

PRESENTE Y FUTURO DE LA TECNOLOGÍA GPS EN APLICACIONES GEODINÁMICAS EN COLOMBIA

(Present and Future of the Technology GPS (Global Positioning System)
in the Geodynamic Applications in Colombia)

Héctor Mora Páez

Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, Ingeominas,
hmora@ingeominas.gov.co

(Recibido agosto 29 de 2007 y aceptado abril 29 de 2008)

Resumen:

Desde 1988, Ingeominas emplea la tecnología GPS como un componente en el estudio de fenómenos geodinámicos. La experiencia ganada durante varios años de trabajos de campo en la toma de información, procesamiento e interpretación de datos GPS da lugar a que se realice un esfuerzo adicional para implementar una Red Nacional de Estaciones Permanentes GPS, que contribuirá al entendimiento de los fenómenos geodinámicos, en especial de aquellos asociados a deformación sísmica y volcánica. Este documento presenta aspectos generales y el panorama actual y futuro del uso de la tecnología GPS con este propósito; tecnología que ha sido y es empleada con éxito en varios países en el desarrollo de programas de investigación orientados a la prevención de desastres.

Palabras clave: GPS, Geodesia satelital, Geodinámica, Deformación tectónica.

Abstract:

Since 1988, Ingeominas has been using the GPS technology as a component of the geodynamic phenomena's study. The experience gained during several years of field work for GPS data collection, processing and interpretation, gave rise the need to make an additional effort to implement a National Wide GPS Permanent Network that will contribute to the geodynamic phenomena's understanding, especially that one related to seismic and volcanic deformation. This document presents some general aspects, about the GPS technology's current situation and its future use with that purpose; technology which has been used successfully in many countries, in the development of the research programs oriented to the disasters prevention.

Key Words: GPS, Satellite Geodesy, Geodynamics, Tectonic Deformation.

1. INTRODUCCIÓN

En 1988, mediante el proyecto internacional CASA (Central and South America GPS Project), desarrollado con el patrocinio de NASA y NSF de Estados Unidos, se inició en Colombia el uso de la tecnología satelital GPS para estudios geodinámicos. Este proyecto, con una duración de 10 años, permitió establecer una red básica en Costa Rica, Panamá, Venezuela, Colombia y Ecuador, que sirvió para determinar los valores reales de velocidades de desplazamiento de las placas tectónicas convergentes en la esquina suroriental de Centroamérica y noroccidental de Suramérica, así como analizar el comportamiento general de dos bloques propuestos: Panamá-Costa Rica y norte de los Andes.

En 1998, con el propósito de continuar las observaciones sobre la red CASA e incrementar el número de estaciones en el país, comenzó la actividad de GEORED (Geodesia: Red de Estudios de Deformación), la cual, incorporada dentro de los proyectos de geodinámica institucionales, ha permitido realizar campañas de campo que han suministrado información valiosa orientada al cálculo de velocidades de desplazamiento, al análisis de deformación intraplaca y a la estimación de desplazamientos cosísmicos, así como la operación de estaciones

permanentes, la implementación de redes para estudio de estructuras geológicas específicas y la elaboración de una propuesta de red activa de estaciones permanentes GPS.

Este documento hace una síntesis de las actividades efectuadas en Colombia, y presenta algunos resultados generales. El procesamiento de todos los datos ha sido realizado mediante el uso del *software* GIPSY-OASIS II, desarrollado por JPL-NASA. Los resultados se expresan en función del ITRF (International Terrestrial Referente Frame).

2. PROYECTO CASA Y GEORED

Colombia comenzó a incursionar en aplicaciones geodésicas satelitales a través del proyecto internacional CASA (Central and South America) GPS Project (1988-1998), que contó con la participación de científicos y entidades de cinco países: Costa Rica, Panamá, Venezuela, Colombia y Ecuador (Trenkamp et ál, 2002). En estos países se tomaron datos de forma simultánea en los años 1998, 1990 (en Ecuador), 1991 (con excepción de Venezuela), 1994, 1996 (en la mayoría de los mismos puntos) y en 1998 (en algunas estaciones en Colombia, Ecuador y Venezuela). Desde entonces, el Ingeominas, con el propósito de dar continuidad a esta actividad, ha realizado un trabajo

sistemático, estableciendo una red de mayor densidad a la cual ha denominado GEORED, concebida de manera amplia, con cobertura en las zonas volcánicas del Ruiz y Galeras. Bajo este esquema operativo se realizaron campañas de GPS en los años 1999, 2001, 2003, 2004 y 2006. Las campañas de 1999 y 2004 se efectuaron como parte de las actividades de asistencia técnica con posterioridad a la ocurrencia de un sismo; la campaña del 2003 estuvo orientada a suministrar información para el Estudio Micro-zonificación sísmica de la ciudad de Santiago de Cali, y la campaña del 2006 correspondió a la implementación de un sector de la red geodésica satelital GPS de estudio de la Falla Bucaramanga-Santa Marta.

El procesamiento de los datos GPS ha sido realizado mediante el empleo del software GIPSY-OASIS II (GPS Inferred Positioning System -Orbit Analysis And Simulation Software) en diferentes versiones (la última de ellas, la versión 5), desarrollado por el Jet Propulsión Laboratory JPL-NASA (Zumberge et ál., 1997), y el cual es empleado por el Ingeominas en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, en virtud del convenio suscrito con la agencia gubernamental NASA de Estados Unidos. Para el procesamiento de la campaña GEORED 2003 se contó con apoyo de la Universidad de Manizales, además, el procesamiento paralelo se ha realizado en el Laboratorio de Exploración Geofísica del Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Carolina del Sur en Estados Unidos. Los mapas han sido generados con el *software* GMT (Generic Mapping Tools), desarrollado en la Universidad de Hawaii, USA.

La figura 1 muestra las velocidades relativas con respecto a Suramérica de las estaciones GPS ocupadas en las campañas efectuadas entre 1991 y 1994, expresadas en ITRF96 (Trenkamp et ál., 2002). Los datos obtenidos permiten establecer la velocidad de la placa Nazca con respecto a Suramérica a partir de los vectores medidos en dos estaciones GPS localizadas sobre la Placa Nazca: la estación permanente de GPS del IGS en la isla Galápagos (GALS) y la estación en la isla de Malpelo (MALS), cuyas velocidades son del orden de 54 mm/a y 58 mm/a, respectivamente, en dirección hacia el este.

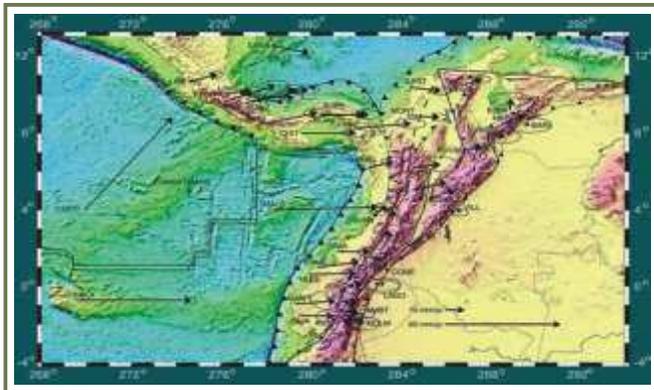


Figura 1. Velocidades relativas con respecto a Suramérica de las estaciones GPS de las campañas efectuadas entre 1991 y 1994, expresadas en ITRF96, (Trenkamp et ál., 2002).

Los resultados correspondientes a la figura 2 para el periodo 1994-2003, expresados en ITRF2000, muestran que las estaciones GPS localizadas en la Costa Pacífica, tanto al norte de Ecuador como al sur de Colombia (MUIS, ESME, y TUMA), experimentan transferencia de movimiento del bloque que subduce a la placa que está por encima, y se caracteriza por tener mayores componentes hacia el Este en sus vectores relativos de movimiento, aunque de menor magnitud que los correspondientes al vector de velocidad medido de la placa de Nazca mencionado anteriormente. Estos vectores reflejarían hipotéticamente dos modos de deformación: deformación elástica recuperable y fallamiento activo asociado con permanente acortamiento, los cuales son razones suficientes para considerar secuencias repetidas de grandes sismos. Por el contrario, las dos estaciones GPS al norte en la Costa Pacífica colombiana, BUEN y BHSL, tienen mayor valor en la componente norte.

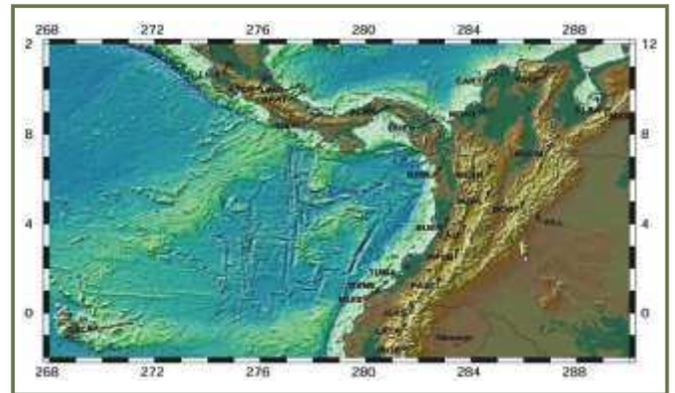


Figura 2. Mapa de velocidades 1994-2003 expresadas en ITRF2000 de las principales estaciones GPS en Costa Rica, Panamá, Venezuela, Colombia y Ecuador (Mora y Trenkamp, 2005).

3. GEORED 2003

Bajo el marco del proyecto “Microzonificación Sísmica de la ciudad de Santiago de Cali”, ejecutado por el INGEOMINAS para el DAGMA, se efectuó una campaña de campo GPS denominada GEORED 2003. Los resultados que se aprecian en la figura 3 sugieren que en forma general, a excepción del extremo sur de Colombia y el norte del Ecuador, todos los sitios se están moviendo a la velocidad del Bloque Norte de los Andes. Las diferencias en el comportamiento en las estaciones localizadas al extremo sur de Colombia y norte del Ecuador son un fuerte argumento en términos de deformación acumulativa y potencial de generación de grandes sismos en la zona de subducción.

El análisis de la información permite observar que las estaciones PAST, PPYN, CALI, MZAL y RION muestran de sur a norte aumento en el valor de la componente Este. Con respecto a la componente Norte, aunque menor, también se aprecia cierto aumento en las estaciones distribuidas de sur a norte en las estaciones PAST, PPYN y CALI, similar a MZAL y

RION, lo cual sugeriría que el Bloque de los Andes del Norte presenta características de ocurrencia de deformación en su interior, especialmente en sentido W-E. Por otra parte, se podría establecer alguna deformación cuantificable entre las estaciones CALI y PTEJ, considerando que la segunda se estaría desplazando con respecto a la primera un valor de 3,1 mm/a con un azimut de 245,2°, lo que permitiría concluir que aunque el sitio CALI, que en realidad está localizado en el CIAT de Palmira, se estaría moviendo junto con el Bloque Norte de los Andes. Este tipo de situaciones permitirían indicar que algunos esfuerzos pueden estar concentrados en fallas superficiales dentro y alrededor de la ciudad de Cali, generando potencial de sismicidad superficial en fallas, de menor magnitud que los asociados a los grandes sismos que ocurren en las zonas de subducción en la costa. (Mora y Trenkamp, 2006).

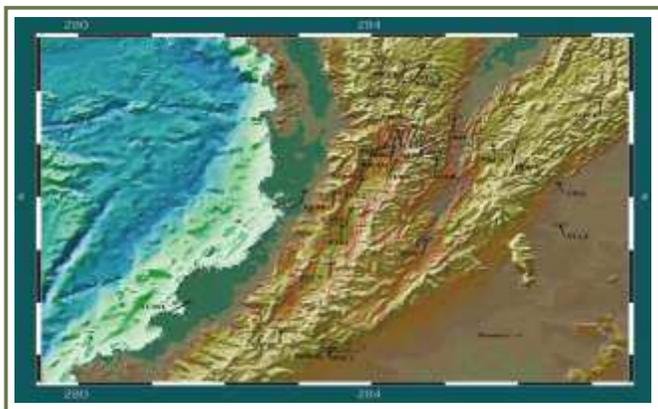


Figura 3. Desplazamientos relativos 1994-2003 expresados en ITRF2000 (Mora y Trenkamp, 2006).

4. GPS Y SISMICIDAD EN COLOMBIA

El ciclo sísmico en la trinchera colombo-ecuatoriana está caracterizado por la ocurrencia de un sismo grande ($M_w = 8,8$) en 1906, el cual rompió un segmento de longitud aproximada a 500 km. Posteriormente, otros tres sismos rompieron nuevamente el mismo segmento desde el sur hacia el norte, en 1942, 1958 y 1979, respectivamente, los cuales fueron aumentando sucesivamente su magnitud; el primero, $M_w = 7,6$; el segundo, $M_w = 7,7$, y el tercero, $M_w = 8,2$. El momento sísmico total de los sismos posteriores al sismo de 1906 corresponde a la liberación de solamente una pequeña fracción de energía, comparada con la del evento en 1906, lo cual permitió considerar que otro sismo grande, $M_w > 7,5$, tendría más del 60% de probabilidad de ocurrencia en la década de los noventa del siglo pasado (Papadimitriou, E., 1993). La secuencia de dichos eventos sísmicos, interpretada como uno de los mejores ejemplos de modelo de asperidad en la ruptura de sismo, más la amenaza sísmica que representa en esta región, permite que esta zona sea una región ideal y especial para el estudio de deformación de corteza asociada con el ciclo sísmico. El comportamiento temporal especial observado en los vectores

de las estaciones CALI y PPNY podrían indicar que en dichas estaciones la acción que ejerce la relajación viscoelástica correspondiente al sismo de 1979, probablemente, ha cesado, y ha vuelto a ganar su componente vectorial en dirección Este, como se aprecia en la figura 4.

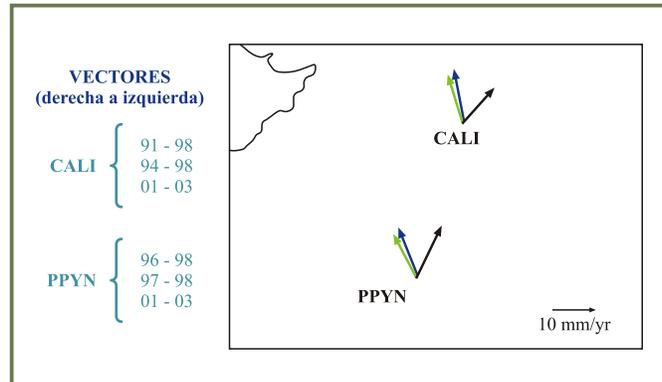


Figura 4. Comportamiento de los vectores en las estaciones CALI y PPNY que indicarían cese de la acción de los efectos de relajación viscoelástica por el sismo de 1979, establecido a partir de mediciones geodésicas satelitales (secuencia en sentido de manecillas del reloj para los periodos de tiempo señalados).

El 15 de noviembre de 2004 ocurrió un sismo, también llamado Sismo de Pizarro, de magnitud local 6.7, localizado en las coordenadas 4.81°N y 77.79°W, de profundidad superficial, según la Red Sismológica Nacional del Ingeominas (RSNC). El epicentro se ubicó a 51 km hacia el suroeste del municipio de Bajo Baudó en la Costa Pacífica del Chocó (Colombia). La magnitud M_w estimada por el Grupo de Sismología de la Universidad de Harvard fue 7,1. La localización del sismo y su mecanismo focal permiten asociarlo al segmento central de la Zona de Subducción del Pacífico Colombiano. El mayor sismo anterior registrado instrumentalmente en esta zona ocurrió el 19 de noviembre de 1991 ($M_w 7,2$), una decena de kilómetros al sureste del sismo de noviembre 15, 2004. La ocurrencia de este sismo, ampliamente sentido en el occidente colombiano, dio lugar a que el Ingeominas adelantara una serie de acciones técnicas conducentes al estudio de las características y particularidades del sismo en mención; una de ellas correspondió a la reocupación de algunas de las estaciones previamente empleadas en la campaña GEORED2003. Los resultados del procesamiento de la información tomada entre el 25 de noviembre y el 30 de diciembre de 2004 se pueden apreciar en la figura 5; las flechas azules corresponden a los valores calculados de movimiento como consecuencia del sismo, y representan el movimiento que se experimentó en cada sitio en el momento de ocurrencia del evento; las flechas negras son el movimiento total de la estación entre el 2003 y el 2004; estas flechas contienen el movimiento del sitio hasta la ocurrencia del sismo, y el movimiento del sitio como consecuencia del sismo; las flechas verdes son el movimiento esperado entre las observaciones del 2003 y la fecha de ocurrencia del sismo. Las flechas no corresponden a valores por año; son valores totales de movimiento expresados en

milímetros, cuya magnitud puede ser observada comparando con la flecha de escala de 10 mm. Todos los valores son expresados en función de ITRF2000. El movimiento esperado corresponde a los movimientos establecidos por los vectores en cada sitio para el periodo 1994-2003, y su cálculo proyectado para la observación entre el 2003 y la fecha de ocurrencia del sismo, que es aproximadamente 1,3 años para cada sitio.

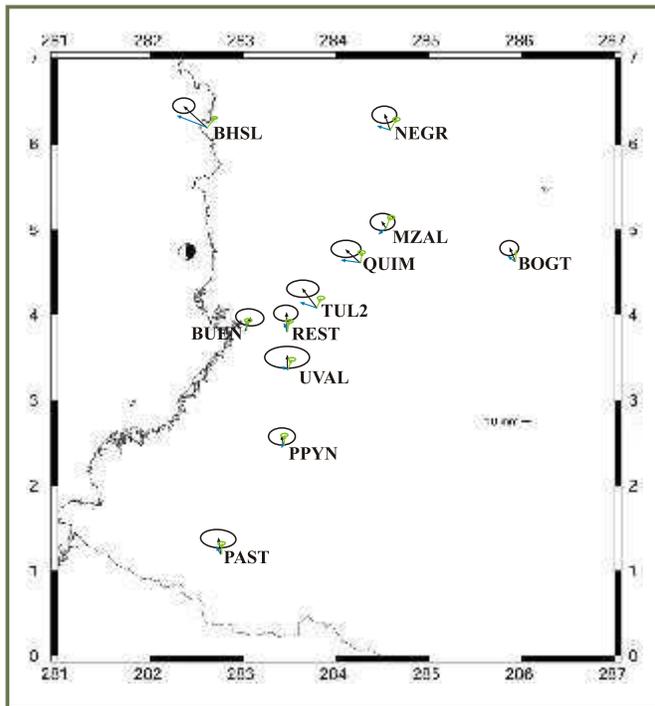


Figura 5. Resultados GPS con posterioridad al sismo de Pizarro del 15 de noviembre de 2004.

Una simple observación de la figura 5 indica, obviamente, que el sismo generó mayor efecto en las estaciones al norte de BUEN (Buenaventura) y REST (Restrepo): las estaciones BHSL (Bahía Solano), NEGR (Rionegro), BOGT (Bogotá), QUIM (Quimbaya) y TUL2 (Tuluá), las cuales muestran movimiento medible relativo al sismo con un nivel estadístico de confianza del 95%. Por otro lado, es sorprendente que la estación GPS de BUEN no fuera, en términos prácticos, afectada por el sismo. Similar apreciación podría hacerse de las estaciones localizadas al sur de BUEN: las estaciones UVAL (Universidad del Valle), PPNY (Popayán) y PAST (Pasto), en las cuales no se aprecia efecto sustancial del sismo. Aunque se debe considerar algún tipo de efecto en REST, UVAL, PPNY y PAST, así sea muy pequeño, es necesario además tener en cuenta la posibilidad de mayor afectación por parte del Sismo de Sotará del 18 de agosto de 2004 en la estación PPNY, y de la actividad del Volcán Galeras en el caso de la estación PAST.

Una probable explicación acerca del comportamiento de BUEN, al menos por ahora, podría atribuirse a que el movimiento puede haber sido absorbido por una falla o alguna

“barrera” tectónica al norte de este sitio, que ha permitido su aislamiento en la generación de deformación, o que en algún momento anterior se presentó dicha deformación, pero asísmicamente; de todos modos, las fallas al norte deben estar desempeñando un papel importante para generar este comportamiento.

5. ACTIVIDADES FUTURAS

El Ingeominas, en la actualidad, está realizando las siguientes acciones concretas en torno a la temática de aplicaciones GPS con propósitos geodinámicos:

5.1 Red Geodésica Satelital para el Estudio de la Falla Bucaramanga-Santa Marta

Bajo el marco del proyecto institucional “Modelos Geológicos”, en el 2005 se realizó la selección y construcción de los puntos que conformarían la mencionada red. En junio y julio del 2006 se realizó la primera ocupación, correspondiente a la zona de la ciudad de Bucaramanga y su zona sur. Próximamente se continuará con el mismo proceso al norte de Bucaramanga. Durante el segundo trimestre del 2007 se realizarán las segundas ocupaciones, que permitirán establecer los posibles vectores de desplazamiento, en una primera aproximación.

5.2 Red Nacional Activa de Estaciones Permanentes Geodésicas Satelitales GPS con Propósitos Geodinámicos: GEORED

El Ingeominas ha considerado que se debe ampliar el campo de acción del uso de la tecnología GPS en estudios geodinámicos. Parte del hecho de que incrementar el grado de conocimiento de los fenómenos geodinámicos, en especial de los sísmicos y volcánicos, y, por ende, reducir los riesgos por desastres asociados implican el despliegue de redes instrumentales de diverso tipo, con requerimientos importantes tales como buena densidad y cobertura, y funcionamiento adecuado a través del tiempo, que junto con la integración de otras disciplinas permita obtener una visión integral de los fenómenos observados, factor esencial en la formulación de planes de desarrollo local, departamental, regional y nacional, así como de planes de prevención y atención para este tipo de fenómenos naturales.

Las redes instrumentales de tecnología diversa permiten conocer tanto los fenómenos sísmicos como volcánicos, con el propósito de mitigar daños a la población y sus bienes, originados directa o indirectamente por dichos fenómenos. Desconocer los fenómenos naturales físicos a los que se ve enfrentada la sociedad significa no poder evaluar la amenaza y el riesgo a los que se encuentra sometida, y dificultar la toma oportuna, eficaz y confiable de medidas y decisiones pertinentes para evitar o disminuir el impacto de los desastres relacionados con dichos fenómenos.

En la actualidad, para el monitoreo e investigación de los fenómenos sísmico y volcánico en Colombia, el Ingeominas opera las siguientes redes: Red Sísmica Nacional de Colombia

(RSNC), Red Nacional de Acelerógrafos (RNA), Red Nacional de Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos y la Red Pasiva de Estaciones GPS con propósitos geodinámicos. La finalidad de estas acciones institucionales es activar las redes, lo cual significa disponer de una red de operación permanente y un sistema de captura de los datos en un centro de acopio en tiempo real, con el objeto de mejorar la capacidad técnica, científica y operativa para el análisis, interpretación y toma de decisiones en relación con fenómenos asociados al estado de deformación tectónica regional y volcánica local en el territorio colombiano, empleando tecnología satelital GPS.

Una Red Nacional Activa de Estaciones Permanentes Geodésicas Satelitales (GPS) con propósitos geodinámicos, orientada a estudiar el campo de deformación interplaca, resultante de la complejidad tectónica debido a la convergencia de las placas tectónicas de Nazca, Caribe y Suramérica en la esquina noroccidental de Suramérica, e intraplaca, asociada a desplazamientos a lo largo de fallas activas y fenómenos relacionados, permitirá un mejor desempeño para el cumplimiento de las funciones asignadas al Ingeominas.

Por otra parte, GEORED está orientada a:

- Implementar una Red Nacional Activa de Estaciones Permanentes Geodésicas Satelitales GPS con propósitos geodinámicos, con transmisión de datos a un centro de acopio de información. La Fase 1, denominada GEORED-01, corresponde al despliegue de 30 estaciones que conformarán el núcleo de la red permanente GPS, que permita cuantificar y determinar la acumulación de la deformación tectónica, conocimiento que posibilita establecer un mecanismo de alarmas previas al evento de liberación de energía que define cualquier gran sismo.

- Conformar una red móvil de adquisición de datos geodésicos satelitales GPS bajo la modalidad de campañas de campo, compuesta por sistemas satelitales GPS móviles. Los equipos móviles contemplados en la Fase 1 corresponden a 6 sistemas y constituirán la red de despliegue rápido, orientada a la realización de campañas de campo entre zonas establecidas por las estaciones permanentes adyacentes, así como para la ocupación de estaciones encaminadas a la atención geodésica postsismo de algún evento de esta naturaleza o estudios especiales, de manera similar a la operación de las redes Sismológica y Acelerográfica Portátiles, cuya utilidad se apreció en los eventos sísmicos de Tauramena (1995) y Armenia (1999), con la adquisición de datos que permitieron avanzar en la comprensión del fenómeno ocurrido. La utilización de los equipos GPS con este propósito estaría fundamentada en tres tipos de campañas: a) ocupación de largo plazo (1 año), b) ocupación de mediano plazo (6 meses) y c) ocupación de corto plazo (semanas). Este instrumental GPS sería empleado además para la ejecución de levantamientos requeridos por otras dependencias de la institución, tales como en levantamientos gravimétricos; determinación de coordenadas de estaciones sismológicas y acelerográficas; puntos de control de campo para imágenes de satélite y fotografías aéreas para elaboración de cartografía y modelos digitales de terreno; puntos de referencia locales para determinación de áreas de

titulación y explotación minera, entre otros, lo cual implica el empleo de otro tipo de antenas, por el carácter móvil de las ocupaciones. Servirá además para realizar proyectos con otras entidades.

- Generar información de desplazamientos horizontal y vertical obtenidos a partir de datos GPS de las redes permanente y la red móvil. La información obtenida permitirá establecer los valores de desplazamiento a lo largo de sistemas de fallas activas en territorio colombiano tales como Cauca-Romeral, Bucaramanga-Santa Marta, Oca y Guacáramo, entre otras; determinar la tasa probable a la cual se estarían elevando los Andes de la esquina Noroccidental de Suramérica; analizar zonas de posible subsidencia en el territorio nacional: Sabana de Bogotá, Valle del Cauca, valles del Tolima y Huila, entre otros; establecer las posibles deformaciones corticales asociadas a actividad tectónica y volcánica. Será por consiguiente insumo esencial para la determinación del estado de deformación a partir de datos geodésicos, la cual será objeto de análisis y comparación con los resultados obtenidos mediante la aplicación de otras técnicas y métodos, lo que permitirá la interpretación integral e interdisciplinaria de resultados.

- Establecer el marco de referencia geodésico multiutilitario del Ingeominas. Permitirá a la institución, en cualquier actividad que requiera de los procesos de georreferenciación, determinar coordenadas con gran precisión, y responder a las necesidades propias de las diversas capas de información temática generada por la entidad.

- Proporcionar información a otras instituciones de investigación. Dada la riqueza y el carácter multiutilitario de la información geodésica satelital GPS, los datos de la red permanente podrán ser proporcionados sin costo alguno, previas consideraciones en cuanto a su uso y reconocimiento, a otras entidades que requieren información geoespacial, tales como el Ideam, DANE, Aeronáutica Civil, IGAC, Ecopetrol, ICP y universidades, así como centros de investigación en geodinámica, estudios de la ionosfera, estudios meteorológicos, entre otros, dando mayor alcance, en cuanto a uso y aplicaciones, a la información adquirida.

Por tanto, la información de la red en el Ingeominas, desde una perspectiva geodinámica, será fuente esencial de información para establecer las velocidades relativas de desplazamientos a lo largo de fallas consideradas como activas, así como de los campos de deformación volcánica en diversos estados de crisis, y desde una perspectiva de la geomática será la base para la realización de diversas actividades de georreferenciación requeridas en variadas tareas correspondientes a la ejecución de actividades en el desarrollo de proyectos y cumplimiento de metas institucionales del Ingeominas. Los diversos tipos de datos e información que se obtengan con la operación de la red bajo esta presunción multifinilar se constituyen en insumos básicos para el cumplimiento de los objetivos estratégicos institucionales, tales como generar el Modelo Básico del Subsuelo Colombiano e identificar su potencial de recursos y amenazas geoambientales, gestionar los recursos mineros con el fin de garantizar la transparencia y oportunidad en todos los procesos administrativos y de catastro minero y diseñar y

desarrollar un Sistema de Información Geológico Minero que proporcione información confiable y oportuna.

En el exterior del Ingeominas, es el compromiso de proporcionar datos confiables, de alta calidad, que puedan servir de insumos en proyectos de investigación por otras entidades del Estado, universidades o centros de investigación, que permitan avanzar en el grado de conocimiento aplicado de acuerdo con las misiones institucionales o intereses disciplinares, con recursos provenientes del Estado y de beneficio común. Es también la forma de privilegiar las posibilidades de realizar proyectos de investigación con científicos de otros países.

6. CONCLUSIONES

Los resultados presentados muestran las bondades de la aplicación de GPS en estudios geodinámicos realizados en Colombia bajo el liderazgo del Ingeominas; no obstante que dichos resultados han correspondido a acciones puntuales, bajo la modalidad de campañas de campo con algunas limitaciones en el número de instrumentos para las mediciones, recurriendo, por tanto, al préstamo por parte de entidades internacionales. Ha faltado mayor conciencia institucional en cuanto al uso de nuevas tecnologías de gran aplicación en el mundo entero. Bajo esta perspectiva, la instrumentación GPS que se empleará estará orientada a entender la interacción de las placas tectónicas referidas, a facilitar la comprensión de los procesos físicos de los sismos que ocurren en el país y a comprender los procesos magmáticos generados por las erupciones volcánicas.

Cada tema científico asociado a estas temáticas requiere mediciones de los campos de deformación interplaca e intraplaca a escalas tanto espaciales como temporales, y bajo consideraciones de campos geodésicos lejano y cercano. Por tanto, el establecimiento de una red permanente GPS es fundamental para suministrar las observaciones requeridas para analizar los diversos problemas, pero que además privilegie la integración con otras técnicas de medición existentes. El campo de deformación superficial debe ser medido directamente con instrumentación geodésica. Esta instrumentación en el futuro debe tener suficiente cobertura para capturar todo el comportamiento del territorio nacional, con la suficiente densidad de estaciones para detectar fenómenos asociados a sismos o volcanes, por ejemplo. También se debe considerar la resolución temporal necesaria para detectar deformación transiente, en rangos asociados a eventos sísmicos como los magmáticos, a acumulación de deformación intersísmica y a relajación postsísmica.

La geodesia ha sido una de las ciencias básicas para el suministro de datos de eventos catastróficos naturales que ocurren sobre o en cercanías de la superficie terrestre. El éxito en las aplicaciones de los métodos geodésicos en el pronóstico de sismos depende de la reproducibilidad de la secuencia de eventos (Bilham, 1991). Bajo la perspectiva geofísica y geodésica, las deformaciones y los esfuerzos están directamente relacionados con los fenómenos naturales de carácter destructivo que se han presentado en Colombia a lo largo de su historia.

El desarrollo de los sistemas de posicionamiento global por satélite le brinda a la comunidad geodésica, geofísica y geológica la posibilidad de medir en tiempo real y con muy alta precisión, los movimientos tectónicos que ocurren a lo largo de las fallas, produciendo deformación que eventualmente es liberada como sismos, al igual que la inflación o deflación de los edificios volcánicos, que suelen producirse antes de la liberación de presión a profundidad, que ocurre antes de cualquier erupción volcánica. Como estos movimientos son sutiles y difíciles de detectar, se requiere tecnología de alta precisión para ser registrados y medidos.

7. REFERENCIAS

- Mora H. and R. Trenkamp (2005): Crustal Deformation Studies in Colombia, In: Proceedings Trimble Dimensions 2005 User Conference, The Mirage, Las Vegas, USA, October 23-26, 2005.
- Mora H. y R. Trenkamp (2006): Investigaciones geodésicas satelitales, en Informe final Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali, Colombia.
- Papadimitriou, E. (1993): Long-Term Earthquake Prediction Along the Western Coast of South and Central America Based on a Time Predictable Model, *Pure Appl. Geophys*, 140: 301-316.
- Trenkamp R., J. Kellogg, J. Freymueller and H. Mora (2002): Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations, *Journal of South American Earth Sciences* 15, Elsevier, Pergamon Press, 157-171.
- Trenkamp R. y H. Mora (2005): Ejemplos de aplicaciones geodésicas satelitales GPS en estudios post-sismo en Colombia. Memorias X Congreso Colombiano de Geología, Ingeominas, Bogotá, ISBN 958-701-557-6.
- Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins and F. H. Webb (1997): Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks. *Journal of Geophysical Research*, B, Solid Earth and Planets, 102: 5005-5017.