a la placa Suramericana fija. Los vectores son mostrados en las Figuras 1 y 2, y son presentados numéricamente en la Tabla I.

Campo de Velocidades en el Occidente de Venezuela: Movimiento Lateral Derecho en la Falla de Boconó y Convergencia Normal a Los Andes

Los vectores de velocidad de los sitios localizados en la parte más noroeste de Suramérica, a distancias >200km del eje central de los Andes venezolanos (Figura 1) muestran un movimiento hacia el este bastante uniforme de esas

regiones con respecto al cratón Suramericano, a una tasa de ~15mm/año. La dirección de este movimiento es oblicua a los Andes venezolanos y a la falla de Boconó, los cuales tienen un rumbo aproximado N50°E. Esta oblicuidad también se observa en los vectores de velocidad de los sitios localizados a ambos flancos de la falla de Boconó a lo largo y ancho de los Andes (Figura 2), lo cual de inmediato sugiere la coexistencia de movimiento transcurrente lateral derecho a lo largo de dicha falla, y de una componente convergente de movimiento perpendicular a los Andes (Perez *et al.*, 1997; Audemard y Audemard, 2002).

La Figura 3 muestra el campo de velocidades en el noroeste de Suramérica asociado a la componente de cizalla en la dirección paralela a la falla de Boconó, el cual fue obtenido a partir del valor de la componente paralela a la falla de cada uno de los vectores de velocidad utilizados en este estudio (Tabla I). A través de los Andes dicho campo está confinado a una franja de deformación de ~100km de ancho y la mayor parte (~80%) de la deformación en superficie está contenida dentro de una banda de ~80km de ancho centrada unos cuantos km al noroeste de la traza principal de la falla de Boconó. La línea sólida en la Figura 3 es el modelo elástico ar-

co-tangencial para la velocidad en superficie, obtenido a partir de las ecuaciones descritas por Okada (1985), que mejor reproduce los datos observados. Dicho modelaje indica un movimiento lateral derecho de 12 ± 2 mm/año por debajo de una profundidad de bloqueo de 14 ± 4 km, en una falla con buzamiento vertical de rumbo N50°E.

La Figura 4 muestra el campo de velocidades en el noroeste de Suramérica asociado a la componente de movimiento convergente en la dirección perpendicular a los Andes. Dicho campo fue obtenido a partir de los valores de la componente normal a la cordillera de los vectores de velocidad analizados. La mayoría de los sitios localizados a distancias >200 km (puntos negros) al noroeste del eje central de los Andes (o de la traza principal de la falla de Boconó) muestran una convergencia de 9-12 mm/año hacia el cratón Suramericano en la dirección analizada (S40°E). Por otro lado, los sitios localizados a distancias <100 km de la falla de Boconó, a ambos lados de la misma, muestran una convergencia de $5,0 \pm 1,1$ mm/año (1σ) en las porciones suroeste de los Andes (puntos rojos), al suroeste de Mérida (Figura 2), mientras que hacia el noreste (puntos verdes y azules) la convergencia es de $2,0 \pm 1,4$ mm/año (1σ). Esto sugiere que los Andes Merideños están rotando en el sentido anti-horario. En todo caso, estos resultados indican que las montañas andinas se están desplazando como un todo hacia el sureste con respecto a Suramérica, lo cual explica los fallamientos inversos de rumbo noreste y buzamiento hacia los Andes que ocurren (Bellizzia *et al.*, 1976; Beltrán, 1993; Audemard, 1999; Audemard *et al.*, 2000, 2005) en el sureste de la cordillera. Finalmente, aunque los datos para las diferentes secciones de los Andes (puntos rojos, verdes y azules) muestran bastante dispersión, se observa un pequeño gradiente y por ende deformación a través de la cordillera: 1-2 mm/año de contracción en una distancia de ~ 200 km, es decir, 5-10 nanostrain por año.

Discusión y Conclusiones

El cratón Suramericano al este de la cordillera andina venezolana es bastante rígido, pues no muestra deformación geodésica ni sismicidad no inducida significativas (Pérez y Mendoza, 1998; Pérez *et al.*, 2001). En contraste, los Andes venezolanos, centrados en la traza principal de la falla de Boconó (Figura 1), se levantan

abruptamente por encima de los llanos hasta una altura promedio de 3-4 km, con el Pico Bolívar cerca de Mérida alcanzando una altura de 4978,4 m (Pérez *et al.*, 2005), y muestran una deformación por cizalla relativamente alta (>5 nanostrain/año), abundante microsismicidad (Pérez *et al.*, 1997; Pérez y Mendoza, 1998), y ocasionalmente terremotos de tamaño moderado (Mw 6+) y mayores (Mw 7-7,6; Rod, 1956; Fiedler, 1961; Grases, 1980; Audemard, 1997; Palme y Altez, 2002; Palme *et al.*, 2005; Audemard *et al.*, 2005). Fallas inversas de orientación paralela a la falla de Boconó en ambos márgenes de la cordillera (Figura 1) buzán hacia la misma (Bellizzia *et al.*, 1976; Beltrán, 1993; De Toni y Kellogg, 1993; Audemard, 1999, 2003; Audemard *et al.*, 2000, 2005) y el desplazamiento en ellas ha provocado el engrosamiento de la corteza (Schubert, 1969; Kellogg y Bonini, 1982; Audemard y Audemard, 2002). Los vectores de velocidad GPS obtenidos a lo largo de perfiles perpendiculares a los Andes muestran una componente de movimiento lateral derecho de 12 ± 2 mm/año asociado a la falla de Boconó, y una tasa de acortamiento o contracción cortical en el orden de 5-10 nanostrain/año, asociado a las fallas inversas antes mencionadas. La componente de movimiento normal a la falla de Boconó cerca de la misma (Figura 4) promedia 4 mm/año, una tasa mucho más pequeña que la mostrada por el movimiento lateral derecho. La tasa modelada para el desplazamiento lateral (Figura 3) es consistente con la derivada (7-10 mm/año) a partir de estudios de paleosismicidad y desplazamientos holocenos asociados a la traza principal de la falla de Boconó (Schubert y Sifontes, 1970; Soulas, 1986; Audemard, 1997, 2005). Es factible que la diferencia ($>20\%$) entre ambas sea producto de la contribución al desplazamiento de otras fallas del tipo transcurrente lateral derecho sub-paralelas a la falla de Boconó, que también muestran actividad holocena, tales como las fallas de Uribante-Caparo y La Colorado-Macanillo en la sección suroeste de los Andes, y las fallas de Hato Viejo, Río Turbio y Morón en la porción noreste de los mismos (Beltrán, 1993; Audemard, 1997, 2005), entre otras.

La partición de desplazamiento exhibida por la región andina venezolana es muy parecida a la que ocurre en California Central, EEUU, donde además de la actividad sísmica a lo largo de la falla transcurrente lateral derecha de San Andreas, ocurre actividad sísmica en una serie de fallas

inversas subparalelas a ella, como es el caso del terremoto de Coalinga de 1983 (Stein y King, 1984; Ekström y England, 1989; Stein y Ekström, 1992), y aunque la tasa de convergencia asociada a las fallas inversas es mucho más pequeña que la tasa de desplazamiento lateral que muestra la falla de San Andreas, toda la convergencia es absorbida por las fallas inversas y no hay desplazamiento oblicuo en la mencionada falla, es decir, en Coalinga la falla de San Andreas muestra transcurrancia pura. Este parece ser también el caso en los Andes venezolanos, dado que los mecanismos focales de terremotos reportados para la región (Pérez *et al.*, 1997; Pérez y Mendoza, 1998; Audemard *et al.*, 2005) muestran transcurrancia lateral derecha pura para eventos asociados a la falla de Boconó, mientras que sismos localizados en ambos márgenes andinos muestran fallamiento inverso puro en planos que buzán hacia la falla.

En las regiones más al noroeste del continente suramericano, incluyendo las áreas costeras de Colombia (Figura 1), la componente de convergencia perpendicular a los Andes (puntos negros en la Figura 4) muestra valores que alcanzan 12 mm/año. Cuando se descompone el vector este-oeste de desplazamiento entre el Caribe y Suramérica (20 ± 2 mm/año) en las direcciones paralela (12 ± 2 mm/año) y perpendicular a los Andes, esta última componente está en el orden de 12-16 mm/año, implicando un déficit de desplazamiento convergente de ~ 4 mm/año en esas regiones. Se infiere que estos ~ 4 mm/año ocurren costa afuera del norte de Colombia, aunque el campo convergente de velocidades observado no está bien acotado por los datos GPS.

Hoy en día, gracias al análisis de datos macrosísmicos (Palme *et al.*, 2005; Choy *et al.*, 2009) y a estudios de paleosismicidad (Audemard, 1997, 2005; Audemard *et al.*, 2008) se conoce acerca de la ocurrencia de una serie de terremotos de tamaño moderado (Mw 6+ en 1610, 1849, 1932 y 1950) y unos pocos mayores (Mw 7+ en 1674, 1812 y 1894), asociados a la falla de Boconó. Estos últimos, con una magnitud Mw estimada entre 7,1 y 7,4 rompieron diferentes secciones de la falla (Figura 4). Así, el evento de 1894 ocurrió en su segmento suroeste (Audemard, 1997, 2008); el sismo de 1674 en la sección central (Palme *et al.*, 2005; Audemard *et al.*, 2008); y el terremoto de 1812 en la sección noreste, pero incluyendo parte de la falla de

San Sebastián adyacente en la costa centro-norte de Venezuela (Choy *et al.*, 2009). El déficit de desplazamiento cerca de la superficie en cada una de estas secciones de la falla, asumiendo que cada segmento de la misma ha estado bloqueado desde la ocurrencia de su último sismo, es de 1m (115 años), 3,2m (335 años) y 1,9m (197 años), respectivamente, si el 80% del desplazamiento regional lateral derecho ocurre a lo largo de la traza principal de la falla de Boconó. Claramente, la sección central de los Andes venezolanos parece ser la de mayor amenaza sísmica. Por ejemplo, para una falla transcurrente de 100-140km de largo por 14km de profundidad, que produzca un sismo de magnitud 7,1-7,4, se anticipa un desplazamiento cosísmico de 2-3,5m (Pegler y Das, 1996). Esta cantidad coincide con el déficit de desplazamiento de 3,2m que fuera estimado en este trabajo para la sección central de la falla de Boconó.

Para concluir, aunque la velocidad relativa lateral derecha exhibida por el sistema de fallas de Boconó está ahora bastante acotada, los detalles del campo de velocidades en el noroeste de Suramérica y de la componente de movimiento normal a los Andes, incluyendo su tasa de contracción, deben ser todavía mejor definidos. Asimismo, la obtención de nuevos datos geodésicos GPS en los Andes permitirá constreñir la profundidad de bloqueo y grado de partición del desplazamiento a lo largo de toda la falla de Boconó y Andes venezolanos, puesto que dichos datos en la región noreste de los mismos son escasos. Esperamos que la repetición futura de una serie de observaciones GPS realizadas durante los años 1999 y 2000 en ~30 sitios adicionales localizados en las regiones centro-norte y nor-occidental de Venezuela, incluyendo los Andes, ayudará a resolver muchas de estas incógnitas y contribuirá a una mejor caracterización del riesgo sísmico que afecta las diferentes regiones venezolanas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Decanato de Investigación y Desarrollo de la Universidad Simón Bolívar por su apoyo económico; a Napoleón Hernández del IGVSB por su apoyo logístico durante las mediciones GPS, a los estudiantes de la USB y LUZ que operaron los aparatos GPS durante las diferentes campañas de observación satelital, y a Frank Audemard por la revisión crítica del manuscrito original.

REFERENCIAS

- Audemard FA (1997) Holocene and historical earthquakes on the Boconó fault system, southern Venezuelan Andes: trench confirmation. *J. Geodyn.* 24: 155-167.
- Audemard FA (1999) Morpho-structural expression of active thrust fault systems in humid tropical foothills of Colombia and Venezuela. *Zeitsch. Geomorphol.* 118: 1-18.
- Audemard FA (2003) Geomorphic and geologic evidence of ongoing uplift and deformation in the Mérida Andes, Venezuela. *Quat. Int.* 101/102: 43-65.
- Audemard FA (2005) Paleoseismology in Venezuela: Objectives, methods, applications, limitations and perspectives. *Tectonophysics* 408: 29-61.
- Audemard FA, Machette M, Cox J, Dart R, Haller K (2000) Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions. *US Geol. Survey Open-File Report 00-0018. Includes map at scale 1:2,000,000 and 78-page report.*
- Audemard FA, Romero G, Rendón H, Cano V (2005) Quaternary fault kinematics and stress tensors along the southern Caribbean from microtectonic data and focal mechanism solutions. *Earth Sci. Rev.* 69: 181-233.
- Audemard FA, Ollaves R, Bechtold M, Díaz G, Beck C, Carrillo E, Pantosti D, Diederix H (2008) Trench investigation on the main strand of the Boconó fault in its central section, at Mesa del Caballo, Mérida Andes, Venezuela. *Tectonophysics* 459: 38-53.
- Audemard FE (1991) *Tectonics of Western Venezuela*. Tesis. Rice University. Texas, EEUU. 245 pp.
- Audemard FE, Audemard FA (2002) Structure of the Mérida Andes, Venezuela: Relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction, *Tectonophysics* 345: 299-327.
- Bellizzia A, Pimentel N, Bajo R (1976) *Mapa Geológico Estructural de Venezuela*. Escala: 1:500.000. Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Caracas, Venezuela.
- Beltrán C (1993) *Mapa Neotectónico de Venezuela*. escala: 1:2.000.000. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). Caracas, Venezuela.
- Blewitt G, Heflin MB, Webb FH, Lindqwister UJ, Malla RP (1992) international terrestrial reference frame using GPS. *Geophys. Res. Lett.* 19: 853-856.
- Choy JE, Palme C, Guada C, Morandi M, Klarica S (2009) The 1812 earthquake in Venezuela. Submitted to *Bull. Seis. Soc. Am.*
- Cluff L, Hansen W (1969) Seismicity and Seismic Geology of Northwestern Venezuela. Woodward-Clyde & Associates Technical Report for Shell de Venezuela, Vol. I and II.
- De Toni B, Kellogg J (1993) Seismic evidence for blind thrusting of the northwestern flank of the Venezuelan Andes. *Tectonics* 12: 1393-1409.
- Deng J, Sykes LR (1995) Determination of Euler pole for the contemporary relative motion of Caribbean and North American plates using slip vectors of interpolate earthquakes. *Tectonics* 14: 39-53.
- Dixon TH, Farina f, DeMets C, Jansma P, Mann O, Calais E (1998) Relative motion between the Caribbean and North American plates and related boundary zone of deformation from a decade of GPS observations. *J. Geophys. Res.* 103: 15157-15182.
- Dragert H, Wang K, James TS (2001) A silent event on the deeper Cascadia subduction interface. *Science* 292: 1525-1528.
- Ekström G, England PC (1989) Seismic strain rates in regions of distributed continental deformation. *J. Geophys. Res.* 94: 10231-10257.
- Fiedler G (1961) Areas afectadas por terremotos en Venezuela. *Bol. Soc. Geol. Ven.* 4: 1791-1810.
- Grases J (1980) *Investigación sobre Sismos Destruyentes que Han Afectado el Centro y Occidente de Venezuela*. Reporte Técnico. Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo (INTEVEP). Caracas, Venezuela, 303 pp.
- Hugentobler U, Dach R, Fridez P (2005) *Bernese GPS Software*. Version 5.0. Astronomical Institute. University of Bern, Suiza. 388 pp.
- Kellogg JN, Bonini WE (1982) Subduction of the Caribbean plate and basement uplifts in the overriding South American plate. *Tectonics* 1: 251-276.
- Kellogg JN, Vega V (1995) Tectonic development of Panamá, Costa Rica and the Colombian Andes: Constrains from Global Positioning System geodetic studies and gravity. En Mann P (Ed.) *Geologic y Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*. *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.* 295: 79-90.
- Malavé G, Suárez G (1995) Intermediate-depth seismicity in northern Colombia and western Venezuela and its relationship to Caribbean plate subduction. *Tectonics* 14: 617-628.
- Molnar P, Sykes LR (1969) Tectonics of Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity. *Geol. Soc. Am. Bull.* 80: 1639-1684.
- Okada Y (1985) Surface Deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.* 75: 1135-1154.
- Palme C, Altez R (2002) Los terremotos de 1673 y 1674 en los Andes venezolanos. *Interciencia* 27: 220-226.
- Palme C, Morandi M, Choy J (2005): Re-evaluación de las intensidades de los grandes sismos históricos de la región de la cordillera de Mérida utilizando el método de Bakun y Wentworth. *Rev. Geogr. Ven.* (Número Especial). pp. 233-253.
- Pegler G, Das S (1996) Analysis of the relationship between seismic moment and fault length for large crustal strike-slip earthquakes between 1977-92. *Geophys. Res. Lett.* 23: 905-908.
- Pennington WD (1981) Subduction of the eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America. *J. Geophys. Res.* 86: 10753-10770.
- Pérez OJ, Mendoza JS (1998) Sismicidad y tectónica en Venezuela y áreas vecinas. *Física de la Tierra* 10: 78-110.

- Pérez OJ, Jaimes M, Garciacaro E (1997) Microseismicity evidence for subduction of the Caribbean plate beneath the South-American plate in northwestern Venezuela. *J. Geophys. Res.* 102: 17875-17881.
- Pérez OJ, Bilham R, Bendick R, Hernández J, Hoyer RM, Velandia J, Moncayo C, Kosuch M (2001) Velocidad relativa entre las placas del Caribe y Sudamérica a partir de observaciones dentro del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en el norte de Venezuela. *Interciencia* 26: 69-74.
- Pérez OJ, Hoyer M, Hernández J, Rodríguez C, Márquez V, Sué N, Velandia J, Deiros D (2005) Alturas del Pico Bolívar y otras cimas andinas venezolanas a partir de observaciones GPS. *Interciencia* 30: 213-216.
- Rod E (1956) Strike-slip faults of northern Venezuela. *Am. Ass. Pet. Geol. Bull.* 40: 457-476.
- Schubert C (1969) Geologic structure of a part of the Barinas mountain front, Venezuelan Andes. *Geol. Soc. Am. Bull.* 80: 443-548.
- Schubert C, Sifontes RS (1970) Boconó fault, western Venezuela: Evidence of post glacial movement. *Science* 170: 66-69.
- Soulas JP (1985) Neotectónica del flanco occidental de los Andes de Venezuela entre 70°30' y 71°00'W (Fallas de Boconó, Valera, Piñango y del Piedemonte). *VI Congreso Geológico Venezolano*. Caracas, Venezuela. pp. 2690-2711.
- Stein RS, Ekström G (1992) Seismicity and geometry of a 110-km-long blind thrust fault, 2, Synthesis of the 1982-1985 earthquake sequence. *J. Geophys. Res.* 97: 4865-4884.
- Stein R, King G (1984) Seismic potencial revealed by surface folding: 1993 Coalinga, California earthquake. *Science* 224: 869-872.
- Taboada A, Rivera LA, Fuenzalida A, Cisternas A, Philip H, Bijwaard H, Olaya J, Rivera C (2000) Geodynamic of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics* 19: 787-813.
- Trenkamp R, Kellogg J, Freymueller J, Mora H (2002) Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *J. South. Am. Earth Sci.* 15: 157-171.
- Van der Hilst R, Mann P (1994) Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. *Geology* 22: 451-454.
- Weber J, Dixon T, DeMets C, Ambeh W, Jansma PE, Mattioli G, Saleh J, Sella G, Bilham R, Pérez OJ (2001) GPS estimate of relative motion between the Caribbean and South-American plates, and geological implications for Trinidad and Venezuela. *Geology* 29: 75-78.

GPS DERIVED VELOCITY FIELD IN WESTERN VENEZUELA: DEXTRAL SHEAR COMPONENT ASSOCIATED TO THE BOCONÓ FAULT AND CONVERGENT COMPONENT NORMAL TO THE ANDES

Omar J. Pérez, Roger Bilham, Michell Sequera, Luiselvic Molina, Patricia Gavotti, Henry Codallo, Carlos Moncayo, Carlos Rodríguez, Rodolfo Velandia, Mercedes Guzmán and Peter Molnar

SUMMARY

The deformation zone between the Caribbean and South-American plates broadens from less than 100km in northeastern Venezuela to more than 400 km in the west, bounded to the south by the northeast-striking Boconó fault system and to the north by an offshore trench that marks the southeast descent of the Caribbean plate beneath northern Colombia and northwestern Venezuela. New Global Positioning System (GPS) measurements within this region reveal that the 20 ±2mm/year of eastward displacement of the Caribbean plate relative to South-America in northeastern and north-central Venezuela is parti-

tioned into a dextral shear velocity of 12 ±2mm/year along a locking line 14 ±4km beneath the surface expression of the Boconó fault, with convergence normal to its northeast strike at 12 to 16mm/year. Of this convergence, ~1/3 concentrates in the Andean regions close to the Boconó fault and manifests itself geologically as a slip on a narrow belt of thrust faults nearly parallel to it, running ~25km away along both sides of the Boconó fault main trace. The convergent velocity field is not well constrained by the GPS data, but it is inferred that as much as 4mm/year occurs offshore northern Colombia.

CAMPO DE VELOCIDADES GPS NO OESTE DA VENEZUELA: COMPONENTE LATERAL DIREITA ASSOCIADA À FALHA DE BOCONÓ E COMPONENTE CONVERGENTE PERPENDICULAR AOS ANDES

Omar J. Pérez, Roger Bilham, Michell Sequera, Luiselvic Molina, Patricia Gavotti, Henry Codallo, Carlos Moncayo, Carlos Rodríguez, Rodolfo Velandia, Mercedes Guzmán e Peter Molnar

RESUMO

A zona de deformação entre as placas do Caribe e América do Sul é relativamente estreita (~100km) no nordeste da Venezuela, ao longo do sistema de falhas de San Sebastián-El Pilar, rumo leste-oeste, com o Caribe deslocando-se para o leste em relação a América do Sul a 20 ±2mm/ano. No oeste da Venezuela e norte da Colômbia essa área se amplia até mais de 400km de largura, delimitada ao sudeste pelo sistema de falhas de Boconó, ao longo dos Andes no centro-oeste da Venezuela; e em sua parte noroeste por uma fossa oceânica mar adentro do norte da Colômbia, que marca a subdução da placa do Caribe por baixo da região mais noroeste da América do Sul. Novas medições com o Sistema de Posicionamiento Global (GPS) revelam que os 20±2 mm/ano de deslocamento lateral direito do Caribe em relação a América do

Sul se dividem em dois componentes: um com 12 ±2mm/ano de movimento lateral direito puro ao longo da falha de Boconó e mergulho vertical, deslizando abaixo de uma profundidade de bloqueio de 14 ±4km; e outro de 12-16mm/ano de convergência perpendicular aos Andes. Desta convergência, ~1/3 se concentra perto da falha de Boconó e resulta em falhamentos inversos de orientação paralela a ela, ao longo de ambos pé de montes andinos e que vão na direção da cordilheira, tal como tem sido deduzido de seções e volumens sísmicos exploratórios com fins petrolíferos, e do estudo dos mecanismos focais de terremotos associados a essas falhas. Embora o campo convergente de velocidades não está bem sustentado por dados GPS, estes sugerem que ~4mm/ano de convergência ocorrem mar adentro ao norte de Colômbia.