

Geodesia espacial en la gestión del riesgo: aplicaciones actuales y futuras en Colombia

Spatial geodesy in risk management: current and future applications in Colombia

Héctor Mora-Páez¹

“Cómo citar este artículo: Mora-Páez, H. (2017). Geodesia espacial en la gestión del riesgo: aplicaciones actuales y futuras en Colombia. *Análisis Geográficos*, 52, 143-153.

Resumen

La geodesia espacial, en los últimos años, se ha convertido en una herramienta fundamental para el estudio de fenómenos asociados a la dinámica terrestre, lo cual permite establecer su papel esencial en el entendimiento y la mitigación de amenazas naturales. Esto implica la conformación de redes geodésicas orientadas a estudios de geodesia tectónica y volcánica, con el propósito de conocer el estado de deformación de la corteza terrestre y sus implicaciones en las posibilidades de ocurrencia de sismos y erupciones volcánicas, así como el empleo de técnicas de interferometría (InSAR) para apoyar estos análisis. Colombia ha venido incursionando desde el Servicio Geológico Colombiano en dichas aplicaciones, abarcando desde el concepto de instrumentación geodésica espacial GNSS hasta el de geodesia de imágenes. Así, el Proyecto GeoRED ha venido implementando gradualmente una red geodésica GNSS para el estudio de la geodinámica en el territorio colombiano, mientras que el proyecto Investigación y Monitoreo de la Actividad Volcánica en Colombia ha realizado la instalación de estaciones geodésicas GNSS en varios edificios volcánicos en el país. Complementariamente, con apoyo de entidades de investigación extranjeras, se han ejecutado actividades de aplicación de interferometría de radar, abarcando incluso el estudio de la subsidencia de la Sabana de Bogotá. En este trabajo se presentan los resultados principales obtenidos hasta 2015 mediante la aplicación de las técnicas mencionadas y se ilustran los aspectos generales del uso de las señales de satélites GNSS con otros propósitos de investigación que apoyarán el avance en el conocimiento del territorio colombiano.

Palabras clave: geodinámica, GNSS, ionosfera, meteorología.

¹ Equipo proyecto GeoRED, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia. Correo: hmora@sgc.gov.co, geored@sgc.gov.co.



Abstract

Space geodesy has become, in recent years, a fundamental tool for the study of phenomena associated to earth's dynamics, which allows to establish its essential role in the understanding and mitigation of natural hazards. It implies the establishment of geodetic networks aimed to carry out tectonic and volcano geodesy, with the purpose of knowing the deformation of the earth's crust and its implications for the possibilities of earthquakes and volcanic eruptions occurrence, as well as the use of interferometry techniques (InSAR) to support these analyzes. In Colombia, the Colombian Geological Service gradually has been working in such applications, from the concept of GNSS Space Geodetic instrumentation as imaging geodesy. The GeoRED Project has been gradually implementing a GNSS geodetic network for the study of the geodynamics in the Colombian territory; at the same time, the Research and Monitoring of Volcanic Activity in Colombia has installed some GNSS geodetic stations in several volcanic edifices in the country. In addition, with the support of foreign research institutions, some activities have been carried out on the application of interferometry radar, covering even the study of the land subsidence of the Sabana de Bogotá. Preliminary results obtained until now are showed, using the techniques mentioned above. It is being also illustrated the general aspects of the use of GNSS satellite signals with other research purposes, in order to support the advances in the knowledge of the Colombian territory.

Key words: *geodynamics, GNSS, ionosphere, meteorology.*



Introducción

Para estudiar la deformación de la corteza terrestre en Colombia a partir de datos geodésicos, la primera tarea de un proyecto de geodesia espacial es la estimación de las velocidades relativas, no solo de las placas tectónicas que convergen en la esquina noroccidental de Suramérica, sino también a lo largo de fallas activas, lo cual requiere instalar estaciones permanentes de operación continua, así como estaciones de campo. De esta manera, es posible analizar la tectónica activa actual, importante en términos de la doctrina geológica del uniformitarismo, bajo la condición que “el presente es la clave del pasado”, lo cual significa que los procesos geológicos actuales, al ocurrir a las mismas tasas de movimiento observadas hoy en día y de la misma manera, son responsables de todas las características geológicas de la Tierra, aspecto fundamental para entender la evolución geológica del territorio colombiano.

Bajo esta premisa surge GeoRED, que corresponde a la denominación corta adoptada para el proyecto Implementación de la Red Nacional de Estaciones Geodésicas Espaciales GPS con Propósitos Geodinámicos, y es también el acrónimo de Geodesia: Red de Estudios de Deformación, como aplicación específica en el estudio y análisis de la deformación de la corteza terrestre en Colombia (Mora, 2006). GeoRED es un proyecto de investigación e innovación tecnológica basado en instrumentación geodésica espacial que comenzó en el 2007, en el entonces Instituto Colombiano de Geología y Minería

(Ingeominas), actual Servicio Geológico Colombiano (SGC), como resultado de consideraciones de pertinencia técnica, científica, social, económica y política, orientado a incrementar el grado de conocimiento de la geodinámica en la esquina noroccidental de Suramérica. Es una herramienta esencial para estudiar la deformación de la corteza terrestre, y vital en el análisis de la deformación interplaca e intraplaca, el ciclo sísmico actual, las erupciones volcánicas y los movimientos de masa, entre otros, los cuales son insumos indispensables en la gestión del riesgo por fenómenos naturales.

El Estado colombiano, a través del Servicio Geológico Colombiano y con el apoyo de la cooperación internacional, ha hecho grandes esfuerzos para aumentar la capacidad técnica y científica de obtención, procesamiento, análisis e interpretación de datos relacionados con la geodinámica del territorio, y está dando pasos bien cimentados para mostrar las amenazas potenciales mediante ejercicios de modelamiento. Así, el despliegue de redes instrumentales de sismología de movimiento fuerte, geodesia espacial GPS, con buena densidad en distribución, funcionamiento adecuado a través del tiempo y calidad de datos, con alcance en estudios tectónicos y volcánicos, permitirá avanzar en el conocimiento de los fenómenos geodinámicos mediante una visión multidisciplinaria de los fenómenos que son un factor clave en la formulación de planes locales, departamentales, regionales y nacionales para la gestión del riesgo cuando se trata de fenómenos naturales de alto impacto en la vida, los bienes y la infraestructura.



Estado actual de la red geodésica del Servicio Geológico Colombiano

El proyecto GeoRED está basado en la aplicación de conceptos fundamentales de geodesia espacial de posicionamiento de alta precisión y en geodesia de imágenes para el estudio de la deforma-

ción de la corteza terrestre en el territorio colombiano. Presta apoyo y ha empezado a incursionar en el desarrollo del concepto de sensoramiento remoto para estudios atmosféricos, mediante la utilización del sistema global de navegación por satélite (GNSS, por la sigla en inglés de Global Navigation Satellite System), término que abarca el conjunto de tecnologías

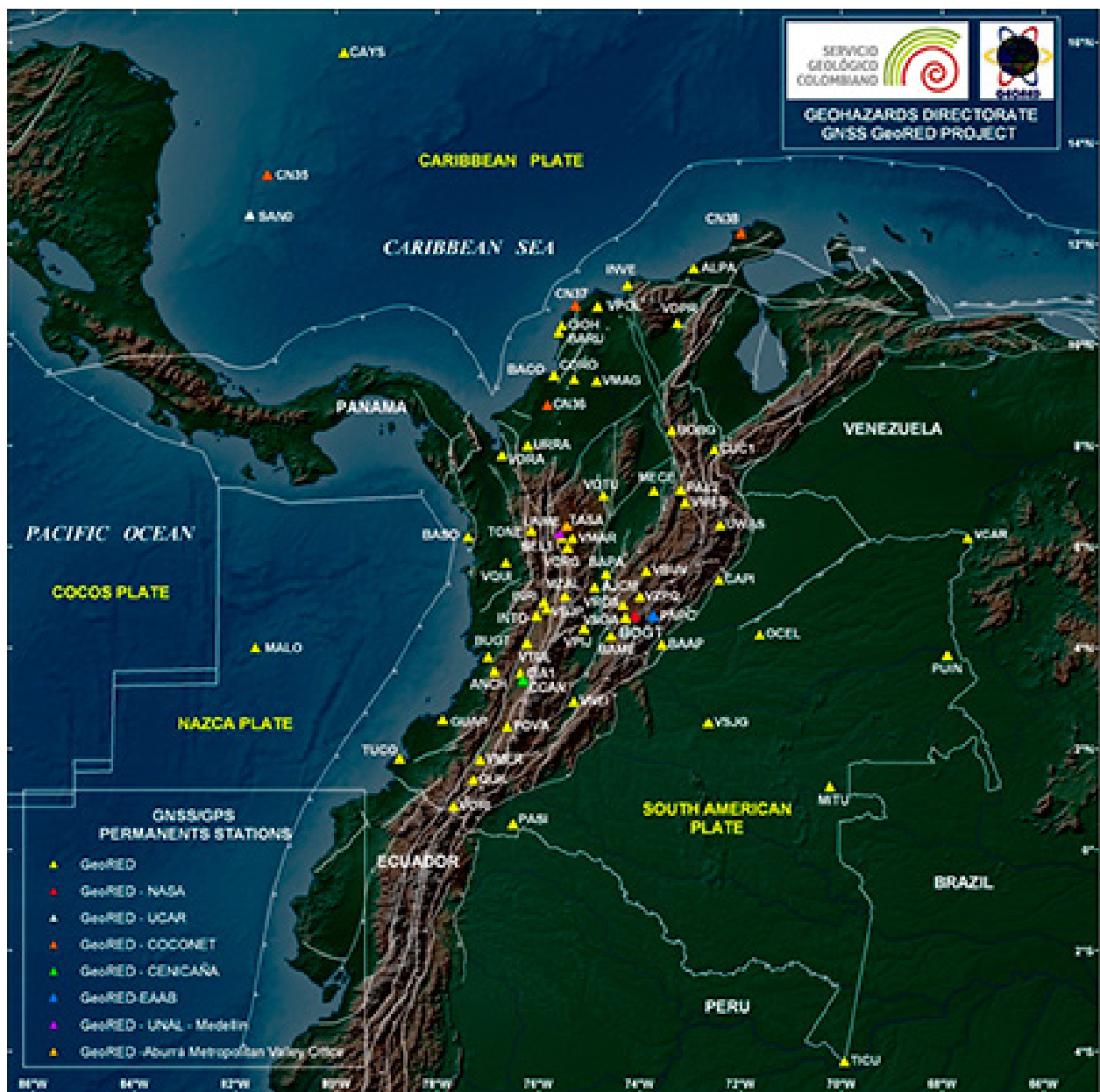


Figura 1. Mapa de localización de estaciones CORS
Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2015).

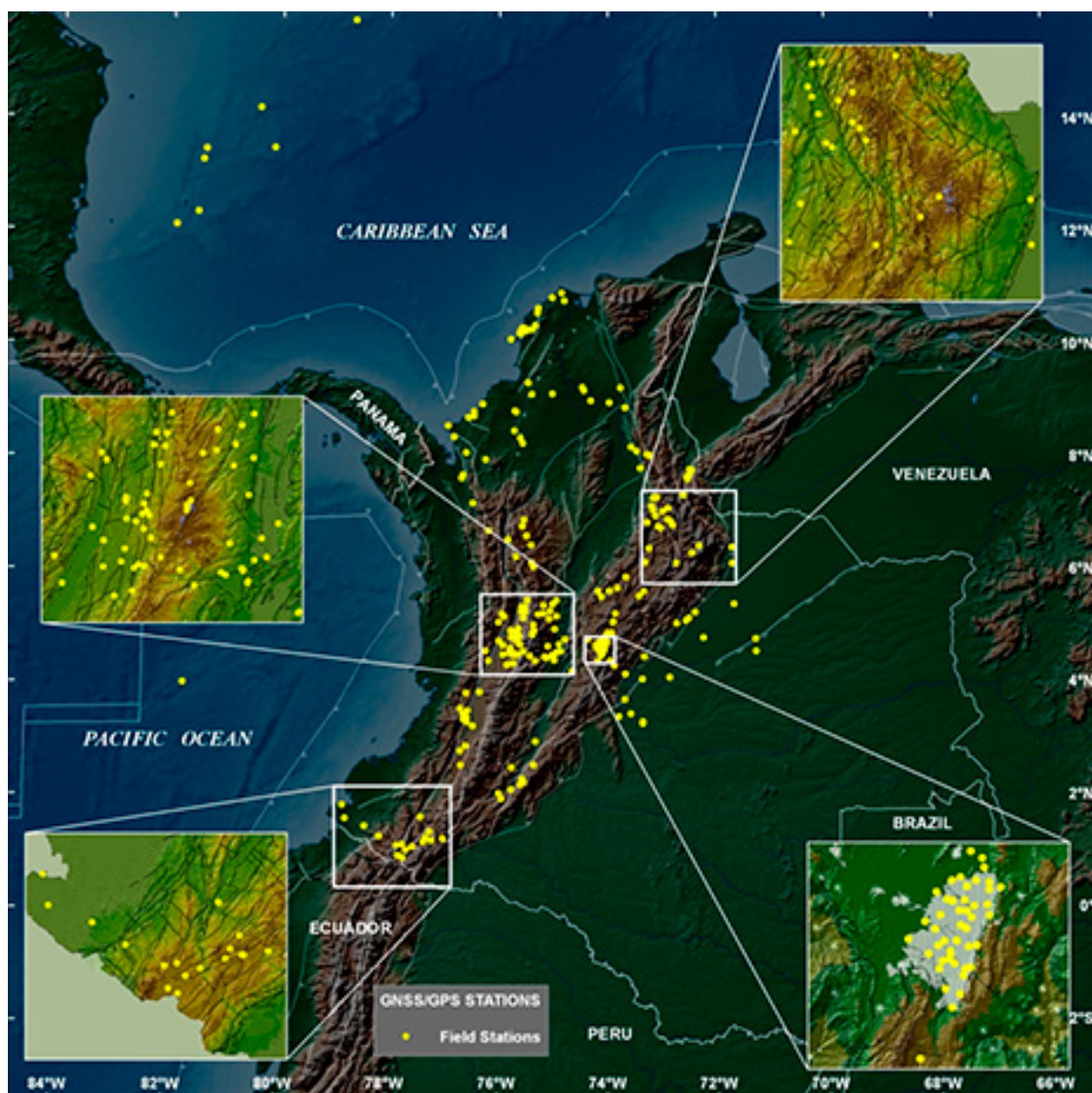


Figura 2. Mapa de localización de estaciones de la red pasiva
Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2015).

actuales de posicionamiento global existentes, así como las que sean desplegadas en el futuro.

GeoRED corresponde a la instrumentación geodésica orientada a entender la interacción de las placas tectónicas que convergen en la esquina noroccidental de Suramérica (Nazca, Caribe y Suramérica)

y dos bloques propuestos (Panamá y Norte de los Andes), las bases físicas de los sismos que ocurren en el país y los procesos magmáticos generados por las erupciones volcánicas.

La evolución reciente de la deformación está estrechamente ligada a la definición de la actividad sísmica. Los estudios



de deformación postsísmica suministran probablemente el mejor constreñimiento en la reología de la corteza y el manto superior, donde es crucial estudiar las fuerzas que generan los sismos y la deformación en los límites de placa en general. La ocurrencia de sismos y de erupciones volcánicas puede estar conectada en algunos casos, y estos fenómenos representan también procesos en un amplio rango de escalas, desde la completa zona del límite de placa hasta la zona núcleo de un sismo.

La red geodésica de GeoRED está basada en la operación de dos tipos de redes: activa y pasiva. La red activa (figura 1) está compuesta por 71 estaciones permanentes GPS/GNSS de operación continua, comúnmente denominadas CORS por la sigla en inglés de Continuously Operating Reference Stations.

La red pasiva (figura 2) está constituida por 301 monumentos construidos en campo que permiten, bajo la modalidad de campañas episódicas, la toma de datos con instrumental geodésico de alta precisión.

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 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 y como inflación o deflación de los conos volcánicos que suele producirse antes de la liberación de presión a profundidad

previa a cualquier erupción volcánica. Como estos movimientos son sutiles y difíciles de detectar, se requiere tecnología de alta precisión para registrarlos y medirlos.

En este sentido, es importante destacar cómo a través del proyecto Inventario y Monitoreo de Geoamenazas y Procesos en las Capas Superficiales de la Tierra, en lo concerniente a investigación y monitoreo, y bajo el concepto de *geodesia volcánica*, se han instalado 15 estaciones GPS con el fin de realizar estudios de deformación, aspecto fundamental en la evaluación del estado de la actividad volcánica.

El procesamiento de los datos de las estaciones del proyecto GeoRED, tanto CORS como de campo, es realizado mediante el software GIPSY-OASIS II (por la sigla en inglés de GNSS Inferred Positioning System Orbit Analysis And Simulation Software), v. 6.3, desarrollado por el Jet Propulsion Laboratory (JPL), el California Institute of Technology (Caltech) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por su sigla en inglés), que es empleado por el Servicio Geológico Colombiano en virtud de convenio de cooperación internacional.

El procesamiento es diario, lo que permite la generación de series de tiempo geodésicas. A partir de dicho procesamiento, se generan las velocidades de desplazamiento de cada una de las estaciones. La figura 3 muestra los vectores de velocidad para las estaciones CORS que tienen observación superior a tres años, lo cual garantiza una alta confiabilidad de los resultados. Estos vectores están expresados en función del marco de referencia global International Terrestrial Reference Frame ITRF2008.

También se ha avanzado en la integración de datos de geodesia espacial y de geodesia de imágenes (interferometría de radar) como aplicación específica en el estudio de la subsidencia de la Sabana de Bogotá. Igualmente, en trabajo conjunto con la Dirección General Marítima, se está haciendo la conexión geodésica de los mareógrafos que dicha entidad ha instalado.

GeoRED ha incursionado además en estudios de la atmósfera en dos de sus componentes, la ionosfera y la troposfera. En el primero, toma en consideración que la naturaleza dispersiva de las cargas eléctricas de la ionosfera infiere un retraso en la señal GPS observada, causando errores en las mediciones de rango y, subsecuentemente, errores en el posicionamiento.

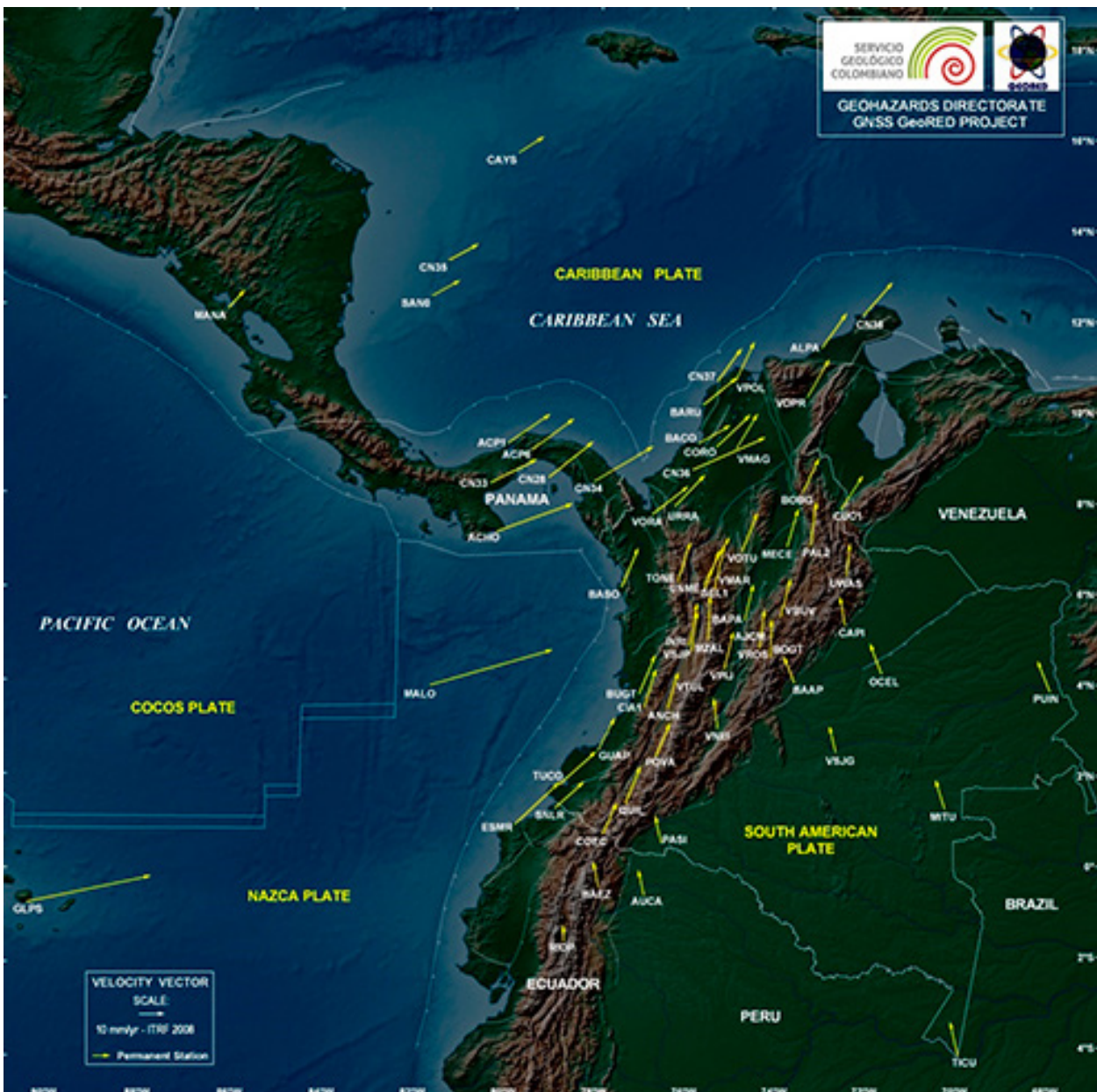


Figura 3. Vectores de velocidad CORS expresados en ITRF2008
Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2015).



La señal GPS, al igual que cualquier onda electromagnética, es afectada por la carga eléctrica del plasma ionizado dispuesto en la ionosfera y en la plasmosfera; para el análisis respectivo se realiza el cálculo del contenido total de electrones (TEC). En el segundo, el fundamento estriba en las observaciones de vapor de agua en una red superficial de receptores de posicionamiento global GPS, bajo la consideración de que las señales GPS, como frecuencias continuas de radio, son retardadas por la atmósfera debido a la refracción atmosférica y la desviación de la señal (curvatura); este “ruido” de origen atmosférico es una fuente de información para las ciencias atmosféricas y la meteorología.

Cooperación

Los logros y resultados que el proyecto GeoRED ha alcanzado están soportados en la cooperación tanto internacional como nacional. Se destaca el apoyo de instituciones tales como la NASA, JPL, Caltech y Unavco, así como de las universidades de Carolina del Sur, Colorado, Nevada, Boston College y Estatal de Pensilvania, en Estados Unidos, y de la Universidade da Beira Interior, en Portugal, a través del Laboratorio de Análisis de Geodesia Espacial y Terrestre. También es importante destacar el intercambio de datos con nuestros países vecinos, como Venezuela, con la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Ecuador, a través del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica de Quito, la Autoridad del Canal de Panamá y el Radio-Observatorio de Jicamarca del Instituto Geofísico del Perú.

En el ámbito nacional, se destaca la colaboración de entidades como la Aeronáutica Civil, la Fuerza Aérea Colombiana, la Armada Nacional, la Dirección General

Marítima, Cenicaña, el Ingenio Risaralda, la Gobernación de Caldas (Aeropuerto La Nubia), el Municipio de Pereira (Aeropuerto Matecaña), la Empresa Hidroeléctrica de Urrá, HOCOL, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, el Cerrejón, Brinsa, el municipio de Guicán, la Gobernación de Boyacá, Parques Nacionales Naturales, la Empresa de Energía Eléctrica del Pacífico, las corporaciones autónomas regionales de Caldas y Risaralda, las universidades Nacional y del Valle, a través del Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano, y del Quindío, con el Observatorio Sismológico del Quindío, así como de los propietarios de predios privados, entre otros.

Conclusiones

Una red geodésica espacial permite realizar una validación tectónica de modelos geológicos estructurales. La integración de información geodésica con la obtenida por medio de otras técnicas y disciplinas permite conocer el estado de deformación y el campo de esfuerzos regional actual, además de proporcionar información básica que sirve de referencia para estudios aplicados a la geología económica a partir del conocimiento de los ambientes geológicos. En Colombia, el Servicio Geológico Colombiano, a través del proyecto GeoRED, ha avanzado sustancialmente en la aplicación de tecnología geodésica espacial con propósitos geodinámicos. Así, se tiene el campo de velocidades geodésicas del territorio colombiano y se han empezado a adelantar acciones en el modelamiento de la deformación de la corteza terrestre bajo la aproximación de bloques geológicos, como paso inicial para determinar las tasas de deformación.



El creciente aumento del espectro de aplicaciones de la tecnología GPS en diversas ramas de las geociencias permite orientar muchas acciones al “estudio integral de las sinergias naturales y humanas en la interfase geosfera-biosfera-atmósfera” (Ingeominas, 2010, p. 17), lo que le da un valor agregado adicional por su potencial contribución a proyectos de importancia e impacto global. Bajo estas consideraciones, las aplicaciones del estudio de las señales provenientes de los satélites GNSS para estudios de la atmósfera (ionosfera y troposfera) crecen gradualmente, investigaciones en las cuales GeoRED ha venido igualmente incursionando.





Bibliografía

Bibliografía citada

Mora, H. (2006). *Red Nacional de Estaciones Geodésicas Satelitales GPS con propósitos geodinámicos*. Propuesta de proyecto presentada al Ministerio de Minas y Planeación Nacional, Documento del Banco de Programas y Proyectos de Inversión Nacional (BPIN).

Ingeominas (2010). Proyecto GeoRED: nueva herramienta de alta precisión para estudiar la deformación de la corteza terrestre en Colombia. *Ingeominas al Día*, 2, 14-18.

Bibliografía consultada

Allmendinger, R., Loveless, J., Pritchard, M. & Meade, B. (2009). From decades to epochs: Spanning the gap between geodesy and structural geology of active mountain belts. *Journal of Structural Geology*, 31, 1409-1422.

Cai, J., Wang, J., Wu, J., Hu, C., Grafarend, E. & Chen, J. (2008). Horizontal deformation rate analysis based on multiepoch GPS measurements in Shanghai. *Journal of Surveying Engineering*, 134(4), 132-137.

Cong, D. C. & Feigl, K. L. (1999). Geodetic measurement of horizontal strain across the Red River fault near Thac Ba, Vietnam, 1963-1994. *Journal of Geodesy*, 73, 298-310.

Delacou, B., Sue, C., Nocquet, J. M., Champagna, J. D., Allanic, C. & Burkhard, M. (2008). Quantification of strain rate in the Western Alps using geodesy: comparisons with seismotectonics. *Swiss Journal of Geosciences*, 101(2), 377-385.

Guohua G., Meng Guojie M. & Wuxing W., (2011). Anomalous crustal movements before great Wenchuan earthquake observed by GPS. *Geodesy and Geodynamics* 2(2), 13-22.

Hack, M., Malservisi, R. & Wdowinski, S. (2009). Strain Rate Patterns from Dense GPS Networks. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1177-1187.

Kobayashi, D., LaFemina, P., Geirsson, H., Chichaco, E. Abrego, A., Mora, H. & E. Camacho. (2014). Kinematics of the western Caribbean: Collision of the Cocos Ridge and upper plate deformation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(5), 1671-1683.



- LaFemina, P., Mora, H., Kobayashi, D. & Fernandes, R. (2014). Deformation of the Western Caribbean and Northwestern South America From GPS Geodesy. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 16, p. 13436, Vienna, Austria.
- McCaffrey, R. (2000). Crustal block rotations and plate coupling. In: S. Stein & J. Freymueller (Eds.) *Plate Boundary Zones* (pp. 101-122). AGU Geodynamics Series 30. Recuperado de http://web.pdx.edu/~7Emccaf/pubs/mccaffrey_blocks_agu_2002.pdf.
- Meade, B. & Loveless, J. P. (2009), Block Modeling with Connected Fault-Network Geometries and a Linear Elastic Coupling Estimator in Spherical Coordinates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(6), 3124-3139.
- Mora, H. (2005). Aplicaciones geodésicas satelitales en Ingeominas, Colombia. *Boletín del Proyecto Multinacional Andino PMA:GCA*, 5(5), 2.
- Plag, H. P., Gross, R. & Rothacher, M. (2009). Global Geodetic Observing System for Geohazards and Global Change. *Geosciences, BRGM's Journal for a Sustainable Earth*, 9, 96-103.
- Rocken, C., Ware, R., Van Hove, T., Solheim, F., Alber, C. & Johnson, J. (1993). Sensing Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System. *Geophys. Res. Lett.*, 20, 2631-2634.
- Sanso, F. (Ed.) (2005). *A Window on the Future of Geodesy*. Proceedings of the IAG, IAG General Assembly, Sapporo, Japan, June 30-July 11, 2003. Germany: Springer-Verlag.
- Tregoning, P., Boers, R., O'Brien, D. & Hendy, M. (1998). Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations. *J. Geophys. Res.*, 103, D22, 28701-28710.
- Yahya, M. F. & Kamarudin, M. N. (2008). *GPS for Meteorology Applications in Malaysia*. International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT 2008). Recuperado de https://www.academia.edu/8988216/GPS_for_Meteorology_Applications_in_Malaysia.

