

# PROCESOS DE GEODINAMICA. ESTUDIOS EN LA CUMBRE DEL CERRO ACONCAGUA. MENDOZA. ARGENTINA.

*María Laura Mateo (3, 4), Luis Lenzano(1, 3, 4), Jorge Barón (2), Ana M Robín (3,4), Mauro Blanco ( 2), Federico González (1)*

*(1) Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ingeniería. Instituto de Geodesia y Geodinámica*

*(2) Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería. Instituto CEDIAC*

*(3) Consejo Nacional de Investigaciones científicas y Tecnológicas (CONICET).*

*(4) Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA – CCT).*

[lmateo@lab.cricyt.edu.ar](mailto:lmateo@lab.cricyt.edu.ar); [llenzano@lab.cricyt.edu.ar](mailto:llenzano@lab.cricyt.edu.ar); [jbaron@cediac.uncu.edu.ar](mailto:jbaron@cediac.uncu.edu.ar);

[amrobin@lab.cricyt.edu.ar](mailto:amrobin@lab.cricyt.edu.ar); [mblanco@cediac.uncu.edu.ar](mailto:mblanco@cediac.uncu.edu.ar); [federicojfg@gmail.com.ar](mailto:federicojfg@gmail.com.ar)

## Resumen

En el marco del programa de investigación SIGMA, “*sistema de investigación GPS monte Aconcagua*”, sustentado por los proyectos de Investigación PIP CONICET N° 2006-5759, *marco de referencia regional y aportes al conocimiento de la geodinámica y los modelos ionosféricos. Andes centrales argentinos*; PIP UNCUIYO N° 06/B144, *marco de referencia regional y aportes al conocimiento de la geodinámica de los andes centrales argentinos*; y PICT AGENCIA N° 02220-06, *medición de la deformación cortical en los andes centrales argentinos mediante geodesia satelital e interferometría radar*”, se diseñó, instaló y se puso en funcionamiento la estación continua GNSS en la cumbre del Cerro Aconcagua, denominada ACON, en el año 2006.

El Programa SIGMA está dirigido hacia los estudios y desarrollos científico-tecnológicos, dentro del Parque Provincial Aconcagua y, en general, en la Región de Los Andes Centrales y Patagónicos. Estos estudios permitirán analizar los procesos naturales y antrópicos, con el fin de desarrollar e implementar acciones para el control del medio ambiente, sobre la base del mantenimiento de los ecosistemas de montaña, a partir de la tecnología GPS, por medio de investigaciones en el campo de la geodesia, geofísica, glaciología, geología y geomorfología

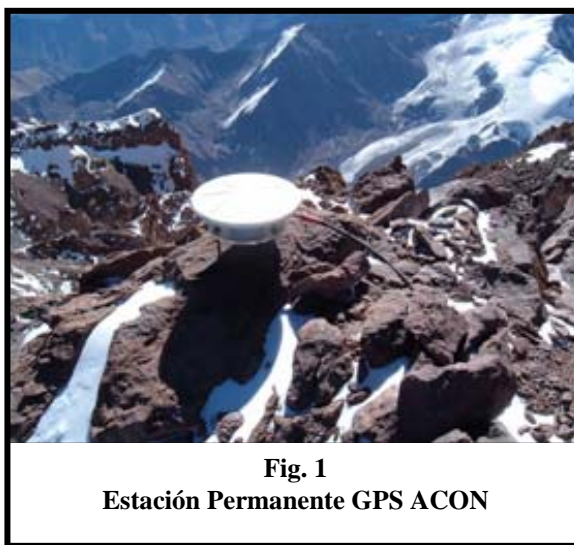
Como base sustentable del programa, se instaló una Estación Continua GNSS en el área de la cumbre del C° Aconcagua, denominada ACON, que permite medir los desplazamientos del mismo, y de esta forma entender mejor los fenómenos tectónicos en los Andes Centrales. La instalación de la misma se produjo en marzo del 2006, y representa la estación continua GNSS más alta del mundo. La tecnología utilizada es de avanzada, pues las condiciones climatológicas son extremas, donde el equipo debe soportar vientos extremos de 200 km/hora y temperaturas que rondan los 45° bajo cero en invierno. Esto motivó que el programa SIGMA incorporara recursos humanos de alta calificación tecnológica, para que pudieran dar respuesta a estas condiciones y como objetivo central, lograr el funcionamiento de la estación ACON.

La estación envía datos desde la cumbre, por medio de radio, a la Oficina Central de Guardaparques, en el paraje denominado “Horcones”, donde existe visual directa con la cumbre. Estos datos se almacenan diariamente en una PC en forma manual o automática. Los resultados obtenidos hasta la fecha son significativos y muestran tendencia de su desplazamiento.

## Introducción

La geodinámica de los Andes Centrales es el tema motivador para el estudio y análisis del caso particular del cerro Aconcagua. Este macizo tiene características particulares ya que su altura supera considerablemente la de los cerros que lo rodean en casi 2000 m.

Para la determinación de los movimientos superficiales del macizo se instaló una estación de medición continua GNSS en la cumbre del cerro, esta tecnología permite determinar en forma precisa y eficiente los sistemas de referencia modernos. Estos se encuentran materializados por este tipo de estaciones sobre la superficie terrestre. Las cuales cuentan no solo con coordenadas sino también con velocidades que muestran el desplazamiento del punto, pudiendo interpretarse de esta forma el movimiento geodinámicos y deformaciones de las placas terrestre.



Durante el año 2006 se llevo a cabo la instalación de la estación GNSS en la cumbre del cerro Aconcagua, en la misma quedó instalada una estación de medición continua GNSS [Lenzano, L. et al 2006], siendo en la actualidad la más alta del mundo (fig 1). Esta no solo colaborara a la densificación y determinación del sistema de referencia geocéntrico global, sino además proporcionará información de alta calidad, a partir de la cual se podrán comprender de mejor manera la geodinámica de los Andes Centrales. La estación se identificó con el nombre “ACON”, heredando el mismo del macizo en el que se encuentra emplazada.

Uno de los objetivos a cumplir, mediante la instalación y puesta en funcionamiento de la estación permanente ACON, es determinar el movimiento planialtimétrico del macizo, previa inclusión de ella en la red de estaciones permanentes GNSS. Para lo cual es necesaria la recopilación de datos de un largo periodo de tiempo, lo cual implica el perfecto funcionamiento del sistema. Esto incluye la alimentación energética del receptor GPS y radio de comunicaciones, la resistencia de las baterías a bajas temperaturas y la correcta comunicación entre la cumbre y el centro de almacenamiento de datos al pie del cerro Aconcagua.

## Modernización y Actualización de la estación Permanente ACON

Durante el verano 2006 se realizaron varias campañas a la cumbre del cerro Aconcagua, en cada una de ellas se realizaron tareas para la instalación de una la estación de medición continua GNSS ACON. Primero se realizó la elección y monumentación de sitio, se instalaron el receptor GPS, la antena de radio para transmisión de datos, el equipo de meteorología, las baterías de alimentación de los equipos y los paneles solare que alimentarían las baterías [Lenzano, L. et al 2006]. El equipo quedó instalado y listo para comenzar con la recepción, almacenamiento y transmisión de datos.



**Fig. 2**  
**Mantenimiento y modernización anual**

Anualmente se realiza el mantenimiento de dicha infraestructura, en el cual se recambian baterías, cables, y todo aquel elemento necesario para el perfecto funcionamiento del sistema (fig 2). Durante la última temporada, verano 2008, se rediseñó el sistema de alimentación y comunicaciones para garantizar y mejorar la disponibilidad de energía, transmisión y descarga de datos. Para ello se tuvo en cuenta las condiciones en que se encontraría el equipo de montaña en la cumbre, ya que las condiciones climatológicas, la disminución de oxígeno y las bajas temperaturas disminuyen la capacidad de

trabajo de las personas. Esto dio lugar a que se reprodujera esta situación en laboratorio antes de proceder al diseño y montaje del sistema a mejorar o implementar. Una vez analizado cuáles son los mejores elementos que soportaran estas condiciones se procedió al diseño de la infraestructura a implementar.

## Descripción del funcionamiento

Como primera tarea se desarrolló la tecnología necesaria que garantizara el buen funcionamiento y el cómodo traslado a la cumbre, además de la fácil y eficiente operación por personas no idóneas en el tema, ya que no podía asegurarse que el personal capacitado en el ensamblaje del sistema hiciera cumbre.

Se tomó como prioridad la captura de datos del receptor GPS, por lo que éste debía recibir como elemento primordial la energía disponible y el mayor tiempo posible. Para ello se instaló un controlador conectado a dos paneles solares conectados en paralelo, el mismo se encarga de proveer de 12V constantes en la entrada de alimentación primaria del receptor GPS. Otro panel conectado a un segundo controlador también provee de energía al receptor por su alimentación secundaria. A su vez ambos controladores recargan las baterías para tener reserva una vez que no se cuente con luz solar, ya sea por el transcurso de la noche o por temporales meteorológicos. Un tercer controlador provee energía a la radio de transmisión de datos, este se encuentra conectado a un panel solar distinto a los anteriores. Finalmente Existe el controlador que cumple la función de “controlar la carga y descarga” de las baterías de Ni-Cd (fig. 3).



**Fig. 3**  
**Modernización y Actualización del sistema de alimentación**

Cuando el controlador está cargando las baterías no permite que éstas tomen un valor superior a los 14.1 Volts, protegiéndolas de cargas excesivas, ya que ésta es la principal causa de deterioro de las mismas. Cuando los paneles dejan de proveer energía suficiente al controlador como para que siga cargando, el controlador abre eléctricamente la entrada del panel y deja que el equipo conectado a él se alimente desde las baterías. Las baterías, cargadas inicialmente, a medida que transcurre el tiempo y de acuerdo al consumo de los equipos comienzan a descargarse y al momento de llegar a una tensión en sus bornes igual o menor a 11.5 Volts el controlador desconecta la provisión de energía a los equipos. Nuevamente al comenzar a cargar los paneles, el controlador “observa el estado, en Volts, de las baterías. Si las mismas se encuentran por debajo de los 12.6 Volts” solo habilita la carga de las baterías hasta que estas superen el mencionado nivel. Cuando las baterías han superado los 12.6 Volts el controlador habilita la alimentación a los equipos conectados a él.

El receptor GPS tiene la particularidad de poseer dos entradas de alimentación energética, una primaria y una secundaria. Cuando la alimentación en la entrada primaria no está presente automáticamente conmuta la alimentación a la entrada secundaria. Recordemos que tanto la entrada primaria como secundaria tienen controladores solares diferentes con baterías diferentes. Esto nos da la ventaja más destacable del sistema de alimentación del receptor GPS; y es que cada controlador tiene un margen de carga y descarga, permitiendo que cuando conecta la alimentación del equipo hay presente un cierto margen de energía-tiempo dado por el otro regulador permitiendo que el otro circuito de alimentación pueda recuperarse. De éste modo cuando la entrada de alimentación primaria se agota, combina a la entrada secundaria automáticamente, esperando a que el sistema de alimentación primario se recupere

Gracias a la innovación tecnológica incorporada en la estación permanente se han obtenido una cantidad significativa de datos de observación. Con los cuales se está trabaja en forma continua y ya se han obtenido los primeros resultados, en los cuales vemos algunas tendencias de movimiento de la estación de medición continua ACON, cumbre del cerro Aconcagua.

## Análisis de datos GNSS

Los datos de observación GPS que la estación permanente ACON registra son enviados vía radio de comunicaciones a la oficina central de guardaparques (Horcones), donde existe una PC que funciona como servidor de almacenamiento de datos. En ella se resguardan los datos para su posterior descarga, procesamiento y análisis de los resultados.

Periódicamente un equipo de personas se traslada hasta la oficina central de guardaparques y realiza el control del funcionamiento de la estación ACON, estableciendo comunicación con la cumbre mediante la utilización de la radio de comunicaciones. Es decir, a través de la PC que funciona como servidor y mediante las comunicaciones de radio, puede



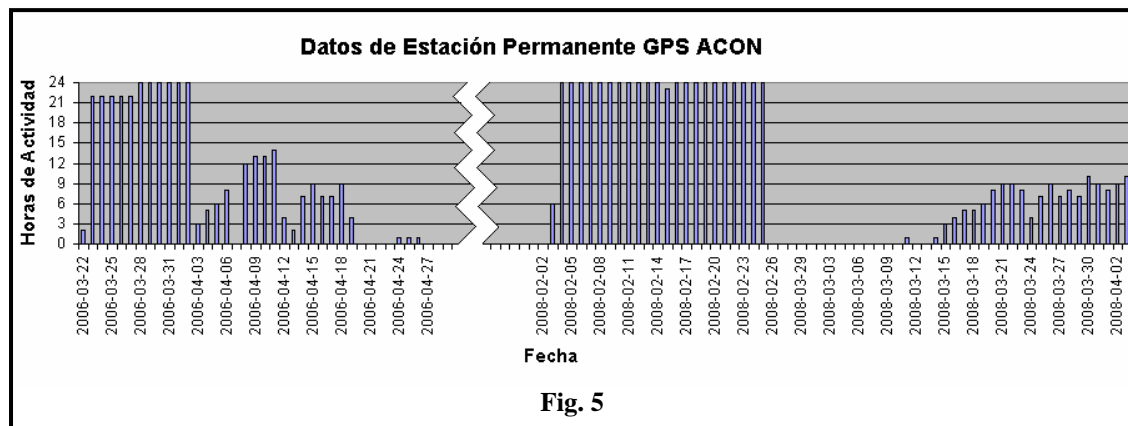
**Fig. 4**  
**Transmisión y almacenamiento de datos**



observarse en que condiciones se encuentra el receptor, el estado de los datos registrados, la temperatura a que se observa dentro de la caja térmica, las condiciones de carga de las baterías que se utilizan como alimentación, etc.

Otros datos registrados por parte del cuerpo de guardaparques en un registro manual y diario de son los datos climatológicos que pueden observarse en la cumbre. Estos son de mucha utilidad para la posterior correlación con los datos colectados por la estación meteorológica y la comparación con el funcionamiento de todo el sistema. En una planilla diaria se registran: estado en la nubosidad y características generales del clima en la zona. Estos datos son tenidos en cuenta para analizar bajo que condiciones sufre desperfectos el sistema de alimentación de la estación.

Durante el periodo de prueba (año 2006) pudieron obtenerse una suma importante de datos de observación. Luego de las modernizaciones y actualizaciones realizadas se han obtenido más datos relevantes. Todos estos, luego de ser analizados, procesados, y ajustados, ya muestran las primeras tendencias de movimientos geodinámicos del bloque Aconcagua (fig. 5).



Finalmente los datos son transformados a formato universal y resguardados en un servidor de almacenamiento a la espera de su tratamiento, análisis y procesamiento para la obtención de los resultados buscados.

## Metodología y cálculo de resultados

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis previo al procesamiento. En este se tuvo en cuenta la continuidad en las observaciones, se descartaron aquellos días que no cumplieran con un mínimo de horas, además de analizar la continuidad diaria de los datos.

La metodología utilizada para el cálculo de las velocidades de la estación ACON fue diagramada exclusivamente el análisis del desplazamiento de esta estación en particular. En principio se tuvieron en cuenta estaciones GNSS de medición continua ubicadas en distintas zonas de la placa, como BRAZ (Brasilia - Brasil), BRFT (Fortaleza - Brasil), CONZ (Concepción - Chile), LPGS (La Plata - Argentina), MZAC (Mendoza - Argentina), SANT (Santiago - Chile), SMAR (Santa María - Brasil), UCOR (Córdoba - Argentina) y UNSA (Salta - Argentina) (fig. 6). En relación a los datos de observación solamente se utilizaron aquellos días que superaban las 10 hs. de medición continua, es decir los días que tenían menos cantidad de horas fueron descartados del procesamiento, este requisito se tuvo en cuenta tanto

para la estación permanente GPS ACON como así también para el resto de las estaciones utilizadas.



**Fig. 6**

Las orbitas y parámetros de orientación terrestre fueron en ambos casos precisos, calculados por el IGS (Servicio Geodésico Internacional). A su vez se aplicaron velocidades conocidas a cada una de las estaciones utilizadas calculadas dentro de la red SIRGAS (Sistema de referencia geocéntrico para las Américas) [Seemüller, W. et al 2008], para actualizarlas a la época de medición.

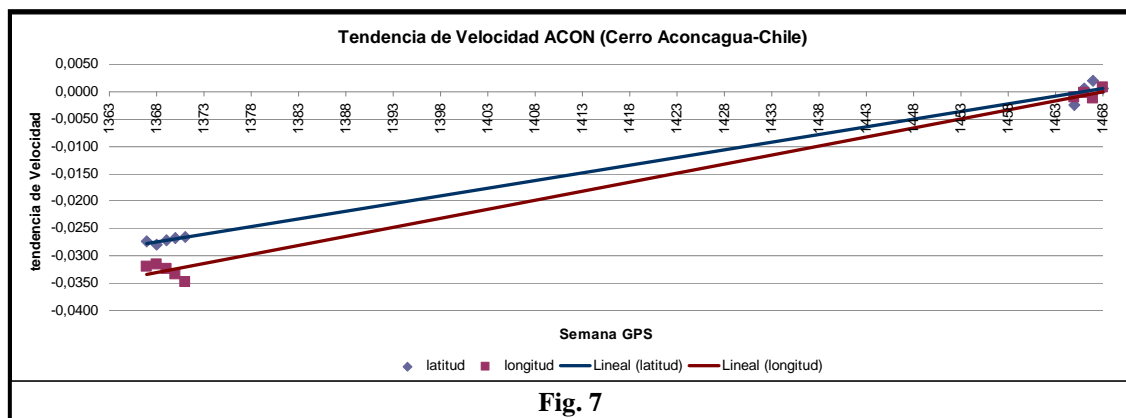
El cálculo de los vectores se realizó utilizando la estrategia manual, de esta manera pudieron generarse los vectores necesarios y elegidos para realizar el

posterior ajuste y estimación de las velocidades buscadas.

Una vez calculados y ajustados los vectores de la red diagramada, se generaron ecuaciones normales diarias y semanales, utilizando como estrategia de ajuste la de red cuasi-libre, dejando un sigma a priori de 1 metro en todas las coordenadas de los puntos calculados. Con esta estrategia pudieron obtenerse resultados de alta calidad y excelentes precisiones. Finalmente se ajustaron estas ecuaciones al marco de referencia SIRGAS obteniéndose las tendencias de movimiento de la estación permanente ACON, utilizando como estrategia de ajuste Not-Net-Rot, Not-Net-Tras.

## Resultados

La figura n° 7 representa gráficamente la tendencia del movimiento de la estación ACON. En color azul se visualiza el movimiento de la coordenada en latitud, la que presenta un movimiento positivo, mientras que en color rojo se observa la coordenada en longitud, también con un desplazamiento positivo. Esto indica que la estación ACON tiene una tendencia noreste.



**Fig. 7**

En cuanto a la tendencia de movimiento en altura de la estación ACON será analizada y calculada en periodos posteriores. Donde la acumulación de mayor cantidad de datos de observación permitirá obtener mejores y más confiables resultados en este sentido.

## Tareas a realizar

Por las condiciones climáticas y geográficas el ascenso a la cumbre del cerro Aconcagua se dificulta en temporada de invierno. Por este motivo la temporada de ascenso se abre a fines del mes de noviembre y finaliza a fines del mes de marzo, durante este periodo las temperaturas en la zona aumentan y disminuye la probabilidad de tormentas que dificultan el ascenso.

En la actualidad se está trabajando en la preparación y programación de la nueva campaña, que se realizará inmediatamente se inaugure la temporada de ascenso 2008-2009. En una primera campaña llegará a la cumbre un grupo reducido de andinistas los que revisarán y controlarán el estado de los materiales y componentes que forman parte del sistema. Con estos resultados se trabajará en el estudio, mejoramiento y confeccionamiento de mejoras a ser instaladas nuevamente en una segunda campaña. En esta última el grupo de campo estará integrado por mayor cantidad de personas y que la infraestructura a instalar llevará mayor cantidad de mano de obra y de materiales a trasladar.

Con los nuevos y mejorados elementos instalados se pretende corregir los errores cometidos durante los últimos tiempos. Obteniéndose de esta manera mayor cantidad de datos, estabilidad en los mismos, lo que derivará en mejor calidad en los resultados obtenidos.

## Referencias

Lenzano, Luis; Mackern, M.V.; Lenzano, María G; Robín, Ana M.; Cabrera, Gabriel; Barón Jorge. *“Estación Permanente GPS “ACON”. Instalación y funcionamiento. Monte Aconcagua. Mendoza, Argentina”*. AAGG 2006. Bahía Blanca, 2006.

Wolfgang Seemüller, Manuela Krügel, Laura Sánchez, Hermann Drewes. *“The Position and Velocity Solution DGF08P01 of IGS Regional Network Associate Analysis Centre SIRGAS (IGS RNAAC SIR)”*. DGFI Report No. 79, 2008.

Lenzano, Luis E. Simposio Internacional sobre Cambio Climático: “Organizando la Ciencia para la Cordillera Americana” (CONCORD). Presentación de trabajo. Título: *“Infraestructura y monumentación de la Estación Permanente GPS “ACON”. MONTE ACONCAGUA. ARGENTINA”*. Mendoza, Argentina. Marzo de 2006.

Lenzano L; Mackern V; y Robín A. *“Estación Permanente GPS MZAC. Su integración a la Red Nacional de EP GPS”*. Pp: 145 - 149. Editorial Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. ISBN: 987-22912-0-9. Publicación en CD. XXI Reunión Científica de Geofísica y Geodesia. 2004.

Leiva J C.; Mackern M V; Cabrera; and Lenzano L. (2007): *“Global change impacts on mountain hazards and tourism in the Aconcagua region, Mendoza, Argentine”*. En Global Change in Mountain Regions. Edited by Martin Price. Sapiens Publishing 2006. 343p. ISBN 0-9552282-2-0. Pág. 259-260.

Mauro Blanco; Leonardo Euillades; Gabriel Cabrera; Luis Lenzano; Jorge Barón: *“Infraestructura y Monumentación de la Estación GPS en el Cerro Aconcagua”*. Geoacta 32, 2007. ISSN: 0326-7237. 2007

Dario Trombott. *“Síntesis de la Geología de la zona del Aconcagua”*. En *“El santuario incaico del cerro Aconcagua”*, Juan Schobinger (comp.): 54-60, Ediunc, Mendoza, 2001. (ISBN: 950-39-0140-5)

Leiva, J.C. et al. *"Global change impacts on mountain hazards and tourism in the Aconcagua region, Mendoza, Argentina"*. Global Change in Mountain Regions. Edited by Martin Price. Sapiens Publishing 2006. 343p. ISBN 0-9552282-2-0. Pág. 259-260.

Giambiagi, L. B. y V. A. Ramos, 2002. *"Structural evolution of the Andes between 33°30' and 33°45' S, above the transition zone between the flat and normal subduction segment, Argentina and Chile"*. Journal of South American Earth Science 15(1), 99-114.

Giambiagi, L. B., P. P. Alvarez, E. Godoy y V. A. Ramos, 2003. *"The control of pre-existing extensional structures in the evolution of the southern sector of the Aconcagua fold and thrust belt"*. Tectonophysics 369: 1-19.