



GEM Systems Advanced Magnetometers  
52 West Beaver Creek Road West, Suite 14  
Richmond Hill, ON Canada L4B 1L9  
Ph. 905-764-8008 Fax. 905-764-2949  
[info@gemsys.ca](mailto:info@gemsys.ca) [www.gemsys.ca](http://www.gemsys.ca)

## **Desarrollo del Súper Gradiómetro de Potasio para Aplicaciones de Investigación de Terremotos**

**Dr. Ivan Hrvoic y G. Hollyer**

GEM Advanced Magnetometers, 52 West Beaver Creek Road, Suite 14  
Richmond Hill, Ontario, M4L 2Z6 Canadá.

Este papel blanco describe un nuevo enfoque y lo que consideramos representa una metodología de tecnología avanzada en mediciones (electro)magnéticas para la investigación de terremotos. Los métodos existentes han tenido resultados limitados debido a las limitaciones de los instrumentos en cuanto a sensibilidad y estabilidad a largo plazo, imperfecciones en la eliminación de ruido ambiental, y en el caso de bobinas de inducción, debido a sus características de baja frecuencia limitada y el efecto peculiar de las mediciones en su amplitud de banda.

Analizamos campos magnéticos dipolares y sus gradientes generados por terremotos, con énfasis en su fuerte carácter local. Los momentos magnéticos de dos precursores medidos son calculados, así como las distancias máximas hasta donde dichos temblores pueden ser detectados mediante el uso de ambos métodos, el que está en uso actual y el método nuevo sugerido (es decir gradiómetro de potasio).

Debido a la extrema sensibilidad del "SuperGradiómetro" de potasio, el nuevo método es por lo menos un orden de magnitud más sensible que las bobinas de inducción actualmente en uso.

### **INTRODUCCIÓN**

El magnetismo ha desempeñado un papel importante en el estudio de terremotos por muchas décadas. Basado en la teoría de piezomagnetismo y / o electrocinética, ofrece una posibilidad de detección de precursores de terremotos debido a la acumulación gradual de la presión, al microagrietamiento de rocas y al flujo de agua durante el proceso. Tres son los factores limitadores típicos e incluyen sensibilidad, estabilidad de los instrumentos a largo plazo y la necesidad de eliminar el ruido ambiental (ruido diurno, ionosférico y antropogénico).



GEM Systems Advanced Magnetometers  
52 West Beaver Creek Road West, Suite 14  
Richmond Hill, ON Canada L4B 1L9  
Ph. 905-764-8008 Fax. 905-764-2949  
[info@gemsys.ca](mailto:info@gemsys.ca) [www.gemsys.ca](http://www.gemsys.ca)

Los primeros sistemas de supervisión con sensibilidades en el rango de nT y medición diferencial de base amplia produjeron en algunos pocos casos precursores impresionantes que sin embargo, ocurrían en tan pocas ocasiones y a veces bajo circunstancias semimisteriosas, que su credibilidad se mantuvo bastante baja. En algunos de los trabajos más recientes se han empleado bobinas de inducción con una mayor sensibilidad (25 pT). Aun con sus limitadas características de largo plazo (ancho de banda 0.01 Hz.), los resultados han sido un poco mejores ya que las anomalías midiendo unas pocas decenas de pT han podido ser detectadas.

Sin embargo la detección de precursores solo era posible cuando los detectores se encontraban bastante cerca del hipocentro del terremoto. A largas distancias, el efecto peculiar limita enormemente la detectabilidad por bobinas de inducción.

El efecto peculiar es el efecto por el que una corriente eléctrica de alta frecuencia tiende a correr generalmente cerca de la superficie exterior de un conductor eléctrico sólido (tierra), a frecuencias por arriba del rango auditivo. Es proporcional a la raíz cuadrada de la resistividad y la raíz cuadrada de  $1/\omega$  donde  $\omega$  es la frecuencia. La profundidad de penetración para una bobina superconductor es de aproximadamente 30 km (basada en una frecuencia de 10 MHz) comparada con la del SuperGradiómetro que cuenta con una profundidad de penetración mucho más grande (basada en una frecuencia de 0.1 MHz).

Anomalías piezomagnéticas varían sustancialmente con la intensidad del temblor, composición de las rocas bajo presión, geometría de la presión, etc. Asumiendo que estas son de carácter dipolar (3), sus campos varían con el cubo de la distancia (es decir, su detectabilidad se limitará a su proximidad a epicentros o mejor aun, a hipocentros).

Resultados más sistemáticos solo se pueden obtener si las mediciones se realizan con una sensibilidad mucho más elevada y mayor estabilidad a largo plazo. Al evaluar los resultados de las mediciones, se debe considerar el carácter local del campo magnético dipolar e interferencias por grandes variaciones de tiempo de los campos



GEM Systems Advanced Magnetometers  
52 West Beaver Creek Road West, Suite 14  
Richmond Hill, ON Canada L4B 1L9  
Ph. 905-764-8008 Fax. 905-764-2949  
[info@gemsys.ca](mailto:info@gemsys.ca) [www.gemsys.ca](http://www.gemsys.ca)

magnéticos (efectos diurnos e ionosféricos). El ruido antropogénico representa otra barrera formidable que debe de ser superada.

Tanto los magnetómetros como, en menor grado, las bobinas de inducción, necesitan trabajar en modo diferencial para alcanzar una mayor sensibilidad – libre de interferencias por las variaciones de tiempo del campo magnético. Instrumentos de referencia que solamente miden variaciones temporales del campo magnético están ubicados por lo general lejos de zonas activas, resultando a menudo en una eliminación imperfecta de las interferencias de ruido ambiental.

## **SUPERGRADIÓMETRO DE POTASIO**

La sensibilidad extrema requerida para el método de base corta para la investigación de terremotos la encuentra en el SuperGradiómetro de potasio de GEM Advanced Magnetometers. El SuperGrad fue desarrollado a raíz de la cooperación entre el Profesor E.A. Alexandrov más su equipo de investigación y el (difunto) Dr. Arthur Green de la United States Geological Survey.

El ruido de fondo del gradiente magnético del SuperGrad es 0.05 pT o 50 fT para 1 medición por segundo. Un espacio de 50 m a 100 m entre los sensores produce una sensibilidad de gradiente de 0.5 fT/m a 1 fT/m.

Para una distancia de 10 km entre sensores y el hipocentro del temblor, esto equivale a detectar entre 1.6 pT a 3.3 pT del campo magnético local del temblor, a una medición por segundo (o un momento magnético mínimo de  $16 - 33 \cdot 10^6 \text{ Am}^2$ ). A una distancia de 100 km del hipocentro, la detectabilidad se vuelve 16 – 33 pT (o un momento magnético mínimo de  $16-33 \cdot 10^{10} \text{ Am}^2$ ).

Esto es comparable a la sensibilidad de una bobina de inducción, aunque estas presentan serios efectos peculiares al medir frecuencias relativamente altas a distancias equivalentes. Por ejemplo, si estimamos la profundidad de penetración a 0.01 Hz. y la conductividad promedio de la tierra de 0.01 S/m a 30 km <sup>(7)</sup>, encontramos que para una distancia de 100 km., esto resulta en una atenuación de más de 20 veces.



GEM Systems Advanced Magnetometers  
52 West Beaver Creek Road West, Suite 14  
Richmond Hill, ON Canada L4B 1L9  
Ph. 905-764-8008 Fax. 905-764-2949  
[info@gemsys.ca](mailto:info@gemsys.ca) [www.gemsys.ca](http://www.gemsys.ca)

La sensibilidad del SuperGrad es aproximadamente una orden o magnitud mayor que las sensibilidades registradas por bobinas de inducción en cualquier circunstancia. Por ejemplo, un simple cálculo demuestra que el terremoto de San Juan Bautista hubiera sido detectado por el Supergrad con una relación señal a ruido de 22:1 mientras que las bobinas de inducción apenas lo detectaron (relación señal a ruido de 1:1).

En contraste con bobinas de inducción, el ruido  $1/f$  del SuperGradiómetro puede ser limitado (teóricamente) a 1 pT a largo plazo; es decir, 10 fT / m podría ser el máximo ruido a largo plazo. Esto también se acerca a nuestras mediciones preliminares de ruido ionosférico. Potencialmente, momentos magnéticos más débiles que un valor de  $10^8 \text{ Am}^2$  (M5) pueden resultar detectables a una distancia de 10 km del hipocentro del temblor.

El último factor limitador es probablemente la desviación del magnetómetro / gradiómetro a largo plazo – un factor que está actualmente siendo evaluado. La eliminación del ruido antropogénico también es algo prometedor. A una distancia de 1 km y una sensibilidad de 1 fT/m, una anomalía grande de  $1000 \text{ Am}^2$  relacionada con efectos creados por el hombre, se vuelve indetectable.

## **INSTRUMENTACIÓN**

El gradiómetro especial de GEM es un sistema basado en potasio bombeado ópticamente – una tecnología única que puede producir volúmenes de datos muy altos, tomando 20 mediciones por segundo.



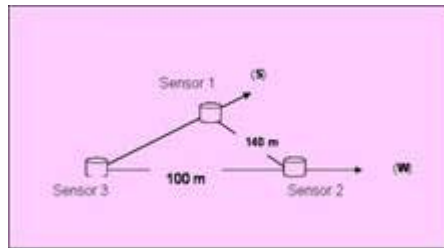
Consola "SuperGrad" con tres sensores.

El sistema está diseñado especialmente para mayor sensibilidad, alto grado de exactitud absoluta, error direccional mínimo y fiabilidad



GEM Systems Advanced Magnetometers  
52 West Beaver Creek Road West, Suite 14  
Richmond Hill, ON Canada L4B 1L9  
Ph. 905-764-8008 Fax. 905-764-2949  
[info@gemsys.ca](mailto:info@gemsys.ca) [www.gemsys.ca](http://www.gemsys.ca)

basándose en los principios de la teoría de bombeado óptico de potasio. En la práctica, el sistema cuenta con 3 sensores y gradientes de medición en dos direcciones perpendiculares en un plano horizontal, según se muestra a continuación.



Muestra del sistema SuperGrad representando dos sensores horizontales (W, S) en referencia al sensor (3) para medición de gradiente horizontal en dos direcciones.

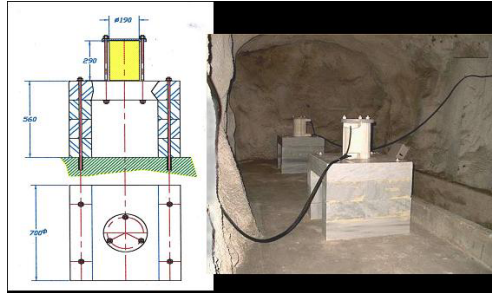
## EJEMPLOS

El SuperGrad está siendo actualmente empleado para estudios sísmicos en la vecindad de la falla del Mar Muerto, Israel, en combinación con un sistema de mediciones de radón integrado. El sistema "Integrated SuperGrad / Radon" (ISGR) fue desarrollado en colaboración con las siguientes instituciones israelíes: "SOREQ Nuclear Institute of Israel", "Geological Survey of Israel" y "Survey of Israel".

El SuperGradiómetro se instaló a mediados del 2002 en el túnel Amram cerca de Eilat en Israel. Este lugar está situado cerca de donde han ocurrido numerosos temblores de poca magnitud y la meta es aprender más sobre los terremotos y de ser posible detectar precursores. La supervisión de radón efectuada por "Geological Survey of Israel" complementa las mediciones magnéticas.



GEM Systems Advanced Magnetometers  
52 West Beaver Creek Road West, Suite 14  
Richmond Hill, ON Canada L4B 1L9  
Ph. 905-764-8008 Fax. 905-764-2949  
[info@gemsys.ca](mailto:info@gemsys.ca) [www.gemsys.ca](http://www.gemsys.ca)



Sensores SuperGrad instalados en el túnel Amram  
con un diagrama de la plataforma de mármol para montaje de  
sensores

El SuperGrad mide campos magnéticos en 3 sensores 20 veces por segundo con 50 msec (10 Hz ancho de banda Nyquist) y tiempos de integración de 1 segundo. Seis canales de datos medidos con una resolución de 1fT (11 dígitos) son transferidos automáticamente a "Survey of Israel" cada hora para ser analizados. Un receptor GPS provee el Tiempo Universal exacto.

El ruido de fondo de los datos es aproximadamente 0.1 pT por 1 segundo de integración con una sensibilidad de aproximadamente 2 fT/m a 50 m de distancia del sensor.

El gradiómetro ha estado en uso por más de dos años y se han obtenido más de 8 billones de mediciones individuales – probablemente el mayor número de datos magnéticos de este tipo que jamás haya sido recolectado. De acuerdo con estos resultados, el sistema demuestra excelente fiabilidad a largo plazo. Se ha construido un segundo SuperGradiómetro de tres sensores que será instalado dentro de un año en una nueva zona de reducido magnetismo cercana a la misma falla.

Otro SuperGrad ha sido instalado en un emplazamiento conducido por el "National Research Council" (NRC) en Ottawa, Canadá. Sin embargo, se ha planeado otra instalación en un área de mayor actividad sísmica, anticipando resultados e historial de casos adicionales.



GEM Systems Advanced Magnetometers  
52 West Beaver Creek Road West, Suite 14  
Richmond Hill, ON Canada L4B 1L9  
Ph. 905-764-8008 Fax. 905-764-2949  
[info@gemsys.ca](mailto:info@gemsys.ca) [www.gemsys.ca](http://www.gemsys.ca)

Por extensión, los principios de gradiometría aquí descritos pueden aplicarse a otros tipos de aplicaciones, tales como gradiómetros para la exploración aérea con base de referencia bastante corta (0.3 m) o mediciones extremadamente sensitivas de la magnetización residual en muestras paleomagnéticas. El SuperGrad tiene bastante potencial con respecto a otros sistemas (por ej. SQUIDS) debido a su fiabilidad, bajo costo y relativa facilidad de uso. El trabajo en esta área continúa.

## **CONCLUSIONES**

Podemos concluir que los magnetómetros con sensibilidad de 1 nT solo pueden detectar los terremotos más fuertes ( $M = 7$  y  $8$ ); las bobinas de inducción, terremotos de magnitud  $M = 6$  o más, y el Supergradiómetro en modo "rápido" y "lento",  $M = 5$  o más. Note que este análisis es aproximado, ya que no considera los factores geométricos. En caso de tomar en cuenta dichos factores podemos esperar algunas variaciones, aunque no muy relevantes, en los resultados anteriores.