

RESONANCIA MAGNÉTICA UNILATERAL

UNILATERAL MAGNETIC RESONANCE

J. C. GARCÍA

Centro de Biofísica Médica, Universidad de Oriente, Cuba. juan.garcia@cbiomed.cu

(Recibido 20/2/2013; Aceptado 20/3/2013)

En solo unas décadas la Resonancia Magnética Nuclear (RMN) se ha convertido en una herramienta importante en casi todas las áreas del desarrollo humano. En este contexto, la Resonancia Magnética Unilateral (RMU) ha emergido en años recientes como una técnica novedosa para explorar muestras de tamaño arbitrario. En RMU el experimento tiene lugar en un lado del imán, lo cual implica campos magnéticos inhomogéneos. Varias aplicaciones han sido desarrolladas en campos como la exploración petrolera, caracterización de productos alimenticios, biomedicina, análisis de materiales, preservación de obras de arte e investigaciones de suelos y plantas. Sin embargo, debido a las ventajas y posibilidades del método, nuevas aplicaciones continúan desarrollándose. El presente trabajo introduce las particularidades de la RMN en campos inhomogéneos y hace una revisión de los trabajos más importantes realizados hasta el momento en RMU. Se describen las propuestas de imanes presentadas y algunas de las aplicaciones desarrolladas.

In just a few decades Nuclear Magnetic Resonance (NMR) has become an important tool in almost all areas of human development. In this context, Unilateral Magnetic Resonance (UMR) has emerged in recent years as a powerful technique to explore samples of arbitrary size. In UMR the desired magnetic field is generated in a remote volume outside the magnet, which means inhomogeneous magnetic field. New magnet designs have been developed and applied in diverse fields such as down-hole oil well logging, characterization of food products, medical applications, material analysis, artwork preservation and investigation of plants and soils. Nevertheless, because of the advantages and capabilities of this method, new applications are continually being developed. This work introduces the particularities of NMR in inhomogeneous fields and makes a review of the most important works developed in UMR. Magnet approaches and new applications are discussed.

PACS: Generation of magnetic field, 07.55.Dd; Magnetostatic devices, 85.70.Ec; Instrumentation for Magnetic Resonance Imaging, 87.61.Ff.

INTRODUCCIÓN

La Resonancia Magnética Nuclear (RMN) como fenómeno físico ha sido tratada con amplitud en muchos textos [1, 2]. Para los propósitos de este trabajo debe recordarse que solo aquellos núcleos con momento magnético no nulo pueden emplearse para el experimento de RMN. Existe una gran cantidad de elementos químicos con isótopos que poseen esta propiedad. En lo adelante, todos los análisis serán referidos al hidrógeno (^1H) por ser, debido a su abundancia en la naturaleza y su elevada razón giromagnética ($\gamma = 2.675 \times 10^8 \text{ rad/s/T}$), el más empleado.

En presencia de un campo magnético externo, los momentos magnéticos de los núcleos se orientan de forma paralela o antiparalela con respecto a la orientación del campo magnético. El hecho de que los núcleos posean también momento angular impide un perfecto alineamiento. En lugar de esto, ocurre un movimiento de precesión alrededor de la dirección del campo estático a una frecuencia ω_0 conocida como frecuencia de Larmor.

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (1)$$

Para el hidrógeno la resultante de la combinación de los momentos magnéticos de las poblaciones paralelas y antiparalelas se conoce como momento magnético neto o magnetización. El experimento básico de RMN consiste en desplazar esta magnetización un ángulo determinado a partir

de su posición de equilibrio (como referencia siempre en el eje z) empleando campos de radiofrecuencia (RF) de frecuencia igual a la frecuencia de Larmor y observar, con una antena situada en el plano transversal (xy), la señal liberada por la muestra durante el retorno de la magnetización a su posición de equilibrio. Dicha señal puede aparecer en forma de una señal de inducción libre (SIL), después de un pulso de RF, o un eco cuando más de un pulso es aplicado.

El retorno de la magnetización a su posición de equilibrio está caracterizado por el tiempo de relajación longitudinal (T_1) que está determinado por las interacciones espín-retículo dentro de la muestra. La pérdida de coherencia irreversible en el plano transversal está caracterizado por el tiempo de relajación T_2 determinado por las interacciones espín-espín. El tiempo de relajación T_2^* , además de la pérdida de coherencia debido a T_2 , incluye los efectos de las inhomogeneidades del campo magnético estático B_0 que en general pueden ser revertidos.

Normalmente el experimento de RMN requiere de campos magnéticos de alta homogeneidad. De ahí que generalmente los experimentos se realicen en imanes cerrados o semicerrados, donde las condiciones de simetría permiten obtener las altas homogeneidades requeridas. Sin embargo, estas condiciones imponen restricciones que limitan el empleo de la tecnología en algunos casos. Por ejemplo, el hecho de que los imanes sean cerrados limita en tamaño de la muestra que puede ser estudiada. De forma general los imanes son de gran tamaño y

requieren condiciones específicas que garanticen la estabilidad temporal de los mismos, ello implica una muy baja portabilidad de estos equipos. Finalmente, el costo de los imanes empleados en sistemas con campos homogéneos es alto y en general determina el alto precio de los equipos.

La RMN de campos homogéneos tiene además limitaciones tecnológicas que la afectan en el estudio de sólidos. Los cortos tiempos de relajación T_2 en este tipo de muestras limitan el tiempo de adquisición y por tanto imponen la necesidad de grandes intensidades de gradientes de campo magnético para mantener resoluciones aceptables en las imágenes. Estos gradientes de campo deben ser, además, conmutados en tiempos muy cortos, lo cual resulta una exigencia muy alta para los generadores.

Solucionar muchas de las limitaciones anteriores implica renunciar a las bondades de los imanes cerrados y desarrollar el experimento empleando campos magnéticos inhomogéneos.

RMN EN CAMPOS INHOMOGÉNEOS

Para analizar las particularidades de la RMN en campos inhomogéneos es necesario analizar el comportamiento de la magnetización durante la excitación de RF. La Fig. 1 muestra un diagrama descriptivo de este proceso en un sistema de coordenadas rotatorio con frecuencia de rotación igual a la de excitación. En este caso, los espines con frecuencia de precesión ω_x continuarían rotando, aún en el sistema rotatorio, a una frecuencia $\Delta\omega_0 = \omega_x - \omega_0$ que puede ser interpretada como la presencia de un campo estático ΔB_0 .

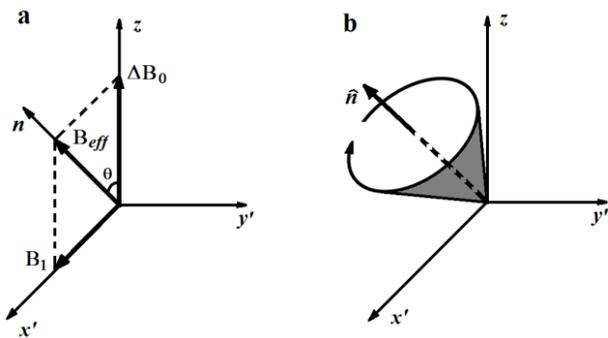


Figura 1: Comportamiento de la magnetización durante una excitación fuera de resonancia.

Durante la excitación, la presencia de los campos B_1 de RF y ΔB_0 producen un campo magnético B_{eff} en la dirección del vector normalizado \hat{n} . Por lo tanto, la magnetización rotará alrededor de \hat{n} en lugar de hacerlo alrededor del eje x' como sucede en campos homogéneos ($\Delta B_0 = 0$). La frecuencia de rotación en este caso está dada por la ecuación (2) y el ángulo de inclinación θ por la ecuación (3).

$$\omega_{eff} = \sqrt{\Delta\omega_0^2 + \omega_1^2} \quad (2)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\omega_1}{\Delta\omega_0}\right) \quad (3)$$

Las primeras consecuencias de este comportamiento están relacionadas, precisamente, con la excitación. Resulta difícil establecer con precisión los valores óptimos de la potencia de RF para obtener, por ejemplo, un ángulo de inclinación de la magnetización de 90° . El criterio de maximizar la señal, aplicado en campos homogéneos, no resulta útil en este caso pues la máxima señal no necesariamente se obtiene para 90° [3]. Para solucionar esta dificultad Bain y Randall [4] propusieron una idea basada en el patrón de oscilación de los ecos al inicio de la caída exponencial en una secuencia multipulso.

Debe también tenerse en cuenta que, debido a las inhomogeneidades de B_0 , todo pulso de RF aplicado es selectivo pues solo una parte de la muestra es excitada. El volumen a excitar depende del ancho del pulso empleado. Esto complica el proceso de ajuste de la potencia aplicada si la misma se realiza variando el ancho de los pulsos, cosa que ocurre comúnmente pues de forma general se sitúa la potencia en su valor máximo para minimizar los anchos de pulso. Igualmente se hace más complicado el proceso de optimización de las antenas de RF pues no resulta obvia la elección del factor de calidad (Q) de las mismas. Factores de calidad altos, como los empleados en campos homogéneos, implican una reducción del volumen a estudiar. En otras palabras, resulta difícil encontrar el equilibrio entre ganancia de señal por incremento de Q y pérdida por disminución del volumen efectivo bajo estudio.

Otra consecuencia importante aparece en secuencias multipulsos, como CPMG [5], utilizadas para la medición de los tiempos de relajación T_2 . En este caso, aparece una oscilación en los primeros ecos que luego tiende a una exponencial decreciente con constante de caída $1/T_{2,eff}$ en lugar de $1/T_2$ como ocurre en campos homogéneos. Esto, así como la obtención de la Ec. (4) ha sido bien explicado por Hurliman en [6].

$$\frac{1}{T_{2,eff}} = \frac{1}{T_2} + \langle n_z^2 \rangle \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (4)$$

Lo anterior significa que aun sin considerar los efectos de la difusión, que son importantes dada la inhomogeneidad del campo estático B_0 , el T_2 medido posee una contribución de T_1 . La magnitud de dicha contribución depende de cuan diferentes son los T_1 y T_2 de la muestra y del factor $\langle n_z^2 \rangle$ que no es más que el promedio de los cuadrados de las componentes z de los ejes de rotación \hat{n} , lo cual depende de la inhomogeneidad del campo estático a través de las Ec. (2) y (3).

En las mediciones de difusión debe tenerse en cuenta que la excitación fuera de resonancia provoca la aparición de múltiples vías de coherencia del sistema de espines y por tanto contribuciones de muchos ecos a la señal obtenida. Hurliman [7] ha dado una buena descripción de este proceso mostrando que los ecos resultantes de cada vía de coherencia poseen diferentes sensibilidades a los efectos de la difusión. Esto complica el análisis de la señal resultante y la determinación de los coeficientes de difusión. Hurliman también ha sugerido el empleo de los ciclos de fase para seleccionar vías de coherencia específicas como

forma de superar esta dificultad, en especial uno de 16 pasos que permite aislar solamente las contribuciones de los ecos estimulados. Esta propuesta no permite la medición directa de los coeficientes de difusión al eliminar el eco directo y por tanto la referencia necesaria para la determinación del mismo. Sin embargo, García *et al.* [8] han demostrado que, aún en este caso, la misma puede ser empleada con solo pequeños cambios en las expresiones matemáticas y la metodología de medición.

En general, todas las dificultades propias del trabajo en campos inhomogéneos han sido explicadas y superadas. Ello ha permitido la realización de estudios de relajación, difusión, imágenes e incluso espectroscopia en diferentes aplicaciones, aunque en general los estudios de relajación y difusión son los más empleados. En este sentido se han desarrollado nuevos algoritmos para el cálculo de funciones de distribución de $T_{2\text{eff}}$ que han facilitado la implementación de funciones bidimensionales $T_{2\text{eff}}$ - Difusión, $T_1 - T_{2\text{eff}}$ y T_1 - Difusión, las cuales aportan mucha más información sobre la muestra bajo estudio.

El desarrollo de las técnicas de RMN de campos inhomogéneos ha estado muy ligado a las aplicaciones en las que se han enfocado. En general todas son técnicas de Resonancia Magnética Unilateral (RMU) pues desarrollan el experimento de RMN en el campo magnético producido en un lado de un imán. Para su estudio, dos grupos pueden ser claramente establecidos. El primero incluye aquellas aplicaciones desarrolladas en un lado de un imán de los comúnmente empleados en estudios de campos homogéneos. Los altos gradientes de campos magnéticos presentes en esta zona, en el orden de decenas de T/m , permiten desarrollar experimentos en sólidos con muy alta resolución. En general se asocian con la técnica conocida como STRAFI (Stray Field Imaging) [9] en la cual se selecciona un plano, generalmente bien fino, y se desplaza la muestra empleando dispositivos mecánicos hasta obtener la imagen deseada.

El segundo grupo de estudio incluye aquellos experimentos donde la medición se realiza empleando imanes portables, generalmente permanentes, que pueden ser trasladados hasta la muestra, eliminando así cualquier restricción de tamaño, peso o ubicación de la misma. Es este tipo de medición lo que más se conoce como RMU.

RESONANCIA MAGNÉTICA UNILATERAL

Los trabajos más importantes en el desarrollo tecnológico de la RMU han estado dirigidos al diseño de imanes que soporten las nuevas aplicaciones que se desean desarrollar. Tres ideas de diseño pueden ser claramente diferenciadas. La primera utiliza campos inhomogéneos tanto de B_0 como de RF, en el segundo caso se producen volúmenes relativamente homogéneos y la tercera trata de generar gradientes constantes de campo magnéticos.

Trabajando con B_0 y B_1 inhomogéneos. En esta variante

de diseño el campo inhomogéneo producido por un imán se combina con el campo de RF, también inhomogéneo, produciendo un volumen de medición en la zona donde ambos son perpendiculares entre sí (Fig. 2).

Esta configuración puede producir campos magnéticos intensos pero los volúmenes de medición son en general pequeños, además en algunas aplicaciones se ve muy afectada por el efecto de la difusión debido a las inhomogeneidades del campo. El mejor ejemplo de esta propuesta es el MOUSE (Mobile Universal Surface Explorer) [10] propuesto por Blumich *et al.* en 1996. Como puede verse en Fig. 2 el MOUSE combina el campo producido por dos imanes unidos por un material ferromagnético. Como antena de RF se emplea un solenoide ubicado en el espacio entre los imanes.

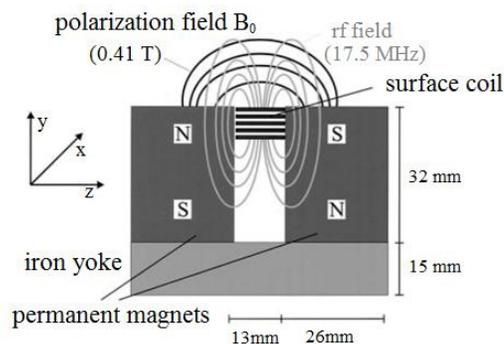


Figura 2: Diagrama descriptivo del MOUSE reproducido de [11]. El volumen de medición se forma donde B_0 y B_1 son perpendiculares.

En 2006 Chang *et al.* [12] propusieron una idea similar empleando el campo de fuga de un imán Halbach [13] construido con ocho imanes cilíndricos de NdFeB. Como antena de RF se empleó una bobina superficial doble cara en espiral.

También basado en esta variante de diseño, en 2007 Marble *et al.* [14] concibieron un pequeño imán basado en dos discos magnéticos y una bobina superficial tipo doble D (Fig. 3) para ser empotrado en muestras de concreto [15].

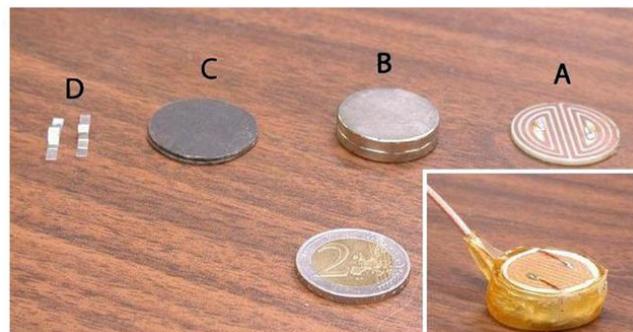


Figura 3: Sensor de RMU para ser empotrado en muestras de concreto. Reproducido de [15].

Volúmenes homogéneos. Este grupo basa la idea de diseño en crear un volumen donde el campo es relativamente homogéneo. Para ello se trata de crear cancelaciones de campo magnético empleando combinaciones de imanes. Debe quedar

claro que las homogeneidades logradas (variaciones en orden de %) aún dista mucho de las obtenidas para los imanes cerrados (variaciones en el orden de ppm). Estas propuestas son más apropiadas para estudio de líquidos debido a la reducción del efecto de la difusión en comparación con las otras variantes.

En este sentido, en 1980 Jackson *et al.* [16] propusieron combinar el campo magnético producido por dos imanes cilíndricos para lograr una región toroidal de campo magnético homogéneo (Fig. 4). Un solenoide situado entre los imanes fue utilizado como antena.

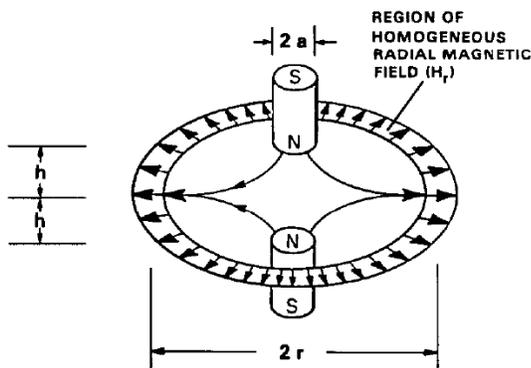


Figura 4: Diseño propuesto por Jackson *et al.* [16]. La antena de RF es colocada entre los polos de los dos imanes cilíndricos.

En 1992, Kleinberg *et al.* [17] combinaron el campo magnético producido por tres imanes para crear el volumen homogéneo deseado (Fig. 5). El hecho de que el campo magnético obtenido es perpendicular a la superficie del arreglo, dificulta el diseño de la antena de RF. En este caso se empleó una antena semi-coaxial cargada con ferrita.

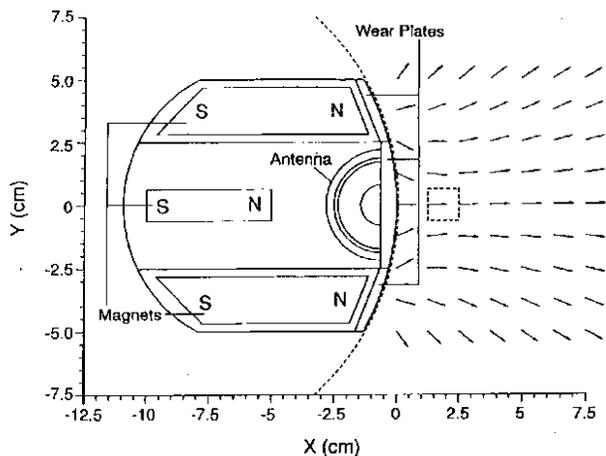


Figura 5: Diseño propuesto por Kleinberg *et al.* en [17]. El imán, y por tanto el tamaño del volumen de medición (marcado con líneas discontinuas), son alargados a lo largo del eje z.

En 2002, Fukushima y Jackson [18] propusieron una variante más acabada al rotar 180° el diseño propuesto por Kleinberg *et al.* El diseño final resultó en un imán cilíndrico dentro de otro imán tubular. De esta forma se logró un volumen con mejor homogeneidad y más alto campo magnético. Al igual que en la propuesta de Kleinberg *et al.* el campo magnético es perpendicular a la superficie lo cual impone el empleo de antenas menos sensibles.

Una idea diferente fue propuesta por Marble *et al.* [19, 20] en 2005. En este caso un casquete ferromagnético ubicado sobre un arreglo de imanes (Fig. 6a) o un imán simple (Fig. 6b) produce el campo magnético deseado. El contorno del casquete ferromagnético se determina mediante una expresión analítica obtenida empleando potenciales escalares. El campo magnético perpendicular a la superficie impone también en este caso el empleo de antenas menos sensibles.

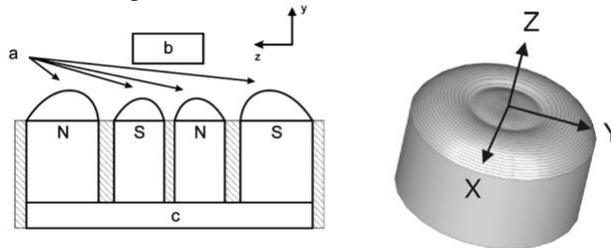


Figura 6: Diseño propuesto por Marble *et al.* para un arreglo de imanes [19] y un imán cilíndrico [20].

En 2006 Manz *et al.* [21], basados en la propuesta de Fukushima y Jackson, emplearon un arreglo de nueve imanes (Fig. 7) para crear el volumen homogéneo. El campo B_0 es perpendicular la superficie. Como antena de RF se empleó una bobina (figura 8) multivuelta. Esta propuesta resulta más complicada desde el punto de vista constructivo que las anteriores.

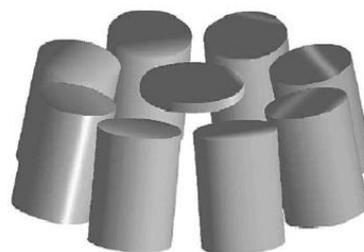


Figure 7: Distribución de los imanes en el arreglo propuesto por Manz *et al.* en [21].

Marble *et al.* [22] propusieron en 2007 un arreglo de tres imanes para generar un volumen homogéneo. En este diseño, reproducido en Fig. 8, los imanes son ubicados de forma que el campo producido es paralelo a la superficie, lo cual permite emplear bobinas más sensibles. Debido a que todos los imanes tienen el campo magnético orientado en la misma dirección, el diseño es muy seguro y compacto.

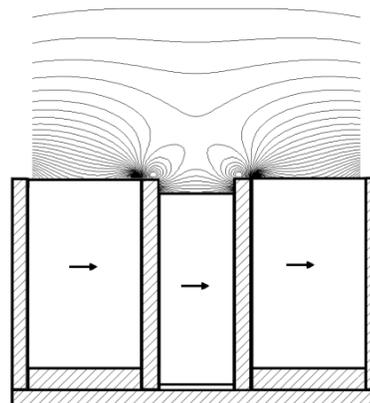


Figura 8: Dibujo reproducido de [23] del arreglo de tres imanes propuesto por Marble *et al.*

Un diseño más complejo fue propuesto, también en 2007, por Perlo *et al.* [24] basado en la idea original del MOUSE. En este caso un gran número de imanes son combinados para lograr la homogeneidad deseada. Este diseño (Fig. 9) puede producir volúmenes con altas homogeneidades que permiten hacer incluso experimentos de espectroscopia de RMN. Sin embargo, la gran cantidad de elementos, que además son sensibles a la variación con temperatura, hacen la propuesta difícil de emplear y de reproducir.

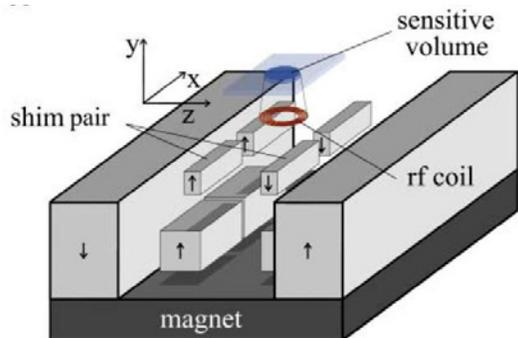


Figura 9: Figura reproducida de [24] donde se muestra la distribución de imanes de la propuesta de Perlo *et al.* La cantidad de elemento lo hace poco útil en aplicaciones prácticas.

Más recientemente, en 2011, Chang *et al.* [25] propusieron una nueva idea basada en un imán principal y un pequeño imán corrector en oposición como se muestra en Fig. 10. El campo magnético generado en este caso es también paralelo a la superficie.

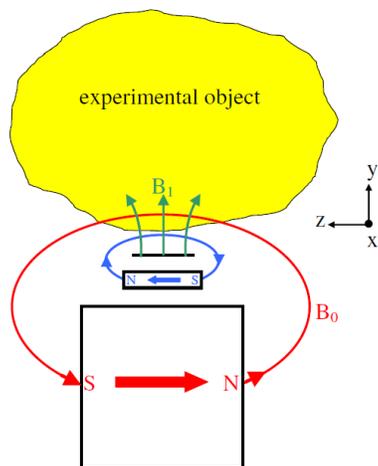


Figura 10: Esquema del diseño de Chang *et al.* extraído de [25].

Gradientes constantes de campo magnético. En este tipo de imanes se trata de controlar la inhomogeneidad del campo magnético generado para que varíe linealmente con la distancia. Esto permite obtener imágenes unidimensionales (perfiles) con alta resolución y la realización de estudios de difusión.

En tal dirección Prado *et al.* [26] presentaron una propuesta en 2000, empleando un pequeño imán acompañado de unas bobinas generadoras de gradiente de campo magnético pulsante. Esta propuesta permite la obtención de imágenes, empleado métodos de codificación pura de fase [27]. En 2002,

Blumich *et al.* [28] propusieron una variación del MOUSE empleando un imán simple que permite obtener un gradiente de 2000 G/cm en su parte central. Esta versión es muy simple pero la región de gradiente constante es de solo unos 4 mm . En 2003, Casanova y Blumich [29] y en 2004 Perlo *et al.* [30] desarrollaron la propuesta de Prado *et al.* y con un imán mejorado (Fig. 11) lograron obtener imágenes en 2D y 3D. Sin embargo estas propuestas, al igual que la idea original, necesitan de fuentes de gradientes para alimentar las bobinas adicionales para la codificación espacial.

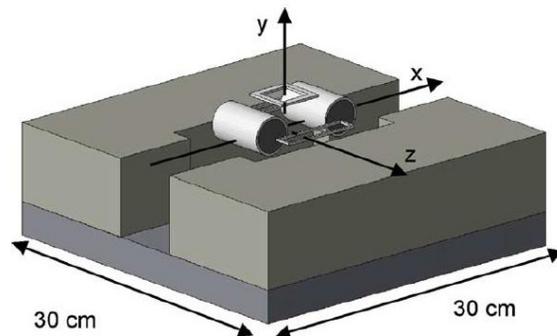


Figura 11: Imán unilateral, propuesto por Perlo *et al.* en [30], con posibilidades de producir imágenes 3D.

En 2005 Rahmatallah *et al.* [31] propusieron un cilindro tubular para generar gradientes constantes. Esta propuesta es similar a la de Blumich *et al.* en [28] pero con mejor homogeneidad en los planos horizontales.

En 2005, Perlo *et al.* [32] introdujeron una nueva propuesta de imán con un gradiente de 2000 G/cm perpendicular a la superficie del imán. En este caso el imán fue optimizado para producir un gradiente constante solo en una pequeña región del espacio pero con una buena homogeneidad en los planos horizontales. Ello fue posible dividiendo a la mitad el diseño original del MOUSE en Fig. 2 y separando ambas partes hasta lograr la distribución de campo deseada en la zona de medición. De esta forma, aplicando técnicas del tipo STRAFI, se pueden obtener perfiles de alta resolución. A diferencia de las técnicas STRAFI convencionales en este caso es el imán el que es desplazado con respecto a la muestra, explotando así la portabilidad del mismo.

En 2008 Marble *et al.* [33], en una propuesta similar a la desarrollada para volúmenes homogéneos, utilizaron casquetes ferromagnéticos para generar gradientes de campo magnético entre 30 y 250 G/cm , sobre una distancia de unos 5 mm .

Más recientemente, en 2010, García *et al.* [8] presentaron una variante del arreglo de tres imanes, similar al mostrado en Fig. 9, que permite obtener gradientes de campo magnético constante extendidos. En este caso la zona de gradiente constante abarca entre 2.5 cm y 4 cm dependiendo del diseño (Fig. 12). Esto permite obtener perfiles a diferentes profundidades debido a lo extendido de la zona de gradiente constante. No obstante, su completa explotación requiere del desarrollo de bobinas de RF y esquemas de excitación más eficientes. García *et al.* demostraron también que para algunas aplicaciones el

solenoides en combinación con un gradiente extendido permite explorar zonas profundas de la muestra bajo estudio.

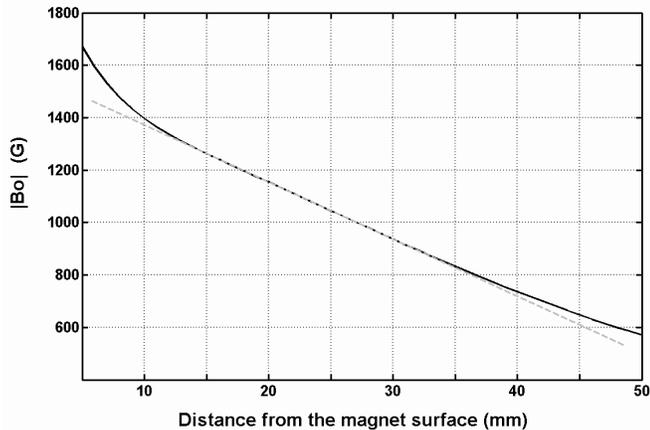


Figura 12: Distribución de campo magnético generada por un arreglo de tres imanes optimizado para generar gradientes constantes extendidos [8].

APLICACIONES

Conjuntamente con el desarrollo tecnológico de la RMU, han ido apareciendo una gran cantidad de aplicaciones donde ésta ha probado ser una herramienta importante. No es intención de este trabajo hacer un análisis de todas, sino comentar algunas de ellas en el intento de mostrar la aplicabilidad de la técnica.

La exploración petrolera es el área donde la RMU ha encontrado una de sus más importantes aplicaciones [15, 16, 34, 35, 36, 37]. Su empleo permite realizar el experimento de RMN sin alterar las condiciones de presión y temperatura a la que se encuentran las rocas a estudiar. Las características de las mismas pueden ser extraídas a partir de las distribuciones de $T_{2\text{eff}}$ obtenidas a partir de un tren de ecos. Las paredes de los poros, provocan una disminución de los tiempos de relajación del agua en comparación con el agua libre. Esta disminución depende de la relaxitividad de las paredes y de la relación superficie – volumen del poro. Debido a esto, la función de distribución de $T_{2\text{eff}}$ es un reflejo claro de la distribución de poros dentro de la roca. De esta forma puede extraerse información de porosidad, tamaño de los poros, tortuosidad, etc. lo cual unido a las características de los fluidos en ellas, son muy importantes en el análisis de los pozos. La Fig. 13, extraída de [15], muestra un diagrama típico de una instalación empleada en la prospección petrolera.

Dispositivos similares han sido reportados también en exploraciones hidrológicas [38, 39]

Un gran número de trabajos ha sido reportado en el área de estudio de materiales, tanto en el estudio de elastómeros y otros sólidos [40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47] como de estudios de procesos de fraguado [14, 22]. La Fig. 3 muestra un sensor de RMU de pequeño tamaño para estudios de fraguado de concreto. Este dispositivo puede ser insertado durante el proceso constructivo, permitiendo luego el monitoreo del proceso de fraguado en las capas más profundas de las

estructuras de concreto. La amplitud de curva de caída de un tren de ecos en una secuencia multipulso como CPMG, extrapolada para tiempo igual cero, permite monitorear la disminución del contenido de agua durante el fraguado. Igualmente, los $T_{2\text{eff}}$ medidos a partir de estas curvas revelan información de los cambios estructurales dentro de la muestra.

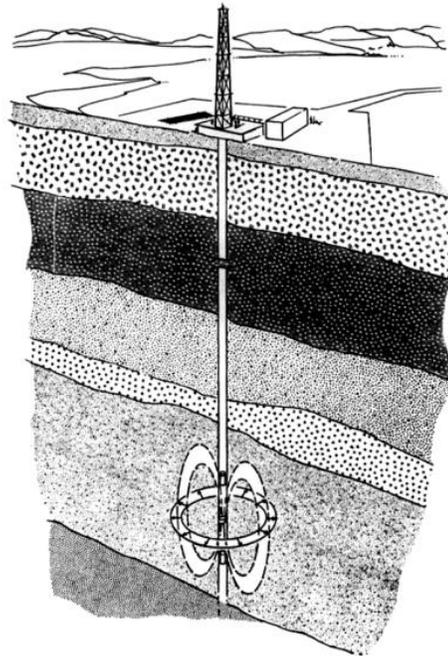


Figura 13. Instalación para el estudio de pozos de petróleo empleando RMU.

La biomedicina ha sido otra área de aplicación de la RMU [48, 49, 50, 51]. Sin embargo, no se han reportados muchos trabajos. Una de las razones para ellos pudiera ser el dominio de la Resonancia Magnética de Imágenes (RMI) en esta área. En los estudios para la conservación de obras de arte [52, 53, 54, 55] y la caracterización de productos alimenticios [56, 57, 58, 59, 60, 61] la portabilidad de la RMU ha sido también de gran utilidad.

Nuevas aplicaciones continúan apareciendo en la literatura científica, al igual que nuevos métodos de análisis [62] que refuerzan los trabajos en campos inhomogéneos y amplían las posibilidades de la misma al proponer incluso la realización de experimentos de espectroscopía de RMN. Igualmente nuevos laboratorios comienzan a realizar trabajos en este campo, hoy restringido a un reducido número de laboratorios en el mundo, lo cual debe contribuir al desarrollo de la técnica.

CONCLUSIONES

La RMU es una técnica novedosa en pleno desarrollo, que debido a su portabilidad y a sus posibilidades para explorar muestras de tamaño arbitrario, ha sacado el experimento de RMN del laboratorio creando así nuevos retos y nuevas oportunidades. El diseño de nuevos imanes y la aparición de nuevas aplicaciones han sido elementos importantes de este proceso. No obstante, los diseños propuestos han estado basados más en la intuición que en cálculos que permitan la

obtención de resultados óptimos. De todas formas, el desarrollo alcanzado hasta el momento permite avizorar el surgimiento de nuevos métodos para el trabajo en campos inhomogéneos y de nuevas aplicaciones. El conocimiento acumulado en esta nueva rama de la RMN, hoy restringido a un pequeño grupo de laboratorios en el mundo, debe extenderse en los próximos años sobre la base de sus resultados, su portabilidad y su bajo costo en comparación con la RMN clásica. El desarrollo de sistemas electrónicos optimizados para aplicaciones específicas debe formar parte de este proceso. Ello contribuirá sin duda alguna a la generación de nuevo conocimiento que acelere el afianzamiento de la RMU como técnica viable en muchas aplicaciones.

[1] E. M. Haacke, R. W. Brown, M. R. Thompson, and R. Venkatesan, *Magnetic Resonance Imaging, Physical Principles and Sequence Design*. (New York: John Wiley and Sons, 1999).
 [2] Z. P. Liang, P. C. Lauterbur, *Principles of magnetic resonance imaging*. (New York: IEEE Press, 2000).
 [3] T. B. Benson and P. J. McDonald, *J. Magn. Res. A* **112**, 17 (1995).
 [4] A. D. Bain and E. W. Randall, *J. Magn. Res. A* **123**, 49 (1996).
 [5] S. Meiboom, D. Gill, *Rev. Sci. Instrum.* **29**, 688 (1958).
 [6] M. D. Hurlimann, D. D. Griffin, *J. Magn. Reson.* **143**, 120 (2000).
 [7] M. D. Hurlimann, *J. Mag. Res.* **148**, 367 (2001).
 [8] J. C. García-Naranjo, I. V. Mastikhin, B. G. Colpitts, B. J. Balcom, *J. Magn. Reson.* **207**, 337 (2010).
 [9] P. J. McDonald, B. Newling, *Rep. Prog. Phys.* **61**, 1441 (1998).
 [10] G. Eidmann, R. Savelsberg, P. Blumler, B. Blumich, *J. Magn. Reson. A* **122**, 104 (1996).
 [11] B. Blümich, P. Blumler, G. Eidmann, A. Guthausen, R. Haken, U. Schmitz, K. Saito, G. Zimmer, *Magn. Reson. Imaging*, **16**, 479 (1998).
 [12] W. H. Chang, J. H. Chen, L. P. Hwang, *Magn. Reson. Imaging* **24**, 1095 (2006).
 [13] K. Halbach, *Nucl Instrum Methods* **169**, 1 (1980).
 [14] A. E. Marble, J. J. Young, I. V. Mastikhin, B. G. Colpitts, B. J. Balcom, in *Eighth International Bologna Conference on Magnetic Resonance in Porous Media*, *Magnetic Resonance Imaging* **25**, 572, (2007).
 [15] P. F. de J. Cano-Barrita, A. E. Marble, B. J. Balcom, J. C. García, I. V. Mastikhin, M. D. A. Thomas, T. W. Bremner, *Cem. Concr. Res.* **39**, 324 (2009).
 [16] J. A. Jackson, L. J. Burnett, J. F. Harmon, *J. Magn. Reson.* **41**, 411 (1980).
 [17] R. L. Kleinberg, A. Sezginer, D. D. Griffin, M. Fukuhara, *J. Magn. Reson.* **97**, 466 (1992).
 [18] E. Fukushima, J. A. Jackson, US Patent 6489872 (2002).

[19] A. E. Marble, I. V. Mastikhin, B. G. Colpitts, B. J. Balcom, *J. Magn. Reson.* **174**, 78 (2005).
 [20] A. E. Marble, I. V. Mastikhin, B. G. Colpitts, B. J. Balcom, *IEEE Trans. Magn.* **43**, 1903 (2007).
 [21] B. Manz, A. Coy, R. Dykstra, C. D. Eccles, M. W. Hunter, B. J. Parkinson, P. T. Callaghan, *J. Magn. Reson.* **183**, 25 (2006).
 [22] A. E. Marble, I. V. Mastikhin, B. G. Colpitts, B. J. Balcom, *J. Magn. Reson.* **186**, 100, (2007).
 [23] G. LaPlante, J. C. García-Naranjo, B. J. Balcom, *NDT&E International* **44**, 329 (2011).
 [24] J. Perlo, F. Casanova, B. Blumich, *Science*, **315**, 1110 (2007).
 [25] W. H. Chang, C. Y. Chung, J. H. Chen, D. W. Hwang, C. H. Hsu, C. Yao, L. P. Hwang, *Mag. Reson. Imaging* **29**, 869 (2011).
 [26] P. J. Prado, *J. Magn. Reson.* **144**, 200 (2000).
 [27] S. Gravina, D. G. Cory, *J. Magn. Reson. B* **104**, 53 (1994).
 [28] B. Blumich, V. Anferov, S. Anferova, M. Klein, R. Fechete, M. Adams, F. Casanova, *Conc. Magn. Reson. B* **15**, 255 (2002).
 [29] F. Casanova, B. Blumich, *J. Magn. Res.* **163**, 38 (2003).
 [30] J. Perlo, F. Casanova, B. Blumich, *J. Magn. Reson.* **166**, 228 (2004).
 [31] S. Rahmatallah, Y. Li, H. C. Seton, I. S. Mackenzie, J. S. Gregory, R. M. Aspden, *J. Magn. Reson.* **173**, 23 (2005).
 [32] J. Perlo, F. Casanova, B. Blumich, *J. Magn. Reson.* **176**, 64 (2005).
 [33] A. E. Marble, I. V. Mastikhin, B. G. Colpitts, B. J. Balcom, *J. Magn. Reson.* **183**, 228 (2006).
 [34] G. Maddinelli, E. Peron, *Appl. Magn. Reson.* **29**, 549 (2005).
 [35] C. G. Masi, M. N. Miller, U.S. Patent 4717876, (1988).
 [36] R. L. Kleinberg, *Conc. Magn. Reson* **13**, 404 (2001).
 [37] R. Freedman, *J. Petrol. Tech.* Jan, 60 (2006).
 [38] B. Blumich, J. Mauler, A. Haber, J. Perlo, E. Danieli, F. Casanova, *Pet.Sci.* **6**, 1 (2009).
 [39] O. Sucre, A. Pohlmeier, A. Miniere, B. Blumich, *J Hydrol.* **406**, 30 (2011).
 [40] V. Herrmann, K. Unseld, H. B. Fuchs, B. Blümich, *Colloid Polym. Sci.* **280**, 758 (2002).
 [41] S. Anferova, V. Anferov, M. Adams, R. Fechete, G. Schroeder, B. Blümich, *Appl Magn Reson* **27**, 361 (2004).
 [42] N. O. Goga, D. E. Demco, J. Kolz, R. Ferencz, A. Haber, F. Casanova, B. Blümich, *J Magn Reson* **192**, 1 (2008).
 [43] B. Blümich, F. Casanova, J. Perlo, S. Anferova, V. Anferov, K. Kremer, N. Goga, K. Kupferschläger, M. Adams, *Magn Reson Imaging* **23**, 197 (2005).
 [44] B. Blümich, F. Casanova, A. Buda, K. Kremer, T. Wegener, *Acta Physica Polonica A* **108**, 13 (2005).
 [45] G. Zimmer, A. Guthausen, U. Schmitz, K. Saito, and B. Blumich, *Wethering Adv. Mater.* **9**, 12 (1997).
 [46] A. Guthausen, G. Zimmer, P. Blümmler, and B. Blümich, *J Magn Reson* **130**, 1 (1998).
 [47] R.I. Chelcea, R. Fechete, E. Culea, D. E. Demco, B. Blümich, *J. Magn. Reson.* **196**, 178 (2009).
 [48] G. Laicher, D. C. Ailion, A. G. Cutillo, *J. Magn. Reson. Series B* **111**, 243 (1996).
 [49] A. Blank, G. Alexandrowicz, L. Muchnik, G. Tidhar,

- J. Schneiderman, R. Virmani, E. Golan, *Mag Reson in Med.* **54**, 105 (2005).
- [50] N. O. Gogaa, A. Pirnau, L. Szabo, R. Smeets, D. Riediger, O. Cozar, B. Blumich, **8**, 1430 (2006).
- [51] R. Haken, B. Blumich, *J. Magn. Reson.* **144**, 195 (2000).
- [52] B. Blümich, S. Anferova, S. Sharma, A. Segre, C. Federici, *J Magn Reson* **161**, 204 (2003).
- [53] C. Casieri, S. Bubici, I. Viola, F. De Luca, *Solid State Nucl Magn Reson* **26**, 65 (2004).
- [54] F. Presciutti *et al*, *Appl Phys Lett* **93**, 033505 (2008).
- [55] N. Proietti, D. Capitani, R. Lamanna, F. Presciutti, E. Rossi, A. L. Segre, *J Magn Reson* **177**, 111 (2005).
- [56] S. Rahmatallah, Y. Li, H. C. Seton, I. S. Gregory, R. M. Aspden, *Eur. Food Res. Technol.* **222**, 298 (2006).
- [57] R. M. Pearson, L. R. Ream, C. Job, J. Adams, *Cereal Foods World* **32**, 822 (1987).
- [58] R. M. Pearson, *Cereal Foods World* **32**, 658 (1987).
- [59] A. Metais, F. Mariette, *J. Magn. Reson.* **165**, 265 (2003).
- [60] A. M. Haiduc, J. van Duynhoven, *Magn. Reson. Imaging* **23**, 343 (2005).
- [61] E. Veliyulin, C. van der Zwaag, W. Burk, U. Erikson, *J. Sci. Food Agric.* **85**, 1299 (2005).
- [62] Z. Zhang, H. Chen, C. Wu, R. Wu, S. Cai, Z. Chen, *J. Magn. Reson.* **227**, 39 (2013).