

# EL ENJAMBRE SÍSMICO DE MACAS (CORDILLERA DE CUTUCÚ)

*Denis LEGRAND* <sup>(1\*)</sup>, *Patrice BABY* <sup>(2\*\*)</sup>, *Francis BONDOUX* <sup>(3)</sup>,  
*Catherine DORBATH* <sup>(3)</sup>, *Séverine BÈS DE BERC* <sup>(1\*\*\*)</sup>, *Marco RIVADENEIRA* <sup>(4)</sup>

## Resumen

La sismicidad de la región de Macas es comparada a la sismicidad global del Ecuador. Un experimento con diez estaciones sismológicas de corto período fue realizado entre 1999 y 2000, cerca de la ciudad de Macas, en la parte sur del piedemonte subandino del Ecuador (cordillera de Cutucú). Las ubicaciones de los terremotos registrados fueron comparadas y correlacionadas con las estructuras geológicas. Algunos eventos están alineados en una dirección NNE-SSW que corresponde a la orientación de los planos nodales del mecanismo focal inverso del terremoto de 1995 ( $M_w=7,0$ ), pero muchos eventos más pequeños están alineados en dirección NNW-SSE. Atribuímos estas dos orientaciones del enjambre sísmico de Macas a los corrimientos subandinos de basamento que provienen de la inversión tectónica de un rift abortado del Triásico-Jurásico, orientado NNE-SSW, que fue levantado y parcialmente expuesto en la cordillera de Cutucú. El presente fraccionamiento de esta parte de la deformación subandina está controlado por fallas normales pre-existentes de orientación NNE-SSW y de edad triásico-jurásico, que han sido significativamente comprimidas en transpresión y reactivadas en fallas inversas. La mayor parte de las fallas del rift estaban orientadas NNE-SSW, y corresponden ahora a algunos corrimientos del Subandino, como lo confirma el mecanismo focal del terremoto de 1995, localizado en el

---

<sup>(1)</sup> IFEA : Institut Français d'Études Andines, Whymper 442 y Coruña, Quito, Ecuador (legrandenis@yahoo.com)

[\* Dirección actual: Departamento de Geofísica, Blanco Encalada 2085, Santiago, Chile].

[\*\* Dirección actual: BRGM - SGR/GUA, Morne Houëlmon, route de l'Observatoire, 97 113 Gourbeyre, Guadeloupe, France (S.BesdeBerc@brgm.fr)].

<sup>(3)</sup> Convenio PETROPRODUCCIÓN-IRD, P. O. Box, 17 12 857, Quito, Ecuador.

[\*\* Dirección actual: IRD Perú, Casilla 18-1209, Lima 18 – Perú (Patrice.Baby@ird.fr)].

<sup>(3)</sup> LMTG, IRD/CNRS/UPS, 38 rue des 36 ponts, 31400 Toulouse, France

<sup>(4)</sup> PETROPRODUCCIÓN, Casilla Postal 17-10-7019, Quito-Ecuador (mrivadeneira@petroecuador.com.ec)

borde este (corrimiento frontal de Morona). En la cordillera de Cutucú, la orientación del enjambre actual de réplicas puede ser interpretada como el resultado de la acomodación del desplazamiento del corrimiento frontal de Morona NNE-SSW, a lo largo de fallas preexistentes NNW-SSE que se encuentran dentro del sistema de rift invertido.

**Palabras claves:** Ecuador, tectónica de inversión, enjambre sísmico, zona subandina.

## INTRODUCCIÓN

Un terremoto de magnitud  $M_w=7,0$  ocurrió el 3 de octubre de 1995, a una profundidad de 23,6 km (Engdahl *et al.*, 1998), cerca de la ciudad de Macas en el piedemonte subandino meridional del Ecuador (cordillera de Cutucú). Las réplicas más fuertes, determinadas por Harvard, están básicamente alineadas en una dirección NNE-SSW, de acuerdo con el mecanismo focal del terremoto principal. Pero, muchos eventos más pequeños, localizados por la red sísmica ecuatoriana, estaban alineados en una dirección sorprendente NNW-SSE (Yepes *et al.*, 1996). Como la distribución de las estaciones de la red ecuatoriana está principalmente orientada NW respecto al enjambre de Macas, la localización de estas réplicas hubieran podido ser afectadas por la distribución de estas estaciones sísmicas. Para confirmar esta orientación, una red portátil de diez estaciones fue instalada alrededor del enjambre de Macas, entre noviembre 1999 y junio 2000.

Muchos estudios geológicos fueron realizados en el piedemonte subandino y en las tierras bajas amazónicas del Ecuador, conocidas como la cuenca Oriente (Tschopp, 1953; Canfield *et al.*, 1982; Dashwood & Abbotts, 1990; Baby *et al.*, 1999; Christophoul *et al.*, 2002a; 2002b; capítulo 1 de este libro), pero existen pocos análisis estructurales detallados sobre la cordillera subandina de Cutucú, cuya fuerte actividad tectónica está evidenciada por el enjambre sísmico de Macas y la deformación de los marcadores morfológicos recientes (Bès de Berc *et al.*, 2003).

El propósito de este estudio es presentar y utilizar resultados geológicos y sísmicos para caracterizar la deformación activa de la cordillera de Cutucú y, para explicar el origen del enjambre sísmico de Macas.

## I. CUADRO GEODINÁMICO

El Ecuador está ubicado en la frontera entre los Andes Centrales orientados SSE-NNW y los Andes Septentrionales orientados SSW-NNE (fig. 1). Esta posición particular en forma de codo hace que esta región está sometida a cambios de esfuerzos importantes y, por lo tanto, puede ser responsable de la fuerte actividad sísmica y volcánica de Ecuador respecto a Perú o Colombia. Por ejemplo, el Ecuador tiene más de 18 volcanes activos, mientras que en el Norte de Perú (Norte de 14°S) el volcanismo activo es inexistente y Colombia tiene 14 volcanes activos (Simkin & Siebert, 1994). Volcanes muy altos están ubicados en Ecuador (*e.g.* Mt Chimborazo, 6 310 m; Mt Cotopaxi, 5 897 m; Mt Cayambe, 5 790 m) y grandes terremotos (*e.g.* del 31/01/1906  $M_w=8,8$ , del 12/12/1979  $M_w=8,1$ , del 14/05/1942  $M_w=7,8$  y del 19/01/1958  $M_w=7,7$ ) ocurrieron en la costa del Pacífico. Específicamente, en los Andes ecuatorianos,

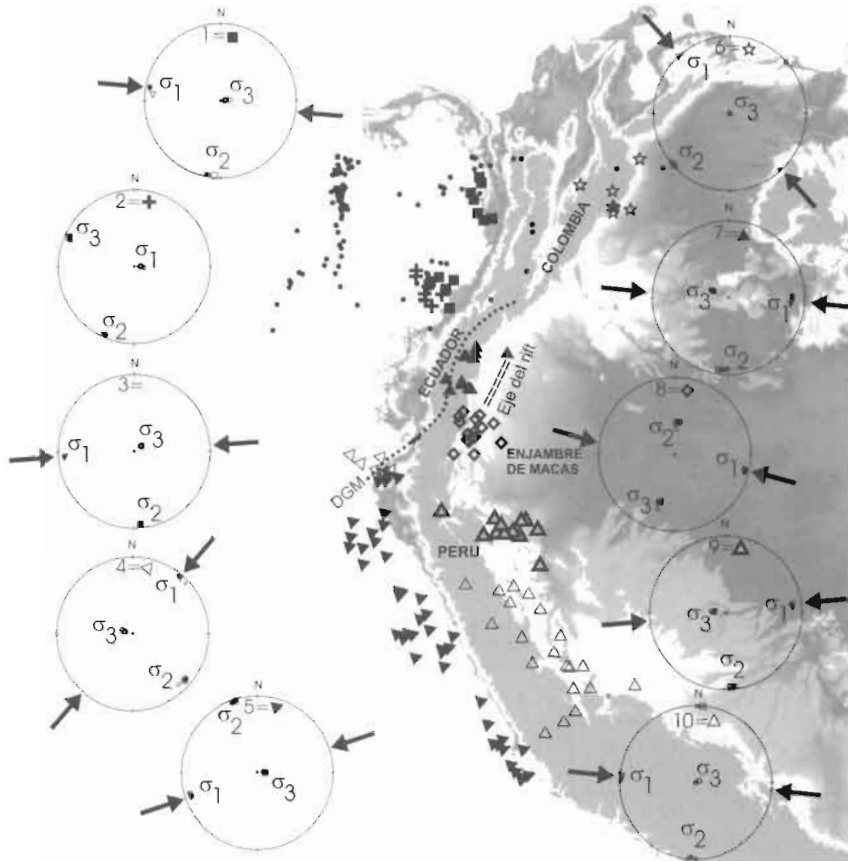


Fig. 1 – Mapa de elevación de la curvatura norte de los Andes (Gtopo 30 DEM), y terremotos superficiales (profundidad < 50 km) ( $M_w > 5,0$ ) del catálogo de Harvard (1973-2000), que tienen mecanismo focal para 10 regiones y los tensores de esfuerzos correspondientes (ver tabla 1). Los círculos corresponden a los terremotos que no fueron usados para la determinación de los tensores de esfuerzos. Para el enjambre de Macas, tres eventos adicionales fueron incluidos (10/05/1963, 03/11/1963, 21/06/1967, ver figura 2). DGM = Dolores Guayaquil Megashear.

ocurrieron grandes terremotos superficiales en la zona subandina ( $M_w = 7,1$  1987 Baeza;  $M_w = 7,0$  1995 Macas), caracterizada también por la presencia de volcanes activos como el Sumaco y el Reventador (reactivado recientemente, noviembre 2002).

La placa de Nazca subduce por debajo de la placa suramericana, a una velocidad de  $58 \pm 2$  mm/año en las latitudes de Ecuador (Trenkamp *et al.*, 2002). Medidas GPS indican un movimiento en dirección este de la placa de Nazca respecto a la placa suramericana, considerada como fija, que es oblicua a la fosa de Ecuador (Kellogg & Vega, 1995; Trenkamp *et al.*, 2002) y que genera una compresión principalmente E-W (Ego *et al.*, 1996; Gutscher *et al.*, 1999a; 1999b). La deformación en los altos Andes

ecuatorianos fue básicamente relacionada con la zona dextral de la megafalla Dolores Guayaquil (Dolores Guayaquil Megashear : DGM) (Winter *et al.*, 1993; Deniaud *et al.*, 1999; Trenkamp *et al.*, 2002), que marca la zona de sutura entre el bloque costero ecuatoriano y el margen continental suramericano (Benitez, 1995; Jaillard *et al.*, 1995). Al este de la DGM, los Andes ecuatorianos consisten en una faja plegada y corrida hacia el este (Cordillera Oriental y piedemonte subandino, donde el patrón estructural está dominado por deformación compresiva y transpresiva (Aspden & Litherland, 1992; Baby *et al.*, 1999; Pratt *et al.*, 2002).

Para tener una idea de los tensores de esfuerzos, les hemos calculado a partir de los mecanismos focales de Harvard para eventos superficiales (< 50 km) de magnitud  $M_w > 5,0$ . La región entera fue dividida en diez regiones, en las cuales se supone que existe un solo tensor de esfuerzos (fig. 1). El comportamiento general de la tectónica puede ser deducido a partir del factor de forma R (Rivera & Cisternas, 1990) del tensor de esfuerzos ( $R < 0$  para una compresión pura,  $R > 1$  para una extensión pura y  $0 < R < 1$  para un estado intermedio, tabla 1). Algunos eventos no han sido tomados en cuenta, porque sus mecanismos focales no eran compatibles con el tensor de esfuerzos de la región (principalmente la costa de Colombia, círculos de la figura 1). Todos los tensores de esfuerzos son compresionales (con un  $s_3$  vertical, figura 1, *i.e.* con  $R < 0$ , tabla 1) excepto

Región	$\sigma_1$		$\sigma_2$		$\sigma_3$		R Score
	strike	dip	strike	dip	strike	dip	
1	280,32 +/- 0,63 5,88 +/- 0,63		190,08 +/- 0,64 2,29 +/- 0,14		77,84 +/- 1,44 83,66 +/- 0,60		-1,51 +/- 0,09 0,996 +/- 0,00005
2	91,07 +/- 1,69 82,64 +/- 0,41		204,19 +/- 0,43 2,87 +/- 0,23		294,53 +/- 0,43 6,74 +/- 0,42		2,16 +/- 0,05 0,995 +/- 0,0002
3	265,17 +/- 0,20 8,54 +/- 0,29		174,42 +/- 0,19 5,03 +/- 0,21		54,24 +/- 1,12 80,06 +/- 0,31		-0,76 +/- 0,02 0,998 +/- 0,00002
4	40,50 +/- 0,82 4,34 +/- 0,20		131,20 +/- 0,85 8,96 +/- 0,41		284,89 +/- 1,11 80,02 +/- 0,43		-2,45 +/- 0,37 0,984 +/- 0,0004
5	251,08 +/- 0,52 7,67 +/- 0,39		341,43 +/- 0,47 2,49 +/- 0,42		88,82 +/- 2,29 81,87 +/- 0,44		-0,31 +/- 0,05 0,709 +/- 0,0003
6	318,25 +/- 0,34 0,34 +/- 0,06		228,25 +/- 0,34 0,25 +/- 0,05		281,65 +/- 2,36 89,57 +/- 0,08		-0,33 +/- 0,02 0,973 +/- 0,0007
7	92,93 +/- 0,99 17,76 +/- 0,36		184,98 +/- 0,94 6,37 +/- 0,31		293,99 +/- 0,58 71,04 +/- 0,37		-0,14 +/- 0,02 0,971 +/- 0,0004
8	104,02 +/- 0,044 5,20 +/- 0,49		6,24 +/- 1,02 55,61 +/- 0,90		197,50 +/- 0,51 33,84 +/- 0,94		0,17 +/- 0,14 0,944 +/- 0,00005
9	83,62 +/- 0,56 13,09 +/- 0,37		174,38 +/- 0,55 3,25 +/- 0,16		278,07 +/- 0,85 76,50 +/- 0,37		-1,84 +/- 0,08 0,991 +/- 0,0002
10	273,59 +/- 0,68 1,33 +/- 0,59		183,55 +/- 0,68 0,68 +/- 0,34		113,03 +/- 25,02 88,49 +/- 0,68		-1,39 +/- 0,06 0,845 +/- 0,0001

Tabla 1 – Características de los tensores de esfuerzos promedio de las 10 mejores soluciones. R es el factor de forma (ver texto).

para dos regiones: la parte sur de la costa de Colombia (región 2 con cruces de la figura 1), que es una pequeña región extensional ( $R > 1$ , tabla 1). La segunda región es el enjambre de Macas (región 8, con diamantes en la figura 1), que tiene un tensor de esfuerzos de rumbo intermedio ( $0 < R < 1$ , tabla 1). Esta región de Macas es una zona de transición entre dos regiones en compresión (Norte del Perú y Norte del Ecuador, figura 1, tabla 1), caracterizando una deformación compleja, en una región en forma de codo entre el cambio de orientación de las cordilleras del Perú y Colombia, mencionado antes. Estos resultados son similares a los encontrados por Ego *et al.* (1996), excepto para la región 6 de Bogotá (estrellas en figura 1) y para la región 8 de Macas (diamantes en la figura 1). Esta diferencia puede ser atribuida a que estos autores no pudieron tomar en cuenta el sismo de Macas de 1995, de magnitud  $M_w = 7,0$ , y sus réplicas, ni tampoco el evento de 1995 de  $M_w = 6,5$  y sus réplicas en la región de Bogotá (estos eventos ocurrieron después de su análisis). Esta situación particular de la región de Macas será discutida en este artículo dentro de su contexto geológico.

## 2. CUADROS SISMOLÓGICOS Y GEOLÓGICOS

Un terremoto superficial de magnitud  $M_w = 7,0$  a 23,6 km de profundidad ocurrió el 03/10/1995 a 2,768°S, 77,818°W (Engdahl *et al.*, 1998; evento 7 en la figura 2), cerca a la ciudad de Macas, en la cordillera subandina de Cutucú, que constituye la parte sur del piedemonte oriental de los Andes ecuatorianos. La deformación subandina en Ecuador es compresiva o transpresiva y es controlada por corrimientos de basamento de alto ángulo. El piedemonte subandino está constituido por la culminación relativamente simple del antiforme Napo (Levantamiento Napo) en el norte, y la estructura compleja de la cordillera de Cutucú en el sur, ambas separadas por la Depresión Pastaza, donde se desarrolló un abanico aluvial tropical y húmedo a gran escala (Bès de Berc *et al.*, capítulo 1 de este libro). La cordillera de Cutucú está deformada significativamente por un complejo sistema de fallas inversas (figura 2) relacionado a la inversión de tipo transpresivo de un rift abortado triásico y jurásico orientado NNE-SSW (Baby *et al.*, 1999; Christophoul, 1999; Díaz *et al.*, capítulo 1 de este libro). Este sistema de rift invertido desaparece en dirección noreste bajo los depósitos terciarios de la adyacente cuenca Oriente de ante-país, como muestran los perfiles sísmicos de los campos de Petroproducción (Rivadeneira & Baby, capítulo 1 de este libro). El núcleo de la cordillera de Cutucú está constituido por la Formación Santiago (figura 3), que corresponde al relleno sedimentario levantado a superficie del rift triásico-jurásico (Christophoul, 1999). Los marcadores geomorfológicos cuaternarios, como las terrazas aluviales del valle del río Upano en la parte trasera de la cordillera de Cutucú, están deformados por fallas de corrimiento (Bès de Berc, 2003). Estas deformaciones recientes están de acuerdo con la sismicidad importante registrada en esta región (figura 2).

Las réplicas más importantes del evento de 1995, registradas por el USGS, están alineadas en una dirección NNE-SSW (figura 2), de acuerdo con el mecanismo focal del choque principal. Sin embargo, muchas pequeñas réplicas (de magnitud local  $M_L < 4,0$ ) fueron también registradas en una dirección perpendicular NNW-SSE, pocos días después del choque principal (Yepes *et al.*, 1996; Alvarado *et al.*, 1996) y hasta más de 5 años después (figura 4). El significado de estas dos orientaciones será discutido posteriormente.

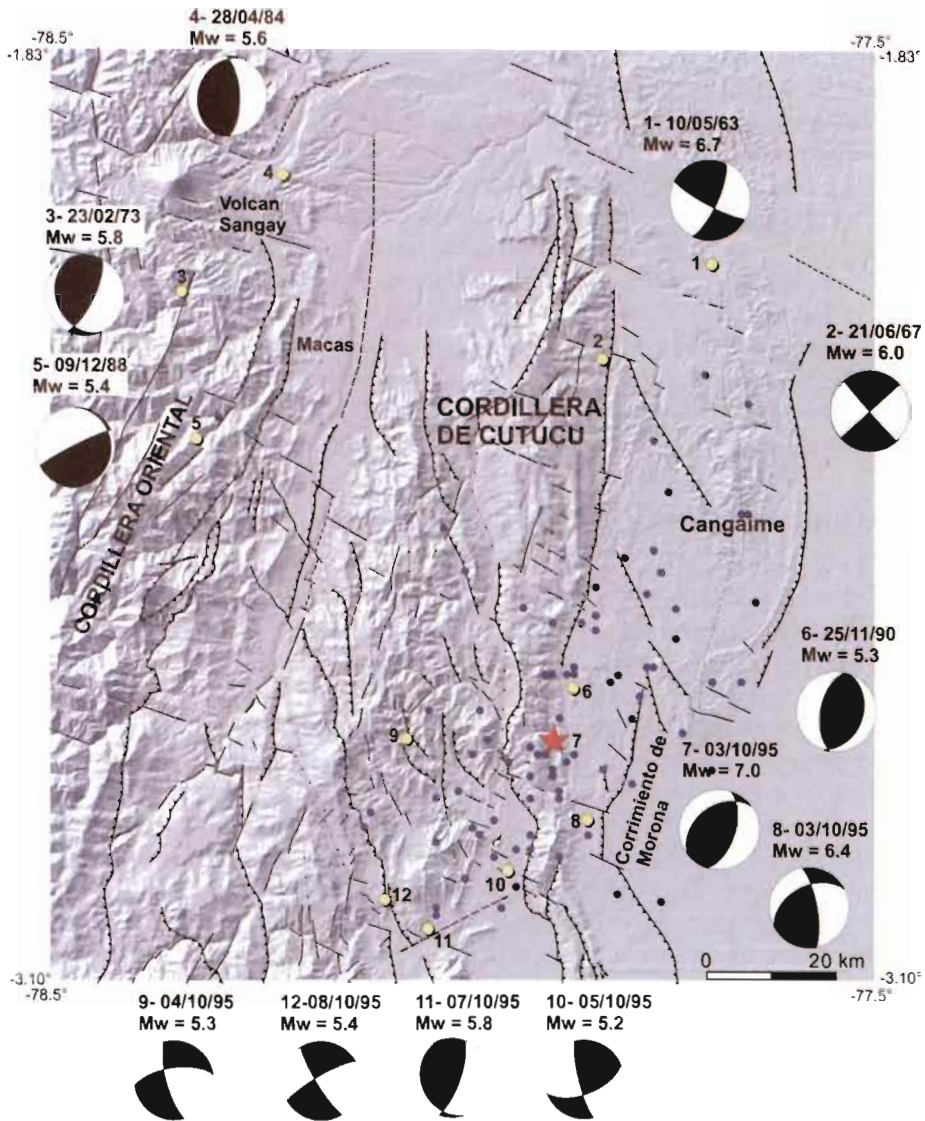


Fig. 2 – Mecanismos focales de terremotos superficiales (profundidad <math>< 50\text{ km}</math>) de magnitud (et al. (1998) que es más precisa). Las réplicas están agrupadas según una dirección NNE-SSW, de acuerdo con el mecanismo focal del choque principal de 1995.



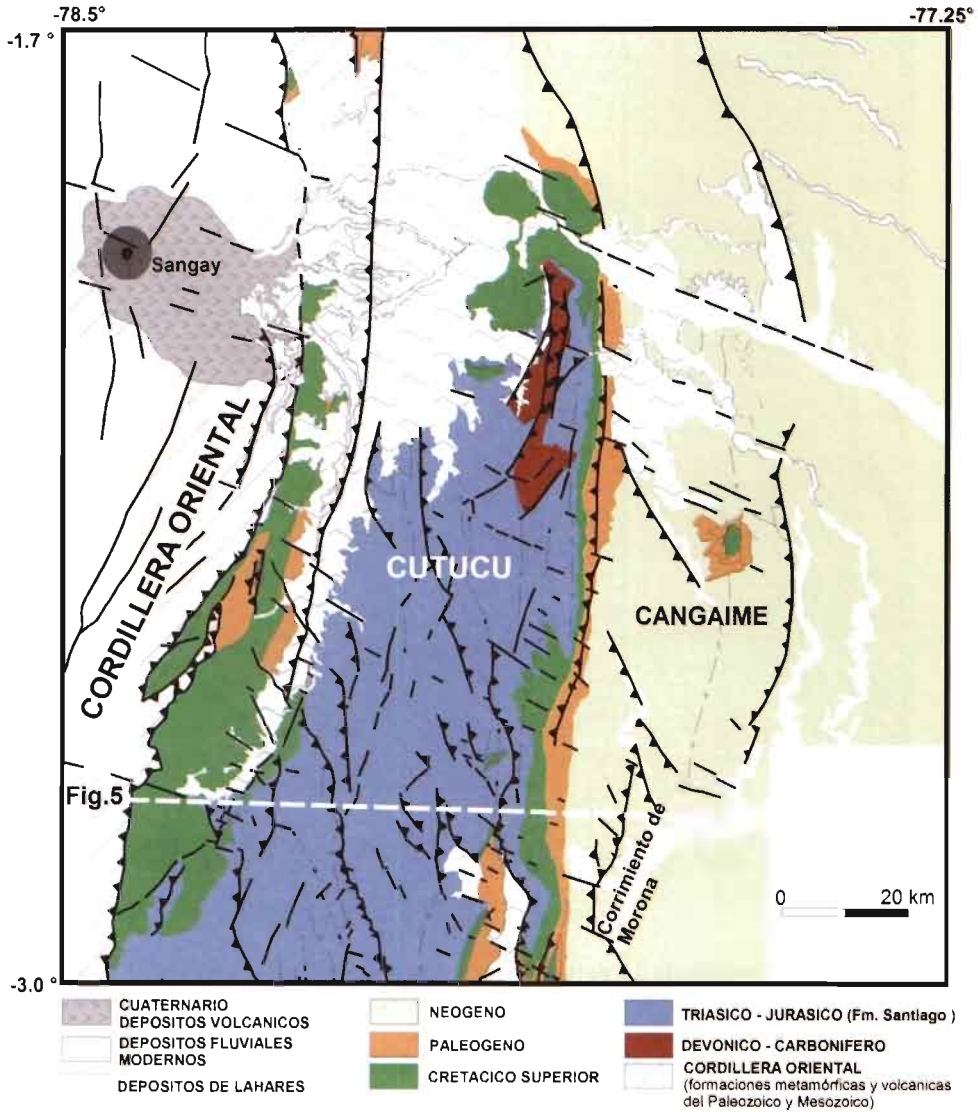


Fig. 3 – Mapa geológico de la región de Macas.

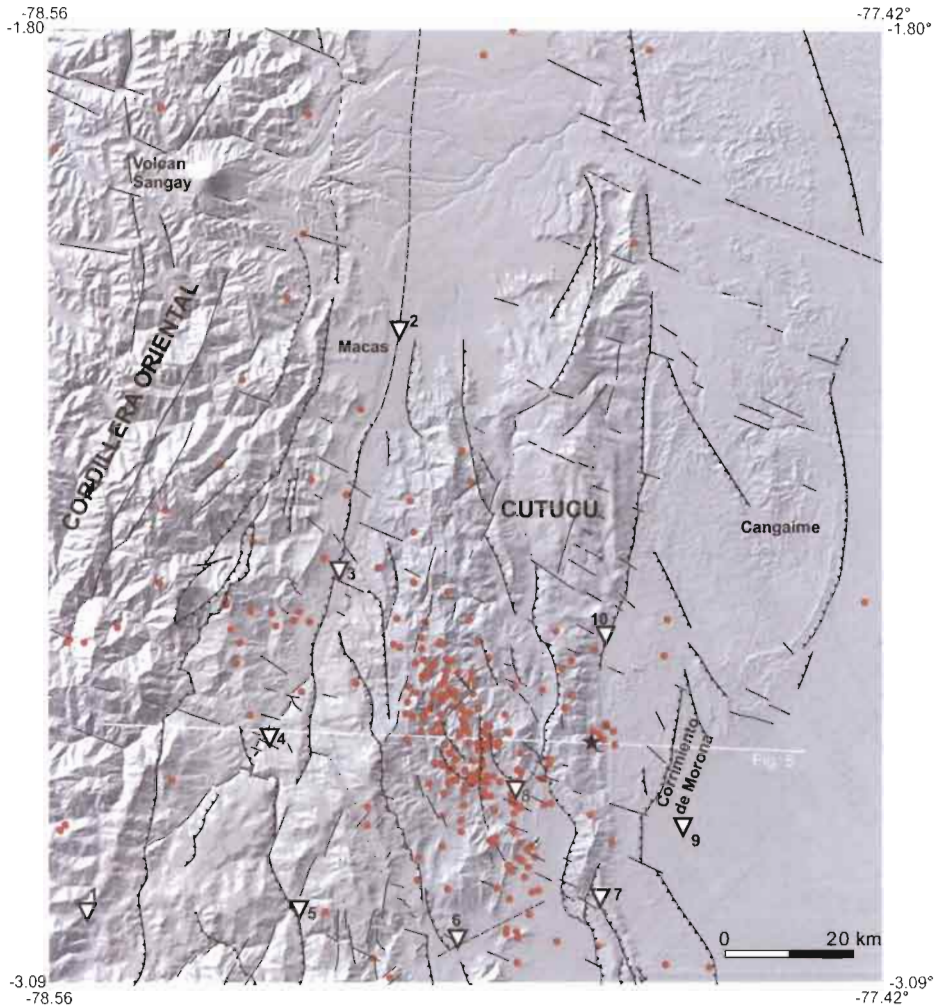


Fig. 4 – Sismicidad registrada durante el experimento de 1999-2000 reportada en el modelo numérico de relieve (software “Savane” © IRD/MS, Francia) y mapa estructural con la localización de las diez estaciones sísmicas (triángulos: 1: Cerro Bosco; 2: Mac2; 3: Mac3; 4: Mac4; 5: Mac5; 6: Mac6; 7: Mac7; 8: Yaupi; 9: Morónia; 10: Miasal).

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA SÍSMICA DE 1999-2000

Aprovechando la fuerte actividad sísmica cerca de Macas desde 1995, se realizaron en la cordillera de Cutucú un análisis estructural y un experimento sísmico para investigar el origen del enjambre sísmico y comprobar su orientación NNW-SSE. Diez estaciones sísmicas (8 L4-3D de tres componentes 1 Hz, y 2 Mark Product vertical 2 Hz de un componente) fueron instaladas alrededor del enjambre de Macas, entre noviembre 1999 y



junio 2000 (figura 4), para precisar las localizaciones de los hipocentros. Cada estación registraba el tiempo con un GPS propio. El intervalo de muestreo era de 50 Hz. Dos estaciones registraban de manera continua, con un sistema de adquisición "REFTEK" (MIASAL y YAUPI) por la dificultad de acceso en la selva amazónica. Las otras ocho estaciones eran de tipo "LEAS" con un sistema de disparo. Las estaciones MC6Z y MC7Z transmitían con telemetría al Cerro Bosco CBOS (figura 4).

#### 4. LOCALIZACIÓN DE LOS EVENTOS DE 1999-2000

En una primera etapa, los eventos fueron pre-localizados con el programa "hypoellipse" (Lahr, 1995). El modelo de propagación fue deducido de la información sísmica de la cuenca Oriente (cf. Rivadeneira & Baby, capítulo 1 de este libro) y comparado con un experimento microsísmico realizado más al sur (cuenca peruana de Ucayali) para obtener una tomografía estructural (Mallick & Drummond, 1999). En una segunda etapa, localizaciones relativas usando la técnica del Master Event (Spence, 1980; Besse, 1986) fueron realizadas (con la información *a priori* de los hipocentros dados por el programa hypoellipse). En una tercera etapa, se hizo una determinación conjunta de la estructura de velocidad y de localización de los eventos, usando la última versión de "simulps12" (Evans *et al.*, 1994) del método de Thurber (1983), y empleando como datos de ingreso los tiempos de viaje de los eventos localizados previamente con la técnica del "master event". Gran parte de los eventos están ubicados entre 0 y 25 km de profundidad. Otros eventos se encuentran a mayor profundidad, hasta 180 km, correspondiendo a la subducción de la placa de Nazca. Algunos eventos están alineados en la dirección NNE-SSW que corresponde a la orientación de los planes nodales del mecanismo focal inverso del sismo de magnitud  $M_w = 7,0$  de 1995 cerca de Macas, pero la mayor parte de los eventos están alineados en una dirección NNW-SSE en la cordillera de Cutucú (figura 4).

#### 5. INVERSIÓN TECTÓNICA Y DATOS SISMOLÓGICOS

Los hipocentros fueron reportados sobre un mapa geomorfológico y estructural de la cordillera de Cutucú (figura 4), obtenido a partir de la interpretación de imágenes satelitales, de estudios de campo y de la revisión de mapas geológicos de Petroproducción. Nuestro mapa estructural muestra dos sistemas principales de fallas inversas y pliegues de varios kilómetros. El primero tiene la orientación regional N-S a NNE-SSW e incluye los principales corrimientos que limitan la cordillera de Cutucú. El terremoto de 1995, sus réplicas y un pequeño enjambre registrado por nuestro experimento están ubicados en la parte frontal de la cordillera de Cutucú (figura 4). El terremoto de 1995, ubicado a 23,6 km de profundidad, ocurrió probablemente sobre el corrimiento de basamento de dirección NNE-SSW, buzante hacia el oeste (figura 2), que emerge a 15 km al este (corrimiento frontal de Morona). Hablaremos más adelante del origen de esta falla mayor. El segundo sistema de pliegues y fallas inversas tiene una orientación NNW-SSE, similar a la del enjambre actual de Macas confirmado por nuestro experimento.

El corte estructural de la figura 5 fue construido a partir de datos de superficie y de los hipocentros obtenidos en nuestro experimento, e inspirado en las secciones

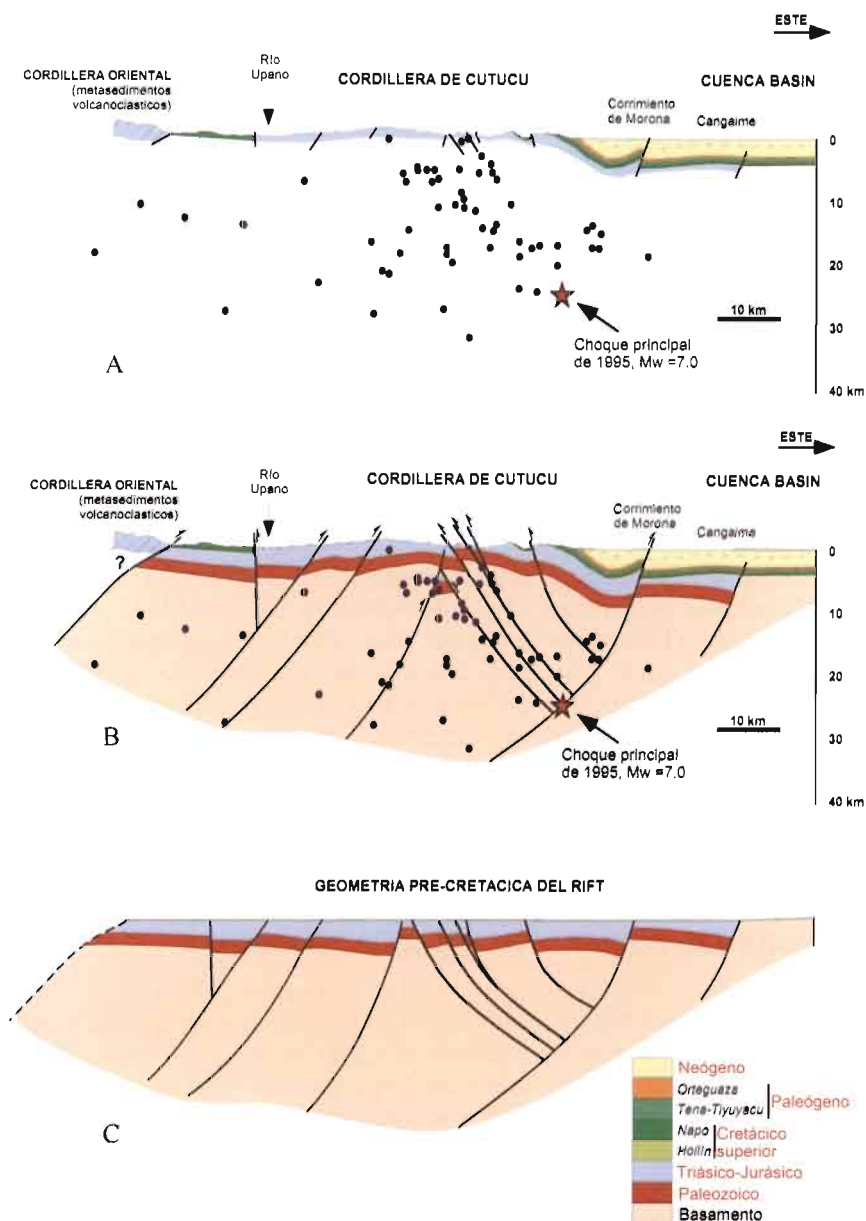


Fig. 5 – Corte estructural perpendicular a la cordillera de Cutucú (ver figuras 3 y 4): A. Datos superficiales y sismicidad gravada durante el experimento de 1999-2000; B. Interpretación de la geometría de las fallas definidas en base a la sismicidad, y perfiles de sísmica de reflexión en la extensión noreste del rift invertido triásico-jurásico (Díaz *et al.*, capítulo 2 de este libro); C. Reconstrucción palinspástica, mostrando la geometría del rift pre-cretácico (estado de pre-inversión).

sísmicas de la parte noreste del rift abortado triásico-jurásico, invertido por transpresión y emergiendo actualmente en la cordillera de Cutucú. Cuencas invertidas y sus estructuras asociadas han sido reconocidas en todos los continentes (Lowell, 1995), e inversión tectónica de rift es común en los Andes (Uliana *et al.*, 1995; Branquet *et al.*, 2002). Las localizaciones de terremotos (figura 5A) muestran corrimientos de basamento de alto ángulo de acuerdo con los datos regionales de sísmica de reflexión. En el este, limitan el corrimiento frontal de Morona, donde está ubicado el sismo de 1995 a 23,6 km de profundidad. Esta falla inversa puede interpretarse como la inversión de una falla mayor normal del borde oriental del rift triásico-jurásico (figura 5B). En el núcleo de la cordillera de Cutucú, la orientación NNW-SSE del enjambre sísmico resulta probablemente de la reactivación de fallas inversas profundas de buzamientos opuestos, orientadas NNW-SSE, y que interpretamos como fallas normales invertidas delimitando un horst de basamento (ver reconstrucción palinspástica de la sección transversal de la figura 5C). Esta interpretación y la orientación NNW-SSE de fallas normales preexistentes dentro del sistema de rift orientado NNE-SSW implican la existencia de una tectónica sinistral y transtensional durante los tiempos triásico y jurásico. En dicho modelo, el desplazamiento del corrimiento de Morona (terremoto de 1995) es acomodado por reajustamiento de fallas dentro del rift invertido, que induce la sismicidad orientada NNW-SSE en la cordillera de Cutucú.

## CONCLUSIONES

El riesgo sísmico en la región de Macas es alto como lo muestra el terremoto allí producido de  $M_w = 7,0$  de 1995. Los temblores son sentidos por muchas personas cada año en esta región (réplicas pos-1995). Esta sismicidad está relacionada a la inversión tectónica de un rift triásico-jurásico orientado NNE-SSW que penetra oblicuamente en el piedemonte subandino (ver figura 1) y emerge en la cordillera de Cutucú. La partición actual de esta parte de la deformación subandina es controlada por la presencia de dos orientaciones de fallas preexistentes del rift. Las fallas originales delimitando el rift estaban orientadas NNE-SSW, y están actualmente reactivadas e invertidas por compresión-transpresión, como lo confirma el mecanismo focal del terremoto de 1995 ubicado en la parte este del corrimiento frontal de Morona. En la cordillera de Cutucú, la orientación actual NNW-SSE del enjambre puede ser interpretada como el resultado de la reactivación de fallas inversas NNW-SSE de buzamiento opuesto, y heredadas del sistema de rift que acomoda el desplazamiento inicial del corrimiento frontal de Morona (terremoto de 1995).

### Agradecimientos

Agradecemos a: A. Cisternas, por facilitarnos su programa para calcular el tensor de esfuerzos, y a J. C. Ruegg por su programa del “Master Event”; IRD por ayudarnos con la red de sismógrafos portátiles; Petroproducción y el Ejército Ecuatoriano por su importante apoyo logístico. D. Legrand agradece al Ministerio de Relaciones Exteriores de Francia (Ministère des Affaires Étrangères) y al Instituto Francés de Estudios Andinos (IFEA), por auspiciarle una posición de 2 años en Ecuador como investigador. Estas investigaciones fueron apoyadas por el Proyecto IRD e INSU 99PNSE59.

## Referencias citadas

- AKI, K., 1965 – Maximum likelihood estimate of  $b$  in the formula  $\log N = a - bM$  and its confidence limits. *Bull. Earth. Res. Inst.*, 43: 237-239.
- ALVARADO A., SEGOVIA M., YEPES H., GUILLIER B., CHATELAIN J. L., EGRED J., VILLAGÓMEZ D., RUIZ M., SAMANIEGO P. & SANTACRUZ R., 1996 – The  $M_w=6.8$  Macas earthquake in the subandean zone of Ecuador, October 3, 1995. Third ISAG, St Malo (France), 17-19/09/1996: 129-132.
- ASPDEN J. & LITHERLAND M., 1992 – The geology and Mesozoic history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*, 205: 187-204.
- BABY P., RIVADENEIRA M., CHRISTOPHOUL F. & BARRAGAN R., 1999 – Style and timing of deformation in the Oriente Basin of Ecuador, 4<sup>th</sup> International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG '99), Univ. Göttingen (Germany), *Extended Abstracts Volume*: 68-72.
- BENITEZ S., 1995 – Évolution géodynamique de la province côtière sud-équatorienne au Crétacé supérieur Tertiaire. *Géologie Alpine*, 71: 5-163.
- BÈS DE BERG S., 2003 – Tectonique de chevauchement, surrection et incision fluviale (exemple de la zone subandine équatorienne, Haut-Bassin Amazonien). PhD thesis, Toulouse III, Paul Sabatier, 181 p.
- BÈS DE BERG, S., SOULA J.C., BABY P., SOURIS M., CHRISTOPHOUL F. & ROSERO J., in press – Geomorphic evidence of active deformation and uplift in a modern continental wedge-top – foredeep transition: example of the eastern Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*.
- BESSE, Ph., 1986 – Relocalisation relative d'événements sismiques appliquée à la région Sud du lac Ghoubbet situé dans la République de Djibouti. PhD, 49 p.
- BRANQUET Y., CHEILLETZ A., COBBOLD P.R., BABY P., LAUMONIER B. & GIULIANI G., 2002 – Andean deformation and rift inversion, eastern edge of Cordillera Oriental (Guateque-Medina area), Colombia. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 391-407.
- CANFIELD, R., BONILLA, G. & ROBBINS, R. K., 1982 – Sacha Oil Field of Ecuadorian Oriente. *AAPG Bull.* 61: 1076-1090.
- CHRISTOPHOUL F., 1999 – Discrimination des influences tectoniques et eustatiques dans les bassins liés à des zones de convergence : exemples du bassin subandin d'Équateur. PhD thesis, Université Toulouse III, Paul Sabatier, 184 p.
- CHRISTOPHOUL F., BABY P. & DAVILA C., 2002a – Stratigraphic responses to a major tectonic event in a foreland basin: the Ecuadorian Oriente Basin from Eocene to Oligocene times. *Tectonophysics*, Vol. 345 (1-4): 281-298.
- CHRISTOPHOUL F., BABY P., SOULA J.C., ROSERO M. & BURGOS J., 2002b – Les ensembles fluviaux néogènes du bassin subandin d'Équateur et implications dynamiques. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes/ Earth and Planetary Science*, 334: 1029-1037.
- DASHWOOD M.F. & ABBOTS J.L., 1990 – Aspects of the Petroleum geology of the Oriente Basin, Ecuador. In: Brooks J. Ed., *Classic Petroleum Provinces*, Geological Society Special Publication, n° 50: 89-117.
- DENIAUD Y., BABY P., BASILE C., ORDOÑEZ M., MONTENEGRO G. & MASCLE G., 1999 – Ouverture et évolution tectono-sédimentaire du Golfe de Guayaquil : bassin d'avant-arc néogène et quaternaire du Sud des Andes équatoriennes. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 328: 181-187.
- EGOF., SÉBRIER M., LAVENU A., YEPES H. & EGUES A., 1996 – Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, 259: 101-116.

- ENGDahl E., VAN DER HILST R. & BULAND R., 1998 – Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 88: 722-743.
- EVANS J.R., EBERHART-PHILLIPS D. & THURBER C.H., 1994 – User's manual for simulps12 for imaging Vp and Vp/Vs: a derivative of the "Thurber" tomographic inversion simul3 for local earthquakes and explosions, Open-file report 94-431.
- GUTSCHER MA., MALAVIEILLE J., LALLEMAND S. & COLLOT JY., 1999a – Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth Planet. Sc. Lett.*, 168: 255-270.
- GUTSCHER MA., MALAVIEILLE J., LALLEMAND S. & COLLOT JY., 1999b – Erratum to "Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision". *Earth Planet. Sci. Lett.*, 170: 155-156.
- GUTSCHER MA., OLIVET J. L. ASLANIAN D., EISSEN J. P. & MAURY R., 1999c – The 'lost Inca Plateau': cause of flat subduction beneath Peru? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 171: 335-341.
- JAILLARDE E., ORDOÑEZ M., BENITEZ S., BERRONES G., JIMENEZ N., MONTENEGRO G. & ZAMBRANO I., 1995 – Basin development in an accretionary, oceanic-floored forearc setting: southern coastal Ecuador during late Cretaceous to late Eocene times. In: A. J. Tankar, R. Suarez & H.J. Welsink Eds., *Petroleum Basin of South America*, Am. Ass. Petr. Geol. Mem., 62: 615-631.
- KELLOG J.N. & VEGA V., 1995 – Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: constraints from global positioning system geodetic studies and gravity. In: Mann, P. (Ed.). *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean plate Boundary in Southern Central America*. GSA Special Paper, 295: 75-90.
- LAHR J., 1995 – HYPOELLIPSE/Version 3.0: A computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquake. U. S. Geol. Surv., Open-file rep., 95: 90 p.
- LEE W., BENNETT R. & MEAGHER K., 1972 – A method of estimating magnitudes of local earthquakes from signal duration. Geol. Surv. Open-file Rep 28.
- LOWELL J., 1995 – Mechanics of basin inversion from worldwide examples. Buchanan, J. G. & Buchanan, P. G. eds, Basin Inversion, Geological Society Special Publication, n° 88: 39-57.
- MALLICK B. & DRUMMOND J., 1999 – The use of earthquake energy for structure tomography in the northern Ucayali basin. INGEPET 99, III International Seminar, Lima, CD-Room, 16 p.
- PRATT W., DUQUE P. & PONCE M., 2002 – Orthogonal deformation in the eastern Andes of Ecuador. 5th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG'02), Univ. Toulouse (France), *Extended Abstracts Volume*: 485-488.
- RIVADENEIRA V. M. & BABY P., 1999 – La Cuenca Oriente: estilo tectónico, etapas de deformación y características geológicas de los principales campos de Petroproducción. PETROECUADOR-IRD edition, Quito, Ecuador, 88 p.
- RIVERA L. & CISTERNAS A., 1990 – Stress tensor and fault plane solutions for a population of earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80: 600-614.
- SIMKINT. & SIEBERT L., 1994 – *Volcanoes of the world*. Geoscience Press, Tucson, Arizona.
- SPENCE W., 1980 – Relative epicenter determination using P-wave arrival-time differences. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 70: 171-183.
- THURBER C.H., 1983. Earthquake locations and three-dimensional crustal structure in the Coyote Lake area, Central California. *J. Geophys. Res.*, 88: 8226-8236.
- TREKAMP R., KELLOGG J. N., FREYMUELLER J. & MORA H. P., 2002 – Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Jour. South Am. Sc.*, 15: 157-171.
- TSCHOPP H. J., 1953 – Oil explorations in the Oriente of Ecuador. *A.A.P.G. Bulletin*, 37: 2303-2347.



- ULIANA A., ARTEAGA M., LEGARRETA L., CERDAN G. & PERONI G., 1995 – Inversion structures and hydrocarbon occurrence in Argentina. *In*: Buchanan J.G. & Buchanan P.G. (eds), *Basin Inversion*, Geological Society Special Publication, 88: 211-233.
- VILLAGÓMEZ D., 2000 – Sismicidad del volcán Guagua Pichincha, 1998-1999. Escuela Politécnica Nacional, facultad de geología, minas y petróleos, tesis de ingeniero geólogo, Quito, Ecuador, 114 p.
- WINTER T., AVOUAC J. P. & LAVENU A., 1993 – Late Quaternary kinematics of the Pallatanga strike-slip fault (central Ecuador) from topographic measurements of displaced morphological features. *Geophys. J. Int.* 115(3): 905-920.
- YEPES H., CHATELAIN JL., GUILLIER B., ALVARADO A., EGRED J., RUIZ M. & SEGOVIA M., 1996 – The Mw 6.8 Macas earthquake in the Sub-Andean zone of Ecuador, October 3, 1995. *Seis. Res. Let.*, 67: 27-32.



# LA CUENCA ORIENTE: GEOLOGÍA Y PETRÓLEO

Patrice Baby  
Marco Rivadeneira  
Roberto Barragán  
(Editores científicos)



# ÍNDICE

PRÓLOGO	9
<i>René Marocco</i>	
AGRADECIMIENTOS	11
INTRODUCCIÓN	13
<i>Patrice BABY, Marco RIVADENEIRA, Roberto BARRAGÁN</i>	
<b>Capítulo 1: Estratigrafía, estructura y evolución geodinámica de la Cuenca Oriente</b>	
EL PRE-APTENSE EN LA CUENCA ORIENTE ECUATORIANA	23
<i>Marlon DÍAZ, Patrice BABY, Marco RIVADENEIRA, Frédéric CHRISTOPHOUL</i>	
ESTRATIGRAFÍA SECUENCIAL DEL CRETACIO DE LA CUENCA ORIENTE DEL ECUADOR	45
<i>Roberto BARRAGÁN, Frédéric CHRISTOPHOUL, Howard WHITE, Patrice BABY, Marco RIVADENEIRA, Félix RAMÍREZ, José RODAS</i>	
MAGMATISMO ALCALINO INTRA-PLACA EN LA CUENCA CRETÁCICA ORIENTE, ECUADOR: EVIDENCIAS GEOQUÍMICAS, GEOCRONOLÓGICAS Y TECTÓNICAS	69
<i>Roberto BARRAGÁN, Patrice BABY</i>	
DINÁMICA DE LA CUENCA DE ANTE-PAÍS ORIENTAL DESDE EL PALEÓGENO	93
<i>Frédéric CHRISTOPHOUL, José David BURGOS, Patrice BABY, Jean-Claude SOULA, Séverine BÈS DE BERC, Celso DÁVILA, Michel ROSERO, Marco RIVADENEIRA</i>	

CUANTIFICACIÓN DE LAS EROSIONES TERCIARIAS Y PLIO-CUATERNARIAS EN LA PARTE SUR DE LA CUENCA ORIENTE	115
<i>José David BURGOS, Patrice BABY, Frédéric CHRISTOPHOUL, Jean-Claude SOULA, Philippe ROCHAT</i>	
HIDROCLIMATOLOGÍA DEL ORIENTE E HIDROSEDIMENTOLOGÍA DE LA CUENCA DEL NAPO	131
<i>Alain LARAQUE, Jean Loup GUYOT, Rodrigo POMBOSA</i>	
LA SUPERFICIE MERA-UPANO: MARCADOR GEOMORFOLÓGICO DE LA INCISIÓN FLUVIATIL Y DEL LEVANTAMIENTO TECTÓNICO DE LA ZONA SUBANDINA	153
<i>Séverine BÈS DE BERG, Patrice BABY, Jaime ROSERO, Marc SOURIS, Jean-Claude SOULA, Frédéric CHRISTOPHOUL, Jorge VEGA</i>	
EL ENJAMBRE SÍSMICO DE MACAS (CORDILLERA DE CUTUCÚ)	169
<i>Denis LEGRAND, Patrice BABY, Francis BONDOUX, Catherine DORBATH, Séverine BÈS DE BERG, Marco RIVADENEIRA</i>	
EVOLUCIÓN MAGMÁTICA ACTUAL DE LA ZONA SUBANDINA: VOLCANES EL REVENTADOR Y SUMACO, MODELOS GEODINÁMICOS PRELIMINARES	183
<i>Roberto BARRAGÁN, Patrice BABY</i>	
<b>Capítulo 2: Historia de la exploración y principales campos petroleros de la petroproducción</b>	
BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE LA EXPLOTACIÓN PETROLERA DE LA CUENCA ORIENTE	205
<i>Marco RIVADENEIRA</i>	
CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS GENERALES DE LOS PRINCIPALES CAMPOS PETROLEROS DE PETROPRODUCCIÓN	229
<i>Marco RIVADENEIRA, Patrice BABY</i>	