

# Resultados del uso de geodesia satelital para estudios geodinámicos en Colombia

HÉCTOR MORA-PAEZ<sup>1</sup>, ROBERT TRENKAMP<sup>2</sup>, JAMES KELLOGG<sup>2</sup>, JEFF FREYMUELLER<sup>3</sup>, MILTON ORDÓÑEZ-VILLOTA<sup>1</sup>

## RESUMEN

El uso de la tecnología GPS provee mediciones directas de los desplazamientos debido al movimiento de las placas y la deformación intraplaca, información básica para el entendimiento de la cinemática de los movimientos. Empleando técnicas de geodesia satelital, tasas de deformación de corteza terrestre en el límite amplio de placas al suroeste del Caribe, sureste de América Central y noroeste de Suramérica han sido derivadas de las campañas de GPS efectuadas en 1988, 1990, 1991, 1994, 1996 y 1998 como parte del proyecto de GPS denominado CASA. (Central And South America). La zona de estudio comprende el área de compleja interacción de las placas Caribe, Nazca y Suramérica. Las mismas estaciones GPS han sido ocupadas con el propósito de hacer comparaciones en la posición de cada sitio, analizando distancias de separación (líneas base) y obteniendo vectores de desplazamientos (magnitud y orientación). Se muestran algunos resultados obtenidos usando el software GIPSY-OASIS II, un paquete de precisión para el análisis de datos GPS, desarrollado por JPL-NASA. INGEOMINAS ha establecido en Colombia una red de estaciones GPS, denominada GEORED, para efectuar ocupaciones sucesivas y obtener información de deformación intraplaca, bajo el proyecto institucional denominado Levantamiento, Compilación y Generación de Información de Información Geodinámica.

PALABRAS CLAVE: GPS, GEODINÁMICA, DEFORMACIÓN, PLACAS TECTÓNICAS

## ABSTRACT

The use of GPS technology provides direct measurements of displacements due to plate motions and intraplate deformation, basic information for understanding kinematic of the movements. Using satelital geodesy techniques, crustal deformation rates in the southwestern Caribbean, southeastern of Central America and northwestern of South America wide plate boundary have been derived from GPS campaigns in 1988, 1990, 1991, 1994, 1996 and 1998 as part of the CASA (Central And South America) GPS Project. The zone of study includes the area of complex interaction between the Caribbean, Nazca and South America plates. The same GPS stations have been occupied with the purpose of making comparisons on the position of each site, analyzing distances of separation (baselines) and obtaining displacement vectors (magnitude and orientation). Some results are showed using the GIPSY-OASIS II software, that is a precision package for the analysis of GPS data developed by JPL-NASA. INGEOMINAS has built a GPS network called GEORED to be occupied successively in order to get information about intraplate deformation, under the institutional project named Survey, Compilation and Generation of Geodynamics Information.

KEY WORDS: GPS, GEODYNAMICS, DEFORMATION, TECTONIC PLATES

## INTRODUCCIÓN

Colombia, a través del Ingeominas, inició las aplicaciones de geodesia satelital mediante el empleo de técnicas de posicionamiento global por satélite en 1988, cuando se inició el proyecto internacional CASA (Central And South America) GPS Project, patrocinado por la National Science Foundation de Estados Unidos y con la partici-

pación de científicos y entidades de cinco países: Costa Rica, Panamá, Venezuela, Colombia y Ecuador. Este proyecto, con patrocinio de la NSF y la NASA, y la cooperación de instituciones de cada país, tuvo como concepción inicial, con propósitos científicos los siguientes aspectos:

- Obtener mediciones de líneas base entre algunas islas del Océano Pacífico localizadas sobre las placas de Nazca y Cocos, y sitios en Colombia y Centro América, que comparadas en el tiempo, permitan determinar las tasas de subducción.
- Establecer una red a través del Cinturón Deformado del Sur del Caribe que pueda demostrar si la corteza Caribe está subduciéndose asísmicamente debajo de los Andes del norte.

1 Ingeominas, Observatorio Vulcanológico y Sismológico, Manizales E-mail: hmora@um.umanizales.edu.co

2 University of South Carolina, Department of Geological Sciences, Columbia SC 29208.

3 University of Alaska at Fairbanks.

- Obtener mediciones de líneas base a lo largo de los sistemas de fallas de Romeral, Santa Marta, Boconó y borde oriental llanero, que eventualmente puedan determinar la distribución de esfuerzos a lo largo de la margen continental de los Andes del norte.
- Obtener mediciones de elevación que puedan establecer si los Andes del norte están ascendiendo, como es sugerido por algunas terrazas levantadas del Plioceno-Cuaternario.
- Localizar estaciones Doppler y GPS para mejorar la transformación entre los sistemas de referencia WGS72 y WGS84 en esta región.

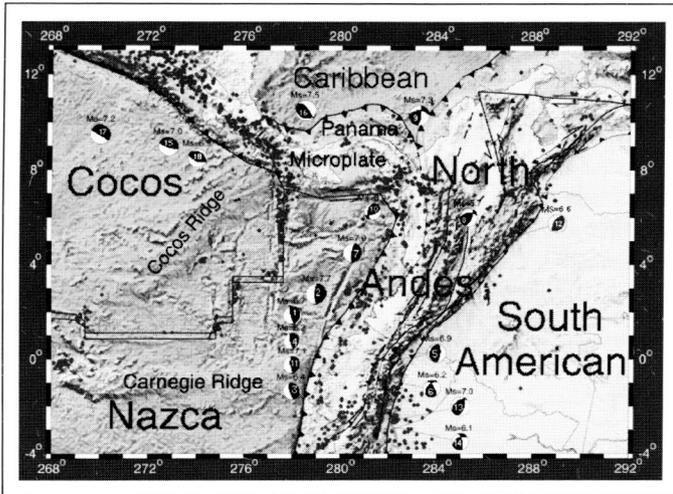


Figura 1. Marco tectónico de la zona del proyecto CASA.

Sin embargo, los resultados del procesamiento de datos entre 1991 y 1998 han permitido enfocar el análisis a los siguientes aspectos:

- Subducción oblicua en la trinchera ecuatoriana y “escape” del Bloque Norte de los Andes
- Acumulación de esfuerzos asociados a sismos en la trinchera ecuatoriana
- Colisión de arco de islas – continente entre Panamá y Colombia
- Subducción de la placa Caribe

Uno de los principales aspectos considerados dentro del proyecto fueron los resultados obtenidos por Nishenko (1989), quien al estudiar las zonas sísmicas en el Cinturón de Fuego del Pacífico estimó un 60% a 90% de probabilidad dependiente del tiempo para la recurrencia de un sismo de magnitud mayor de 7 en la zona de subducción de la frontera colombo-ecuatoriana (figura 2) para el periodo 1989-1999.

Nishenko analizó los sismos ocurridos en esta zona en 1906, 1942, 1958 y 1979, para establecer el riesgo potencial sísmico. Es importante considerar que la longitud de ruptura del sismo de ruptura es equivalente a la sumatoria de las longitudes de ruptura de los otros tres sismos posteriores (figura 3). Papadimitriou (1993), al es-

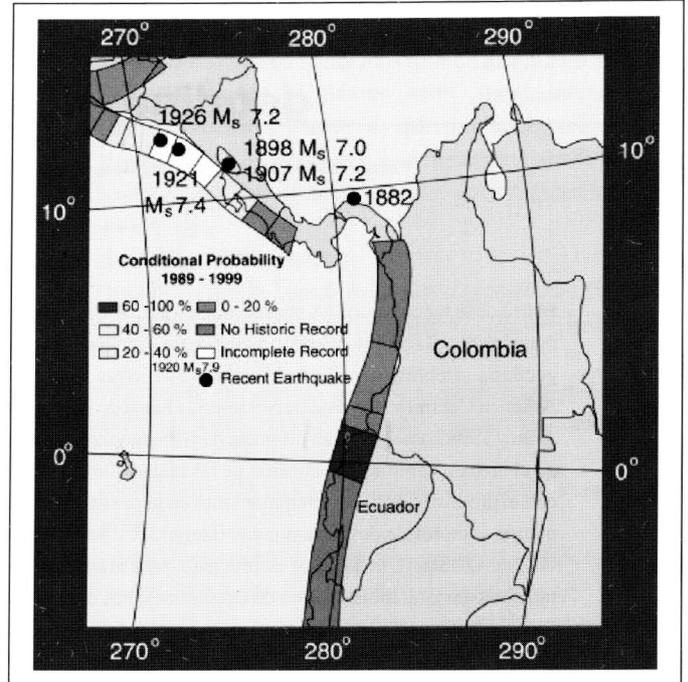


Figura 2. Riesgo sísmico potencial, Nishenko, 1989.

tudiar solamente los segmentos a lo largo de la costa oeste de Centro y Suramérica, empleando un modelo de predicción en el tiempo, establece un 68% de probabilidad dependiente del tiempo para un sismo mayor de 7,5 en la misma zona, para un período de 10 años que finaliza en 2002.

De hecho, se han presentado varios sismos, que han afectado a varios países en la zona de estudio, algunos de ellos con profundas repercusiones económicas y sociales, y gran cantidad de pérdidas humanas y de heridos, así como destrucción de viviendas. La figura 1 muestra la localización epicentral de los sismos principales que se han presentado en la zona indicada. Los sismos numerados del 1 al 11 corresponden a los localizados en el Bloque Norte de los Andes; los sismos numerados del 12 al 14 corresponden a los asociados a la Falla Frontal Oriental y los sismos 15 al 18 corresponden a los ocurridos en Costa Rica. No está localizado el sismo del Quindío, 25 de enero de 1999, de profundas repercusiones en Colombia.

## METODOLOGÍA

El estudio geodésico de sismos surgió cuando Reid empleó el desplazamiento de los puntos geodésicos al este y oeste de la falla de San Andrés para proponer su teoría del rebote elástico en 1910. Los primeros trabajos se basaron en técnicas de triangulación y trilateración, y posteriormente de trilateración. Con el advenimiento de la era satelital, la geodesia satelital se ha convertido en disciplina básica para el análisis y estudio de deformación interplaca e intraplaca. La geodesia ayuda en el estudio individual de sismos desde que la evidencia geodésica en desplazamiento cosísmico fue notada en el

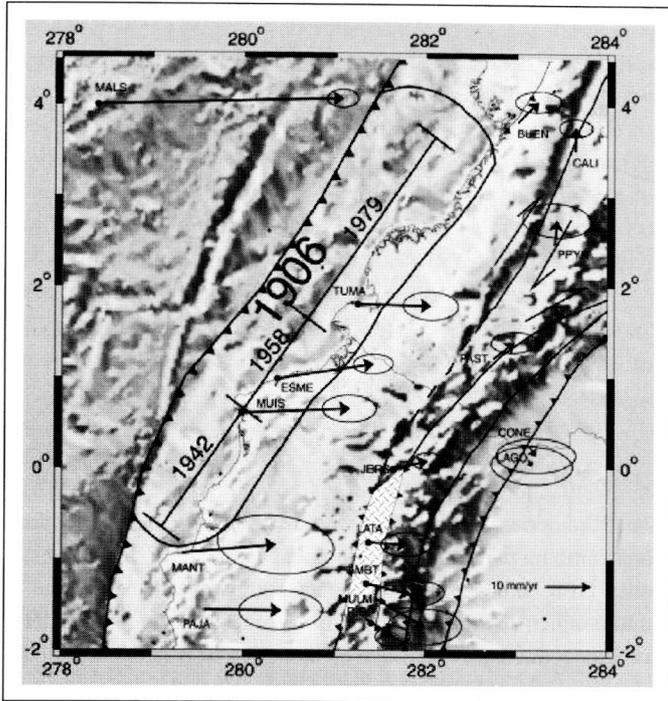


Figura 3. Sismos en la zona de subducción de la frontera colombo-ecuatoriana.

sismo de Sumatra en 1892. Adicionalmente, la geodesia juega un importante papel para entender el ciclo sísmico. En este orden de ideas, la geodesia tectónica implica la ocupación sucesiva en el tiempo de las mismas estaciones para observar las variaciones de las coordenadas de dichas estaciones expresadas en un marco de referencia determinado, en virtud de los desplazamientos como respuesta a las fuerzas que interactúan. Por tanto, el uso de la geodesia en aplicaciones tectónicas debe ser dividido en métodos de campo cercano y campo lejano, clasificación relacionada con los métodos que deben ser aplicados, tanto tradicionales como satelitales, o dicho de otra forma, métodos terrestres y métodos satelitales. De hecho, la geodesia brinda excelente resultados en diversos procesos relacionados con la actividad sísmica, como movimiento presísmico, cósmico e incluso postsísmico; también proporciona información en movimientos asísmicos. La geodesia de campo lejano usualmente se refiere a ediciones de grandes distancias, mientras que la geodesia de campo cercano se refiere a las mediciones en la vecindad o sobre el fenómeno objeto de medición. La figura 4 muestra el alcance de las mediciones geodésicas al observar y cuantificar los desplazamientos relativos en dos puntos, mediante el establecimiento de una red de cuatro puntos, ubicados a lado y lado de una falla de rumbo.

Bajo esta premisa, desde 1988 se han venido realizando ocupaciones de campo con propósitos geodinámicos.

La campaña CASA de 1994 permitió la ocupación de la mayoría de las estaciones ocupadas en las campañas de 1998, 1990 y 1991, así como iniciar un proceso de densificación en Colombia, como se

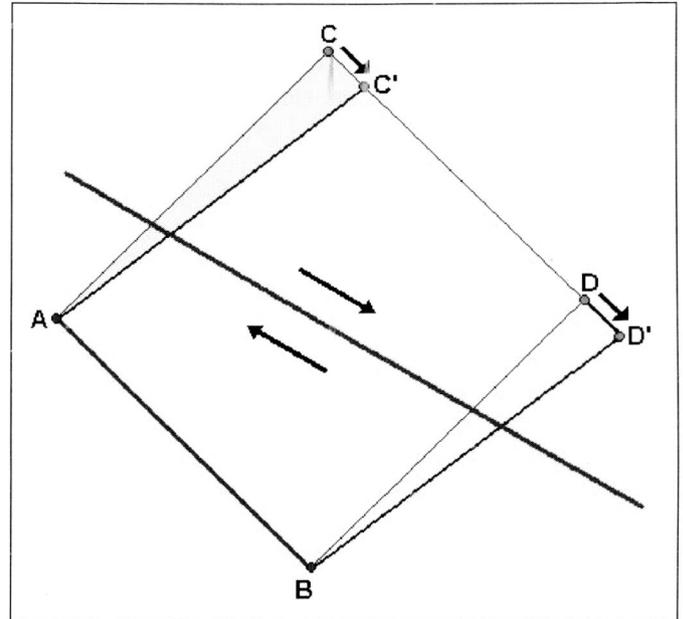


Figura 4. Ejemplo de aplicación geodésica para la determinación de movimientos relativos.

estaba haciendo de manera simultánea en Ecuador y Panamá. Mora (1995) y Mora y Kellogg (1996) muestran resultados de las mediciones de campo de 1991 y 1994 y las comparan con los obtenidos entre 1998 y 1991 por Freymueller, Kellogg y Vega (1993), correspondientes a los valores de subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa suramericana, colisión de la microplaca Panamá-Costa Rica con el Bloque Norte de los Andes, y desplazamiento del Bloque Norte de los Andes con relación a la estable Suramérica.

En la campaña de 1996 en Colombia se ocupó de nuevo la totalidad de las estaciones principales del proyecto CASA y la mayoría de las estaciones de densificación materializadas y ocupadas por primera vez en 1994. En la campaña de 1998, Ingeominas y la Universidad de Carolina del Sur dedicaron sus esfuerzos a la parte norte del sector colombiano con el propósito de obtener resultados entre el sector occidental de Colombia, frontera con Panamá, y el sector oriental de la frontera con Venezuela, así como el espacio comprendido entre estas dos áreas. En 1999, Ingeominas realizó algunas ocupaciones en las inmediaciones de la zona epicentral del sismo del 25 de enero de 1999. En la campaña de 2001 se ocuparon algunas estaciones de la zona suroccidental del país, de manera simultánea con otras estaciones en el Ecuador.

## DATOS

Los datos de campo obtenidos en las diversas campañas de GPS han sido procesados empleando el software GIPSY OASIS II (GPS Inferred Positioning System Orbit Analysis And Simulation Software), desarrollado por JPL/NASA. Todos los datos han sido analizados tomando en consideración una red de estaciones GPS de

rastreo permanente. A partir de 1996 se ha empleado también la información de la estación permanente de Bogotá y, parcialmente de la estación permanente que operó en Popayán, pendiente de ser reinstalada.

## RESULTADOS

Desde la perspectiva regional del área de estudio, la primera conclusión de las mediciones de GPS extendidas a lo largo de la fosa oceánica en América Central estableció una medición independiente del movimiento de las placas Cocos y Caribe, cuyos resultados sugieren un ciclo sísmico de esfuerzo acumulativo cerca de la fosa (Dixon, 1993). La comparación de resultados con mediciones previas en la región (Dixon y otros, 1991) permitió definir que el movimiento relativo de la placa Caribe con respecto a Norteamérica (235 mm/año en la componente este) era, de alguna manera, más rápido que la tasa estimada en el modelo global NUVEL-1A (123 mm/año). La velocidad relativa de la mayoría de las principales placas tectónicas se conoce a partir de modelos geológicos globales, con precisión de pocos mm/año, o de algunos grados en azimut (DeMets y otros, 1990, 1994). Estos modelos han sido empleados en la determinación de los movimientos relativos de las placas que convergen en la esquina noroccidental de Sudamérica.

Es importante hacer referencia al concepto de Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF), realización del ITRS (Sistema de Referencia Terrestre Internacional) mediante mediciones espaciales en sitios específicos alrededor del globo terrestre, el cual es afectado por algunos factores en la observación y el procesamiento de las posiciones de la estación y del satélite y sus movimientos. Estos factores incluyen:

- Relaciones entre el Sistema de Referencia Celestial y el ITRS considerando la tasa de rotación de la tierra.
- Coordenadas a priori de los sitios.
- Modelo de movimiento de la tectónica de placas usado para estimar las velocidades de los sitios.
- Modelo geopotencial adoptado para el campo de gravedad terrestre.
- Constante gravitacional para la masa de la tierra, GM.
- Valor usado para la velocidad de la luz.
- Influencia de las mareas.
- Presión de la radiación solar.
- Offsets de los relojes y tasas de deriva.
- Efectos atmosféricos.
- Variaciones de antena.

Mediante el procesamiento conjunto de estos factores, el IERS produce, tomando en consideración un conjunto de coordenadas de estaciones y sus velocidades, un ITRF para un instante dado, típicamente el comienzo del primer día de un año dado. Así, por ejemplo, el ITRF94 es el ITRS realizado el 1º de enero de 1994, descrito por Boucher y otros (1996). Un ITRF es generado en su forma pura

como coordenadas cartesianas centradas en la tierra (X, Y, Z). Por consiguiente, debe utilizarse un elipsoide de referencia para efectuar la conversión a coordenadas elipsoidales (latitud, longitud y altura elipsoidal). El elipsoide de referencia asociado al reciente ITRF es el Sistema de Referencia Geodésico de 1980 - GRS-80.

La estrategia de análisis y presentación gráfica de información GPS correspondió inicialmente al establecimiento del movimiento relativo entre las diferentes placas, determinado por la comparación entre las diferentes líneas base de sitios ocupados en anteriores campañas. La tasa de cambio de los vectores de las líneas base, determinados de los vectores tridimensionales entre los dos sitios, miden las tasas de movimiento entre las principales placas o, si es del caso, entre sitios establecidos para obtener información de deformación intraplaca. El cálculo y la presentación de los resultados se está efectuando en virtud de un marco de referencia fijo; en este caso, Suramérica. Aunque el marco de referencia Suramérica funciona como un punto fijo, la diferencia con respecto a tomar estaciones GPS como puntos fijos para comparar estriba en que el punto también se mueve, teniéndose entonces un punto de Euler y un vector rotacional, expresado en un marco de referencia bien definido, es decir, el ITRF correspondiente. Por tanto, cada punto de Suramérica tiene una velocidad que se incrementa en magnitud a medida que esté más alejado del punto de Euler. De esta manera, en lugar de estar relacionando los movimientos de los puntos ocupados con un punto fijo, se relaciona más bien el movimiento del punto en consideración con el movimiento de Suramérica en dicho punto, el cual será diferente porque existirán diferentes distancias desde el polo de Euler. La figura 9 muestra los resultados obtenidos, expresados en ITRF96. La figura 5 presenta los vectores de velocidad obtenidos a partir de las diversas mediciones efectuadas sobre las estaciones GPS; la tabla 1 muestra los valores de las respectivas componentes, vector resultante y azimut, así como el nombre del sitio al cual corresponden las respectivas estaciones, expresados en el ITRF96.

Los vectores de velocidad en las estaciones MALS y GALA permiten establecer mayor velocidad en la estación GALA, lo cual significa mayor velocidad al sur de la placa de Nazca, en el caso Colombia-Ecuador. Varios sitios de la red CASA están bien situados para medir la liberación de esfuerzos en el evento que ocurra un gran sismo en la misma área donde se presentó la zona de ruptura del sismo de 1906 y, de vital importancia, la deformación que debe estar acumulándose y que podría ser la causa de dicho evento. Tres vectores de estaciones localizadas cerca a la costa en el borde colombiano-ecuadoriano, MUIS (Muisne) y ESM (Esmeraldas) en el Ecuador, y TUMA en Colombia, tienen una gran componente de movimiento este-noreste relativo a la estable Suramérica. Las velocidades relativas de los vectores de las dos estaciones ecuatorianas, con respecto a Sudamérica, son del orden de 21 mm/año, mientras que la estación colombiana arroja un valor de 15 mm/año, y sus di-

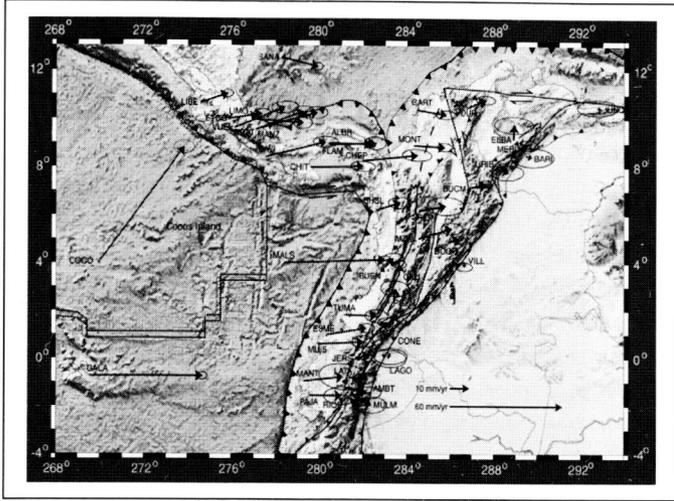


Figura 5. Velocidad relativa de las estaciones GPS de las campañas de 1991, 1994, 1996 y 1998 (Trenkamp et al., 2002).

recciones son consistentes con la dirección de la subducción de la placa de Nazca (Trenkamp et al., 2002).

Se puede apreciar que al este de la fosa colombo-ecuatoriana, las estaciones costeras de Ecuador y la estación costera de Colombia TUMA (16 mm/año) tienen vectores con significativa componente hacia el este, aunque mucho más pequeños que el vector de velocidad medido para la subducción de la placa de Nazca, mientras que

otras estaciones, localizadas en la costa pero más al norte, como BUEN y BHSL, tienen componentes al este mucho más pequeñas, del orden de 4, 5 y 3,6 mm/año, respectivamente. Las estaciones localizadas al norte y este de la estación TUMA presentan vectores de velocidad con una componente norte más representativa, como se aprecia en las estaciones PAST, CALI, BUEN, MZAL y BOGO. Otras estaciones localizadas más al norte, por encima de los 6° de latitud, como RION, MONT y CART en Colombia, así como la estación URIB en Venezuela, presentan una sustancial componente mayor hacia el este, lo cual es bastante significativo si se considera la distancia con respecto a la trinchera colombiana asociada a la subducción de la placa de Nazca. Adicionalmente, las estaciones VDUP y BUCM, distantes alrededor de 500 km de la zona de colisión Panamá-Colombia, muestran componentes este mayores, pero la componente norte es significativa dentro de los respectivos vectores.

La magnitud y dirección de la colisión Panamá-Colombia tiene su expresión en el comportamiento y vectores de cinco estaciones en Panamá y tres vectores en Costa Rica. Dichos resultados dejan entrever, la traslación relativa uniforme del Bloque Panamá, los cuales tienen componentes en la dirección este en el rango de 22 a 32 mm por año, en contraste con la muy baja componente en dirección norte. De hecho, Panamá y la parte norte de Colombia son la única oportunidad para estudiar la cinemática y mecánica de una zona de colisión activa entre un arco de islas y el continente. El lí-

TABLA 1. VECTORES DE VELOCIDAD RELATIVOS A SURAMÉRICA COMO MARCO DE REFERENCIA FIJO EXPRESADOS EN ITRF96 (MODIFICADO DE TRENKAMP ET AL., 2002).

ESTACIÓN	ID ESTACIÓN	LONG W	LAT N	ESTE	NORTE	RESULT	AZIMUT °	σ (E)	σ (N)
				Mm (Año)				Mm (Año)	
BAHÍA SOLANO	BHSL	-77.39	6.20	12.67	3.62	13.18	74.05	3.85	1.64
BOGOTÁ	BOGO	-74.08	4.87	5.78	1.29	5.92	77.42	1.99	1.14
BUCARAMANGA	BUCM	-73.18	7.12	9.27	2.22	9.53	76.53	2.32	1.14
BUENAVENTURA	BUEN	-76.99	3.82	4.51	4.49	6.36	45.13	3.2	1.42
CALI	CALI	-76.36	3.50	0.08	5.13	5.13	0.89	2.29	1.20
CARTAGENA	CART	-75.50	10.36	15.10	-2.34	15.28	98.81	3.24	1.32
MALPELO	MALS	-81.61	4.00	53.62	1.43	53.64	88.47	2.09	1.21
MONTERÍA	MONT	-75.68	8.89	16.51	-0.86	16.53	92.98	2.43	1.24
MANIZALES	MZAL	-75.47	5.03	17.92	4.75	18.54	75.15	3.58	1.73
PASTO	PAST	-77.26	1.22	4.86	3.51	5.99	54.16	3.20	1.41
POPAYÁN	PPYN	-76.58	2.48	0.47	5.25	5.27	5.12	4.70	2.33
RIONEGRO	RION	-75.43	6.18	14.09	2.38	14.29	80.41	6.11	2.76
SAN ANDRÉS	SANA	-81.73	12.52	19.18	-4.49	19.70	103.18	1.65	1.11
TUMACO	TUMA	-78.75	1.81	16.08	-0.42	16.09	91.50	3.76	1.91
VALLEDUPAR	VDUP	-73.25	10.44	10.10	4.02	10.87	68.30	3.14	1.30
VILLAVICENCIO	VILL	-73.38	4.07	0.00	-2.53	2.53	180.00	2.94	1.29

mite del área colombo-panameña es una región tectónicamente compleja que se encuentra entre el Cinturón Deformado del Norte de Panamá y la trinchera colombo-ecuatoriana, donde ocurrieron más de 60 sismos de magnitud 5 o mayor entre 1963 y 1981, potencial sísmico estudiado por Camacho y Viquez (1993).

El Bloque Norte de los Andes está delimitado por las fallas del Borde Oriental y Boconó al este, la trinchera colombo-ecuatoriana y Panamá al oeste, y al norte el Cinturón Deformado del Caribe sur. La velocidad de la estación BOGO, con relación a Sudamérica, es del orden de 6.2 mm/año, lo cual es interpretado como una aproximación a la velocidad del Bloque Norte de los Andes relativo a la estable Suramérica. Sin embargo, este valor es menor que el promedio de la tasa de movimiento transcurrente para el Plioceno, medida mediante observaciones geomorfológicas por Tibaldi y León (2000).

La única estación existente sobre la Placa Caribe, y por consiguiente el único vector correspondiente a la estación SANA, sugie-

re que continúa la lenta subducción de la placa Caribe bajo el norte de Colombia y Panamá, con un valor mayoritario de la componente este.

Finalmente, con respecto a la zona del Eje Cafetero colombiano, los datos que se presentan, de carácter preliminar, por primera vez en Colombia arrojan datos de análisis de información intraplaca antes y después de la ocurrencia de un sismo de gran incidencia en el país, como el sismo del Quindío del 25 de enero de 1999, a partir de información geodésica. Es básicamente el resultado de un trabajo sistemático que ha continuado el Ingeominas, como prolongación del proyecto CASA en una red a la cual se ha denominado GEORED (Geodesia: red de estudios de deformación), concebida de manera amplia, con cobertura incluso en las zonas volcánicas del Ruiz y Galeras.

*Las figuras 6 y 7 muestran los vectores intersísmicos que se tienen hasta ahora en virtud de las ocupaciones de estaciones realizadas, y algunos de ellos dependen solamente de medidas sencillas*

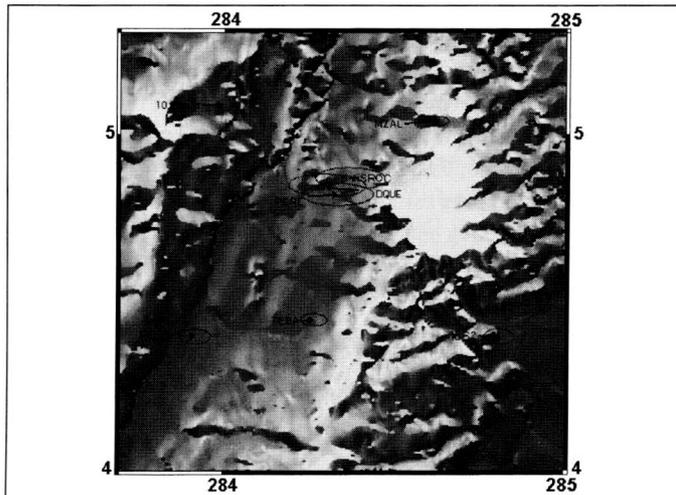


Figura 6. Vectores relativos de velocidades horizontal y vertical para el período 1994-1998.



Figura 7. Vectores relativos de velocidades horizontal y vertical para las mediciones 1996-1998-

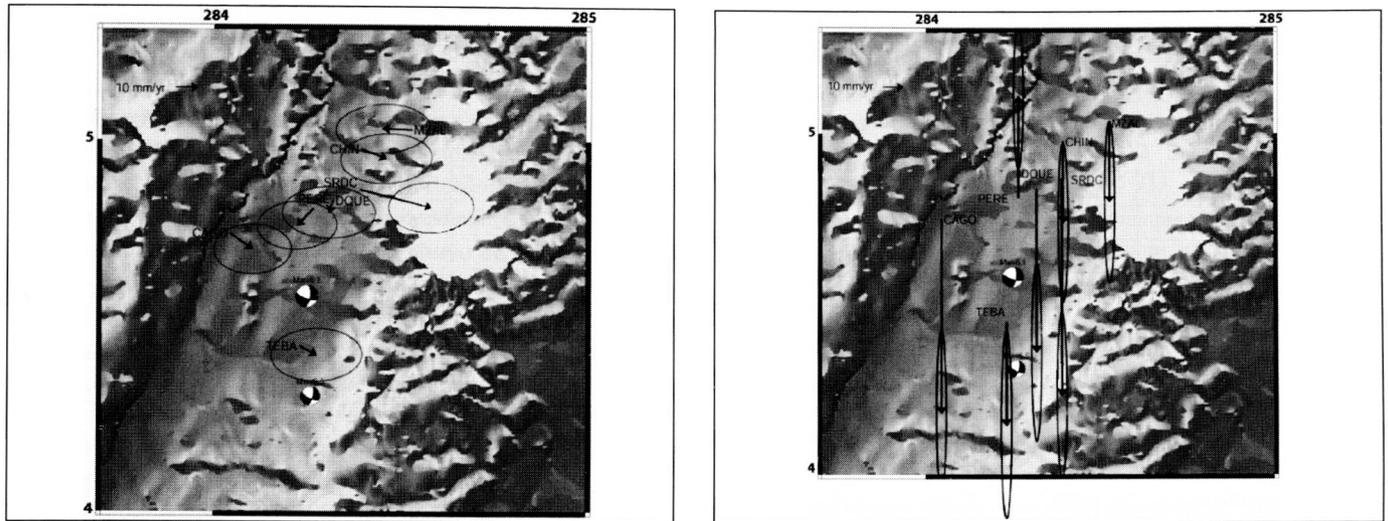


Figura 8. Vectores relativos de velocidades horizontal y vertical para las mediciones 1998-1999.

efectuadas en 1994 ó 1996, y las correspondientes efectuadas en 1998.

En la figura 8 aparecen los vectores de las estaciones que muestran claramente una respuesta sísmica mediante técnicas de geodesia satelital. Como los sismos principales ocurrieron el 25 de enero de 1999, las velocidades intersísmicas para los 9 o 10 meses previos al sismo están inmersas en la señal, teniendo en cuenta que la campaña de GPS de 1998 se realizó durante los meses de febrero y marzo.

Los vectores de la figura 8 muestran, fundamentalmente un vector de campo controlado por movimiento vertical de bloque de ángulo alto durante el sismo del Quindío. Lamentablemente no se tiene un buen conjunto de datos de velocidades intersísmicas en esta área. El área es un poco ambigua porque es la zona transicional entre la parte suroeste de Colombia, donde se tiene alta deformación acumulada en la costa, y un movimiento del Bloque Norte de los Andes claramente definido en sentido general oeste al este, similar a los patrones que se observan en el norte del Ecuador, así como acción de la zona de colisión de Panamá-Colombia, cuyos efectos podrían estar afectando el comportamiento de la estación MZAL, altamente confiable, por ser la estación y el vector mejor constreñidos.

La tabla 2 muestra los vectores de desplazamientos horizontales y verticales de algunas estaciones localizadas en la zona del Eje Cafetero colombiano. El primer conjunto de estaciones arroja información entre 1994 y 1998, y corresponden al análisis de las estaciones ocupadas en las campañas efectuadas en 1994, 1996 y 1998. El segundo conjunto corresponde al cálculo correspondiente a los desplazamientos ocurridos en virtud de las ocupaciones entre 1996 y 1998, que constituye un simple dato de comparación entre dos épocas diferentes, lo cual no es aconsejable para análisis geodinámico. El tercer conjunto de estaciones corresponde a aquellas que permi-

ten hacer comparaciones entre las ocupaciones efectuadas en 1998 y las efectuadas con posterioridad a la ocurrencia del evento sísmico del 25 de enero de 1999.

La información de la tabla 2 permite establecer que la estación PERE, localizada en el Aeropuerto Matecaña, al comparar las mediciones de 1998 y las efectuadas en 1999 con posterioridad al sismo, tuvo un ascenso de 5 cm, y que la estación SRDC tuvo comportamiento similar, del orden de 10 cm. Las otras estaciones analizadas, CAGO, DQUE, TEBA y MZAL tuvieron comportamiento opuesto, es decir, de descenso, del orden de 9,7, 8,1, 5,1 y 3,9 cm, respectivamente, lo que permite establecer la fuerte in-

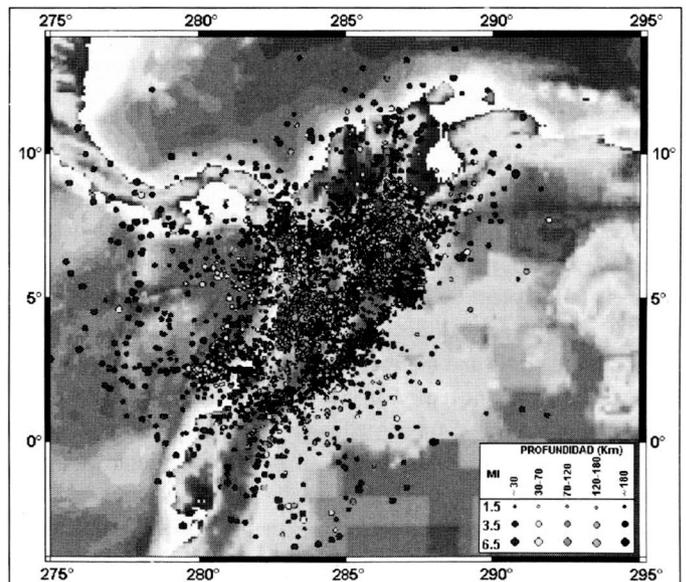


Figura 9. Sísmicidad en Colombia. Nótese las magnitudes y profundidades en la zona del Eje Cafetero.

TABLA 2. VALORES DE DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS HORIZONTALES Y VERTICALES (CM) PARA LA ZONA DEL EJE CAFETERO, EXPRESADOS EN ITRF96, PARA LOS PERÍODOS 1994-1998, 1996-1998 Y 1998-1999.

ESTACIÓN	ID ESTACIÓN	LONG W	LAT N	VECTOR HORIZONTAL				CORR	VECTOR VERTICAL	
				E	N	$\sigma E$	$\sigma N$		V	$\sigma V$
ROLDANILLO	ROLD	-76.148	4.402	1.134	-0.074	0.327	0.158	-0.037	0.062	0.791
TEBAIDA	TEBA	-75.769	4.445	0.610	0.035	0.272	0.125	-0.044	-0.315	0.621
PEREIRA	PERE	-75.734	4.815	1.177	0.074	0.730	0.226	0.002	-6.228	1.267
DOS QUEBRADAS	DQUE	-75.682	4.837	-0.273	0.156	0.791	0.233	-0.070	-1.090	1.334
SANTA ROSA DE CABAL	SRDC	-75.608	4.867	-0.334	-0.008	0.721	0.225	-0.074	1.559	1.319
MANIZALES	MZAL	-75.470	5.030	1.725	0.145	0.185	0.089	0.004	-0.567	0.415
IBAGUÉ-2	IBG2	-75.250	4.400	1.038	-0.042	0.313	0.157	-0.041	0.134	0.735
1996-1998										
CARTAGO	CAGO	-75.956	4.748	1.084	-0.580	0.629	0.303	0.040	-9.231	1.728
LA PALMILLA	LAPA	-75.794	4.725	1.200	-0.292	0.419	0.154	-0.095	-3.019	0.836
QUIMBAYA	QUIM	-75.748	4.623	-0.702	-0.393	0.597	0.175	-0.057	-2.753	0.978
PIJAO	PIJA	-75.704	4.336	0.380	-0.999	0.445	0.166	-0.093	-4.667	0.936
INGENIERÍA	INGE	-75.660	4.555	1.419	-0.237	0.588	0.168	0.028	-3.590	0.958
FILANDIA	FILA	-75.634	4.687	-1.424	-0.066	0.397	0.182	-0.086	-3.154	1.029
CALARCÁ	CALA	-75.631	4.532	-0.995	-0.658	0.490	0.166	0.075	-2.741	0.987
CORCASOA	CIRC	-75.629	4.623	0.836	-0.087	0.391	0.141	-0.023	-2.433	0.803
SALENTO	SALE	-75.567	4.641	1.337	0.396	0.386	0.161	-0.087	-1.383	0.896
CAJAMARCA	CAJM	-75.435	4.438	0.669	0.048	0.227	0.106	-0.035	-0.436	0.543
1998-1999										
CARTAGO	CAGO	-75.956	4.748	1.030	-0.713	0.734	0.467	0.011	-9.705	1.691
TEBAIDA	TEBA	-75.769	4.445	0.773	-0.397	0.848	0.496	0.024	-5.125	1.910
PEREIRA	PERE	-75.734	4.815	-0.727	-0.767	0.744	0.452	0.043	5.057	1.489
DOS QUEBRADAS	DQUE	-75.682	4.837	-0.170	-0.542	0.865	0.485	-0.013	-8.149	1.820
SANTA ROSA DE CABAL	SRDC	-75.608	4.867	3.266	-0.802	0.806	0.472	0.010	10.834	1.704
MANIZALES	MZAL	-75.470	5.030	-1.324	0.043	0.884	0.461	0.068	-3.932	1.656

fluencia vertical del movimiento, cuyas componentes horizontales, a excepción de SRDC y MZAL en la componente norte, son sustancialmente menores.

Es preciso advertir que el modelo planteado para el área probablemente sea predictivo, por ahora, en un sentido estricto, y probablemente sea algo diferente de lo que puede estar ocurriendo en la realidad. Es importante tener en cuenta que esta área presenta numerosas fallas, reconocidas como activas, y puede existir múltiple energía acumulada en dirección general norte-sur, lo cual hace difícil por ahora confirmar algunos de los planteamientos formulados. Esto será posible sólo a medida que se tenga mayor cantidad de datos obtenidos en el campo mediante ocupaciones sucesivas con GPS. Sin embargo, perfectamente se puede considerar que junto con el Nido de Bucaramanga y la zona de colisión de Panamá-Colombia, y teniendo en cuenta los datos geodésicos obtenidos, esta área es una zona de clara tendencia actividad sísmica representativa, de hecho ya evidente en la distribución epicentral de los sismos de la figura 9.

## CONCLUSIONES

La interpretación de los resultados obtenidos mediante técnicas de geodesia aplicada a estudios geodinámicos permite establecer una componente norte más representativa en algunas estaciones GPS localizadas al suroccidente de Colombia, lo que permite suponer que la componente oblicua de la subducción de la placa de Nazca está siendo acomodada mediante movimiento transpresivo NE a lo largo de fallas subparalelas al margen de los Andes. El alto componente este de los vectores de velocidad de las estaciones localizadas por encima de los 6° de latitud supone la influencia de la colisión que se presenta entre Panamá y Costa Rica, planteada por Kellogg y Vega (1995).

Con relación a los resultados mostrados en las figuras 6, 7 y 8, previamente se había expresado que como los sismos principales ocurrieron el 25 de enero de 1999, las velocidades intersísmicas para los 9 a 10 meses previos al sismo están inmersas en la señal. Esto significa que si se asume que la señal intersísmica es este-noreste, lo cual es una gran asunción en esta área que puede con-

siderarse transicional, se debe efectuar una serie de análisis para establecer la respuesta sísmica actual, lo cual es importante para Colombia, pues se puede determinar la señal intersísmica para el país. De esa manera, cuando ocurra un evento, una simple reocupación de estaciones GPS puede dar una excelente indicación de la señal sísmica que es transmitida a la superficie. Consideramos que no hay duda de que la señal en el área correspondiente a la zona afectada por el sismo del 25 de enero de 1999 estuvo dominada por movimientos verticales en el momento de la liberación de la energía sísmica. Se debe considerar como preliminar este esquema de respuesta, debido a que lamentablemente no se cuenta con la cantidad suficiente de datos para hacer una mejor aproximación y, por tanto, una generalización más precisa respecto al planteamiento de los movimientos verticales, aunque ha de considerarse además que muchas de las fracturas en la zona, que permiten el acomodamiento de los desplazamientos verticales, son de amplio rango. Una observación de la señal en Manizales, que es el mejor sitio constreñido, y un sencillo cálculo, permiten suponer que estaría ocurriendo algún desplazamiento en una fractura que tendría aproximadamente un ángulo de pendiente de 45°, al tomar la señal sísmica y considerar además la señal intersísmica, la cual simplemente dice que el movimiento total fue de cerca 3 cm hacia el oeste, y el movimiento vertical, tipo descendente, de 3 cm. La colisión de Panamá-Colombia podría estar afectando a la estación MZAL, una estación confiable; el vector en Manizales, el vector mejor constreñido, es del orden de 1,8 0,5 cm por año. De ahí la importancia de obtener más épocas de medición en estos sitios, como clave para comprender la zona transicional mencionada.

Por tal motivo, y considerando la necesidad de obtener información geodésica en la zona, el Ingeominas, en el marco del proyecto Levantamiento de Información Geodinámica del Territorio Colombiano, establecerá próximamente una estación semipermanente en el área de la ciudad de Manizales, teniendo en cuenta que el rastreo continuo es una necesidad vital. Por ejemplo, en el momento de la ocurrencia de un sismo, se registra el movimiento asociado o el movimiento lento a lo largo de días, meses o incluso años, antes de la ocurrencia del evento.

Los resultados y las interpretaciones de los datos son una simple muestra de la importancia del empleo de técnicas geodésicas, cuyo aporte es fácilmente observable. Por tanto, la recomendación fundamental estriba en la necesidad de obtener información mediante el empleo de técnicas satelitales con el propósito de establecer los movimientos actuales de la corteza del territorio colombiano e interpretarlos de modo integral con resultados obtenidos mediante la aplicación de otras disciplinas.

## BIBLIOGRAFÍA

AMBEHH W.; BILHAM R.; CALAIS E.; DEMETS C.; DIXON T.; FREYMUELLER T.; JANSMA P.; KELLOGG J.; MORA H.; LUDGREN P.;

- MANN P., and WEBER, J. GPS Networks in the Caribbean. Fall Meeting. EOS-AGU, Baltimore, USA, 612, Abstract.
- BLEWITT, G. 1993. Advances in Global Positioning System Technology for Geodynamics Investigations: 1978-1992. Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology. D. Smith and D. Turcotte (Eds.). *Geodynamics Series AGU* 25: 195-213.
- BOUCHER, C., Z. ALTAMIMI, L. 1993. "Development of a Conventional Terrestrial Reference Frame". Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics, *Geodynamics Series AGU* 24: 89-97.
- CAMACHO, E., and VIQUEZ, V. 1993. Historical seismicity of the North Panama Deformed Belt. *Rev. Geol. Amer. Central* 15: 49-64.
- DIXON, T.H., and KONREICH Wolf, S. 1990. Some tests of wet tropospheric calibration for the CASA UNO Global Positioning System Experiment. *Geophys. Res. Letter*. 17(3): 203-206.
- FREYMUELLER, J.T.; KELLOGG, J.N. and VEGA, V. 1993. Plate Motions in the North Andean Region. *J. Geophys. Res.* 98 (B12): 21853-21863.
- IGS. 2000. *Annual Report 1999*. NASA-JPL, Pasadena.
- KELLOGG, J., and 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.
- KELLOGG J., and MORA, H. 1994. *Seismicity and strain in a wide plate boundary-CASA (Central and South America) GPS measurements*. 66th. Annual Meeting, Seismological Society of America, Eastern Section, Columbia, USA, 1994, 23, Abstract.
- KELLOGG, J., MORA, H.; FREYMUELLER, J.; DIXON, T., and LEFFLER, L. 1994. *CASA (Central and South America) GPS measurements, deformation in a wide plate boundary*. Fall Meeting, EOS-AGU, Baltimore, USA, 163, Abstract.
- MORA H., and KELLOGG J. 1994. *Quaternary faults in Central and South America - CASA GPS measurements*. 66th. Annual Meeting, Seismological Society of America, Eastern Section, Columbia, USA, 38, Abstract.
- \_\_\_\_\_, and FREYMUELLER, T. 1994. *Quaternary faults in the Southwest Caribbean-GPS measurements*. Fall Meeting, EOS-AGU, 612, San Francisco, USA, Abstract.
- MORA, H.; KELLOGG, J.; FREYMUELLER, T.; DIXON, T., and LEFFLER, L. 1995. *Crustal deformation along the wide North Andean plate boundary-CASA (Central and South America) GPS Measurements*. XXI General Assembly, IUGG. Boulder, USA, A44, Abstract.
- \_\_\_\_\_. 1995. *Tectonics of Northwestern South America, CASA GPS Measurements*. Spring Meeting, EOS-AGU, Baltimore, USA, S266, Abstract.
- MORA, H. 1995. Central and South America GPS Geodesy: Relative Plate Motions Determined from 1991 and 1994 Measurements in Colombia, Costa Rica, Ecuador, Panama and Venezuela. *Master Thesis*. University of South Carolina.
- MORA, H. y KELLOGG, J. 1996. "Movimientos relativos de placas determinados con GPS a partir de las mediciones de CASA-91 y CASA-94".

- Memorias del VII Congreso Colombiano de Geología*. Santafé de Bogotá.
- PAPADIMITRIOU, E. 1993. Long term earthquake prediction along the western coast of South and Central America based on a time predictable model. *PAGEOPH* 140: 301-316.
- TIBALDI, A., and LEÓN, J. 2000. Morphometry of late Plesitocene-Holocene faulting and volcano tectonic relationship in the Southern Andes of Colombia. *Tectonics*. 19: 358-377.
- TRENKAMP, R.; KELLOGG, J.; MORA, H.; FREYMUELLER, T.; DIXON T., and LEFFLER, L. *Active Panama – Northern Andes Collision – GPS Displacement Vectors 1998-1994*. Fall Meeting, American Geophysical Union, F613, Abstract.
- TRENKAMP, R.; KELLOGG, J.; FREYMUELLER, J., and MORA, H. 2002. Wide plate margin, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 157-171.
- UNIVERSITY NAVSTAR CONSORTIUM. 1994. *Geoscientific Research and the Global Positioning System, Recent Developments and Future Prospects*. UNAVCO.
- VAN DIERENHONCK, A.J.; RUSSELL; S.S.; KOPITZKE, E.R., and BIRNBAUM, M. 1980. The GPS Navigation Message. In: *Global Positioning System*. Navigation. Vol. I. The Institute of Navigation, Alexandria.
- WARE, R., and BUSINGER, S. 1995. *Global Positioning Finds Applications in Geosciences Research*. EOS, Transactions, AGU, p. 187.