



## **LA ESTACIÓN MAGNÉTICA ZONDA: ESTUDIO DE PERTURBACIONES MAGNÉTICAS RELACIONADAS CON TERREMOTOS. SAN JUAN, ARGENTINA**

Francisco Ruiz<sup>1\*</sup>, Marcos Sanchez<sup>2</sup>, Patricia Martinez<sup>1,2</sup>, Mario Gimenez<sup>1,2</sup>, Flavia Leiva<sup>1</sup>, Orlando Álvarez<sup>2</sup>, Antonio Introcaso<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de San Juan, Instituto Geofísico Sismológico, San Juan, Argentina

<sup>2</sup>CONICET, Argentina

### **Resumen**

Con el objetivo de establecer una estación permanente para el registro de la componente total del campo magnético terrestre, se instaló un sistema Overhauser GSM 19 en el Instituto Geofísico Sismológico perteneciente a la Universidad Nacional de San Juan, 31° 32' 43'' de latitud Sur y 68° 41' 03'' de longitud Oeste.

La Estación Magnética Zonda (EMZ) se ubica en una región estratégica para estudiar la Anomalía magnética del Atlántico Sur. Además, su entorno posee alta actividad sísmica, por esta razón el magnetómetro ha sido programado para registrar a intervalos de 10 segundos para detectar posibles cambios en el campo geomagnético asociados con fenómenos sísmicos. Desde el año 2007, estos datos son analizados en conjunto con la actividad sísmica de magnitud mayor que 3.

En este trabajo se analizan perturbaciones geomagnéticas relacionadas con eventos sísmicos localizados en la corteza y en la zona de Wadati-Benioff, con epicentro a distancias menores que 100km desde EMZ. Se han podido identificar posibles premonitores magnéticos para eventos de magnitud superior a 4 en el caso de los provenientes de la zona de interplaca y de magnitud superior a 3.5 para sismos localizados en corteza.

### **Abstract**

With the objective to establish a permanent observatory to measure the total magnetic field, an Overhauser GSM 19 system has been installed at the Instituto Geofísico Sismológico of the Universidad Nacional de San Juan, 31° 32' 43'' S and 68° 41' 03'' W.

The Zonda magnetic observatory (EMZ) is located in a strategic region to study the South Atlantic Magnetic Anomaly. Moreover, EMZ is placed in a region of high seismic activity. In order to try to detect changes in the geomagnetic field associated with earthquake phenomena, the magnetometer has been set to take readings in intervals of 10 seconds. Data collected since 2007 are analyzed in comparison with the occurrence of earthquakes of magnitude larger than 3.

In this paper we analyze geomagnetic disturbances related to seismic events located in the crust and Wadati-Beniff zone up to epicentral distances of 100 km to EMZ. We have identified possible magnetic precursors for events with magnitudes greater than 4 for earthquakes from the interplate zone and above 3.5 for earthquakes located in the crust.

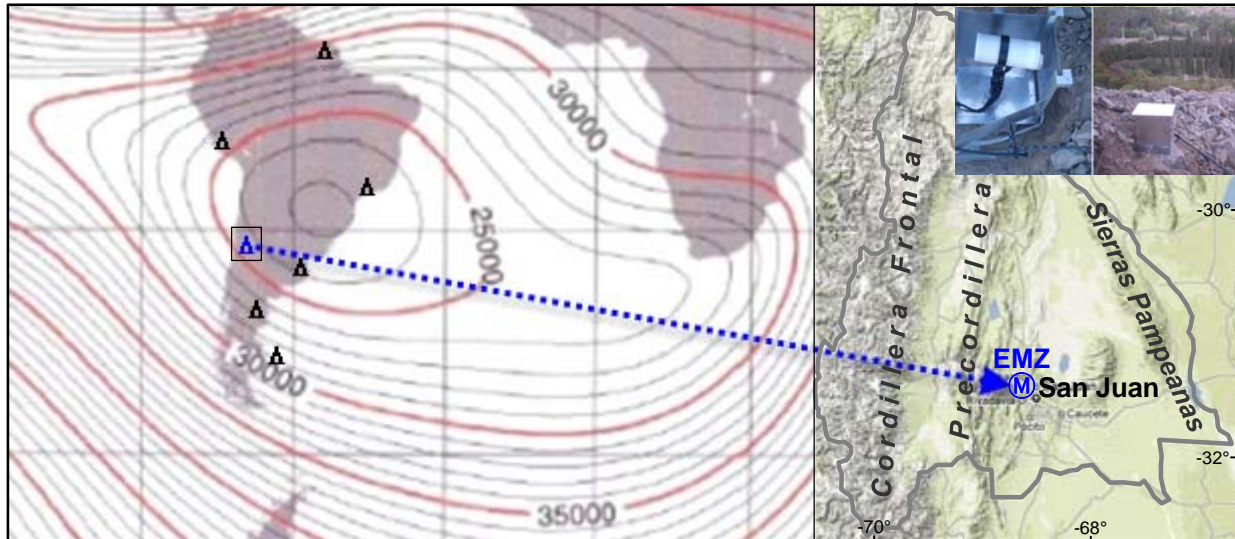
### **Introducción**

En setiembre de 2007 se instaló en el predio del Instituto Geofísico Sismológico (UNSJ) un sistema GSM 19T con el objetivo de establecer una estación magnética permanente, ubicada en 31° 32' 43'' de latitud



Sur y  $68^{\circ} 41' 03''$  de longitud Oeste (Gianibelli et al. 2009). Los registros resultaron un tanto ruidosos, por lo cual, en Abril de 2010 se instaló un nuevo y más preciso magnetómetro (GSM 19 Overhauser V7) equipado con un cable de 100 m para alejar al censor de ruidos culturales. Los registros geomagnéticos están siendo analizados en conjunto con el Observatorio Astronómico de La Plata y se están haciendo las gestiones para publicar los datos en el World Data Center for Geomagnetism.

La Estación Magnética Zonda (EMZ) llena un vacío en el sudoeste americano para estudiar la Anomalia magnética del Atlántico Sur, ya que es el único observatorio magnético (Figura 1) emplazado en el extremo sur de los Andes Centrales. Análisis de los datos observados durante el año 2008, en épocas de baja actividad solar, indican que la variación secular para EMZ es de  $-70$  nT/Año (Gianibelli et al. 2009).



**Figura 1:** Mapa de ubicación de la Estación Magnética Zonda (EMZ). Izquierda: Localización de los observatorios magnéticos (triángulos en negro) en Sudamérica, curvas de nivel: anomalía magnética del Atlántico Sur (nT). Derecha: Ubicación de EMZ en el mapa físico de la Provincia de San Juan y fotos del censor GSM 19.

EMZ se emplaza en la región de mayor actividad sísmica de la República Argentina. A efectos de detectar posibles cambios en el campo geomagnético asociados con fenómenos sísmicos, el magnetómetro se programó para tomar lecturas a intervalos de 10 segundos en forma permanente.

Uno de los problemas de los geofísicos de la tierra sólida es encontrar posibles relaciones entre un terremoto y cambios geomagnéticos en su área epicentral (Nagata 1972). Los avances en la técnica para mediciones precisas del campo geomagnético, en el conocimiento del efecto del estrés mecánico sobre las rocas de la corteza y los efectos electromagnéticos en la migración de fluidos en la zona de preparación de un sismo, han permitido hacer frente a este tipo de problemas (Nagata 1972, Sasai 1991, Draganov et al. 1991, Fenoglio et al. 1995, Cicerone et al. 2009). También se han modelado perturbaciones ionosféricas generadas por ondas de presión atmosférica excitadas por el fenómeno sísmico que se propagan a grandes distancias del terremoto (Iyemori et al., 2005).

El término precursor se emplea para describir la amplia variedad de fenómenos físicos que preceden a un terremoto. Estos fenómenos incluyen campos eléctricos y magnéticos inducidos, cambios de nivel de las aguas subterráneas, deformación superficial, cambios de temperatura, patrones anómalos de sismicidad, entre otros.



Alguno de estos fenómenos han sido observados fortuitamente antes de un terremoto, por ejemplo, un magnetómetro instalado a 7 km del terremoto de Loma Prieta en California (18-10-1989), registró dos precursores en el campo magnético, la primera dos semanas antes del evento principal ( $M_L$  7,1) y la segunda 3 horas antes (Cicerone et al. 2009).

Aún hay muchas incertezas en la observación de precursores magnéticos asociados con terremotos, mientras en algunos eventos se han observado claras señales registradas desde semanas hasta horas antes del evento principal, en otros terremotos no se detectan cambios que superen el ruido ambiental. En algunos su intensidad va en aumento y se detecta a más de 100 km de la fuente y otros eventos solo se detectan a pocos km del foco y con baja amplitud.

En este trabajo mostraremos resultados del análisis de eventos en el período Abril de 2010 a Julio de 2011, con epicentros en un radio no mayor a 100 km desde la estación EMZ. En esta época no se registró actividad de magnitud superior a 5.5, el umbral de análisis para sismos corticales es de  $M \geq 3$  y para la zona de Wadati-Benioff de  $M \geq 4.0$ . Si bien la energía liberada por los sismos es baja, se han encontrado perturbaciones magnéticas en el 70% de los eventos con magnitud superior a 4.

### Modelos de premonitores magnéticos

Algunos modelos físicos han sido propuestos para explicar la generación de señales electromagnéticas precursoras asociadas con terremotos. Para frecuencias ultra cortas (ULF) del campo magnético se han propuesto tres mecanismos.

1) Mecanismo *magnetohidrodinámico* “MHD” (Nagata 1972, Draganov et al. 1991): el flujo de un fluido conductor en presencia de un campo magnético genera un campo magnético secundario. De acuerdo con las leyes de Maxwell:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{\nabla^2 \mathbf{B}}{\mu_0 \sigma}$$

Donde  $\mu_0$  es la permeabilidad en el vacío,  $\sigma$  es la conductividad eléctrica,  $\mathbf{v}$  es la velocidad del fluido y  $\mathbf{B}$  el campo magnético. El campo magnético inducido en la fuente sísmica dependerá del tamaño de la zona de ruptura, de la conductividad del fluido y de la permeabilidad que favorece el aumento de  $\mathbf{v}$ .

2) Efectos *piezomagnéticos* “EPM” (Sasai 1991): el campo magnético secundario se induce por cambios en la magnetización de las rocas ferromagnéticas como respuesta a la aplicación de un esfuerzo. Para un material isotrópico, el cambio de magnetización  $\Delta M_i$  esta dado por: #

$$\Delta M_i = \left( -\frac{1}{2} \tau_{kk} \delta_{ij} + \frac{3}{2} \tau_{kk} \right) \beta M_j$$

Donde  $\beta$  es la sensibilidad al esfuerzo,  $\tau$  es el tensor de esfuerzo,  $\delta_{ij}$  es el delta de Kronecker. Si el material obedece a la ley de Hooke, el tensor de esfuerzo dependerá solo de las constantes de Lamé y de la deformación.

3) El mecanismo propuesto para explicar el campo magnético de frecuencias ultra cortas ULF es el *efecto electrocinético* (Fitterman 1979, Cicerone et al. 2009): resulta del flujo de corrientes eléctricas en la tierra en la presencia de una interface sólido-líquido, estas corrientes a su vez producen un campo magnético secundario. La densidad de corriente y la velocidad del fluido son procesos acoplados definidos por:

$$\mathbf{J} = -\sigma \nabla E - \frac{q\zeta}{\eta} \nabla P \quad \mathbf{v} = -\frac{q\zeta}{\eta} \nabla E - \frac{k}{\eta} \nabla P$$



Donde  $\mathbf{j}$  es la densidad de corriente,  $\mathbf{v}$  es la velocidad del fluido,  $E$  es el potencial transmisor,  $\epsilon$  es la constante dieléctrica,  $\zeta$  es una medida del potencial inicial en la interface eléctrica,  $\sigma$  la conductividad del fluido,  $\eta$  la viscosidad dinámica,  $k$  es la permeabilidad y  $P$  la presión del fluido. El campo magnético es inducido por el flujo de corrientes eléctricas y está dado por la ley de Biot-Savart:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{\nabla' \times \mathbf{j}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV'$$

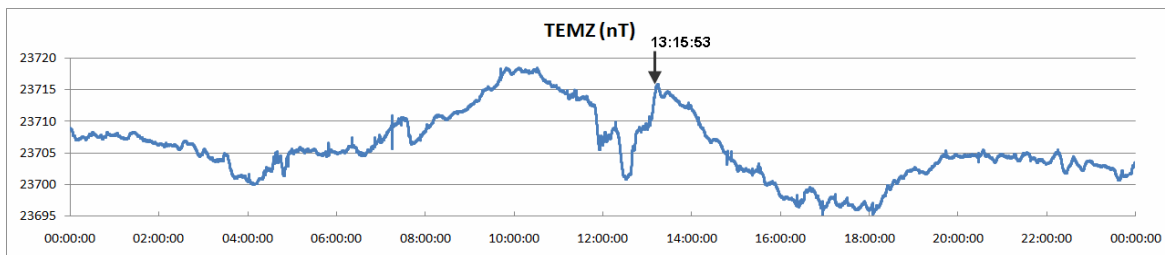
Fenoglio et al. (1995) analizaron la contribución de estos tres mecanismos a las señales magnéticas ULF observadas antes del terremoto de Loma Prieta (18-10-1989, Ms 7.1), el análisis se focalizó en dos incrementos magnéticos previos al evento principal, el primero tuvo una magnitud de 2 nT (dos semanas antes del evento principal) y el segundo de magnitud 6.7 nT ocurrió 3 horas antes del terremoto. En este estudio el efecto magnetohidrodinámico tiene una contribución despreciable en la señal magnética ULF, debido a su rápida atenuación. En este evento el efecto piezomagnético indujo un campo magnético de baja amplitud por el tipo de rocas y geometría de la falla. Por lo tanto el efecto electrocinético parece ser el más significativo, pudiendo explicar cambios magnéticos de 5 a 10 nT, semejantes a los observados antes del terremoto.

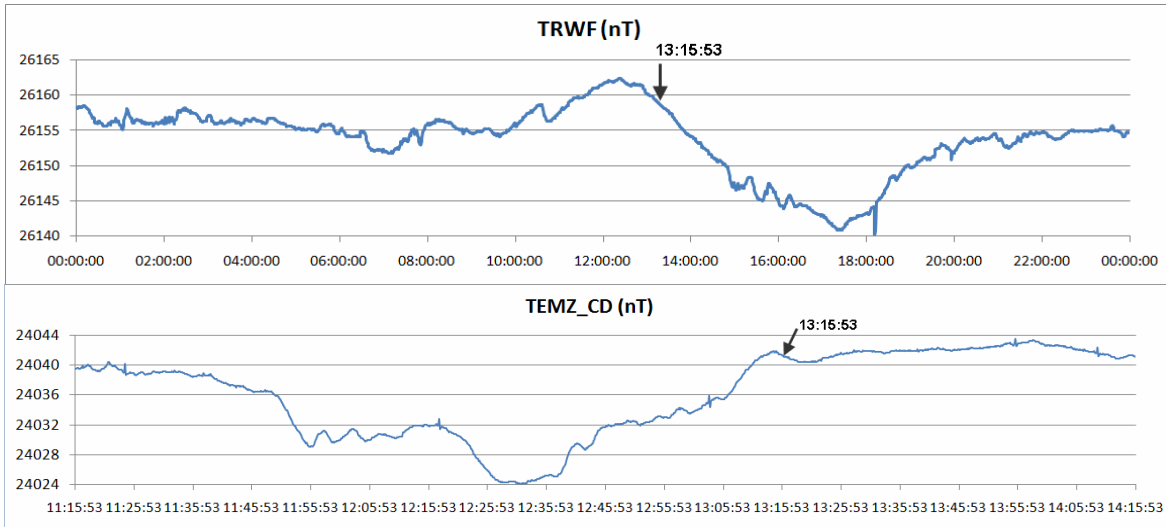
### Análisis de los datos

Desde que se instaló el magnetómetro Overhauser (10/4/2010) con cable de 100m para alejar al censor de los ruidos culturales, la Estación Magnética Zonda registra con alta relación señal/ruido. La comparación de los registros de EMZ con los observatorios de Trelew TRW y de Puerto Stanley PST, muestra excelente correlación especialmente con TRW.

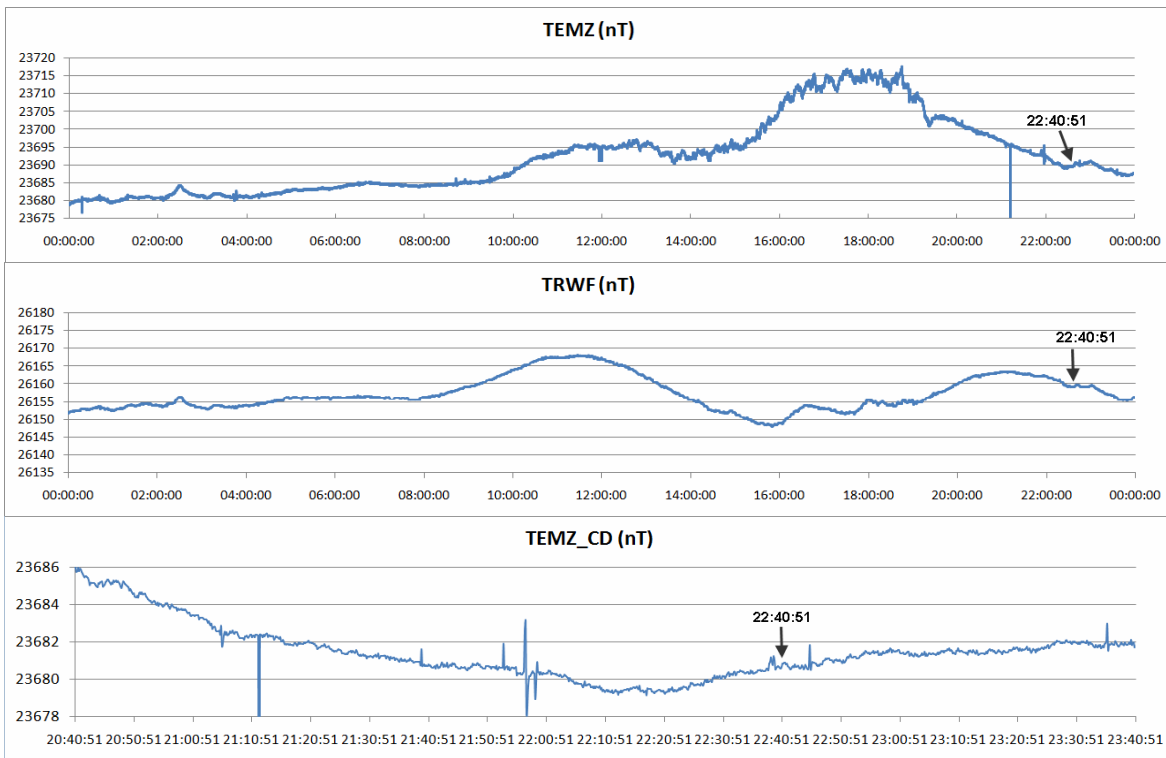
Estudios preliminares para identificar posibles perturbaciones magnéticas relacionadas con fuentes sismogénicas, se realizaron sobre sismos con magnitud superior a 3, desde el día 11/4/2010 al 27/07/2011. Se analizaron 107 eventos localizados a distancias epicentrales menores que 100 km de EMZ. Se prestó especial atención a los sismos corticales, ninguno de los cuales excedió la magnitud 4.5. Aproximadamente el 50 % de los sismos analizados presenta evidencias de actividad magnética relacionada con el sismo.

La metodología empleada consistió en comparar los magnetogramas de EMZ con los observados en TRW y PST (observaciones no perturbadas), señalando el tiempo de origen del sismo en los registros magnéticos e identificando perturbaciones en EMZ. Para eliminar, en parte, los efectos inducidos por el campo magnético externo (actividad solar), se corrigieron los registros de EMZ por variación diurna, teniendo en cuenta los datos de TRW.

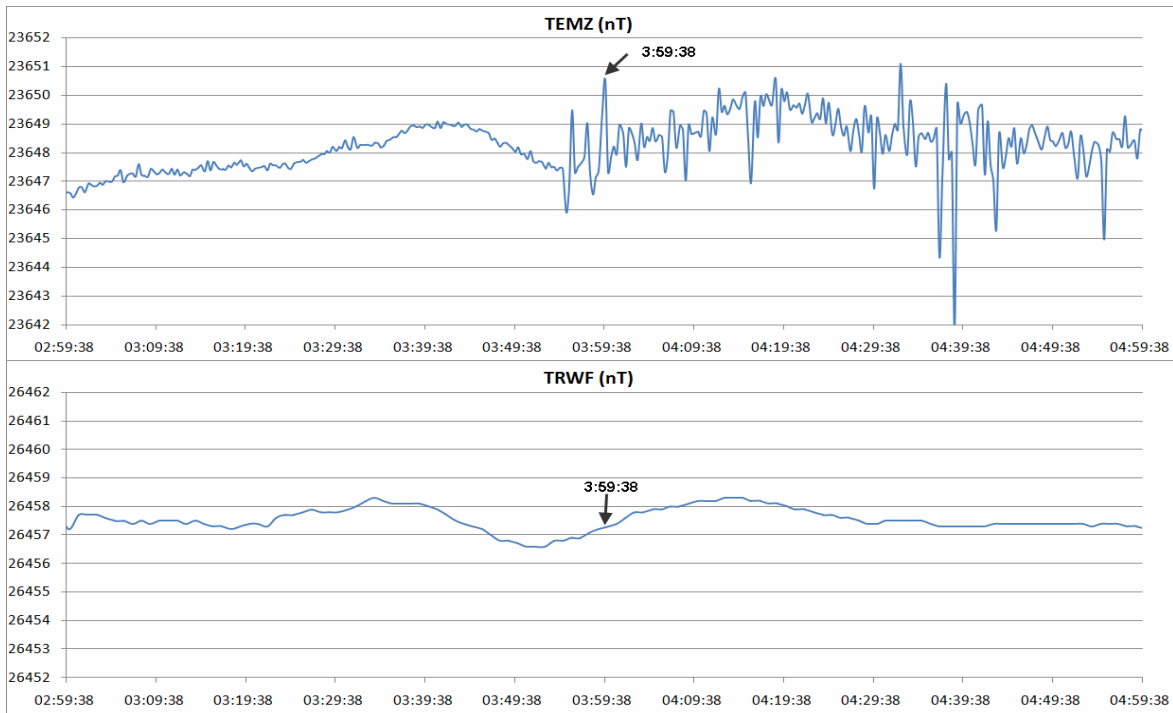




**Figura 2:** Comparación de los magnetogramas de los observatorios magnéticos Zonda (arriba) y de Trelew (centro) el día 20/7/2010. Parámetros del sismo: magnitud  $M_b=4.2$ , tiempo origen  $t=13:15:53$  (flecha), profundidad  $z=23$  km, coordenadas  $-31.8658^\circ S; -68.3250^\circ W$ . Abajo, detalle de 3 horas del registro de EMZ corregido por variación diurna.



**Figura 3:** Comparación de los magnetogramas de EMZ (arriba, TEMZ) y de Trelew (centro, TRWF) el día 26/11/2010. Parámetros del sismo: magnitud  $M_b=3.8$ , tiempo origen  $t=22:40:51$  (flecha), profundidad  $z=31$  km, coordenadas:  $-31.3128^\circ S; -68.5878^\circ W$ . Abajo, detalle de 3 horas del registro de EMZ corregido por variación diurna (TEMA\_CD).



**Figura 4:** Comparación de los magnetogramas de EMZ (arriba) y de Trelew (abajo) el día 10/4/2011, parámetros del sismo: magnitud  $M_b=4.4$ , tiempo origen  $t=3:59:38$  (flecha), Hipocentro:  $z=100$  km;  $-30.5478^\circ S$ ;  $-68.8919^\circ W$ .

El 70 % de los sismos con magnitud superior a 4 presentan perturbaciones magnéticas previas al evento, observables desde pocos minutos hasta varias horas antes del mismo. Especialmente los sismos provenientes de la zona de Wadati-Benioff ( $z\sim 100$  km) exhiben oscilaciones (Figura 4) de algunos nT en el rango de frecuencias de 0.020 a 0.005 Hz, que en algunos casos se observan varias horas antes del sismo. En Figuras 2 y 3 se muestran ejemplos de sismos corticales. El evento del 20/7/2010 presenta una espectacular señal de más de 12 nT observada desde 1:25 horas antes del sismo de magnitud 4.2. El sismo del 26/11/2010 muestra actividad 6 horas antes del evento acompañada por picos de alta frecuencia (Figura 3).

A pesar de no haberse registrado, en el periodo analizado, un sismo de magnitud importante. El hecho de observar perturbaciones asociadas con actividad sísmica de moderada energía, alienta la profundización de investigaciones en la búsqueda de premonitores de un evento destructivo. Creemos que con la instalación de más estaciones magnéticas en el frente de deformación activo de San Juan, distribuidas a distancias del orden de 100 km entre si, se podrían identificar las posibles zonas de preparación de un terremoto.

## Conclusiones

Se han analizado los registros de 15 meses del campo geomagnético registrado por la Estación Magnética Zonda, ubicada en la región de mayor actividad sísmica de la Argentina. Se identificaron perturbaciones en el campo relacionadas con eventos sísmicos localizados en la región de influencia de la estación (radio de hasta 100 km). Se encontraron más de 20 sismos con magnitud cercana a 4 que exhiben inequívocas evidencias de anomalías magnéticas registradas varios minutos a varias horas antes del sismo asociado. Se encontró que las perturbaciones magnéticas relacionadas con sismos con hipocentro en la zona de Wadati-Benioff, exhiben oscilaciones de varios nT previas al evento, mientras que los sismos corticales responden con picos magnéticos de amplitud y duración variable. Estos resultados propician la expansión y mejora



del instrumental y de metodologías aplicadas al análisis de premonitores magnéticos en regiones de alto peligro sísmico.

### **Agradecimientos**

Este trabajo forma parte del Proyecto 21E905, subsidiado por CICITCA, Universidad Nacional de San Juan. El instrumental se adquirió gracias al proyecto de modernización de equipamiento PME2006-024, también ha sido soportado, en parte, por el PICT-07-01903 (ANCYT).

### **Referencias**

- Cicerone, R., Ebel, J. y Britton, J., 2009, A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics* 476 (2009) 371–396
- Draganov, A., Inan, U. y Taranenko, Y., 1991. ULF magnetic signatures at the Earth's surface due to ground water flow: a possible precursor to earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 18, 1127–1130.
- Fenoglio, M., Johnston, M. y Byerlee, J., 1995, Magnetic and electric fields associated with changes in high pore pressure in fault zones: application to the Loma Prieta ULF emissions. *J. Geophys. Res.* 100, 12951–12958.
- Fitterman, D., 1979, Theory of electrokinetic–magnetic anomalies in a faulted halfspace. *J. Geophys. Res.* 84, 6031–6040.
- Gianibelli, J. C., Ruiz, F., Gimenez, M. y Quaglino, N., 2009, Análisis comparativo de las variaciones diurnas calmas registradas en los observatorios de Trelew, Las acacias y el Zonda. *XXIV Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas*, Actas: 175.
- Nagata, T., 1972, Application of tectonomagnetism to earthquake phenomena. *Tectonophysics*, 263-271.
- Iyemori T., Nose, M., Han, D., Gao, Y., Hashizume, M., Choosakul, N., Shinagawa, H., Tanaka, Y., Utsugi, M., Saito, A., McCreddie, H., Odagi, Y. y Yang, F., 2005, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20807, doi: 10.1029/2005GL024083
- Sasai, Y., 1991. Tectonomagnetic modeling on the basis of the linear piezomagnetic effect. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo* 66, 585–722.