

Instalación de estaciones geodésicas de monitoreo continuo para fines geocientíficos en el margen caribe sureste

Franck Albert Audemard¹; Carlos Reinoza^{1,2*}; Ricardo López¹; Karl Feaux³; François Jouanne⁴

doi: <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n2-2020001> 

Forma de citar: Audemard, F.A.; Reinoza, C.; López, R.; Feaux, K.; Jouanne, F. (2020). Instalación de estaciones geodésicas de monitoreo continuo para fines geocientíficos en el margen caribe sureste. *Boletín de Geología*, 42(2), 15-30. doi: 10.18273/revbol.v42n2-2020001.

Resumen

Desde inicios del año 2015 y en el marco del proyecto Red de Observación de Operación Continua GPS del Caribe (COCONet) se han instalado seis estaciones de observación continua del Sistema de Posicionamiento Global (cGPS) y meteorología en el territorio venezolano (El Baúl-CN41, Quebrada Arriba-CN39, Isla de Aves-CN49, Los Roques-CN42, Isla de Margarita-CN44 e Isla La Blanquilla-CN43). Adicionalmente, se instalaron otras dos estaciones geodésicas: Saucedo-SAU0 y La Pica Arriba de Catuaro-PAC0, así como un extensómetro a través de la falla El Pilar como parte del proyecto VENCREEP (ANR-Francia). En tal sentido, en el marco del proyecto Tsunami FONACIT 2013000361 ya han sido adquiridas siete estaciones permanentes de nueva generación de las 15 previstas, las cuales serán estratégicamente ubicadas para densificar la red existente en el corto plazo. Estas estaciones permitirán comprender mejor la geodinámica local y regional con implicaciones importantes en el estudio de la amenaza sísmica.

Palabras clave: cGPS; Red geodésica; Caribe; Amenaza sísmica.

Installation of continuously monitoring geodetic stations for geoscience research at the south Caribbean margin

Abstract

Since 2015 six new continuous Global Positioning System (cGPS) and meteorological stations have been installed in Venezuela as part of the Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network (COCONet) project (El Baúl-CN41, Quebrada Arriba-CN39, Isla de Aves-CN49, Los Roques-CN42, Isla de Margarita-CN44, and Isla La Blanquilla-CN43). Almost simultaneously, in the framework of the VENCREEP project (ANR-France), a survey composed of two geodetic stations (Saucedo-SAU0 and La Pica Arriba de Catuaro-PAC0) and one creepmeter was installed to study the Pilar Fault. Also, new seven cGPS stations of fifteen planned were acquired through the Tsunami project (FONACIT 2013000361), aiming at densifying the current network. The whole set of stations will improve our knowledge about the local and regional geodynamics. We are sure that the results will have implications for seismic hazard studies.

Keywords: cGPS; Geodetic network; Caribbean; Seismic hazard.

¹ Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Caracas, Venezuela. faudemard@funvisis.gob.ve; (*) reinoza@cicese.mx; rlopez@funvisis.gob.ve

² Departamento de Sismología, División de Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.

³ UNAVCO, Inc. Geodetic Infrastructure, 6350 Nautilus Drive, Boulder, Colorado, USA. kfeaux@unavco.org

⁴ Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre, Grenoble, France. francois.jouanne@univ-smb.fr

Introducción

La geodinámica ligada al territorio venezolano ha sido estudiada por casi tres décadas con el uso de mediciones geodésicas precisas con el Sistema de Navegación Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System* - GNSS). Las mediciones llevadas a cabo en las diferentes iniciativas en suelo venezolano han seguido la metodología de adquisición de datos por ocupaciones temporales o comúnmente conocidas como campañas (Drewes *et al.*, 1989, 1995; Kellogg y Dixon, 1990; Pérez *et al.*, 2001a, 2001b, 2011; Baumbach *et al.*, 2004; Jouanne *et al.*, 2011; Reinoza, 2014; Reinoza *et al.*, 2015). Básicamente, la adquisición de los datos ha consistido en la instalación temporal de receptores geodésicos doble frecuencia en sitios predeterminados, durante periodos de unas pocas horas en varias sesiones diarias hasta un máximo de 120 horas continuas de medición, e incluso, algunos puntos han sido seleccionados como estaciones base. Un ejemplo, es la estación AUD0 que fue utilizada como estación permanente durante las campañas de medición 2003, 2005 y 2013 en el nororiente de Venezuela. Desde un punto de vista muy general, los datos geodésicos han permitido determinar el campo de velocidades geodésicas para gran parte del país y determinar tasas de movimiento de fallas geológicas (*e.g.* fallas de Boconó y El Pilar), así como contribuir en el cálculo del desplazamiento relativo entre las placas Caribe y Suramérica (DeMets *et al.*, 2000; Pérez *et al.*, 2001a, 2001b). No obstante, la poca densidad de estaciones a lo largo del territorio ha limitado los resultados, la velocidad de las fallas no ha sido acotada en toda su extensión y los parámetros estimados en estudios previos presentan ciertas incertidumbres que requieren ser mejor definidos con nuevos datos geodésicos (Pérez

et al., 2011, 2018; Jouanne *et al.*, 2011; Reinoza *et al.*, 2015; Mogollón y Reinoza, 2018). Además, existe un número importante de fallas que aún no han sido objeto de estudio aplicando técnicas de geodesia espacial. Para el estudio de la cinemática de fallas en Venezuela las recopilaciones basadas en neo-tectónica, paleo-sismología, sismología entre otras disciplinas (*e.g.* Audemard *et al.*, 2000) siguen siendo la principal fuente de consulta.

Recientemente, los avances tecnológicos han permitido el establecimiento de redes de monitoreo permanente y continuo con el fin de obtener periodos de observación más completa que la permitida por las observaciones esporádicas en campañas de adquisición. Se ha comprobado la relación entre el incremento tiempo de observación y el aumento de la precisión del vector posición (Eckl *et al.*, 2001). Es por ello, que en este trabajo nos enfocamos en presentar los avances relacionados con la instalación de estaciones de observación continua (cGNSS) en Venezuela a la fecha. A partir del año 2015 se han instalado un total de 8 estaciones de monitoreo continuo (Figura 1 y Tabla 1). Por un lado, en el marco del proyecto Red de Observación de Operación Continua GPS del Caribe (*Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network* - COCONet), se han instalado seis estaciones de observación geodésica y meteorológica. Y adicionalmente, se instaló un arreglo de dos estaciones de monitoreo continuo (Figura 1 y Tabla 1). Más un extensómetro a través de la falla El Pilar como parte del Proyecto VENCREEP (*VEN* por Venezuela y *CREEP* por el término inglés, cuya traducción castiza es reptación) financiado por la Agencia Nacional de la Investigación de Francia (*Agence Nationale pour la Recherche* - ANR).

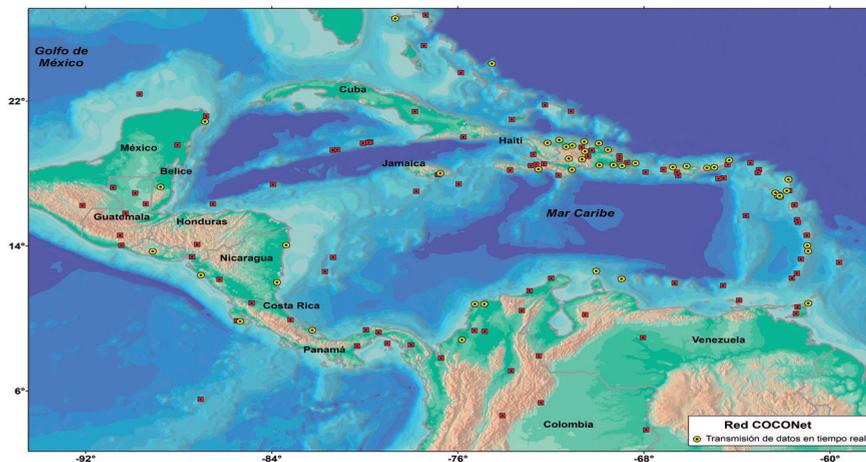


Figura 1. Distribución espacial de las estaciones COCONet. Modificado de <https://coconet.unavco.org>. En círculos amarillos se indican las estaciones que cuentan con transmisión de datos en tiempo real y en recuadros rojos el resto de estaciones.

Red de monitoreo del Caribe

La red COCONet fue impulsada con el propósito de desarrollar una infraestructura geodésica y atmosférica de gran escala en el Caribe (Braun *et al.*, 2012). El objetivo principal de esta red es ser la columna vertebral para una amplia gama de investigaciones (*e.g.* Anthes *et al.*, 2015; Braun *et al.*, 2017), así como responder interrogantes relevantes en materia de geo-amenazas (*e.g.* Pérez *et al.*, 2018; Ellis *et al.*, 2018, 2019). La red está compuesta de 145 estaciones, subdividas en: (1) 57 estaciones COCONetCore que incluyen todos los sitios que el Consorcio Universidad NAVSTAR (*University NAVSTAR Consortium* - UNAVCO) ha instalado y mantiene actualmente, (2) 25 estaciones repotenciadas (COCONetRefurb) que incluyen todos los sitios operados por instituciones colaboradoras (*University Corporation for Atmospheric Research* - UCAR; Geomedición, Instrumentos y Sistemas, S.R.L. de República Dominicana; Universidad Nacional de Costa Rica, Gobierno de Islas Cayman, entre muchas otras), en donde UNAVCO ha provisto insumos para actualizar los equipos y actualmente financia operaciones y mantenimiento, y por último (3) 63 estaciones operadas (COCONetPartner) por instituciones aliadas con acceso abierto y gratis a toda la comunidad geodésica global.

Del mismo modo, COCONet suministra datos meteorológicos superficiales. Los productos atmosféricos incluyen observaciones de temperatura, presión, humedad relativa, velocidad y dirección del viento e intensidad de precipitación. Así como, estimaciones de vapor de agua troposférico a partir de GPS en la forma de retraso de humedad del zenit (*Zenit Water Delay* - ZWD). Esta información es procesada por los Centros de Análisis del Servicio GAGE (*Geodesy Advancing*

Geosciences and EarthScope - GAGE) diariamente para estimar posiciones topocéntricas de las estaciones geodésicas.

Todos los datos de las estaciones COCONet están disponible en los sistemas de distribución de datos y metadatos, donde se incluyen los servicios web: Interfaz de Archivos de Datos (*Data Archive Interface* - DAI) y Centro de Archivos Geodésicos Continuos (*Geodetic Seamless Archive Center* - GSAC). Los datos en tiempo real están disponibles para un conjunto menor de estaciones COCONet a través del sistema de tiempo real de UNAVCO, el cual está disponible para usuarios registrados. El Proyecto COCONet adicionalmente proporcionó apoyo para el desarrollo de “*Dataworks*” y para tres Centros Regionales de Datos (*Regional Data Centers* - RDCs), seleccionados a través de un concurso de propuestas: (1) el Instituto Caribe para Meteorología Hidrología, (2) el Servicio Geológico Colombiano y (3) el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Los datos pueden ser igualmente descargados en cualquiera de los tres centros regionales, e igualmente todos los datos de las estaciones COCONet son analizados por el Centro de Análisis GAGE, incluyendo productos como series de tiempo de posición y soluciones de velocidad y posición, disponibles en los servicios web mencionados (Mattioli y Feaux, 2016; Herring *et al.*, 2016). En 2019, UNAVCO impulsó un proyecto internacional denominado Red de las Américas (*Network of the Americas* - NOTA), que integra la red COCONet, junto con estaciones ubicadas en Alaska, Estados Unidos continental y Puerto Rico pertenecientes al Observatorio de Limite de Placa EarthScope (*the EarthScope Plate Boundary Observatory* - PBO), y las estaciones en México de TLALOCNet.

Tabla 1. Estaciones geodésicas permanentes en Venezuela.

Estación	Muestreo (s)	Nombre	Receptor	Antena	Latitud	Longitud	Datos desde
COCONet							
CN39	15	Quebrada Arriba	Trimble NetR9	TRM59800.00	10,21	-70,52	20 Ene 2015
CN41	30	El Baúl	Trimble NetR9	TRM59800.00	8,94	-68,04	18 Ene 2015
CN42	15	Los Roques	Trimble NetR9	TRM59800.00	11,95	-66,68	29 Oct 2015
CN43	15	I. La Blanquilla	Trimble NetR9	TRM59800.00	11,82	-64,60	14 Ago 2016
CN44	15	I. de Margarita	Trimble NetR9	TRM59800.00	11,00	-63,91	14 Jun 2016
CN49	15	I. de Aves	Trimble NetR9	TRM59800.00	15,67	-63,62	13 Abr 2016
VENCREEP							
PAC0	30	P. A. de Catuaro	Trimble NetR9	TRM55971.00	10,62	-63,53	11 JUL 2015
SAU0	30	Saucedo	Trimble NetR9	TRM57971.00	10,42	-63,46	10 JUL 2015

Estaciones en Venezuela

La representación venezolana constituida por investigadores de la Universidad Simón Bolívar y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) se involucró en este proyecto desde las primeras reuniones que se llevaron a cabo en Puerto Rico (febrero de 2011) y Trinidad (junio de 2011), enfocadas en el desarrollo y perfeccionamiento del plan para la instrumentación de los sitios COCONet. Cabe resaltar que Venezuela había sido inicialmente desterrada del proyecto por las diferencias geopolíticas que los altos gobiernos de Venezuela y Estados Unidos de Norteamérica mantenían. Es sólo la intervención de científicos de estas instituciones, quienes logran la reincorporación de Venezuela al proyecto, tal como contemplaba la formulación inicial del proyecto presentada por UNAVCO ante la Fundación Nacional de Ciencia (*National Science Foundation* - NSF). En marzo de 2012, se realizó una misión de reconocimiento conjunta UNAVCO-FUNVISIS de los posibles lugares de instalación en territorio venezolano. De esta actividad se generaron reportes para cada uno de los futuros sitios donde se incluía (1) una visión de conjunto, (2) información general del lugar como localización, datos de contactos locales, mapas de ubicación, descripción del recorrido hasta el punto e información sobre solicitud de permisos, (3) infraestructura del sitio: tipo de alimentación eléctrica (uso de celdas solares, corriente continua, etc.) y vista del cielo, (4) acceso y seguridad del sitio, (5) aspectos relacionados con la construcción de la estación (disponibilidad de agua en sitio, tomas de corriente, espacio para perforación, accesibilidad, modificaciones requeridas, etc.), (6) estrategia de comunicación propuesta (celular, satélite, radio, etc.), y finalmente se verificó (7) la ausencia de factores que obstruyeran los datos eólicos o distorsionaran las lecturas de temperaturas (instrumentación meteorológica). La selección de sitios está ligada directamente a la construcción de la monumentación, uno de los aspectos más importantes de la instalación geodésica. En la actualidad, una gran variedad de tipos de monumentos es utilizada en las redes geodésicas a nivel mundial; donde la selección de sitios y monumentos debe hacer énfasis en la seguridad ante el vandalismo, estabilidad geológica del terreno y ubicación desde el punto de vista de la propia técnica geodésica (Combrinck y Schmidt, 1998).

Las actividades en Venezuela iniciaron con la instalación de la estación CN41, localizada en las instalaciones

del Hato Piñero, cercano a la población de El Baúl, estado Cojedes. La segunda estación CN39, se ubicó en las cercanías a la población de Quebrada Arriba, estado Lara; ambas ubicadas próximas a estaciones sismológicas de banda ancha de FUNVISIS, a fin de tratar de aprovechar la infraestructura de transmisión de los datos vía satelital, por el satélite de comunicación nacional Simón Bolívar. Igualmente, estas dos estaciones fueron instaladas de forma mancomunada por personal de UNAVCO y FUNVISIS, lo cual sirvió de entrenamiento al personal de FUNVISIS para instalar las restantes sin supervisión directa. Posteriormente, se instaló la estación CN49 en las instalaciones de la Base Científico Naval Simón Bolívar en la Isla de Aves, el sitio más septentrional del territorio venezolano. A pesar de ser la estación más remota e aislada, lo que presagiaba un largo y complicado camino de solicitud de permisos y apoyo inter-institucional nacional, se contó con la fortuna de la realización de una misión científica a la isla (VIII Campaña de Investigación Científica a Isla de Aves, impulsada por el Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas, en junio 2015), a la cual FUNVISIS fue invitada a participar con tres integrantes, siendo así la primera de las cuatro restantes a ser instalada. La cuarta estación en instalarse fue la CN42, ubicada en el Gran Roque, en el archipiélago Los Roques, componente del Territorio Insular “Francisco de Miranda” (TIFM), luego se llevó a cabo la instalación de la estación CN44 en Cerro El Copey de la Isla de Margarita, estado Nueva Esparta y por último, la sexta y última estación CN43 en la sede de la Estación Secundaria de Guardacostas “La Blanquilla”, del TIFM (Figura 2).

Red geodésica oriental

Las mediciones de la red geodésica de FUNVISIS en el oriente del país en 2003, 2005 y 2013 han permitido cuantificar la tasa de movimiento de la falla El Pilar. Los resultados indican que el gradiente de velocidad a ambos lados de la falla El Pilar es fuertemente asimétrico con presencia de desplazamiento asísmico de $\sim 10\text{-}12\text{ mm a}^{-1}$, localizado entre 0-12 km profundidad (Jouanne *et al.*, 2011; Reinoza *et al.*, 2015). Este movimiento conocido también como reptación, fue observado en campo a través de marcadores (*e.g.* carreteras, alcantarillas, aceras y construcciones) progresivamente desplazados lateral derecho a pesar de la baja sismicidad (Audemard, 2006).

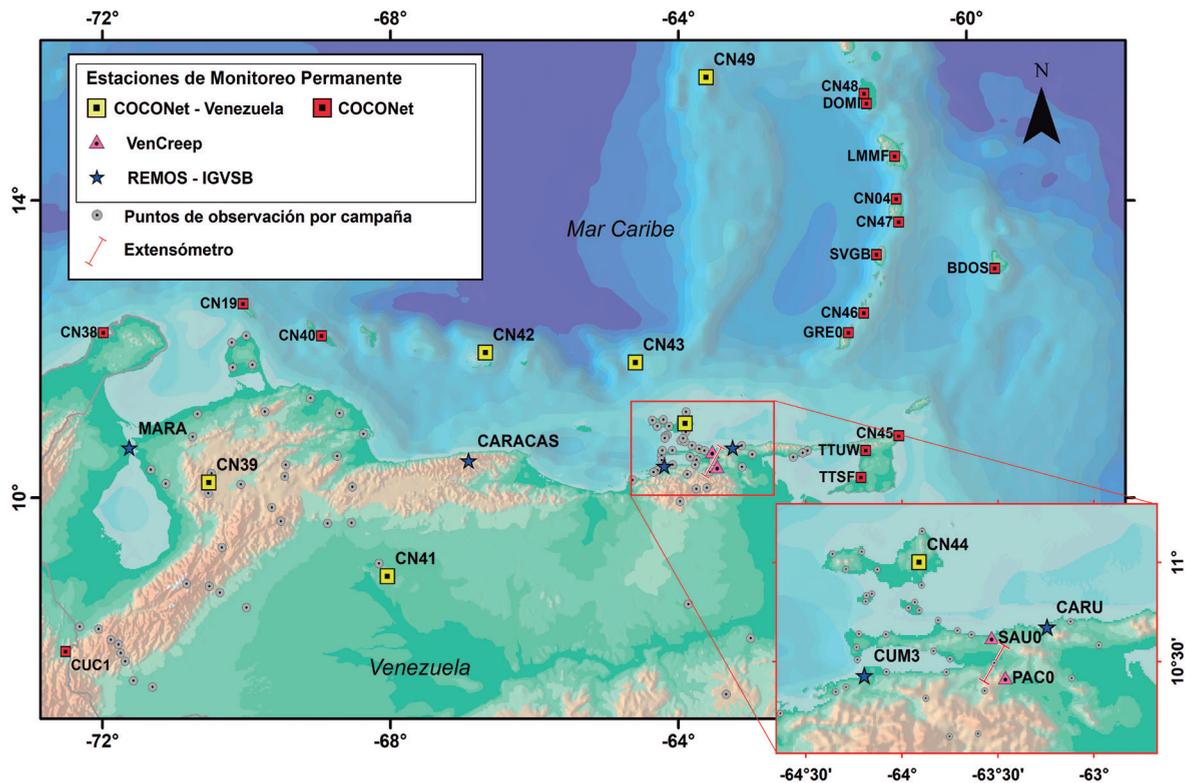


Figura 2. Distribución de estaciones de monitoreo permanente en Venezuela. Los recuadros amarillos representan las estaciones COCONet en territorio venezolano. Los recuadros rojos indican el resto de estaciones COCONet que se visualizan en el presente mapa. Los triángulos magenta representan las estaciones GNSS permanentes del proyecto VENCREEP. Las estrellas azules corresponden a estaciones de la Red de Monitoreo Satelital (REMOS) del Instituto Geográfico Simón Bolívar (IGVSB). Como complemento, se muestra la distribución de puntos de observación geodésica por campaña en círculos grises y la localización del extensómetro con una simbología particular.

Con el propósito de estimar la amenaza sísmica, la cual pudiese ser aminorada en parte por la presencia de reptación en la falla El Pilar (Jouanne *et al.*, 2011; Reinoza *et al.*, 2015; Pousse-Beltrán *et al.*, 2016), es crucial determinar si el movimiento es constante (continuo) o por el contrario es el resultado de crisis muy puntuales asociadas con este fenómeno (periódico). Para ello, se planteó el proyecto titulado Mediciones de Desplazamientos Lentos sobre la falla El Pilar (Venezuela), aunque se le identifica por el acrónimo VENCREEP, que posteriormente fue aprobado por la ANR. En una primera fase, esta iniciativa consistió en la instalación de un arreglo instrumental constituido por un extensómetro y dos receptores geodésicos ubicados al norte y sur de la falla El Pilar. El extensómetro consta de un sensor de variación lineal que detecta y mide el desplazamiento relativo en milímetros entre dos bloques separados por una falla geológica (Sydenham *et al.*, 1969; Bilham *et al.*, 2016). Adicionalmente, los datos suministrados por las dos estaciones geodésicas instaladas al norte y

sur permitirán detectar y cuantificar el desplazamiento de la falla El Pilar en profundidad con la aplicación de modelados elásticos (Chinnery *et al.*, 1961; Okada, 1985). Es decir, que ambos equipos –extensómetro y estaciones GPS– se complementan en cuantificar la deformación a través de la falla El Pilar, dado que el primero mide deformaciones en el campo cercano (frágil), mientras que las dos estaciones GPS en el campo medio a lejano (elástico), por estar separadas unos 10 km entre sí.

Metodología de instalación

Estaciones geodésicas permanentes

Para ilustrar este aspecto seleccionamos la estación Isla de Margarita-CN44 (Figura 3). La Isla de Margarita es la principal isla de Venezuela, localizada al norte del sistema principal de fallas transcurrentes entre las placas Caribe y Suramérica. La selección del sitio permite no solo el estudio de la geodinámica de la Placa

Caribe sino también es favorable para los estudios de trayectoria o paso de los huracanes en el sureste del Mar Caribe. Para la estación CN44 se seleccionó el Monumento Reforzado de Perforación Corta (*Short Drilled-Braced Monument - SDBM*), utilizado para los casos donde la roca competente aflora en superficie (Normandeau *et al.*, 2008). El SDBM está compuesto de 4 patas, correspondientes a barras de acero inoxidable de 1 pulgada de diámetro, dispuestas: una vertical, reforzadas por otras tres dispuestas en trípole,

separadas 120° y en donde una de ellas está orientada al norte. Las cuatro barras cilíndricas van cementadas en la roca con un pegamento inyectable tipo epoxi de dos componentes a una profundidad aproximada de 1,8 metros. La estabilidad, rigidez y fortaleza de este “tetrápodo” (especie de trípole con una barra central vertical) son logradas soldando a discreción todos los elementos de acero, en la base donde se coloca el adaptador nivelante para la antena.



Figura 3. Estación CN44 ubicada en el Cerro El Copey, Isla de Margarita.

La instalación de una estación tipo CN44 sigue los pasos que se describen a continuación: (1) previo a la instalación de la estación se realiza una minuciosa revisión de los equipos, materiales y herramientas a ser utilizados. Se realizan las pruebas y configuración final del receptor NetR9 y la antena Choke Ring de la marca Trimble. (2) En algunos casos se hace necesario la solicitud de permisos. En lo que respecta a la estación CN44, meses antes se había adelantado la documentación correspondiente ante el Instituto Nacional de Parques (INPARQUES). Y en el caso de las estaciones a instalar en islas del TIFM, semanas o meses antes se planifica la logística de transporte con la Armada Nacional Bolivariana de Venezuela. (3) Ya en el sitio pre-seleccionado, se realiza una revisión y selección del emplazamiento final para la construcción del monumento con base en línea de vista clara hacia los satélites GNSS, así como de las unidades de alimentación de energía y comunicaciones. (4) Se toma la orientación del norte magnético como punto de partida para la ubicación de la antena geodésica y la disposición de las celdas solares con el fin de optimizar su rendimiento. (5) El punto medio del

SDBM es seleccionado y se ejecuta la perforación del hoyo central para el emplazamiento de la pata vertical. Después de finalizar la perforación del hoyo central, se selecciona el punto de instalación de la pata orientada hacia el norte (aproximadamente 1 metro desde el punto central) y se inicia la perforación considerando un ángulo de 55° con el plano horizontal del suelo. La posición y dirección de las patas varía si la topografía del emplazamiento no es sub-horizontal; ajustándose a la topografía. (6) Este proceso se repite con las otras dos patas restantes, asegurándose que estén espaciadas en 120° a partir de la pata de orientación norte. Al final de la perforación, las barras se cementan al sustrato rocoso, se calcula la disposición final y se procede a cortar el material sobrante de las barras; y de esta forma son soldadas las barras inclinadas contra la pata central, para ser finalmente reforzadas con piezas anguladas de acero inoxidable entre las barras inclinadas y la central vertical, dándole la forma, solidez, rigidez, estabilidad y fortaleza al “tetrápodo”. (7) Posteriormente, se suelda una terminación enroscada sobre el tope de la barra central para colocar el adaptador de la antena, y se procede a instalar y nivelar la antena Choke

Ring orientada al norte. (8) Adicionalmente, en proximidad (a unos pocos metros) y evitando generar interferencias a la antena geodésica con reflexiones sobre las superficies planas de los paneles solares, se realiza la perforación y cementado del mástil o poste para la ubicación de la unidad de alimentación y comunicación. (9) Luego, se procede al montaje del gabinete (Serie F de la casa SunWize) que contendrá el receptor NetR9 y los acumuladores del sistema de alimentación solar. (10) Se montan las dos celdas solares de 85 vatios orientadas longitudinalmente E-W e inclinadas ligeramente (unos 10°-15°) hacia el sur, buscando el máximo aprovechamiento de los rayos solares del sol siempre ubicado levemente al sur por

encontrarnos en las bajas latitudes norte (0°-16°N). (11) Se realiza la conexión del cable entre la antena y el gabinete, así como la instalación de dos baterías de 90 Amh, se termina el cableado eléctrico, las protecciones eléctricas ante un corto circuito y el poste base a tierra. (12) Finalmente, se realiza la configuración del receptor NetR9, del modem celular y el sensor meteorológico WXT520, que registra datos de presión del aire, temperatura, humedad, precipitación, velocidad y dirección del viento. De acuerdo a las condiciones del sitio, pudiese ser conveniente realizar trabajos de protección de las instalaciones contra vandalismo, incursión de animales, etc. En la Figura 4 se ilustran algunos pasos de la metodología de instalación.



Figura 4. A. Perforación inclinada del hoyo SO en la estación CN43. B. Fijación con soldadura de las partes del SDBM de la estación CN44. C. Fijación de la antena Choke Ring de la estación CN49. D. Aplicación del pegamento tipo epoxi de dos componentes para fijar el poste de la unidad de alimentación y comunicación. E. Montaje de las celdas solares. F. Vista del interior del gabinete que contiene el receptor NetR9, el banco de baterías y conexiones restantes.

Instalación del arreglo VENCREEP

El equipamiento arribó a la sede de FUNVISIS-Caracas procedente de la *Universidad Savoie Mont Blanc* ubicada en Le Bourget du Lac, Francia en enero de 2015. Sería hasta el segundo semestre de ese año cuando se lleva a cabo el reconocimiento de los posibles sitios e instalación. La selección de los sitios para los receptores geodésicos respondió a los siguientes

criterios: un receptor GNSS en cada uno de los bloques en contacto por la falla El Pilar (Norte y Sur), tomando en cuenta la ubicación de las estaciones Cumaná y Carúpano de la Red de Monitoreo Satelital (REMOS) del Instituto Geográfico Simón Bolívar (IGVSB) con fin de lograr una mejor distribución equidistante de estaciones y finalmente se previeron condiciones de seguridad y durabilidad del vértice geodésico. Se tomó ventaja de la infraestructura existente y características

como accesibilidad, cercado y regularidad del servicio eléctrico. Para el caso particular del extensómetro la pre-selección se limitó a sitios previamente observados durante los estudios de la ruptura en superficie del terremoto de Cariaco (Audemard, 2006).

Las estaciones geodésicas consisten de un receptor Trimble NetR9 y una antena geodésica Zephyr. La estación PAC0 está ubicada en el caserío de la Pica Arriba de Catuaro en el bloque sur de la falla El Pilar; y por su parte la estación SAU0 fue instalada en la población de Saucedo, del lado norte. Las antenas geodésicas, en ambas estaciones, fueron instaladas sobre techos de concreto ya existentes. Para ello se utilizaron los “spits” o piezas de metal embutidas en el concreto, las cuales mediante un conector se fuerza el centrado de la antena Zephyr. Los receptores están registrando datos desde julio de 2015.

El extensómetro, claramente no se considera una estación geodésica, sin embargo, forma parte intrínseca de la instrumentación del proyecto VENCREEP (Figura 5). Este equipo fue instalado en la Hacienda “San Miguel”, Las Manosas, cercana a la población de Cariaco, estado Sucre. El núcleo del extensómetro

es el Transformador Diferencial de Variación Lineal (*Linear Variation Differential Transformer - LVDT*). Se instaló un LVDT modelo 2000 DC-SE en el bloque sur de la ruptura del sismo de Cariaco de 1997. Este sensor va unido a un anclaje fijo en el bloque norte por medio de un invar, un cable o alambre compuesto por una aleación de hierro y níquel, el cual es utilizado en trabajos de precisión por su pequeño coeficiente de dilatación termal (Davis, 2001). Similar a una estación geodésica compleja, este equipo se alimenta por medio de celdas solares y va conectado a un gabinete que contiene un acumulador o batería, así como un registrador de datos (*datalogger*). El conjunto igualmente dispone de un sensor meteorológico (modelo HMP60) capaz de captar temperatura y humedad. Desafortunadamente, la descarga de datos para el arreglo, prevista a realizarse directamente desde el equipo mediante visitas esporádicas no se ha podido llevar a cabo regularmente por razones ajenas al grupo de investigadores. Se tiene previsto la transmisión directa de datos. Para ello se requiere resolver primero la trasmisión de los datos por modem internet de la Compañía Anónima Nacional Teléfonos de Venezuela (CANTV).

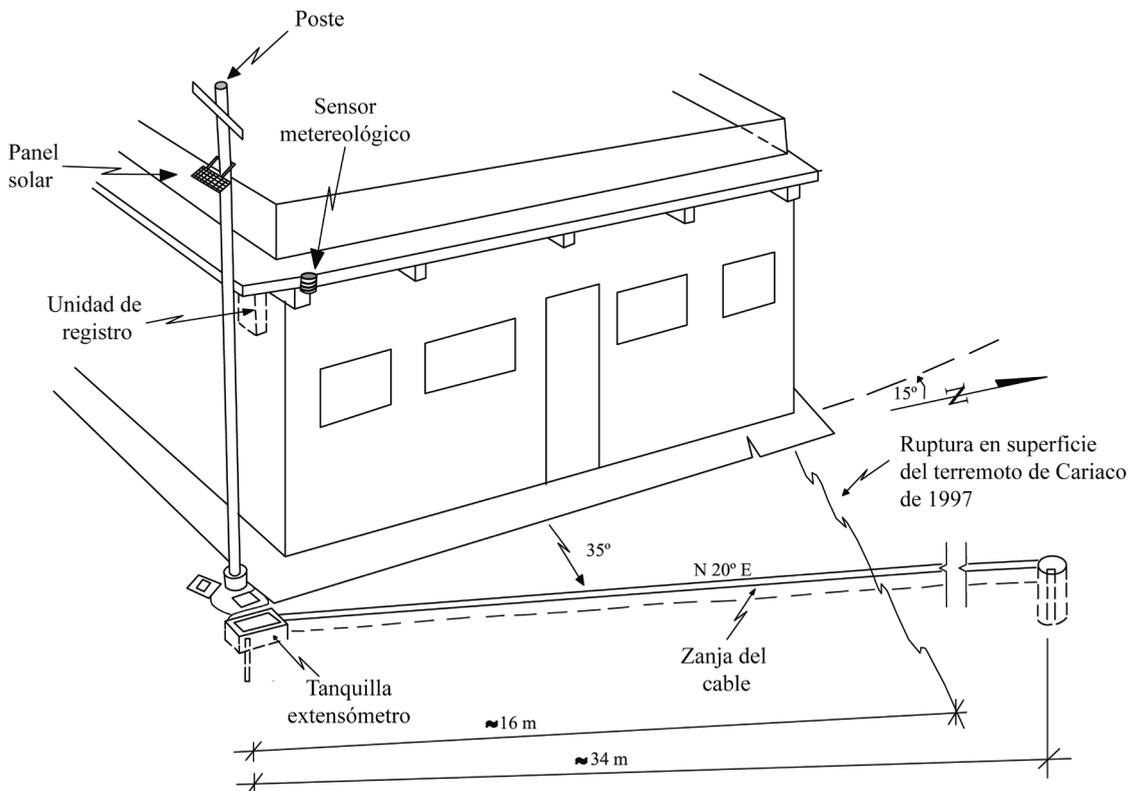


Figura 5. Esquema de instalación del extensómetro en la Hacienda “San Miguel”, Las Manosas, estado Sucre (dibujo original por Franck Audemard).

Primeros datos y resultados

Los datos de las estaciones COCONet en territorio venezolano se encuentran actualmente disponibles en el DAI Version 2. En esta plataforma adicionalmente se puede obtener información sobre la descripción del sitio y monumento, estadísticas de control de calidad de los datos, información sobre la última configuración, series de tiempo geodésicas (Figura 6) y aspectos complementarios. La metodología para el análisis de los datos y generación de productos geodésicos son ampliamente descritos por Herring *et al.* (2016). Como se predice en dicho trabajo, el ITRF2008/IGb08 (Altamimi *et al.*, 2012) ha sido reemplazado por el ITRF2014/IGS2014 (Altamimi *et al.*, 2017) como principal marco de referencia. Actualmente, el centro de procesamiento GAGE ofrece valores de

posición, series de tiempo y velocidades en el marco de referencia IGS2014, una interpretación específica del IGS para el ITRF2014 que incluye nuevas y actualizadas calibraciones de los satélites, antenas y receptores GNSS. Adicionalmente, se incluyen resultados en los marcos de referencia Norte América (NAM14) y Antártica (ANT14), estos dos últimos basados en las estimaciones de posición utilizando el vector de rotación de Altamimi *et al.* (2017). De igual forma, se sigue generando resultados en los marcos de referencia IGS08 y NAM08 (Altamimi *et al.*, 2012). Entre los resultados resaltantes para estaciones en territorio venezolano, es el trabajo de Wang *et al.* (2019) que incluye los datos de las estaciones CN39, CN41 y CN49 como parte de un total de 250 estaciones geodésicas continuas con el propósito de desarrollar un marco de referencia estable para el Caribe (CARIB18).

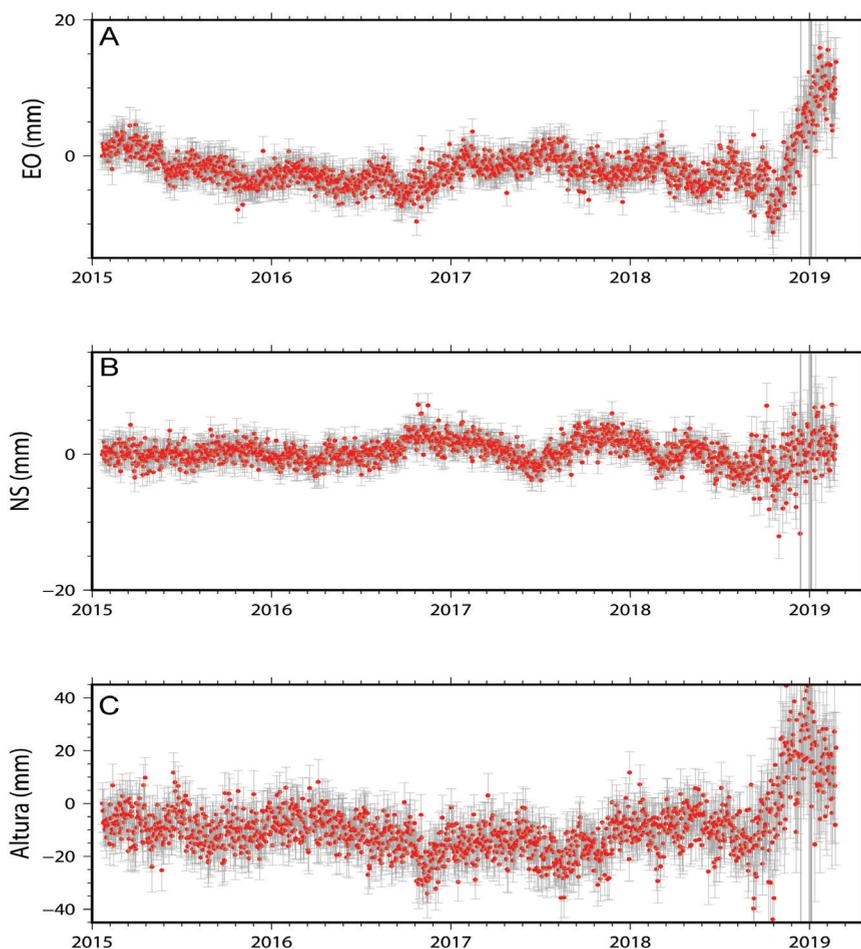


Figura 6. Series de tiempo de posición procesadas diariamente para la estación Quebrada Arriba-CN39 según datos disponibles en el DAI. De arriba hacia abajo se muestra el desplazamiento en milímetros vs el tiempo de medición en años, para las componentes **A.** Este-Oeste, **B.** Norte-Sur y **C.** Vertical. Los valores atípicos han sido removidos y están referenciados al sistema de la placa tectónica de Norte América (NAM08). Los puntos rojos son las soluciones finales y las barras grises representan la desviación estándar (UNAVCO Community, 2015).

Con el propósito de comparar y validar los resultados de las estaciones instaladas en Venezuela con las estaciones más próximas, calculamos las velocidades relativas a Suramérica estable para todo el conjunto de estaciones COCONet (Figura 7) a partir de los datos de velocidad en el marco de referencia IGS08 generados por el centro de procesamiento GAGE, utilizando el polo de rotación absoluto propuesto por Altamimi *et al.* (2012) (Tabla 2). Se descartaron los valores de las estaciones BIS0, MARC, PRMO y CN56, por presentar errores considerables en sus resultados. Se observa que las estaciones CN39, CN41, CN42 y CN49 muestran magnitud y orientación coherente.

Sin embargo, la estación CN44 muestra un vector de velocidad con una fuerte componente Este, con valores de σ_{Ve} y σ_{Vn} relativamente altos al resto de estaciones. Adicionalmente, Reinoza *et al.* (2015) presenta valores de velocidad relativos a Suramérica estable para seis estaciones geodésicas por campaña en la Isla de Margarita, promediando $20,5 \text{ mm a}^{-1}$ y $4,4 \text{ mm a}^{-1}$ para las componentes de velocidad Este y Norte, respectivamente. De hecho, los datos disponibles para el cálculo de los productos de esta estación son escasos (de 2016,45 a 2016,91), lo que claramente se refleja en la calidad de los resultados.

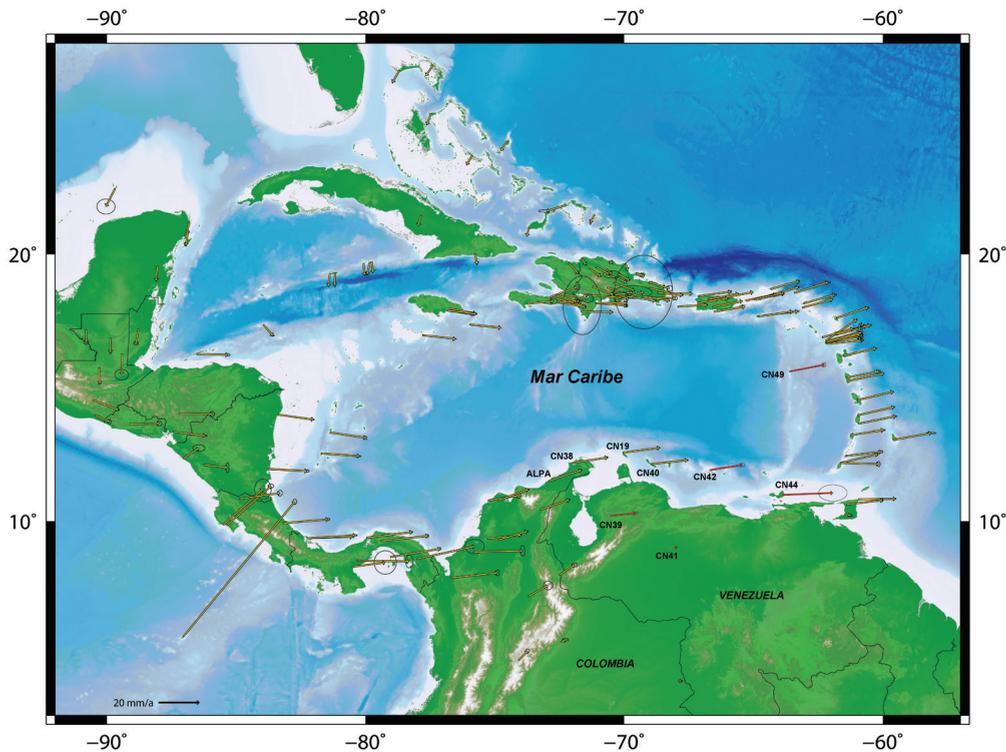


Figura 7. Velocidades expresadas dentro del marco de referencia para la Placa Suramérica utilizando el polo de rotación propuesto por Altamimi *et al.* (2012), con elipses de error para un 95% de nivel de confianza, para las estaciones COCONet. Los vectores rojos indican las estaciones CN39, CN41, CN42, CN44 y CN49 ubicadas en el territorio venezolanos. La estación CN43 no tiene datos disponibles por el momento en el DAI de UNAVCO. Los vectores amarillos representan las velocidades calculadas para el resto de estaciones de la red.

Tabla 2. Polo de rotación absoluto ITRF2008 para Suramérica (Altamimi *et al.*, 2012).

Marco de referencia	Placa Suramérica				VCMP (mm a ⁻¹)	
	ω_x (mas a ⁻¹)	ω_y (mas a ⁻¹)	ω_z (mas a ⁻¹)	ω (° Ma ⁻¹)	E	O
ITRF2008	-0,243 ± 0,009	-0,311 ± 0,010	-0,154 ± 0,009	0,118 ± 0,002	0,44	0,34
Transformación a componentes cartesianas (°Ma ⁻¹)						
	Comp.-x	Comp.-y	Comp.-z			
ITRF2008	-0,0675	-0,0864	-0,0428			

VCMP: Valor Cuadrático Medio Ponderado

En el mismo sentido, se compararon los valores de velocidades de Pérez *et al.* (2018) para la estación CN40, y Mora-Páez *et al.* (2019) para las estaciones CN19 y CN40, instaladas en Aruba y Curazao respectivamente; ambos, países insulares del Reino de los Países Bajos, con los valores de las estaciones CN19 y CN40 procesadas por el GAGE y expresadas en este trabajo en el marco de referencia Suramérica estable (Tabla 3). La comparación de los vectores resultantes para estas estaciones muestra resultados

bastante similares, mucho más si se consideran los errores de las componentes Este y Norte. Adicionalmente, si se observa el vector velocidad de la estación CN42 ubicada en el archipiélago Los Roques, en conjunto con las estaciones CN19 y CN40, e incluso con las estaciones CN38 y ALPA en territorio colombiano, se muestra claramente un desplazamiento bastante uniforme en magnitud y sentido NE (relativo a Suramérica fija) del Bloque Bonaire (Silver *et al.*, 1975).

Tabla 3. Velocidades expresadas en los marcos de referencia NAM14 e IGS08 generadas por el centro de procesamiento GAGE. Velocidades relativas a Suramérica estable utilizando el polo de rotación propuesto por Altamimi *et al.* (2012).

Estación	NAM14 (mm a ⁻¹)*		IGS08 (mm a ⁻¹)		Relativos a Suramérica estable (mm a ⁻¹)	
	Ve	Vn	Ve	Vn	Ve	Vn
CN39	12,64 ± 0,53	5,22 ± 0,23	6,53 ± 0,53	11,64 ± 0,22	12,37 ± 0,53	1,35 ± 0,22
CN41	0,91 ± 0,08	4,13 ± 0,07	-4,85 ± 0,12	11,47 ± 0,1	0,8 ± 0,12	0,91 ± 0,1
CN42	17,56 ± 0,69	5,46 ± 0,43	10,01 ± 0,53	13,19 ± 0,34	15,87 ± 0,53	2,48 ± 0,34
CN44	28,26 ± 2,32	3,30 ± 1,52	19,44 ± 2,85	11,98 ± 1,65	25,13 ± 2,85	1,00 ± 1,65
CN49	19,01 ± 0,28	5,58 ± 0,60	11,29 ± 0,25	14,36 ± 0,44	17,29 ± 0,25	3,36 ± 0,44
CN19	18,88 ± 0,07	6,15 ± 0,06	11,92 ± 0,07	12,73 ± 0,12	17,97 ± 0,07	2,39 ± 0,12
CN19 ¹					18,2 ± 0,7	3,3 ± 0,6
CN40	18,68 ± 0,08	5,52 ± 0,08	11,84 ± 0,13	12,38 ± 0,11	17,81 ± 0,13	1,92 ± 0,11
CN40 ¹					17,6 ± 0,7	1,9 ± 0,7
CN40 ²			12,5 ± 0,7	11,8 ± 0,7		

Los valores de velocidad han sido recopilados de:

* UNAVCO Community (2011, 2013, 2015a, 2015b, 2015c, 2016a, 2016b).

¹ Mora-Páez *et al.* (2019).

² Pérez *et al.* (2018).

Perspectivas

En el marco del proyecto Tsunami FONACIT 2013000361 ya han sido adquiridas otras 7 estaciones permanentes de nueva generación de las 15 previstas, las cuales serán estratégicamente ubicadas para densificar el arreglo COCONet y VENCREEP en el corto plazo. Finalmente, la política de acceso libre a los datos de las estaciones COCONet así como los altos estándares de la instalación han permitido que estas estaciones sean propuestas como parte de la Red de Operación Continua del Sistema de Referencia para las Américas (SIRGAS-CON) y de esta forma reactivar la contribución nacional al mantenimiento del marco de referencia SIRGAS en Venezuela (Cioce *et al.*, 2015).

Estas siete estaciones a instalar, aunadas a las ya instaladas y aquí descritas, se espera que conformen la columna principal de una red más densa en el corto o mediano plazo por el Estado venezolano, a

fin de monitorear de manera permanente y continua la deformación tectónica activa y por sismos, tanto de primer orden (fallas de Boconó, San Sebastián, El Pilar, entre otras) como de orden menor que surcan la geografía nacional. Y muy particularmente en las regiones pobladas y construidas del territorio nacional; por lo general ubicadas en los relieves montañosos de Venezuela. Esta red geodésica de monitoreo permanente se complementará periódicamente de las redes de medición por campaña. Más aun, está previsto la instalación de la red en la región centro-norte del país (objetivo aún pendiente del proyecto FONACIT 2013000361), dado que las primeras redes instaladas fueron las de Oriente en 2003 y Occidente en 2011. Todo esto siempre con el fin de cuantificar la tasa de movimiento de las fallas (potencialmente) activas, así como de estudiar e identificar otras deformaciones de la corteza terrestre en territorio nacional, tales como: rotaciones de bloques tectónicos, extensión,

compresión, cizallamiento, movimientos oblicuos, transpresión, transtensión, profundidad de bloqueo (o profundidad sismogénica), acumulación elástica, reptación, entre otras. En el mismo sentido, se prevé apoyarse en otras herramientas de la Geodesia Satelital que persiguen cuantificar deformaciones a largo, mediano o corto plazo, como la técnica InSAR (Interferometría SAR o *Interferometry of Synthetic Aperture Radar*; Pousse-Beltrán *et al.*, 2016).

Por otra parte, no se descarta el uso de estaciones geodésicas continuas para identificar y caracterizar la ocurrencia de sismos lentos (*slow-slip events*), cuyo desplazamiento de centímetros a metros puede ocurrir sobre horas, días y hasta semanas sin actividad sísmica mayor asociada (Drager *et al.*, 2001; Kostoglodov *et al.*, 2003). Una posibilidad de estudio, es el caso de la subducción de las Antillas de Sotavento (o la subducción asociada al cinturón de deformación sur caribeño), que bordea costa afuera por el nor-occidente y centro-norte venezolano.

Por último, la premisa que se ha profesado en las últimas décadas por los autores es que las fallas menores, a pesar de ser más lentas y menos peligrosas en términos de su potencial sismogénico (o sismo máximo probable) por su baja a bajísima recurrencia (periodo de retorno expresado en miles o decenas de miles de años), son las más pobremente conocidas (o con mayores incertidumbres epistémicas), por lo que se desconoce cuándo ha sido su última activación significativamente importante, lo que no excluye que el próximo terremoto destructor en nuestro territorio ocurra en una de estas fallas definidas como de segundo o hasta de tercer orden. Las técnicas y enfoques aquí descritos esperan reducir las incertidumbres aleatorias existentes en cuanto a la actividad de esas fallas “supuestamente” menores, la eventual rotación de bloques tectónicos y la ocurrencia de sismos lentos, sin dejar de mirar a las deformaciones asociadas a las grandes fallas del borde de placas.

Conclusiones

La geodesia espacial ofrece ventajas excepcionales sobre otros métodos aplicados al estudio de la deformación de la superficie terrestre. Afortunadamente, en las últimas décadas las metodologías aplicadas han dado resultados satisfactorios, y de la mano del avance tecnológico, las posibilidades y nuevas fronteras no dejan de abrirse. Desde hace un tiempo, se entendió la importancia de la aplicación de la técnica GNSS a los estudios

de geodinámica en el país, y conscientes de ello, se empezó a dar forma a la metodología con la incursión en la instalación de redes geodésicas y mediciones por campaña. En los años sucesivos, se planteó la necesidad de realizar un monitoreo permanente, siendo el proyecto COCONet una plataforma fundamental en lo que se refiere al entrenamiento, instalación y operatividad de una red geodésica continua. La metodología de instalación de estas estaciones está apegada al mayor estándar de calidad a nivel mundial. De igual forma, el enfoque multipropósito (geodesia y meteorología) de las estaciones, así como el alcance de la red replicada a todo el Caribe, el libre acceso y disponibilidad de los datos a través de múltiples fuentes, ha permitido establecer una extensa comunidad de intercambio científico.

Los primeros resultados obtenidos para las estaciones por el centro de procesamiento GAGE se muestran bastante coherentes con el resto de las estaciones COCONet. Destaca el caso de las estaciones CN39, CN41 y CN49 que han sido consideradas para el desarrollo del marco de referencia estable CARIB18. Por su parte, el vector obtenido para la estación CN42 es similar en magnitud y orientación a los resultados obtenidos para estaciones dentro del Bloque de Bonaire, con errores bastante aceptables. Se espera que próximamente el conjunto de datos de las estaciones CN43 y CN44 estén disponibles para la comunidad científica.

Por otro lado, la iniciativa VENCREEP, ciertamente un poco más modesta, nos permite seguir avanzado en nuestro conocimiento sobre los patrones de comportamiento de la falla El Pilar. Las mediciones esporádicas y puntuales han generado resultados muy interesantes con implicaciones en materia de amenaza sísmica. Sin embargo, estamos seguros que la observación continua permitirá definir con una mayor precisión la tasa de desplazamiento de los segmentos que constituyen la falla El Pilar, la variabilidad espaciotemporal de estos movimientos, la delimitación de asperidades, entre otros muchos aspectos; experiencia que es y será replicable a otros accidentes tectónicos (potencialmente) activos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los dos evaluadores anónimos por sus valiosos comentarios y sugerencias. John Sandru, Kyle Bohnenstiehl, Michael Fend, Glenn Mattioli, Michel Jackson de UNAVCO, Jesús Villegas

y Antonio Zakhia de FUNVISIS y Eric Calais (Ecole Normale Supérieure - Francia) formaron parte del proyecto COCONet involucrado en la instalación de estaciones geodésicas en Venezuela. Agradecemos a la Armada Bolivariana, INPARQUES, Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo y Aguas (MPPEA), Ministerio del Poder Popular para las Relaciones Interiores, Justicia y Paz (MPPRIJP). Así como a todas las personas que permitieron y colaboraron, sin interés alguno, en la instalación de las estaciones. En especial, al personal del Ambulatorio Rural II “Santo Anibal” Dominici de Saucedo, a la familia González (Pica Arriba de Catuaro) y al Sr. Jesualdo Lambertino de la Hacienda San Miguel. Igualmente agradecemos el apoyo logístico de la Consultoría Jurídica de FUNVISIS, y en particular a la Abog. Elena Valera. A Marina Peña por sus siempre bien logrados dibujos. Este trabajo es una contribución a los proyectos FONACIT-2013000361 (Tsunami), NSF COCONet (EAR-1042906/EAR-1042909) y LabEx OSUG@2020.

Referencias

- Altamimi, Z.; Métivier, L.; Collilieux, X. (2012). ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7). doi: 10.1029/2011JB008930
- Altamimi, Z.; Métivier, L.; Rebischung, P.; Rouby, H.; Collilieux, X. (2017). ITRF2014 plate motion model. *Geophysical Journal International*, 209(3), 1906-1912. doi: 10.1093/gji/ggx136
- Anthes, R.; Robock, A.; Antuña-Marrero, J.C.; García, O.; Braun, J.J.; Arredondo, R.E. (2015). Cooperation on GPS Meteorology between the United States and Cuba. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(7), 1079-1088. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00171.1
- Audemard, F.A. (2006). Surface rupture of the Cariaco July 09, 1997 earthquake on the El Pilar fault, northeastern Venezuela. *Tectonophysics*, 424(1-2), 19-39. doi: 10.1016/j.tecto.2006.04.018
- Audemard, F.A.; Machette, M.; Cox, J.; Dart, R.; Haller, K. (2000). Map and database of quaternary faults in Venezuela and its offshore regions. US Geological Survey Open-File Report 00-0018. Include map at scale 1:2.000.000 and 78-page report.
- Baumbach, M.; Grosser, H.; Romero, G.; Rojas, J.L.; Sobiesiak, M.; Welle, W. (2004). Aftershock pattern of the July 9, 1997 Mw=6.9 Cariaco earthquake in Northeastern Venezuela. *Tectonophysics*, 379(1-4), 1-23. doi: 10.1016/j.tecto.2003.10.018
- Bilham, R.; Ozener, H.; Mencin, D.; Dogru, A.; Ergintav, S.; Cakir, Z.; Aytun, A.; Aktug, B.; Yilmaz, O.; Johnson, W.; Mattioli, G. (2016). Surface creep on the North Anatolian Fault at Ismetpasa, Turkey, 1944-2016. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), 7409-7431. doi: 10.1002/2016JB013394
- Braun, J.; Feaux, K.; Mattioli, G.S.; Miller, M.M.; Normandeau, J.; Lopez, A.M. (2017). The 2017 Atlantic hurricane season as observed by COCONet and HoustonNet - utilizing geodetic infrastructure to observe the atmosphere. *AGU Fall Meeting*. New Orleans, USA.
- Braun, J.J.; Mattioli, G.S.; Calais, E.; Carlson, D.; Dixon, T.H.; Jackson, M.E.; Kursinski, E.R.; Mora-Paez, H.; Miller, M.M.; Pandya, R.; Robertson, R.; Wang, G. (2012). Focused study of interweaving hazards across the Caribbean. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 93(9), 89-90. doi: 10.1029/2012eo090001
- Chinnery, M.A. (1961). The deformation of the ground around surface faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 51(3), 355-372.
- Cioce, V.; Rincón, M.F.; Morales, R.; Wildermann, E.; Royero, G.; Reinoza, C.; Audemard, F.A.; Sánchez, L. (2015). Una alternativa para el mantenimiento del marco de referencia SIRGAS en Venezuela. *Simposio Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas SIRGAS*, Santo Domingo, República Dominicana.
- Combrinck, L.; Schmidt, M. (1998). Physical site specifications: geodetic site monumentation. *IGS Network System Workshop*, Annapolis, USA.
- Davis, J. (2001). *Alloying: Understanding the Basics*. ASM International.
- DeMets, C.; Jansma, P.E.; Mattioli, G.S.; Dixon, T.H.; Farina, F.; Bilham, R.; Calais, E.; Mann, P. (2000). GPS geodetic constraints on Caribbean-North America Plate Motion. *Geophysical*

- Research Letters*, 27(3), 437-440. doi: 10.1029/1999GL005436
- Dragert, H.; Wang, K.; James, T.S. (2001). A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface. *Science*, 292(5521), 1525-1528. doi: 10.1126/science.1060152
- Drewes, H.; Kaniuth, K.; Stuber, K.; Tremel, H.; Kahle, H.; Straub, C.; Hernandez, N.; Hoyer, M.; Wildermann, E. (1995). The CASA'93 GPS campaign for crustal deformation research along the South Caribbean plate boundary. *Journal of Geodynamics*, 20(2), 129-144. doi: 10.1016/0264-3707(95)00002-Q
- Drewes, H.; Reigber, C.; Stuber, K.; Suarez, M.; Tremel, H.; Henneberg, H.; Hoyer, M.; Chourio, O.; Rekkedal, S. (1989). The Venezuelan part of the CASA/UNO GPS Project. *Manuscripta Geodaetica*, 14, 339-344.
- Eckl, M.C.; Snay, R.A.; Soler, T.; Cline, M.W.; Mader, G.L. (2001). Accuracy of GPS-derived relative positions as a function of interstation distance and observing-session duration. *Journal of Geodesy*, 75(12), 633-640. doi: 10.1007/s001900100204
- Ellis, A.; DeMets, C.; Briole, P.; Cosenza, B.; Flores, O.; Graham, S.E.; Guzmán-Speziale, M.; Hernández, D.; Kostoglodov, V.; LaFemina, P.; Lord, N.; Lasserre, C.; Lyon-Caen, H.; Rodríguez-Maradiaga, M.; McCaffrey, R.; Molina, E.; Rivera, J.; Rogers, R.; Staller, A. (2018). GPS constraints on deformation in northern Central America from 1999 to 2017, Part 1 – Time-dependent modelling of large regional earthquakes and their post-seismic effects. *Geophysical Journal International*, 214(3), 2177-2194. doi: 10.1093/gji/ggy249
- Ellis, A.; DeMets, C.; McCaffrey, R.; Briole, P.; Cosenza-Murales, B.; Flores, O.; Guzmán-Speziale, M.; Hernández, D.; Kostoglodov, V.; LaFemina, P.; Lord, N.; Lasserre, C.; Lyon-Caen, H.; Rodríguez-Maradiaga, M.; Molina, E.; Rivera, J.; Rogers, R.; Staller, A.; Tikoff, B. (2019). GPS constraints on deformation in northern Central America from 1999 to 2017, Part 2: Block rotations and fault slip rates, fault locking and distributed deformation. *Geophysical Journal International*, 218(2), 729-754. doi: 10.1093/gji/ggz173
- Herring, T.A.; Melbourne, T.I.; Murray, M.H.; Floyd, M.A.; Szeliga, W.M.; King, R.W.; Phillips, D.A.; Puskas, C.M.; Santillan, M.; Wang, L. (2016). Plate Boundary Observatory and related networks: GPS data analysis methods and geodetic products. *Reviews of Geophysics*, 54(4), 759-808. doi: 10.1002/2016RG000529
- Jouanne, F.; Audemard, F.A.; Beck, C.; Van Welden, A.; Ollarves, R.; Reinoza, C. (2011). Present-day deformation along the El Pilar Fault in eastern Venezuela: Evidence of creep along a major transform boundary. *Journal of Geodynamics*, 51(5), 398-410. doi: 10.1016/j.jog.2010.11.003
- Kellogg, J.N.; Dixon, T.H. (1990). Central and South America GPS geodesy - CASA Uno. *Geophysical Research Letters*, 17(3), 195-198. doi: 10.1029/GL017i003p00195
- Kostoglodov, V.; Singh, S.K.; Santiago, J.A.; Franco, S.I.; Larson, K.M.; Lowry, A.R.; Bilham, R. (2003). A large silent earthquake in the Guerrero seismic gap, Mexico. *Geophysical Research Letters*, 30(15). doi: 10.1029/2003GL017219
- Mattioli, G.S.; Feaux, K. (2016). COCONet - Results, Sustainability, and Capacity Building. NSF Community Workshop. Final Workshop Report. EAR-1634055. Punta Cana, Dominican Republic.
- Mogollón, J.; Reinoza, C. (2018). Análisis de la cinemática inter-sísmica asociada a la falla de Oca-Ancón mediante el uso de la geodesia espacial de alta resolución. *Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería*, Caracas, Venezuela.
- Mora-Páez, H.; Kellogg, J.N.; Freymueller, J.T.; Mencin, D.; Fernandes, R.M.S.; Diederix, H.; LaFemina, P.; Cardona-Piedrahita, L.; Lizarazo, S.; Peláez-Gaviria, J.R.; Díaz-Mila, F.; Bohórquez-Orozco, O.; Giraldo-Londoño, L.; Corchuelo-Cuervo, Y. (2019). Crustal deformation in the northern Andes – A new GPS velocity field. *Journal of South American Earth Sciences*, 89, 76-91. doi: 10.1016/j.jsames.2018.11.002
- Normandeau, J.; Meertens, C.; Bartel, B. (2008). GPS antenna monuments and mounts supported by UNAVCO: Options and Effectiveness. *AGU Fall Meeting*, San Francisco, USA.

- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 1135-1154.
- Pérez, O.J.; Bilham, R.; Bendick, R.; Hernández, N.; Hoyer, M.; Velandia, J.R.; Moncayo, C.; Kozuch, M. (2001a). Velocidad relativa entre las placas del Caribe y Sudamérica a partir de observaciones dentro del sistema de posicionamiento global (GPS) en el norte de Venezuela. *Interciencia*, 26(2), 69-74.
- Pérez, O.J.; Bilham, R.; Bendick, R.; Velandia, J.R.; Hernández, N.; Moncayo, C.; Hoyer, M.; Kozuch, M. (2001b). Velocity field across the Southern Caribbean Plate Boundary and estimates of Caribbean/South-American Plate Motion using GPS Geodesy 1994-2000. *Geophysical Research Letters*, 28(15), 2987-2990. doi: 10.1029/2001GL013183
- Pérez, O.J.; Bilham, R.; Sequera, M.; Molina, L.; Gavotti, P.; Codallo, H.; Moncayo, C.; Rodríguez, C.; Velandia, R.; Guzmán, M.; Molnar, P. (2011). Campo de velocidades GPS en el occidente de Venezuela: componente lateral derecha asociada a la Falla de Boconó y componente convergente perpendicular a Los Andes. *Interciencia*, 36(1), 39-44.
- Pérez, O.J.; Wesnousky, S.G.; De La Rosa, R.; Márquez, J.; Uzcátegui, R.; Quintero, C.; Liberal, L.; Mora-Páez, H.; Szeliga, W. (2018). On the interaction of the North Andes plate with the Caribbean and South American plates in northwestern South America from GPS geodesy and seismic data. *Geophysical Journal International*, 214(3), 1986-2001. doi: 10.1093/gji/ggy230
- Pousse-Beltran, L.; Pathier, E.; Jouanne, F.; Vassallo, R.; Reinoza, C.; Audemard, F.; Doin, M.P.; Volat, M. (2016). Spatial and temporal variations in creep rate along the El Pilar fault at the Caribbean-South American plate boundary (Venezuela), from InSAR. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(11), 8276-8296. doi: 10.1002/2016JB013121
- Reinoza, C. (2014). Application de la géodésie satellitaire GNSS à haute résolution à la déformation de la marge Sud-Caraïbe. Implication pour l'aléa sismique dans l'Ouest et le Nord-Est du Venezuela. Tesis de Doctorado, Université Grenoble Alpes, France.
- Reinoza, C.; Jouanne, F.; Audemard, F.A.; Schmitz, M.; Beck, C. (2015). Geodetic exploration of strain along the El Pilar Fault in northeastern Venezuela. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(3), 1993-2013. doi: 10.1002/2014JB011483
- Silver, E.A.; Case, J.E.; Macgillavry, H.J. (1975). Geophysical study of the Venezuelan Borderland. *GSA Bulletin*, 86(2), 213-226. doi: 10.1130/0016-7606(1975)86<213:GSOTVB>2.0.CO;2
- Sydenham, P.H. (1969). A tensioned-wire strain seismometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 2(12), 1095-1097.
- UNAVCO Community (2011). COCONet GPS Network - CN40-CuracaoMetCR2011 P.S. - GPS/GNSS Observations Dataset. UNAVCO, Inc. doi: 10.7283/T5BV7DWT
- UNAVCO Community (2013). COCONet GPS Network - CN19-ArubaNethARU2013 P.S. - GPS/GNSS Observations Dataset. UNAVCO, Inc. doi: 10.7283/T5HD7SZB
- UNAVCO Community (2015a). COCONet GPS Network - CN39-QuebradaArribVen P.S. - GPS/GNSS Observations Dataset. UNAVCO, Inc. doi: 10.7283/T55H7DJB
- UNAVCO Community (2015b). COCONet GPS Network - CN41-ElBaul_Vene_2015 P.S. - GPS/GNSS Observations Dataset. UNAVCO, Inc. doi: 10.7283/T5930RJX
- UNAVCO Community (2015c). COCONet GPS Network - CN42-CN42LosRoquesVen P.S. - GPS/GNSS Observations Dataset. UNAVCO, Inc. doi: 10.7283/T5DV1H8B
- UNAVCO Community (2016a). COCONet GPS Network - CN44-MargIsIndVEN2016 P.S. - GPS/GNSS Observations Dataset. UNAVCO, Ind. doi: 10.7283/T5PV6HR0

UNAVCO Community (2016b). COCONet GPS Network - CN49-CN49_Ave_VEN2015 P.S. - GPS/GNSS Observations Dataset. UNAVCO, Inc. doi: 10.7283/PYY1-4C49

Wang, G.; Liu, H.; Mattioli, S.G.; Miller, M.M.; Feaux, K.; Braun, J. (2019). CARIB18: A stable geodetic reference frame for geological hazard monitoring in the Caribbean region. *Remote Sensing*, 11(6). doi: 10.3390/rs11060680

Franck Albert Audemard
ORCID: 0000-0003-2046-5916

Carlos Reinoza
ORCID: 0000-0003-2347-3161

Ricardo López
ORCID: 0000-0002-3146-2502

Karl Feaux
ORCID: 0000-0001-6858-9913

François Jouanne
ORCID:0000-0001-9374-7880

Trabajo recibido: junio 21 de 2019
Trabajo aceptado: febrero 28 de 2020