

# RESONANCIA MAGNÉTICA: de la versatilidad en el control cuántico al sensado y las nuevas tecnologías cuánticas

**Palabras clave:** resonancia magnética, espines nucleares, tecnologías cuánticas, control cuántico, sensado cuántico, dinámica de muchos cuerpos, decoherencia.

**Keywords:** *magnetic resonance, nuclear spins, quantum technologies, quantum control, quantum sensing, many-body dynamics, decoherence.*

**Resumen:** La resonancia magnética fue una de las primeras plataformas en permitir el control preciso y reproducible de sistemas cuánticos. Mucho antes de que se consolidara el concepto de tecnologías cuánticas, la RMN ya manipulaba coherentemente estados de espín mediante el diseño de secuencias de pulsos y la ingeniería efectiva de Hamiltonianos, es decir, procesaba información cuántica de manera controlada. En este sentido, puede considerarse un antecedente sólido —y socialmente exitoso— de la segunda revolución cuántica. Además de su impacto en química, materiales y medicina, la RMN se convirtió en un laboratorio privilegiado para estudiar dinámica cuántica de muchos cuerpos, irreversibilidad, decoherencia y propagación de la información cuántica. En este artículo revisamos desarrollos históricos y contribuciones recientes, con énfasis en trabajos realizados por científicos en Argentina que han desempeñado un papel central en posicionar a la RMN como herramienta clave de la segunda revolución cuántica. A través de ecos de espín y su generalización como eco de Loschmidt, ingeniería de Hamiltonianos y desacoplamiento dinámico, estos aportes permitieron investigar scrambling, termalización y protección de la información en sistemas de espines. Asimismo, analizamos su evolución hacia el sensado cuántico avanzado, donde la decoherencia se convierte en recurso, y su integración con espines electrónicos —como los centros NV en diamante— abre la posibilidad de nano-MRI y exploración de procesos moleculares e intracelulares. En conjunto, la resonancia magnética emerge como una tecnología cuántica madura que ha contribuido activamente a definir el paradigma contemporáneo del control y la explotación de sistemas cuánticos.

■ **Chattah, Ana Karina**<sup>1,2</sup>,  
**Álvarez, Gonzalo A**<sup>3,4,5</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Física Enrique Gaviola (IFEG, CONICET-UNC), Ciudad Universitaria, 5000 Córdoba, Argentina

<sup>2</sup> Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FaMAF), Universidad Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina

<sup>3</sup> Centro Atómico Bariloche, CONICET, CNEA, 8400 San Carlos de Bariloche, Argentina

<sup>4</sup> Instituto de Nanociencia y Nanotecnología, CNEA, CONICET, 8400 San Carlos de Bariloche, Argentina

<sup>5</sup> Instituto Balseiro, CNEA, Universidad Nacional de Cuyo, 8400 San Carlos de Bariloche, Argentina

E-mail: karina.chattah@unc.edu.ar;  
gonzalo.alvarez@conicet.gov.ar

**Magnetic resonance: from versatility in quantum control to sensing and the new quantum technologies**

**Abstract:** Magnetic resonance was one of the first platforms to enable the precise and reproducible control of quantum systems. Long before the concept of quantum technologies was consolidated, NMR was already coherently manipulating spin states through the design of pulse sequences and effective Hamiltonian engineering; that is, it processed quantum information in a controlled manner. In this sense, it can be considered a solid —and socially successful— precedent of the second quantum revolution. In addition to its impact on chemistry, materials science, and medicine, NMR became a privileged laboratory for studying quantum many-body dynamics, irreversibility, decoherence, and the propagation of quantum information. In this article, we review historical developments and recent contributions, emphasizing the work carried out by scientists in Argentina who have played a central role in positioning NMR as a key tool of the second quantum revolution. Through spin echoes and their generalization as the Loschmidt echo, Hamiltonian engineering, and dynamical decoupling, these contributions made it possible to investigate scrambling, thermalization, and information protection in spin systems. Furthermore, we analyze its evolution towards advanced quantum sensing, where decoherence becomes a resource, and its integration with electronic spins —such as NV centers in diamond— which opens up the possibility of nano-MRI and the exploration of molecular and intracellular processes. Altogether, magnetic resonance emerges as a mature quantum technology that has actively contributed to defining the contemporary paradigm for the control and exploitation of quantum systems.

## ■ INTRODUCCIÓN

La Resonancia Magnética Nuclear (RMN) ocupa un lugar central en la historia de las ciencias cuánticas. Desde su aparición hacia la década de 1940, con los experimentos pioneros de I. I. Rabi, F. Bloch y E. M. Purcell, la RMN se convirtió en una de las técnicas más influyentes de la ciencia moderna, reconocida con múltiples Premios Nobel por su impacto en física, química y medicina. Siendo los espines nucleares entidades que responden a la mecánica cuántica, la RMN se transformó en una de las primeras plataformas capaces de controlar y manipular sistemas cuánticos en la práctica. Mucho antes de que existieran las computadoras cuánticas basadas en iones, átomos fríos o circuitos superconductores, la RMN ya permitía poner a prueba ideas fundamentales: la superposición de estados, la coherencia cuántica y la posibilidad de realizar operaciones lógicas sobre sistemas atómicos (Gershenfeld & Chuang 1997, Cory et al. 1997). De hecho, algunos de los primeros algoritmos de la computación cuántica fueron implementados en RMN, demostrando que era posible usar el lenguaje cuántico para procesar información de manera controlada (Nielsen et al. 1998).

Este carácter pionero convirtió a la RMN en una fuente de inspiración para múltiples disciplinas. Las técnicas de control dinámico desarrolladas en el campo —secuencias de pulsos, refocalización de espines, diseño de Hamiltonianos efectivos— sirvieron de modelo para plataformas tan diversas como los iones atrapados, los átomos de Rydberg, las moléculas polares o los centros de color en diamante (Suter & Álvarez 2016). A partir de ellas, surgió un interrogante fundamental que aún hoy guía el desarrollo de las tecnologías cuánticas (Knill & Laflamme

1998, Braunstein et al. 1999): ¿qué aspectos de la información son realmente exclusivos del mundo cuántico y no pueden ser replicados por sistemas clásicos?

Uno de los grandes logros de la RMN fue mostrar que, con estrategias adecuadas de control, es posible prolongar la vida útil de los estados cuánticos, manipularlos y transferirlos entre distintas partes de un sistema (Suter & Álvarez 2016). Estos avances dieron lugar a un repertorio de herramientas hoy esenciales para la computación y la simulación cuántica, pero también para áreas aplicadas de enorme impacto, como la biología, la química y la medicina (Le Bihan 2003, Zwick 2022). En estos campos, los espines nucleares dejaron de ser únicamente objetos de estudio para convertirse en sensores: pequeñas sondas cuánticas capaces de registrar información microscópica sobre su entorno (Álvarez 2022, Zwick & Álvarez 2023).

El desarrollo del sensado cuántico es un claro ejemplo de esta evolución. Allí donde los dispositivos clásicos encuentran límites en su resolución espacial o en su sensibilidad, los sensores cuánticos ofrecen un acceso directo a escalas atómicas y nanométricas. En RMN, el sensor es el propio espín nuclear, que responde a campos magnéticos, eléctricos, variaciones de temperatura o incluso a la presencia de moléculas vecinas. En un extremo del espectro tecnológico, los sensores individuales —como los centros de vacancia nitrógeno en diamante— ya han mostrado la capacidad de detectar campos magnéticos a través de un solo electrón. En el otro extremo, la RMN tradicional, basada en la señal de enormes conjuntos de espines (del orden de  $10^{20}$  en un simple tubo de muestra), ofrece la ventaja de ser un método no invasivo que puede aplicarse, por ejemplo, para

observar el interior del cuerpo humano mediante imágenes de resonancia magnética (MRI por la sigla en inglés de magnetic resonance imaging) (Le Bihan 2003).

Este carácter dual es distintivo: la RMN puede operar tanto en la frontera de la nanoescala como en la escala macroscópica, con aplicaciones clínicas cotidianas. La dificultad, claro, está en extraer la información microscópica escondida en el interior de un ensamble tan grande de espines. Resolver este desafío ha sido uno de los motores de innovación más potentes del campo. En particular, diseñar estrategias de control dinámico de la información cuántica que codifiquen en la señal observable los detalles de los procesos microscópicos —difusión molecular, interacciones entre espines, restricciones geométricas— permite que la RMN funcione como un microscopio cuántico (Zwick & Álvarez 2023).

Un ejemplo paradigmático es la aplicación de la RMN y la MRI al estudio del tejido biológico. El agua, que constituye alrededor del 70% de nuestro organismo, contiene núcleos de hidrógeno cuyos espines actúan como sensores naturales de su entorno. Al analizar cómo se mueven esas moléculas en medios restringidos —como fibras nerviosas, membranas celulares o capilares— es posible obtener imágenes de la microestructura del tejido con una resolución que supera ampliamente la del tamaño de un píxel convencional (Álvarez et al. 2013, Shemesh et al. 2015, Zwick et al. 2020). Esto ha abierto la puerta a una forma de biopsia virtual no invasiva, con implicancias directas para el diagnóstico temprano de enfermedades neurodegenerativas y otras patologías (Le Bihan 2003, Shemesh et al. 2015, Capiglionni et al. 2021).

El otro gran eje que atraviesa la historia de la RMN en las tecnologías cuánticas es el llamado fenómeno de decoherencia. Todos los sistemas cuánticos son extremadamente frágiles frente a su entorno: las fluctuaciones ambientales tienden a destruir las superposiciones cuánticas y a volver “clásico” lo que originalmente era cuántico. Entender, controlar y, en algunos casos, incluso aprovechar la decoherencia se transformó en un campo de investigación en sí mismo. En RMN, el desarrollo de secuencias de pulsos que prolongan la coherencia —como los famosos ecos de espín— fue fundamental para abrir el camino a técnicas más sofisticadas de desacoplamiento dinámico, hoy empleadas en casi todas las plataformas cuánticas (Souza et al. 2012, Suter & Álvarez 2016).

La decoherencia no es solo un obstáculo; también es una fuente de información. La velocidad y la manera en que un espín pierde coherencia dependen íntimamente de las características de su entorno. Mediante la aplicación de secuencias de control apropiadas, ese proceso se convierte en una herramienta de sentido: un “filtro espectral” capaz de revelar qué frecuencias de ruido o qué interacciones dominan en un material, una molécula o un tejido (Álvarez & Suter 2011, Álvarez et al. 2013). En este sentido, la RMN ocupa una posición estratégica como banco de pruebas para nuevas ideas de control cuántico y como plataforma para el sentido cuántico avanzado (Zwick & Álvarez 2023).

A lo largo de su historia, la RMN ha sabido reinventarse para responder a preguntas fundamentales y, al mismo tiempo, abrir aplicaciones inesperadas. Desde las primeras demostraciones de algoritmos cuánticos hasta los estudios actuales de dinámica fuera del equilibrio, desde la caracterización de materiales complejos hasta la obtención de imágenes

biomédicas, su versatilidad es la clave. Mirando hacia adelante, la RMN se perfila no solo como una disciplina consolidada, sino como un actor central en la segunda revolución cuántica: esa etapa en la que el control de sistemas cuánticos deja de ser un experimento aislado y se convierte en la base de tecnologías transformadoras, con impacto en la ciencia, la industria y la sociedad.

### Nota Editorial 1: ¿Qué es exactamente “manipular un espín”?

Para comprender cómo la resonancia magnética nuclear (RMN) funciona como tecnología cuántica, resulta útil imaginar el “espín” de los núcleos atómicos como minúsculas brújulas o pequeños imanes. Cuando colocamos una muestra (o a un paciente) dentro de un campo magnético fuerte, estas brújulas tienden a alinearse. Cuando los científicos envían ondas de radio (secuencias de pulsos): estos pulsos actúan como “dedos invisibles” que empujan y giran estas brújulas a voluntad, obligándolas a adoptar estados de superposición (apuntando a varios lados a la vez). Al “captar” el eco magnético que devuelven estas brújulas cuando intentan volver a su posición original, los investigadores pueden mapear el entorno molecular con una precisión asombrosa.

### ■ RESONANCIA MAGNÉTICA EN SÓLIDOS EN ARGENTINA: HISTORIA Y DESARROLLOS

Más allá de los inicios como herramienta espectroscópica y de su consolidación como técnica de imágenes con múltiples aplicaciones, la RMN abrió un camino menos visible pero igual de revolucionario: el estudio experimental de la dinámica cuántica de muchos cuerpos. En este terreno, grupos de investigación en

Argentina jugaron un papel destacado, transformando la RMN de sólidos en una plataforma privilegiada para explorar fenómenos fundamentales de la física cuántica contemporánea (Pastawski et al. 1995, Levstein et al. 1998, Pastawski et al 2000).

Entre los hitos internacionales se encuentra el trabajo de Richard R. Ernst, galardonado con el Premio Nobel de Química en 1991, cuyas técnicas de polarización localizada permitieron observar la difusión cuántica de excitaciones de espín en cristales (Muller et al. 1974, Zhang et al. 1992). Estos experimentos revelaron comportamientos sorprendentes, como recurrencias, ecos e interferencias cuánticas, que desafiaban las explicaciones estadísticas clásicas y abrían la puerta a nuevas preguntas sobre la reversibilidad del tiempo en sistemas cuánticos.

En Argentina, a mediados de los años '90, un grupo de investigación en Córdoba comenzó a articular teoría, experimentación y simulaciones numéricas para estudiar la decoherencia y la irreversibilidad cuántica. Su herramienta central fueron los ecos de Loschmidt, señales que se obtienen bajo reversión de las interacciones en el sistema, permitiendo medir su sensibilidad frente a perturbaciones internas y externas. Estos ecos —en sus variantes mágicos, de polarización o mesoscópicos— se convirtieron en verdaderos “detectores” de decoherencia (Pastawski et al. 1995, Levstein et al. 1998, Pastawski et al 2000).

El trabajo en RMN de sólidos en Argentina no se limitó a medir la pérdida de coherencia, sino que también innovó en el diseño de dinámicas efectivas mediante la teoría del Hamiltoniano promedio. Gracias a ello fue posible imitar distintos modelos de interacción —como los Hamiltonianos XY o truncamientos de interacciones dipolares— y observar cómo decaen los ecos bajo

esas condiciones (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2015b). De esta forma, la RMN se transformó en un simulador cuántico analógico capaz de recrear fenómenos colectivos en sistemas de hasta 10.000 qubits naturales, algo inalcanzable para otras plataformas experimentales (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2015b, Sánchez 2023).

Con el cambio de siglo, esta línea de trabajo se enlazó con cuestiones de frontera en la física teórica. La conjetura holográfica de Maldacena y el modelo SYK de Kitaev, que conectan la dinámica de espines con problemas de agujeros negros y caos cuántico, ofrecieron un nuevo marco conceptual. En este contexto, los ecos de Loschmidt estudiados en Córdoba resultaron ser equivalentes, en ciertos límites, a los correladores fuera de orden temporal (OTOCs por la sigla en inglés de out-of-time-ordered correlators), considerados hoy un indicador clave de scrambling cuántico y pérdida de información (Álvarez et al. 2015b, Sánchez et al. 2020, Domínguez et al. 2021). La RMN argentina ya venía explorando esos conceptos mucho antes de que se popularizaran en el ámbito de la teoría de altas energías, aportando evidencia experimental única en el límite termodinámico (Álvarez & Suter 2010, Sánchez 2020, Lozano-Negro 2024).

Entre los hallazgos más originales se destacó la formulación de la hipótesis central de irreversibilidad (CHI por la sigla en inglés de central hypothesis of irreversibility), que vincula la escala de decoherencia intrínseca con la conectividad de las interacciones del sistema (Pastawski et al 2000, Jalabert & Pastawski 2001). Asimismo, los experimentos permitieron observar transiciones dinámicas colectivas, como la oscilatoria-sobremortiguada en ecos mesoscópicos, y fenómenos de localización en sistemas desordenados (Álvarez et al.

2006, Álvarez et al. 2015b). Estos resultados mostraron que la RMN no solo servía para entender materiales, sino también para responder preguntas abiertas sobre la emergencia del caos y la termalización en sistemas cuánticos complejos.

La versatilidad experimental se puso a prueba en una gran variedad de materiales —desde adamantano e hidroxiapatita hasta cristales líquidos y fulerenos—, que funcionaron como bancos de prueba para estudiar conectividades espaciales, crecimiento de correlaciones y la aparición de fases dinámicas (Álvarez et al. 2015b, Domínguez et al. 2021). Más allá de lo específico de cada sistema, lo central fue que la RMN de sólidos ofreció un entorno natural para observar directamente cómo emerge la complejidad cuántica en la práctica.

De este modo, la RMN desarrollada en Argentina trascendió su rol como técnica espectroscópica tradicional para convertirse en un verdadero simulador cuántico analógico, capaz de dialogar con los problemas más profundos de la física actual. Sus logros hasta el presente no solo generaron conocimiento fundamental, sino que también se tradujeron en aplicaciones prácticas para la caracterización de materiales, tejidos biológicos, fármacos y polímeros. A la par, contribuyeron a la formación de una generación de jóvenes investigadores con sólida formación teórica y experimental, que hoy continúan expandiendo estas líneas en diálogo con la comunidad internacional.

## ■ CONTRIBUCIONES ACTUALES DESDE LA RMN AL DESARROLLO CUÁNTICO

### DINÁMICA CUÁNTICA FUERA DEL EQUILIBRIO

La resonancia magnética nuclear en sólidos es mucho más que una téc-

nica para estudiar materiales: es un laboratorio natural de física cuántica. A diferencia de plataformas más controladas y reducidas, como los iones atrapados o los circuitos superconductores, los experimentos de RMN en sólidos involucran hasta  $10^{23}$  espines nucleares que interactúan colectivamente. Esto la convierte en un escenario natural para explorar preguntas profundas:

- ¿Cómo evoluciona un sistema cuántico fuera del equilibrio?
- ¿Qué mecanismos llevan a la pérdida de información cuántica?
- ¿Cómo aparece la irreversibilidad en un mundo gobernado por leyes reversibles?

### Nota Editorial 2: Rebobinando la película cuántica

El concepto del “Eco de Loschmidt” puede entenderse como un intento de viajar hacia atrás en el tiempo a nivel microscópico. Imagine dejar caer una gota de tinta en un vaso de agua: la tinta se dispersa rápida e irremediablemente. Sin embargo, si tuviéramos el poder de invertir de forma exacta el movimiento y la dirección de cada molécula de agua y de tinta, la mancha volvería a contraerse hasta formar nuevamente una gota perfecta. En el mundo cuántico, los físicos logran esta proeza aplicando pulsos electromagnéticos que obligan a los espines a “desandar su camino”. Si al intentar rebobinar la película la gota no se forma perfectamente, ese pequeño error revela información valiosa sobre las perturbaciones ocultas en el entorno del material.

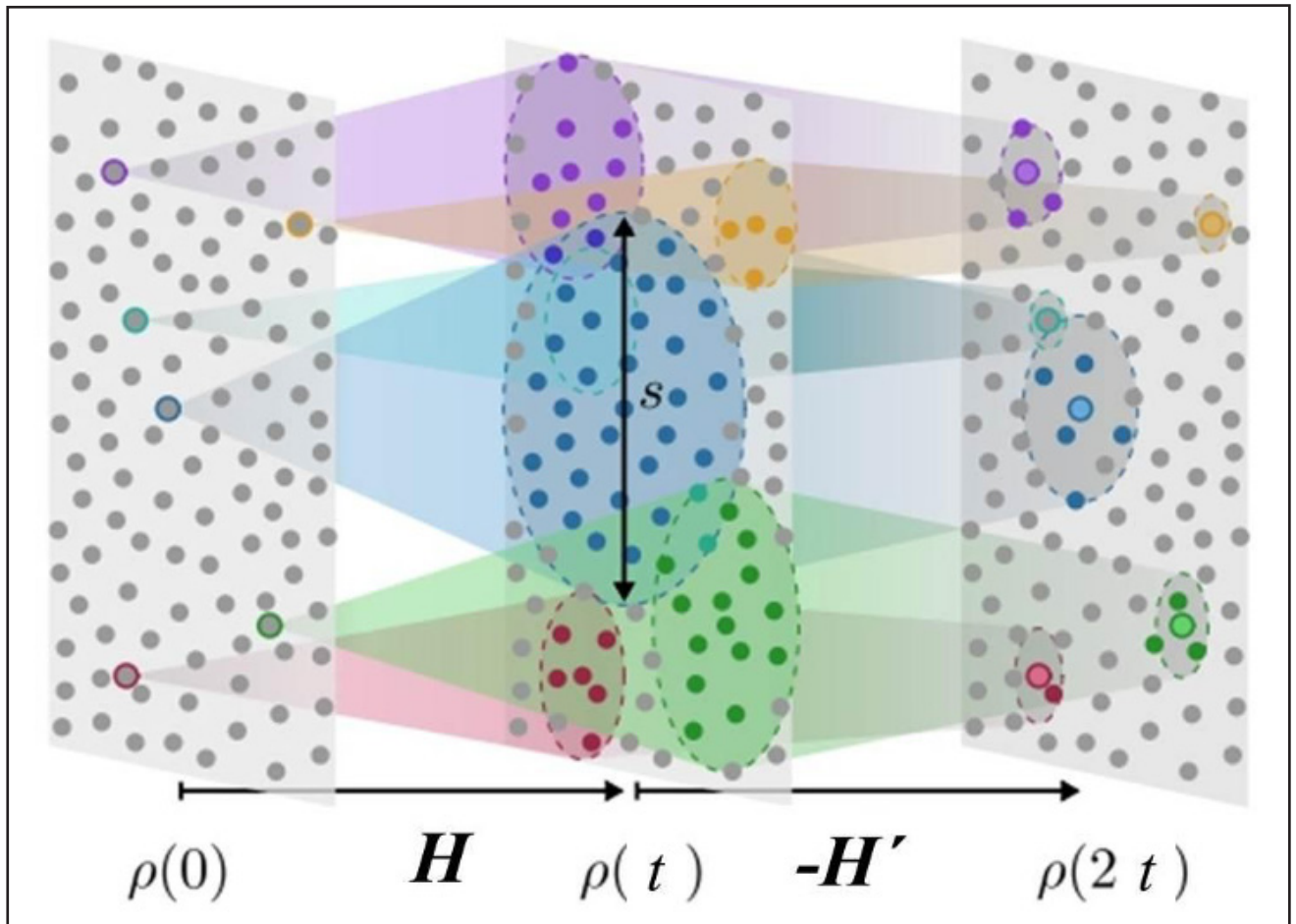
Ecos de Loschmidt y la irreversibilidad cuántica: El concepto de eco

de Loschmidt surge directamente de esta tensión entre reversibilidad e irreversibilidad. Ludwig Boltzmann, en el siglo XIX, había introducido el principio de entropía creciente para describir la flecha del tiempo en la física estadística. Su contemporáneo, Johann Loschmidt, cuestionó cómo podía surgir una evolución

irreversible a partir de leyes microscópicas que son simétricas en el tiempo. La RMN dio la primera respuesta experimental a esta paradoja: mediante secuencias de pulsos es posible invertir efectivamente el signo de la evolución en el Hamiltoniano y observar cómo un sistema de espines “regresa” a su estado

inicial, generando un eco de señal macroscópica (Pastawski et al 2000, Goussev 2012) (ver **Figura 1**).

En sistemas reales, la inversión nunca es perfecta, lo que permite cuantificar la fragilidad de la dinámica frente a pequeñas perturbaciones. En este sentido, los ecos de



**Figura 1.** Esquema conceptual del scrambling de una excitación local y su reversión temporal mediante un eco generalizado de Loschmidt. En el panel izquierdo, una excitación de espín inicialmente localizada (puntos coloreados) codifica información cuántica en un subconjunto reducido del sistema. Bajo la evolución directa gobernada por el Hamiltoniano  $H$ , esta información se dispersa coherentemente entre un número creciente de espines, generando correlaciones de muchos cuerpos y estados “scrambled” caracterizados por clusters de tamaño creciente  $s$  (panel central). Este proceso describe el scrambling: la transformación de información inicialmente local en correlaciones altamente no locales. El panel derecho ilustra la inversión temporal implementada como un eco generalizado de Loschmidt, donde se intenta revertir la dinámica aplicando una evolución bajo  $-H'$ . Si la reversión fuera perfecta ( $H' = H$ ), el sistema retornaría al estado inicial. Sin embargo, cuando  $H' \neq H$ , incluso pequeñas imperfecciones impiden la reconstrucción completa: la información, ahora distribuida de manera compleja en muchos cuerpos, no puede re-enfocarse totalmente. Esta sensibilidad a perturbaciones constituye una firma del scrambling y permite acceder experimentalmente a correladores fuera de orden temporal (OTOCs) y coherencias múltiples (MQC), que cuantifican la distribución de clusters en el tiempo  $t$ . Figura adaptada de Sequeiros et al. (2025), *Physical Review A* 112, 022617.

Loschmidt se convirtieron en una herramienta para medir la estabilidad y la decoherencia en sistemas cuánticos de muchos cuerpos. Experimentos realizados en Argentina y en colaboración internacional demostraron que la atenuación del eco no solo depende de defectos experimentales, sino que refleja propiedades intrínsecas del sistema, como la complejidad de sus interacciones y la proximidad a regímenes caóticos. (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2015b, Sanchez 2016)

De ecos a OTOCs: cuando la información se mezcla (“scrambling”): En la última década, el interés en comprender cómo se dispersa la información cuántica en sistemas de muchos cuerpos llevó al desarrollo de nuevas métricas, en particular las OTOCs. Estas correlaciones fuera de orden temporal miden cuán rápido una perturbación local se propaga, afectando a todo el sistema, un fenómeno conocido como scrambling!. El scrambling no implica simplemente decoherencia o pérdida de coherencia cuántica, sino la redistribución de la información de un modo tal que se vuelve prácticamente inaccesible a observables locales. En la teoría de agujeros negros, por ejemplo, las OTOCs se han utilizado para cuantificar la rapidez con la que la información se “mezcla” en el horizonte de sucesos (ver Fig. 1).

En el laboratorio, la RMN permitió llevar estos conceptos a la práctica, poniéndolos a prueba en sistemas materiales reales. Mediante técnicas de control cuántico — como los Hamiltonianos promedio, la dinámica de Floquet y la medición estroboscópica— se diseñaron evoluciones experimentales donde las OTOCs y los ecos generalizados pueden medirse en forma efectiva (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2010a, Álvarez et al. 2015b). Es-

tos experimentos mostraron cómo, partiendo de espines individuales, surgen clusters de espines correlacionados cuyo tamaño crece con el tiempo. En las mediciones, el tamaño de los clusters está determinado por la distribución de la señal en múltiples coherencias cuánticas, o MQC en inglés. Lo más fascinante: los ecos de Loschmidt generalizados pueden (re)interpretarse como un caso particular de OTOCs, haciendo de la RMN un puente entre la teoría de la información cuántica, la física estadística y la cosmología cuántica (Sanchez 2020, Domínguez et al. 2021, Sanchez 2022) (ver **Figura 1**).

### Nota Editorial 3: La paradoja de los huevos revueltos

El término *scrambling* proviene del inglés *scrambled eggs* (huevos revueltos) y es una de las analogías más gráficas de la física moderna. Describe cómo la información cuántica de una sola partícula se dispersa y se “mezcla” a lo largo de todo un sistema complejo. Pensemos en romper un huevo y batirlo en una sartén: la información original (la yema y la clara separadas) no ha desaparecido del universo, sigue ahí, pero se ha vuelto imposible de leer o recuperar si observamos solo una pequeña porción de la mezcla. Medir la velocidad de este nivel de “mezcla cuántica” ayuda a los físicos a entender desde la dinámica interna de nuevos materiales superconductores hasta el comportamiento límite de la información cayendo en un agujero negro.

Termalización y dinámica fuera del equilibrio: Otra pregunta clave que puede responderse con estas herramientas es la de la termalización cuántica. En la física clásica, sistemas con muchas partículas tien-

den a un estado de equilibrio caracterizado por la maximización de la entropía. En los sistemas cuánticos, en cambio, el asunto es más sutil: la evolución es unitaria y, en principio, reversible. ¿Cómo emerge entonces el comportamiento térmico?

Experimentos de RMN permitieron explorar esta cuestión observando cómo subsistemas pequeños (por ejemplo, un espín o un grupo reducido de espines) alcanzan un comportamiento compatible con la termodinámica, aun cuando el sistema global permanece en un estado puro gobernado por la mecánica cuántica. Los ecos de Loschmidt y las OTOCs son en este contexto herramientas para rastrear cómo la información sobre las condiciones iniciales se dispersa y se vuelve inobservable localmente, dando la apariencia de termalización (Swin-gle 2018, Lewis-Swan 2019) .

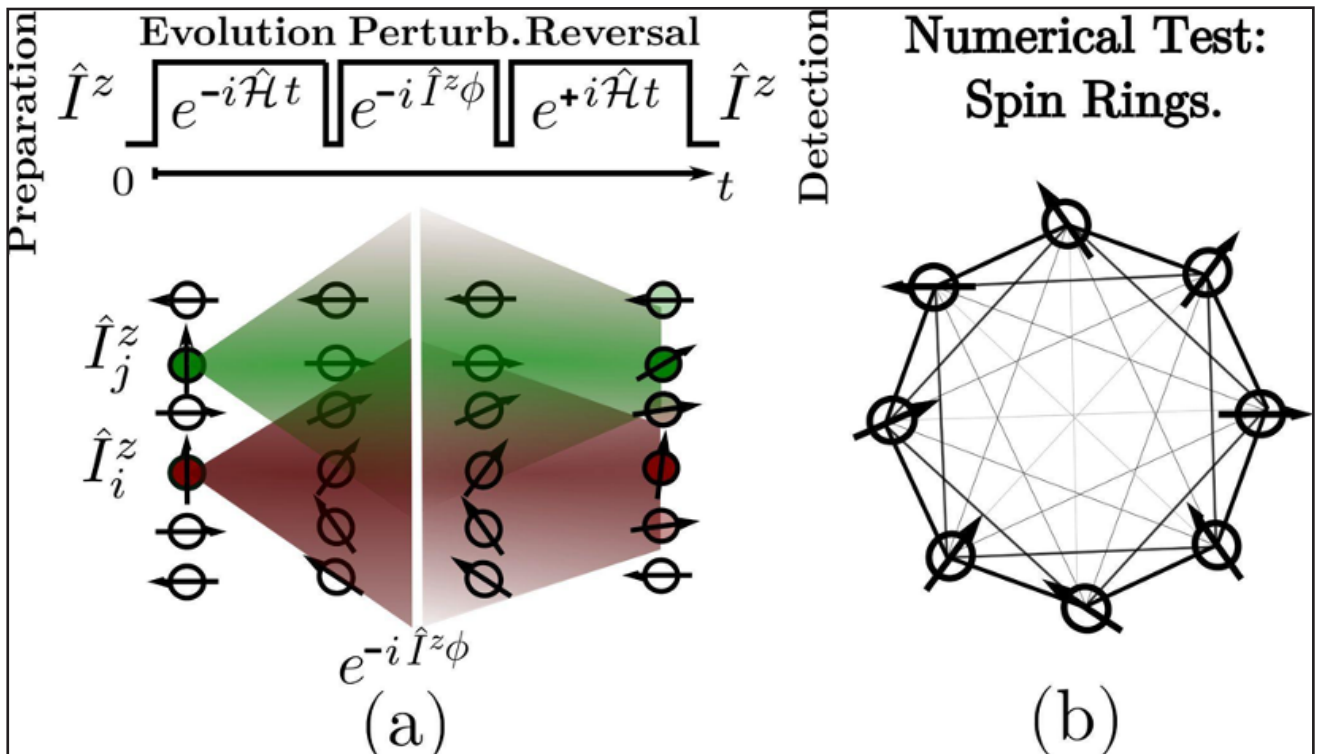
En particular, en estudios realizados en sólidos se observó que la velocidad de scrambling puede estar vinculada con propiedades de transporte cuántico, como la difusión de correlaciones o la propagación balística de excitaciones . Estos resultados conectan la física de la RMN con campos tan diversos como la teoría del caos cuántico y los límites de velocidad de propagación de información. De esa forma, la dispersión de la información y el crecimiento de los clusters de espines sugieren la existencia de una velocidad efectiva de propagación, compatible con las cotas de Lieb–Robinson, que imponen un límite fundamental a la rapidez con la que las correlaciones cuánticas pueden expandirse en el sistema (Sánchez 2023, Zwick & Álvarez 2023).

Relevancia y aportes de Argentina: Argentina ha jugado un rol destacado en esta área. Desde los años noventa, grupos locales exploraron

la irreversibilidad cuántica a través de experimentos de eco en sistemas de espines nucleares, introduciendo protocolos que luego fueron adoptados internacionalmente (Pastawski et al. 1995, Levstein et al. 1998, Pastawski et al. 2000, Jalabert & Pastawski 2001). Posteriormente, se contribuyó a la generalización de estas ideas al lenguaje de OTOCs y scrambling, posicionando a la RMN como una de las pocas plataformas capaces de explorar de manera experimental problemas que, en principio, parecían confinados a la teoría (Álvarez & Suter 2010, Álvarez

et al. 2015b, Sánchez et al. 2016, Sánchez et al. 2020, Domínguez et al. 2021, Sánchez 2022, Lozano-Negro et al. 2024). Estos avances no solo tienen interés fundamental, sino que también son cruciales para el desarrollo de tecnologías cuánticas. Entender los mecanismos de scrambling y termalización ayuda a identificar qué procesos limitan la coherencia en dispositivos cuánticos y qué estrategias pueden usarse para proteger o incluso aprovechar la dinámica de muchos cuerpos en tareas de simulación y sensado (Kuffer et al. 2025, Rosenberg et al. 2026).

Hamiltonianos escaleados: ralentizar, invertir y controlar la dinámica: Una de las formas experimentales más exitosas desarrolladas en Argentina ha sido el uso de Hamiltonianos escaleados, con interacciones internas ajustadas controladamente, permitiendo explorar nuevos regímenes. Se puede entonces acelerar las dinámicas, ralentizarlas o incluso invertir su dirección, creando evoluciones “hacia adelante” o “hacia atrás” en el tiempo. Este enfoque permitió acceder a escalas de tiempo más cortas, imposibles de resolver con el Hamiltoniano original



**Figura 2.** (a) Secuencia de pulsos de un experimento de coherencias cuánticas múltiples (MQC) y representación esquemática de la equivalencia entre el eco de Loschmidt global y la suma de ecos locales. Se muestran dos contribuciones a la magnetización total, asociadas a los sitios  $i$  (verde) y  $j$  (bordó). Tras la evolución bajo  $H$ , una perturbación y la reversión temporal, cada contribución tiende a re-enfocarse en su sitio de origen. Cuando una contribución verde alcanza el sitio  $j$ , o una bordó alcanza  $i$ , ambas se superponen y se cancelan (regiones con mezcla verde–bordó), ilustrando interferencia destructiva. Como resultado, sólo las componentes que retornan coherentemente a su sitio original sobreviven en la suma total. La magnetización global ( $I_z$ ) medida experimentalmente equivale, en sistemas homogéneos y grandes, al promedio de ecos locales. (b) Modelo de anillos de espines utilizado en simulaciones numéricas para imitar los experimentos. La conectividad y el alcance de los acoplamientos —que decrecen con la distancia de enlace— permiten analizar cómo la estructura del sistema favorece la cancelación de contribuciones cruzadas y, en consecuencia, la equivalencia entre observables globales y locales. Figura adaptada de Lozano-Negro et al. (2024), *Physical Review A* 110, 042410.

no escaleado, estudiando la irreversibilidad en función del factor de escala (Sánchez 2020, Sánchez 2022). Gracias a esto, es posible separar con precisión los efectos debidos a errores experimentales de aquellos que provienen de la complejidad intrínseca del sistema, lo que es esencial para poner a prueba la llamada hipótesis central de irreversibilidad (Sanchez 2020). Uno de los resultados más prometedores fue observar que existe un régimen independiente de perturbaciones (Pastawski et al 2000, Jalabert & Pastawski 2001), en donde la irreversibilidad está ligada completamente a la complejidad del sistema, es decir el conjunto de espines provee su propio “sistema + baño”. A esto llamamos decoherencia intrínseca que está gobernada por la propia dinámica colectiva del sistema. A su vez el scrambling de la información se vio reflejado en el crecimiento de los clusters de espines, revelando un comportamiento tipo balístico para geometría 3D, con una ley proporcional a  $t^3$  para el tamaño de cluster (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2015b, Sánchez 2023). En experimentos recientes, se observaron clusters de hasta 10000 espines correlacionados, incluso en momentos en los que el eco de señal casi ha desaparecido: la magnetización inicial se desparrama por grados de libertad ocultos (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2015b).

¿Puede un observable global revelar dinámica local?

Una de las limitaciones más desafiantes de RMN en sólidos, reside en la dificultad de excitar y detectar espines individuales, ya que la mayoría de los experimentos se basan en observables globales, como la magnetización total. En contraste, muchas predicciones teóricas relevantes —incluidos los correladores fuera de orden temporal— se formulan en términos de operadores loca-

les. Esta aparente brecha entre teoría y experimento plantea una pregunta fundamental: ¿puede un observable global capturar información genuinamente local?

Resultados recientes ofrecen una respuesta alentadora. Simulaciones numéricas en sistemas homogéneos de muchos espines muestran que, en el límite de sistemas grandes, los OTOCs globales medidos experimentalmente reflejan con bastante fidelidad el promedio de los OTOCs locales, ver **Figura 2**. La razón es que, tras el protocolo de evolución, perturbación y reversión temporal, las contribuciones cruzadas provenientes de distintos sitios interfieren destructivamente, mientras que las componentes coherentes asociadas a cada sitio se refocalizan predominantemente en su origen.

Esta equivalencia efectiva entre ecos globales y dinámicas locales permite conectar directamente los experimentos de RMN como plataforma para estudiar fenómenos fundamentales de la dinámica cuántica de muchos cuerpos (Lozano-Negro et al. 2024).

## ■ COMUNICACIÓN CUÁNTICA CON CADENAS DE ESPINES

Las cadenas de espines constituyen un modelo natural para explorar la comunicación cuántica: un estado preparado en un extremo de la cadena puede propagarse, gracias a las interacciones internas, hasta el otro extremo sin necesidad de intervención externa. La RMN ha sido una de las primeras plataformas experimentales en las que se puso a prueba esta idea, ofreciendo un marco tangible para estudiar cómo la información cuántica puede transferirse a través de materiales reales (Stolze et al. 2014, Sec. 5.4). El ejemplo más simple de este fenómeno se observa en un par de espi-

nes acoplados, donde la excitación inicial localizada en uno de ellos se transfiere periódicamente al otro. Este proceso, conocido como operación SWAP, constituye uno de los bloques elementales de un canal de comunicación cuántica. En RMN, estas oscilaciones de intercambio de energía y coherencia entre dos núcleos se detectaron directamente, mostrando que la dinámica prevista por los modelos de cadenas podía materializarse en sistemas físicos reales (Álvarez et al. 2006). Cuando el número de espines aumenta, las dinámicas se vuelven más complejas, pero también emergen fenómenos colectivos de gran interés. Uno de los más llamativos es el de los ecos mesoscópicos, que aparecen cuando una excitación inicial se propaga por toda la red de espines y, tras cierto tiempo, se recombina de manera coherente generando un eco observable en el sistema. Estos ecos, detectados en experimentos de RMN en sólidos, constituyen evidencia clara de que las cadenas de espines pueden actuar como canales de almacenamiento y recuperación de información cuántica (Pastawski et al. 1995).

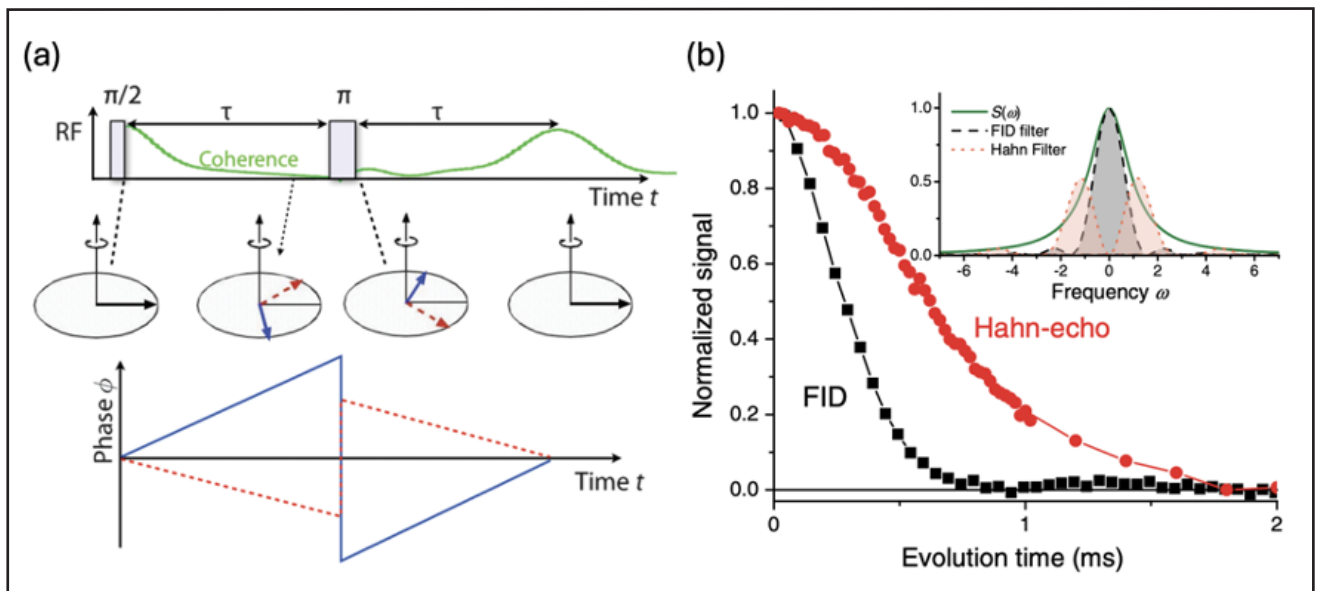
Los trabajos realizados en Argentina y en colaboración internacional mostraron que estas dinámicas no sólo podían observarse, sino que también era posible diseñar secuencias de control que robustecieran frente a imperfecciones y decoherencia (Álvarez et al. 2010b, Zwick et al. 2011, Stolze et al. 2014). Así, la RMN se consolidó como un banco de pruebas privilegiado para validar las predicciones teóricas sobre transferencia de información en cadenas de espines, explorar su estabilidad bajo condiciones experimentales reales y, sobre todo, descubrir nuevas manifestaciones colectivas que no estaban previstas originalmente en los modelos más simples. Más allá de su interés fun-

damental, estas investigaciones tienen una clara proyección hacia el futuro de las tecnologías cuánticas. Las cadenas de espines podrían convertirse en canales intra-dispositivo para transferir información dentro de un procesador cuántico, conectando distintas partes de un chip sin necesidad de recurrir a interfaces externas. En este sentido, las observaciones experimentales en RMN — desde el SWAP elemental hasta los ecos mesoscópicos— proporcionan tanto validación conceptual como inspiración práctica para el diseño de redes de comunicación cuántica en la materia condensada.

### ■ PROTECCIÓN DE LA INFORMACIÓN CUÁNTICA

Uno de los grandes desafíos de la ciencia cuántica es que la información cuántica es extremadamente frágil. A diferencia de la información clásica, los estados cuánticos no pueden copiarse libremente (teorema de no clonación) y son altamente sensibles a cualquier perturbación del entorno. Como consecuencia, los sistemas tienden a perder rápidamente sus propiedades cuánticas a través del proceso de decoherencia, que borra las superposiciones y correlaciones que distinguen lo cuántico de lo clásico.

Desde sus orígenes, la resonancia magnética nuclear ha sido pionera en el desarrollo de herramientas para enfrentar este problema. El descubrimiento del eco de espín por Erwin L. Hahn en 1950 fue la primera demostración de que la pérdida de coherencia no es necesariamente irreversible: aplicando pulsos de radiofrecuencia de forma adecuada, es posible refocalizar la señal de los espines y recuperar la información que parecía perdida (Hahn 1950, ver **Figura 3**). Este hallazgo marcó el inicio de una larga tradición de secuencias de pulsos destinadas a proteger los estados cuánticos de la decoherencia (Suter & Álvarez 2016).

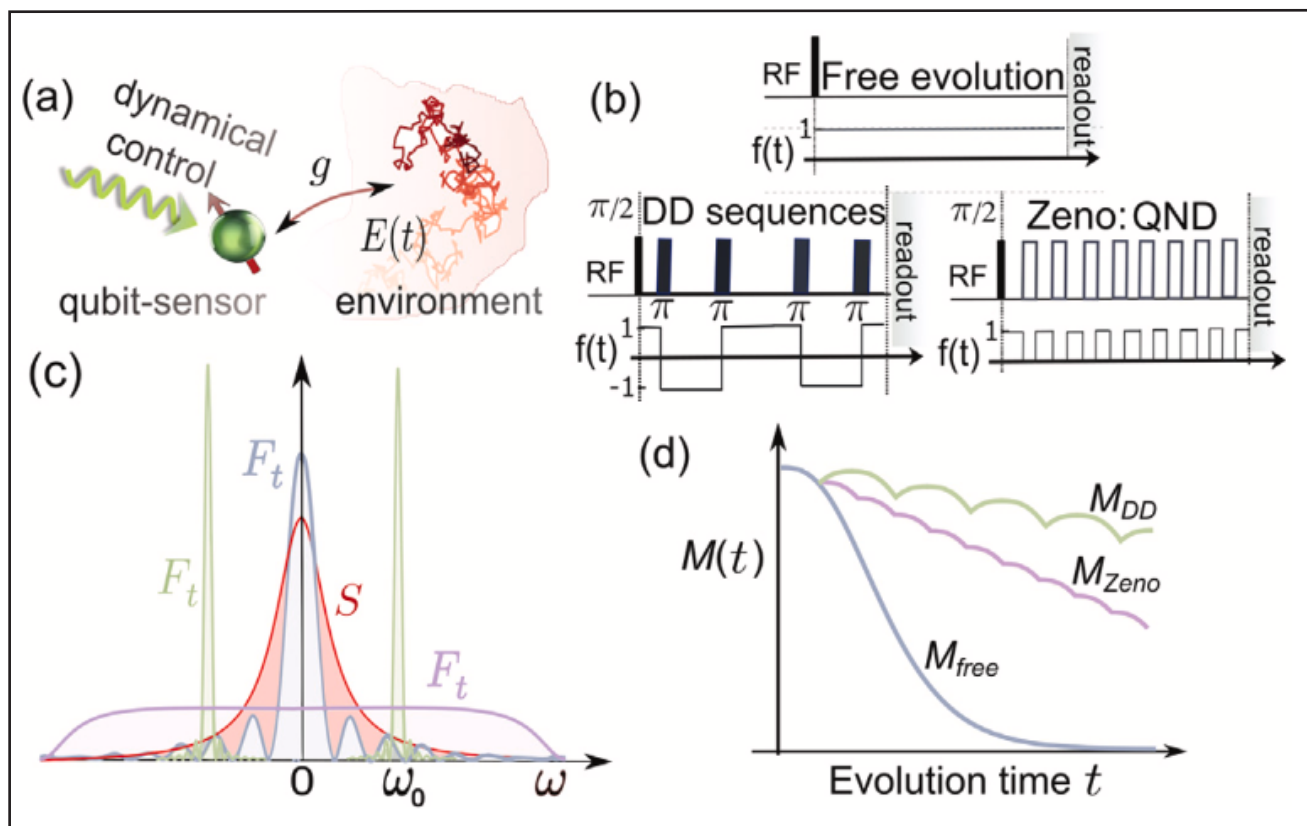


**Figura 3.** Secuencia de Hahn y principio de desacoplamiento dinámico como mecanismo de protección de la información cuántica. (a) Formación de un eco mediante un pulso de inversión  $\pi$ . La traza superior muestra la secuencia de pulsos (rectángulos) y la señal promedio del ensamble de espines (línea verde). Debido a inhomogeneidades estáticas del entorno, los espines acumulan fases distintas y la magnetización se desfasa, perdiendo coherencia. El pulso  $\pi$  invierte la evolución relativa de fases y permite que, en el tiempo  $2\tau$ , las trayectorias de fase se reencuentren, produciendo un eco. El panel central ilustra la orientación de dos espines individuales, mientras que el inferior muestra su evolución de fase (líneas roja y azul), evidenciando la reversión de la dispersión de fases. (b) Comparación entre el decaimiento de la magnetización en precesión libre y bajo control mediante el eco de Hahn. Ambas señales son proporcionales a la coherencia de un estado cuántico. En evolución libre, la coherencia decae rápidamente por desfásaje; en cambio, el eco compensa las contribuciones estáticas del entorno y recupera coherencia. El decaimiento residual del eco indica que el entorno presenta fluctuaciones dinámicas. El recuadro muestra el espectro de ruido ambiental  $S(\omega)$  (verde) y las funciones de filtro asociadas a la evolución libre (gris) y al eco de Hahn (rojo). A diferencia de la evolución libre, la función de filtro del Hahn se anula en  $\omega = 0$ , suprimiendo el ruido de baja frecuencia. Este principio constituye la base del desacoplamiento dinámico y de las estrategias modernas de protección de coherencia en tecnologías cuánticas. Figura adaptada de Suter & Álvarez (2016) *Review of Modern Physics* 88, 041001.

Con el tiempo, estas técnicas se sofisticaron enormemente. Secuencias como las de Carr–Purcell–Meiboom–Gill (CPMG) aplican trenes de pulsos periódicos que corrigen las fluctuaciones del entorno. Estas ideas, originalmente desarrolladas en el ámbito de la RMN, se generalizaron en lo que hoy se conoce como

desacoplamiento dinámico (dynamical decoupling, DD): un conjunto de estrategias que utilizan pulsos o campos externos para promediar las interacciones indeseadas y preservar la coherencia cuántica (Suter & Álvarez 2016). El impacto de estas técnicas trascendió rápidamente a la RMN. Actualmente, variantes de DD

se emplean en múltiples plataformas de la segunda revolución cuántica, incluyendo iones atrapados, átomos ultrafríos, centros de vacancia-nitrógeno en diamante y circuitos superconductores. El concepto central sigue siendo el mismo: mediante secuencias cuidadosamente diseñadas, es posible extender la



**Figura 4.** Control de la decoherencia de un sensor cuántico y diseño de su sensibilidad espectral. (a) El espín nuclear —un qubit sensor— puede controlarse dinámicamente para maximizar la información relevante sobre su entorno, con el cual interactúa mediante un acoplamiento de intensidad  $g$ . La información sobre las fluctuaciones ambientales  $E(t)$  se infiere a partir de la decoherencia inducida en el qubit. (b) Secuencias de control que modulan la interacción sensor–entorno mediante una función de modulación  $f(t)$ : (i) Evolución libre, con  $f(t) = 1$ . (ii) Secuencias de eco de espín o desacoplamiento dinámico (DD), que alternan el signo de la modulación entre  $f(t) = \pm 1$ . (iii) Evolución libre interrumpida por mediciones proyectivas no demolitorias (QND), que reinician el estado del qubit. Para mediciones suficientemente frecuentes se observa el efecto Zeno cuántico (QZE). Todas las secuencias comienzan con un pulso de excitación  $\pi/2$  y finalizan con la lectura de la señal. (c) Representación espectral del desfase. Se muestra una densidad espectral ambiental típica  $S(\omega)$  (rojo) y las funciones de filtro  $F(\omega)$  asociadas a cada protocolo (azul: evolución libre; verde: DD; violeta: QND). Cada secuencia define una ventana espectral distinta: la evolución libre es sensible principalmente a ruido de baja frecuencia; el desacoplamiento dinámico desplaza la sensibilidad hacia frecuencias seleccionadas  $\pm\omega_0$ ; y las mediciones frecuentes generan un filtro amplio asociado al QZE. (d) Comportamiento esquemático del decaimiento de la magnetización  $M(t)$  bajo las tres estrategias de control. En conjunto, estas técnicas permiten diseñar la respuesta espectral del sensor y convertir la decoherencia en un recurso para extraer información selectiva sobre el entorno, fundamento del sentido cuántico moderno. Figura adaptada de Zwick & Álvarez (2023) *Journal of Magnetic Resonance Open*, 16-17, 100113.

vida útil de la información cuántica y, con ello, ampliar el horizonte de aplicaciones prácticas. Más allá del desacoplamiento, la RMN también aportó al diseño de pulsos compuestos y control robusto, que corrigen errores sistemáticos de calibración y aseguran que pequeñas imperfecciones no se acumulen sino que se compensen entre sí (Souza et al. 2011). Estas técnicas se integran con otras estrategias desarrolladas en la teoría de la información cuántica, como los códigos de corrección de errores y los subespacios libres de decoherencia, que introducen redundancia y simetrías para blindar la información contra ciertas clases de perturbaciones (Souza et al. 2012, Suter & Álvarez 2016).

En Argentina, varios grupos han contribuido de forma significativa a este campo. Por un lado, mediante estudios experimentales en sistemas sólidos y líquidos, se exploró la irreversibilidad cuántica y la forma en que las interacciones de muchos cuerpos aceleran la pérdida de coherencia, proporcionando modelos realistas para comprender cómo se degrada la información en condiciones experimentales (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2015b, Domínguez et al. 2021). Por otro lado, se diseñaron e implementaron estrategias de desacople dinámico robusto, capaces de mantener la coherencia incluso bajo fluctuaciones intensas y entornos complejos (Souza et al. 2011, Souza et al. 2012). Estas contribuciones se destacaron tanto en el plano conceptual como en el experimental, y han tenido impacto internacional.

Un aspecto especialmente interesante que surgió de estas investigaciones es que proteger la información cuántica no siempre significa eliminar la decoherencia por completo. En algunos casos, las mismas herramientas que se utilizan para

suprimir el ruido pueden configurarse de manera tal que “filtren selectivamente” el entorno, revelando información sobre él (Álvarez & Suter 2011, Álvarez et al. 2013). De esta manera, la frontera entre proteger contra la decoherencia y explotarla como recurso se vuelve difusa (ver **Figura 4**). Este cambio de perspectiva dio lugar a un área de gran desarrollo en los últimos años: el sentido cuántico (quantum sensing), donde la decoherencia deja de ser un enemigo para convertirse en una fuente de información útil (Zwick et al. 2016, Zwick & Álvarez 2023).

En síntesis, la protección de la información cuántica tiene sus raíces en la RMN, desde los primeros ecos de Hahn hasta las modernas secuencias de desacoplamiento dinámico y los protocolos de control robusto. Estas técnicas se consolidaron como herramientas centrales en la segunda revolución cuántica y siguen siendo perfeccionadas con aportes clave desde Argentina. El siguiente paso, que exploramos en la próxima sección, es cómo esas mismas herramientas pueden invertirse: en lugar de simplemente proteger a los sistemas de su entorno, utilizarlas para convertir al entorno en una fuente de información valiosa mediante estrategias avanzadas de sentido cuántico.

## ■ SENSADO CUÁNTICO

El desarrollo de técnicas para proteger la información cuántica condujo, casi de manera natural, a un cambio de perspectiva: si la decoherencia es inevitable, ¿por qué no aprovecharla como un recurso? De esta idea surge el concepto de quantum sensing, donde los propios procesos de interacción con el entorno, lejos de ser un obstáculo, se convierten en una ventana privilegiada para observarlo. En este marco, un espín nuclear puede pensarse como un sensor cuántico elemental. Su estado responde a los campos magnéticos locales, a las fluctuaciones ambientales o al movimiento de las moléculas que lo rodean. Mediante técnicas de control dinámico, es posible diseñar la forma en que ese espín “escucha” al entorno: los pulsos de radiofrecuencia actúan como filtros espectrales que seleccionan qué frecuencias de ruido o qué procesos dinámicos afectan más fuertemente a la coherencia del sensor (Zwick & Álvarez 2023, ver **Figura 4**). De esta manera, la decoherencia de un espín deja de ser un síntoma indeseado y pasa a convertirse en una medición indirecta del entorno. La pregunta ya no es cómo evitar que el espín pierda coherencia, sino cómo hacer que esa pérdida revele de manera óptima la información que buscamos.

### Nota Editorial 4: Convertir al enemigo en aliado

A lo largo del desarrollo de las tecnologías cuánticas, la “decoherencia”—la pérdida de las delicadas propiedades cuánticas debido al ruido e interferencia del ambiente— siempre ha sido considerada el mayor enemigo a vencer, ya que destruye la información almacenada en los qubits. Sin embargo, el “sentido cuántico” propone un cambio de paradigma clave: darle la vuelta al problema. Si el ruido de una célula, una molécula o un tejido es lo que destruye el estado cuántico de nuestro espín, entonces medir *cuán rápido y de qué manera* se destruye nos da una radiografía ultra-precisa de ese mismo entorno. El espín se “sacrifica” a propósito para leer lo que hay a su alrededor, convirtiéndose en el sensor más sensible permitido por las leyes de la física.

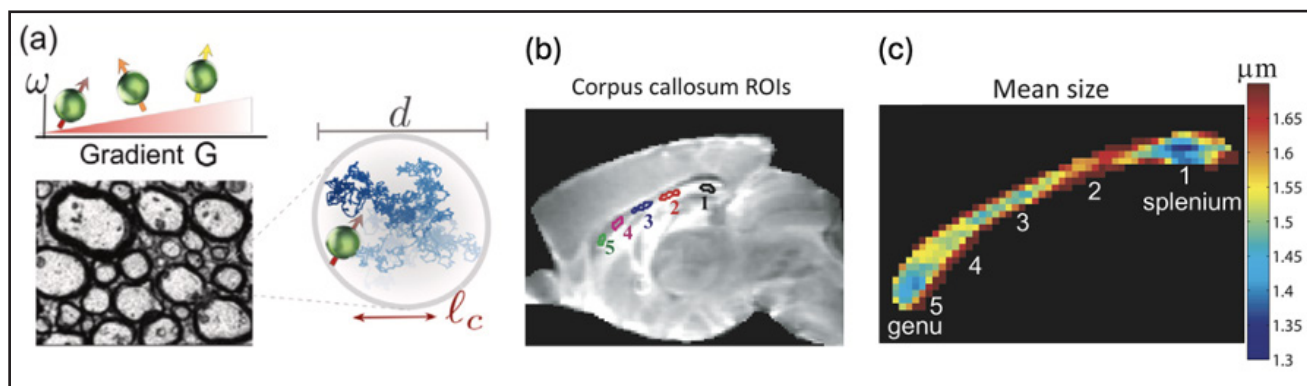
Este principio dio lugar a un repertorio de métodos que reinterpretan técnicas clásicas de la RMN en términos de sentido cuántico. Experimentos basados en ecos de Hahn, secuencias CPMG o variantes de desacoplamiento dinámico se reformularon como herramientas para filtrar selectivamente el ruido ambiental y extraer información sobre sus propiedades espectrales (Álvarez & Suter 2011, Álvarez et al. 2013, Zwick et al. 2016). En paralelo, se desarrollaron enfoques inspirados en el efecto Zeno cuántico, donde la decoherencia inducida de manera controlada congela o modula la dinámica del sensor, y técnicas híbridas que combinan pulsos coherentes con proyecciones efectivas (Álvarez et al. 2010a, Bretschneider et al. 2012, Zwick & Álvarez 2023, Ronchi 2024). Las aplicaciones de este enfoque son diversas y abarcan desde la física fundamental hasta la

biomedicina. En imágenes de resonancia magnética ponderadas en difusión, los núcleos de hidrógeno del agua funcionan como sensores naturales del microentorno tisular (Figura 5). Al diseñar secuencias de gradientes y pulsos que codifican la difusión molecular en la señal, se obtiene información sobre la microestructura del tejido a escalas mucho menores que el tamaño del vóxel (pixel volumétrico), lo que abre la posibilidad de realizar una “biopsia virtual no invasiva” con relevancia directa en el diagnóstico temprano de enfermedades neurodegenerativas (Shemesh et al. 2015, Capiglionni et al. 2021).

En la física de muchos cuerpos fuera del equilibrio, los mismos protocolos que permiten medir la decoherencia de un espín se adaptaron para estimar correlaciones complejas en sistemas sólidos, incluyendo los

correladores fuera de orden temporal, que cuantifican cómo una perturbación local se propaga y se disemina por todo el sistema (Domínguez et al. 2021, Zwick & Álvarez 2023, Kuffer et al. 2025). En química y biología molecular, por su parte, se han utilizado protocolos de estimación selectiva de acoplamientos espín–espín para inferir la topología de redes de interacciones, proporcionando información estructural de moléculas complejas (Bretschneider et al. 2012, Ronchi 2024). Incluso se han propuesto esquemas de aprendizaje adaptativo en tiempo real, donde el control se ajusta dinámicamente en función de los resultados experimentales, optimizando la eficiencia del sentido (Zwick et al. 2016).

Una característica distintiva de la RMN como plataforma de quantum sensing es que trabaja con conjuntos muy grandes de espines, del



**Figura 5.** Concepto de codificación de tamaños microestructurales tisulares en la señal de un espín sensor. (a) Esquema de axones en la sustancia blanca cerebral, rodeados por la vaina de mielina. En presencia de un gradiente de campo magnético, los espines nucleares precesan con frecuencias dependientes de su posición. El movimiento browniano de las moléculas de agua les permite explorar el entorno microscópico y “sentir” las restricciones geométricas impuestas por la microestructura. Esta exploración codifica en la señal una longitud de correlación característica  $l_c$ , relacionada con el tamaño de los compartimentos (por ejemplo, en geometrías cilíndricas  $l_c$  es proporcional al diámetro axonal). Adaptado de Zwick & Álvarez (2023) *Journal of Magnetic Resonance Open*, 16-17, 100113. (b) Regiones de interés (ROIs) definidas en distintas áreas anatómicas del cuerpo calloso del cerebro de un ratón, superpuestas a una imagen de referencia por MRI. Estas regiones permiten comparar cuantitativamente propiedades microestructurales en diferentes zonas del tejido. (c) Mapas paramétricos obtenidos a partir del diseño de secuencias de control cuántico que permiten codificar en la coherencia del sensor información sobre la distribución de tamaños microestructurales tisulares  $l_c$  (valor medio, pico y ancho). El contraste observado entre distintas regiones del cuerpo calloso refleja diferencias en la organización y tamaño de la microestructura axonal. (b,c) Adaptados de Shemesh et al. (2015) *PLoS ONE* 10, e0133201.

orden de  $10^{20}$  en una muestra macroscópica. Esto contrasta con otras tecnologías de sensores cuánticos que se basan en qubits individuales. La señal de la RMN, aunque más débil a nivel de cada espín, puede detectarse de manera no invasiva y en condiciones de temperatura ambiente, lo que la convierte en una herramienta única para aplicaciones biomédicas. En Argentina, varios desarrollos recientes han puesto especial énfasis en esta fortaleza, con el diseño de secuencias capaces de extraer información microscópica a partir de ensamblajes y optimizar la relación entre decoherencia y sensibilidad (Álvarez et al. 2013, Zwick et al. 2020). Estos trabajos muestran que la RMN no solo compete con otras plataformas de sensado cuántico, sino que además ofrece ventajas complementarias, en particular en la interfaz entre física fundamental, materiales y aplicaciones médicas (Zwick & Álvarez 2023).

### ■ PURIFICACIÓN E HIPERPOLARIZACIÓN DE ESTADOS CUÁNTICOS

Uno de los grandes retos para la implementación de tecnologías cuánticas es la preparación de estados cuánticos puros. La mayoría de los sistemas disponibles en condiciones experimentales corrientes presentan mezclas térmicas con muy bajo grado de orden, lo que limita seriamente su utilidad para el cómputo, el almacenamiento y el sensado cuántico. En este contexto, la resonancia magnética nuclear y los sistemas de espines en sólidos han sido terreno fértil para el diseño de protocolos de purificación, orientados a incrementar la polarización y crear estados mucho más cercanos a la pureza ideal.

Un enfoque particularmente prometedor es la hiperpolarización

de núcleos a partir de defectos en diamante, como los centros de vacancia-nitrógeno (NV). Estos sistemas permiten polarizar de manera muy eficiente el espín electrónico del defecto a temperatura ambiente y transferir esa polarización a los núcleos de  $^{13}\text{C}$  del entorno. A través de procesos de difusión de espín, la polarización se propaga y alcanza un número creciente de núcleos, de modo que un ensamble inicialmente desordenado puede transformarse en un conjunto con un grado de pureza muy superior al natural. Los desarrollos recientes han demostrado que, al combinar bombeo óptico, excitación coherente por microondas y secuencias de control dinámico, es posible implementar protocolos robustos de transferencia de polarización que funcionan en condiciones realistas y sin necesidad de recurrir a temperaturas criogénicas. Esto permitió lograr niveles apreciables de orden nuclear no solo en las proximidades inmediatas de los centros NV, sino también en regiones macroscópicas del cristal. La importancia de este avance radica en mostrar que es posible alcanzar estados cuánticos purificados en materiales y condiciones que antes se consideraban fuera del alcance.

Miembros de grupos en Argentina han realizado contribuciones significativas en esta dirección, proponiendo y validando esquemas de purificación que explotan tanto la interacción controlada con defectos electrónicos como la propagación de la polarización en redes nucleares (Álvarez et al. 2015a, Ajoy et al. 2018). Estos trabajos han ayudado a consolidar la idea de que la interacción con el entorno, habitualmente vista como fuente de decoherencia, puede aprovecharse también para inducir procesos de enfriamiento y purificación controlada. Más allá de su interés conceptual, la purificación de

estados cuánticos tiene un claro valor práctico. Por un lado, permite preparar condiciones iniciales bien definidas para estudiar fenómenos colectivos en dinámica cuántica fuera del equilibrio. Por el otro, abre la puerta a aplicaciones como las memorias cuánticas basadas en espines nucleares, capaces de preservar información durante tiempos prolongados, y a la preparación de estados hiperpolarizados que potencien experimentos de sensado e imagen cuántica. En conjunto, estos resultados confirman que la RMN y los sistemas híbridos de espines en sólidos constituyen plataformas sólidas para la purificación de estados cuánticos. El camino recorrido, con aportes destacados de grupos en Argentina, demuestra la viabilidad de estas estrategias y refuerza su papel dentro del repertorio de herramientas clave de la segunda revolución cuántica. (Álvarez et al. 2015a, Ajoy et al. 2018)

### ■ PERSPECTIVAS HACIA LA SEGUNDA REVOLUCIÓN CUÁNTICA

La resonancia magnética nuclear ha demostrado ser una plataforma fundamental para el desarrollo de la información y las tecnologías cuánticas. Su madurez experimental y la versatilidad de sus técnicas de control han permitido estudiar y manipular sistemas cuánticos de muchos cuerpos, diseñar secuencias para proteger la coherencia y explorar el sensado cuántico en escalas microscópicas. Sin embargo, el horizonte de la disciplina se extiende más allá de la RMN convencional: la combinación con espines electrónicos en sólidos, en particular los centros de vacancia-nitrógeno en diamante, abre nuevas posibilidades de exploración en la nanoescala que proyectan a la resonancia magnética hacia dominios completamente nuevos (Rosenberg et al. 2026).

Uno de los campos donde la RMN seguirá desempeñando un papel decisivo es el de las memorias cuánticas. Los espines nucleares son candidatos naturales para almacenar información cuántica gracias a sus largos tiempos de coherencia. En combinación con protocolos avanzados de control dinámico y con hiperpolarización inducida por defectos electrónicos, pueden convertirse en registros colectivos estables que complementen arquitecturas de computación cuántica basadas en otros tipos de qubits. Este potencial de memoria se vuelve aún más prometedor en sistemas híbridos, donde la información se transfiere desde un espín electrónico, fácilmente accesible y manipulable, hacia un conjunto de espines nucleares que actúa como depósito de larga duración.

El campo del quantum sensing también ofrece un panorama de gran proyección. En la escala macroscópica, la RMN con ensamblajes nucleares ya se consolidó como una técnica no invasiva para obtener información microestructural, con aplicaciones directas en medicina y ciencia de materiales. La optimización de secuencias de control permitirá mejorar la resolución y la especificidad, potenciando su uso como “microscopio cuántico” para caracterizar entornos complejos. Al mismo tiempo, los espines electrónicos en defectos en sólidos representan una vía complementaria para acceder a escalas aún menores. Los centros NV en diamante, en particular, actúan como sensores cuánticos de alta sensibilidad capaces de detectar campos magnéticos débiles a nivel nanométrico. En este terreno se vislumbra el desarrollo de tecnologías de nano-MRI, capaces de generar imágenes de moléculas individuales, proteínas o incluso procesos intracelulares en tiempo real. Estos avances abrirán la posibilidad de estudiar directamente la organización

molecular de la vida, con implicancias profundas para la biología y la medicina.

En el área de la comunicación intra-dispositivo, las cadenas de espines exploradas en RMN ofrecen un modelo viable para la transferencia de información dentro de procesadores cuánticos. La posibilidad de transmitir estados cuánticos a través de redes de espines sin recurrir a interfaces externas constituye un recurso estratégico para la escalabilidad de la computación cuántica. Los resultados experimentales obtenidos en sistemas de RMN, incluyendo observaciones de procesos de intercambio elemental y ecos mesoscópicos, demuestran que estas dinámicas pueden aprovecharse en arquitecturas cuánticas integradas. El futuro de la comunicación cuántica a escala local probablemente combine estos conceptos con tecnologías de espines electrónicos en sólidos, dando lugar a dispositivos híbridos donde la transferencia de información se realice de manera eficiente y robusta.

La simulación cuántica es otro campo en el que la RMN ya mostró su potencial y donde se esperan desarrollos aún más ambiciosos. Mediante la ingeniería de Hamiltonianos promedio, es posible emular dinámicas de modelos de muchos cuerpos y explorar fenómenos fuera del equilibrio. Los experimentos de RMN han permitido implementar correladores fuera de orden temporal y estudiar el scrambling de la información, aportando evidencia experimental a cuestiones que parecían reservadas a la teoría. El avance en la RMN impulsa nuevas estrategias experimentales y tecnologías de adquisición de datos que transforman la forma de estudiar sistemas cuánticos complejos. Un ejemplo clave es el Floquet driving, una técnica que aplica pulsos periódicos muy

rápidos para “domar” la evolución cuántica de sistemas fuera del equilibrio. Este control permite acceder a un régimen “pretérmico”, donde la dinámica se vuelve más predecible y las señales se refuerzan hasta mil veces, logrando observar fenómenos que antes quedaban enterrados en el ruido. Un aspecto curioso es la observación de una ruptura de simetría temporal, algo conocido como “time crystal” o cristales temporales, característicos de sistemas de no-equilibrio forzados periódicamente.

Gracias a esta sensibilidad mejorada que se ha podido lograr en base a la comprensión profunda de los procesos mecánico-cuánticos del sistema de espines, hoy es posible estudiar y analizar de nuevas maneras, cómo se forman y crecen los clusters de espines correlacionados. La combinación con nuevos métodos de tratamiento de datos —como algoritmos de inversión numérica extremadamente sensibles— abre la puerta a modelar con precisión la distribución y evolución de estas correlaciones, enriqueciendo nuestro entendimiento de la dinámica cuántica fuera del equilibrio, y al mismo tiempo ofreciendo herramientas potenciales para otras tecnologías emergentes, como la simulación cuántica, la computación tolerante a errores y el sensado de ultra alta precisión.

En el futuro, la integración con defectos electrónicos y materiales híbridos permitirá diseñar simuladores cuánticos combinando la robustez de los núcleos con la sensibilidad y el acceso directo de los electrones, abriendo nuevas oportunidades para modelar materiales cuánticos, fases exóticas y procesos críticos.

En el ámbito biomédico, la resonancia magnética sigue siendo una de las aplicaciones más relevantes y socialmente impactantes. El avance

de las secuencias basadas en difusión y control dinámico promete ampliar las capacidades diagnósticas de la imagen por resonancia magnética, permitiendo una caracterización microestructural del tejido vivo con un nivel de detalle sin precedentes. Esta perspectiva apunta hacia la realización de una biopsia virtual no invasiva, con la capacidad de detectar alteraciones en estadios tempranos de enfermedades neurodegenerativas o metabólicas. En paralelo, la emergencia de técnicas basadas en espines electrónicos, como los centros NV, proyecta la posibilidad de desarrollar nano-MRI biomolecular, capaz de obtener imágenes con resolución nanométrica de estructuras intracelulares (Rosenberg et al. 2026). La combinación de estas dos aproximaciones —la imagen macroscópica no invasiva y la microscopía cuántica en la nanoescala— configura un panorama en el que la resonancia magnética se transforma en una herramienta transversal, desde el organismo completo hasta la molécula individual.

Los centros NV y otros defectos electrónicos en sólidos serán protagonistas en esta transición. Su capacidad para ser polarizados ópticamente y leídos con alta fidelidad a temperatura ambiente, sumada a su interacción con redes de espines nucleares, los convierte en nodos privilegiados para construir sistemas híbridos. Estos materiales permiten combinar la sensibilidad extrema de los electrones con la estabilidad de los núcleos, habilitando dispositivos que integran sensado, memoria y simulación en una misma arquitectura. A partir de estos avances, se vislumbra un camino hacia tecnologías de diagnóstico molecular, plataformas de simulación híbrida y herramientas de biología cuántica orientadas a entender procesos intracelulares con una resolución sin precedentes.

La proyección del rol de la RMN y de los espines electrónicos en las próximas décadas muestra un horizonte amplio y diversificado. Ambas plataformas, lejos de ser excluyentes, se complementan y potencian mutuamente. Mientras la RMN aprovecha la fuerza del ensamble y su carácter no invasivo para aplicaciones macroscópicas, los espines electrónicos y los sistemas híbridos expanden el alcance hacia la nanoescala y las aplicaciones moleculares. Esta dualidad convierte a la resonancia magnética, en su acepción más amplia, en un pilar de la segunda revolución cuántica.

En conjunto, estas líneas de desarrollo —memorias híbridas, comunicación en redes de espines, simulación fuera del equilibrio, nano-MRI biomolecular— delinean un programa de investigación donde la resonancia magnética no sólo amplía sus aplicaciones, sino que redefine su papel dentro de la arquitectura de las tecnologías cuánticas emergentes.

## ■ COMENTARIOS FINALES

La resonancia magnética ha sido, de manera natural, una de las primeras plataformas en las que se exploró el control cuántico de la información. Su base conceptual consiste en manipular estados de espín para codificar y procesar información, lo que facilitó la evolución, cada vez más sofisticada, hacia el control dinámico, protección y sensado. Este recorrido convirtió a la RMN en la técnica de información cuántica más madura en cuanto a aplicaciones concretas, con un impacto directo y comprobado en áreas como la medicina, la biología y la ciencia de materiales.

Sin embargo, esta madurez se alcanzó en un marco particular: la mayoría de sus aplicaciones prác-

ticas funcionan en ensambles macroscópicos de espines, donde la señal colectiva permite acceder a información útil pero al mismo tiempo dificulta la observación directa de fenómenos locales o de entrelazamiento. En estos sistemas se han identificado correlaciones cuánticas de muchos cuerpos que trascienden lo clásico, aunque todavía no existe una medida clara que permita caracterizar inequívocamente el entanglement en ensambles de gran tamaño. Este es un desafío abierto de enorme interés conceptual, que conecta la RMN con preguntas fundamentales sobre la naturaleza de la información cuántica en sistemas complejos. En este escenario, las técnicas de RMN y el diseño de secuencias de pulsos tampoco son ajenos al impacto de la inteligencia artificial: el uso de algoritmos avanzados permitiría optimizar secuencias para implementar Hamiltonianos específicos, que luego podrían probarse experimentalmente, y también desarrollar nuevas estrategias de corrección de errores para evitar la pérdida de señal en estos sistemas cuánticos macroscópicos.

La resonancia magnética, tanto en su versión macroscópica como en su evolución hacia plataformas híbridas que integran espines nucleares y electrónicos, constituyendo así una técnica establecida con aplicaciones concretas que ya benefician a la sociedad y, al mismo tiempo, abierta a transformaciones profundas que la proyectan hacia nuevas escalas y arquitecturas de control cuántico. Esta convergencia entre estabilidad nuclear y sensibilidad electrónica amplía su alcance desde ensambles colectivos hasta dispositivos de interrogación local, configurando un marco experimental donde memoria, sensado y simulación pueden coexistir dentro de un mismo sistema físico. Grupos en Argentina han contribuido de forma

significativa a este recorrido, desde el diseño de protocolos de control robusto hasta el desarrollo de estrategias de sentido y purificación en sistemas híbridos. El futuro de la resonancia magnética cuántica, en todas sus escalas, seguirá ofreciendo oportunidades para generar conocimiento fundamental y aplicaciones con impacto directo en la Ciencia, la Tecnología y la Sociedad.

## ■ AGRADECIMIENTOS

Durante los últimos años hemos tenido la fortuna de trabajar en estos temas con numerosos estudiantes e investigadores talentosos y dedicados, entre ellos A. Ajoy, R.H. Acosta, C. Bretshneider, L. Buljubasich, M. Capiglioni, E. P. Danieli, F. D. Domínguez, R. Fischer, A. Finkler, L. Frydman, P. Jiménez, R. Kaiser, G. Kurizki, M. Kuffer, P. R. Levstein, P. London, F. S. Lozano-Negro, H. M. Pastawski, D. D. Bhaktavatsala Rao, M. C. Rodríguez, B. Ronchi, W. Rosenberg, C.M. Sánchez, G. Sequeros, N. Shemesh, J. Stolze, D. Suter, A. M. Souza, A. Zwick y O. Osenda. G.A.A. agradece el apoyo de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), del Instituto Balseiro, de la Fundación Balseiro y de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT-FONCyT), a través de los proyectos PICT-2017-3156, PICT-2017-3699, PICT-2018-4333, PICT-2021-GRFTI-00134 y PICT-2021-I-A-00070, así como de los Proyectos de Investigación Plurianuales (PIP-CONICET) N.º 11220170100486CO y 11220220100531CO, y del programa PIBAA 2022–2023. Asimismo, se agradece el financiamiento de la Universidad Nacional de Cuyo (SIIP Tipo I 2019-C028, 2022-C002 y 2022-C030) y de los programas de colaboración internacional entre el MINCyT (Argentina) y MAECI (Italia), y entre el MINCyT y MOST

(Israel). A.K.C. agradece el apoyo de CONICET y de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba (SECyT-UNC), a través de los programas CONSOLIDAR 2018–2022 y PIDTA 33620230100054CB. A.K.C. agradece al CCAD (Centro de Supercómputo de la Universidad Nacional de Córdoba) por los recursos brindados para realizar cálculos computacionales en los trabajos citados.

## ■ GLOSARIO

**Caos cuántico:** Estudio de sistemas cuánticos cuyo comportamiento es muy sensible a perturbaciones, similar al caos clásico pero con rasgos cuánticos.

**Centros NV** (Vacancias de nitrógeno en diamante): Defectos en la estructura del diamante que actúan como qubits altamente sensibles y controlables, utilizados en sentido cuántico y computación.

**Cluster de espines:** Grupo de partículas cuyos espines están correlacionados cuánticamente. Se caracterizan por su tamaño.

**Coherencias cuánticas múltiples:** Estados en los que varios espines están correlacionados y evolucionan colectivamente, generando señales características en RMN.

**Computación cuántica:** Campo de estudio y desarrollo de tecnologías que aprovechan las propiedades cuánticas para procesar información de manera diferente a la computación clásica.

**Decoherencia:** Pérdida de las propiedades cuánticas debido a la interacción con el entorno, lo que lleva a un comportamiento más clásico.

**Eco de Loschmidt:** Señal que se obtiene al revertir la evolución temporal de un sistema cuántico y com-

pararla con la condición inicial. Permite medir la dificultad de revertir una evolución en el tiempo ante perturbaciones.

**Espín:** Propiedad cuántica de las partículas subatómicas, similar a un pequeño imán, que puede manipularse para obtener información del sistema.

**Estado cuántico:** Descripción completa del estado físico de un sistema cuántico, que incluye información sobre sus posibles resultados de medición.

**Hamiltoniano (cuántico):** Función matemática que describe la energía total de un sistema cuántico y su evolución en el tiempo.

**OTOC (Out-of-Time-Ordered Correlator):** Herramienta para estudiar la velocidad de propagación de la información cuántica, relacionada con el caos cuántico.

**RMN (Resonancia Magnética Nuclear):** Técnica experimental que permite estudiar la estructura y dinámica de materiales observando el comportamiento cuántico de los espines de los núcleos atómicos, en presencia de un campo magnético.

**Scrambling:** Proceso por el cual la información cuántica se dispersa entre muchas partículas en un sistema de muchos cuerpos y deja de ser accesible a una observación local.

**Secuencias de pulsos:** Series de pulsos de radiofrecuencia diseñadas para manipular el estado de los espines y controlar la dinámica cuántica en experimentos de RMN, para el diseño de aplicaciones de en general de caracterización de moléculas, materiales, procesos físicos, químicos y biológicos.

**Simulación cuántica:** Uso de sistemas cuánticos controlables, como

los espines nucleares en RMN, para imitar otros sistemas cuánticos complejos.

**Termalización:** Proceso mediante el cual un sistema cuántico de muchos cuerpos evoluciona hacia un estado en el que sus subsistemas pequeños exhiben propiedades compatibles con la termodinámica, aun cuando el sistema global permanece en un estado puro.

## ■ REFERENCIAS

- Ajoy, A., Liu, K., Nazaryan, R., Lv, X., Zangara, P. R., Safvati, B., Wang, G. et al. (2018) Orientation-Independent Room Temperature Optical  $^{13}\text{C}$  Hyperpolarization in Powdered Diamond. *Science Advances* 4, eaar5492.
- Álvarez, G. A., Danieli, E. P., Levstein, P. R. & Pastawski, H. M. (2006) Environmentally induced Quantum Dynamical Phase Transition in the spin swapping operation. *Journal of Chemical Physics* 124, 194507.
- Álvarez, G. A. & Suter, D. (2010) NMR quantum simulation of localization effects induced by decoherence. *Physical Review Letters* 104, 230403.
- Álvarez, G. A., Bhaktavatsala Rao, D. D., Frydman, L. & Kurizki, G. (2010a) Zeno and anti-Zeno polarization control of spin-ensembles by induced dephasing. *Physical Review Letters* 105, 160401.
- Álvarez, G. A., Mishkovsky, M., Danieli, E. P., Levstein, P. R., Pastawski, H. M. & Frydman, L. (2010b) Perfect state transfers based on selective quantum interferences within a complex spin network. *Physical Review A (Rapid Communication)* 81, 060302.
- Álvarez, G. A. & Suter, D. (2011) Measuring the spectrum of colored noise by dynamical decoupling. *Physical Review Letters* 107, 230501.
- Álvarez, G. A., Shemesh, N. & Frydman, L. (2013) Coherent dynamical recoupling of diffusion-driven decoherence in magnetic resonance. *Physical Review Letters* 111, 080404.
- Álvarez, G. A., Bretschneider, C. O., Fischer, R., London, P., Kanda, H., Onoda, S., Isoya, J., Gershoni, D. & Frydman, L. (2015a). Local and bulk  $^{13}\text{C}$  hyperpolarization in nitrogen-vacancy-centred diamonds at variable fields and orientations. *Nature Communications*, 6, 8456.
- Álvarez, G. A., Suter, D. & Kaiser, R. (2015b). Localization-delocalization transition in the dynamics of dipolar-coupled nuclear spins. *Science* 349, 846.
- Álvarez, G. A. (2022) Una mirada a las tecnologías cuánticas y la medicina. in *Serie: hojitas de conocimiento*, No 51 CIENCIA (Comisión Nacional de Energía Atómica - Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable, Argentina, (2022), pp. 455–456. ISBN: 978-987-1323-12-8.
- Braunstein, S. L., Caves, C. M., Jozsa, R., Linden, N., Popescu, S. & Schack, R. 1999 Separability of Very Noisy Mixed States and Implications for NMR Quantum Computing. *Physical Review Letters* 83, 1054–57.
- Bretschneider, C. O., Álvarez, G. A., Kurizki, G. & Frydman, L. (2012) Controlling spin-spin network dynamics by repeated projective measurements. *Physical Review Letters* 108, 140403.
- Capiglion, M., Jiménez, P., Zwick, A. & Álvarez, G. A. (2021) Noninvasive Quantitative Imaging of Selective Microstructure Sizes via Magnetic Resonance. *Physical Review Applied* 15, 014045.
- Cory, D. G., Fahmy, A. F. & Havel, T. F. (1997) Ensemble Quantum Computing by NMR Spectroscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 94, 1634–39.
- Domínguez, F. D., Rodríguez, M. C., Kaiser, R., Suter, D. & Álvarez, G. A. (2021) Decoherence scaling transition in the dynamics of quantum information scrambling. *Physical Review A* 104, 012402.
- Gershenfeld, N. A. & Chuang, I. L. 1997 Bulk Spin-Resonance Quantum Computation. *Science* 275, 350–56.
- Goussev, A., Jalabert, R. A., Pastawski, H. M. & Wisniacki, D. A. (2012). Loschmidt echo. *Scholarpedia*, 7, 11687.
- Hahn, E. L. (1950). Spin echoes. *Physical Review* 80, 580-594.
- Jalabert, R. A. & Pastawski, H. M. (2001) Environment-Independent Decoherence Rate in Classically Chaotic Systems. *Physical Review Letters* 86, 2490.
- Knill, E. & Laflamme, R. (1998) Power of One Bit of Quantum Information. *Physical Review Letters* 81, 5672-5675.
- Kuffer, M., Zwick, A. & Álvarez, G. A. (2025). Sensing out-of-equilibrium and quantum non-Gaussian environments via induced time-reversal symmetry breaking on the quantum-probe dynamics. *PRX Quantum* 6, 020320.

- Le Bihan, D. (2003). Looking into the Functional Architecture of the Brain with Diffusion MRI. *Nature Reviews Neuroscience* 4, 469–80.
- Levstein, P. R., Usaj, G. & Pastawski, H. M. (1998) Attenuation of Polarization Echoes in Nuclear Magnetic Resonance: A Study of the Emergence of Dynamical Irreversibility in Many-Body Quantum Systems. *The Journal of Chemical Physics* 108, 2718.
- Lewis-Swan, R. J., Safavi-Naini, A., Kaufman, A. M. & Rey, A. M. (2019) Dynamics of Quantum Information. *Nature Reviews Physics* 1, 627–34.
- Lozano-Negro, F. S., Sánchez, C. M., Chattah, A. K., Álvarez, G. A. & Pastawski, H. M. (2024). Global out-of-time-order correlators as a signature of scrambling dynamics of local observables. *Physical Review A* 110, 042410.
- Muller, L., Kumar, A., Baumann, T. & Ernst, R. R. (1974) Transient Oscillations in NMR Cross-Polarization Experiments in Solids. *Physical Review Letters* 32, 1402.
- Nielsen, M. A., Knill, E. & Laflamme, R. (1998) Complete Quantum Teleportation Using Nuclear Magnetic Resonance. *Nature* 396, 52–55.
- Pastawski, H. M., Levstein, P. R. & Usaj, G. (1995) Quantum Dynamical Echoes in the Spin Diffusion in Mesoscopic Systems. *Physical Review Letters* 75, 4310.
- Pastawski, H. M., Levstein, P. R., Usaj, G., Raya, J. & Hirschinger, J. (2000) A Nuclear Magnetic Resonance Answer to the Boltzmann-Loschmidt Controversy?. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 283, 166–170.
- Ronchi, B., Zwick, A. & Álvarez, G. A. (2024). Maximizing information obtainable by quantum sensors through the quantum Zeno effect. *Physical Review Applied* 22, 034058.
- Rosenberg, J. W., Kuffer, M. Zohar, I., Stöhr, R., Denisenko, A., Zwick, A., Álvarez, G. A. & Finkler, A. (2026) Witnessing non-stationary and non-Markovian environments with a quantum sensor. *Physical Review Applied* 25, 014049
- Sánchez, C. M., Levstein, P. R., Buljubasich, L., Pastawski, H. M. & Chattah, A. K. (2016). Quantum dynamics of excitations and decoherence in many-spin systems detected with Loschmidt echoes: Its relation to their spreading through the Hilbert space. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374.
- Sánchez, C. M., Chattah, A. K., Wei, K. X., Buljubasich, L., Cappellaro, P. & Pastawski, H. M. (2020). Perturbation independent decay of the Loschmidt echo in a many-body system. *Physical Review Letters* 124, 030601.
- Sánchez, C. M., Chattah A. K., Pastawski H. M., (2022). Emergent decoherence induced by quantum chaos in a many-body system: A Loschmidt echo observation through NMR, *Physical Review A* 105, 052232.
- Sánchez, C. M., Pastawski, H. M. & Chattah, A. K. (2023). Low perturbation limit decoherence analyzed by scaling the double quantum Hamiltonian. *Journal of Magnetic Resonance Open*, 16–17, 100104.
- Sequeiros, G., Sánchez, C. M., Buljubasich, L., Chattah, A. K., Pastawski, H. M. & Acosta, R. H. (2025). Multiple quantum many-body clustering probed by dynamical decoupling. *Physical Review A* 112, 022617.
- Shemesh, N., Álvarez, G. A. & Frydman, L. (2015) Size distribution imaging by Non-Uniform Oscillating-Gradient Spin Echo (NOGSE) MRI. *PLoS ONE* 10, e0133201.
- Souza, A. M., Álvarez, G. A. & Suter, D. (2012). Robust dynamical decoupling. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 370, 4748–4769.
- Stolze, J., Álvarez, G. A., Osenda, O. & Zwick, A. (2014) Robustness of spin-chain state-transfer schemes in Quantum State Transfer and Network Engineering, edited by G. M. Nikolopoulos and I. Jex (Springer Berlin Heidelberg), pp. 149–182. Partly published in arXiv:1502.04879.
- Suter, D. & Álvarez, G. A. (2016). Protecting quantum information against environmental noise. *Review of Modern Physics* 88, 041001.
- Swingle, B. (2018). Unscrambling the physics of out-of-time-order correlators. *Nature Physics*, 14, 988–990.
- Zhang, S., Meier, B. H. & Ernst, R. R. (1992) Polarization Echoes in NMR. *Physical Review Letters* 69, 2149.
- Zwick, A., Álvarez, G. A., Stolze, J. & Osenda, O. (2011) Robustness

- of spin-coupling distributions for perfect quantum state transfer. *Physical Review A* 84, 022311.
- Zwick, A., Álvarez, G. A., and Kurizki, G. (2016) Maximizing information on the environment by dynamically controlled qubit probes. *Physical Review Applied* 5, 014007.
- Zwick, A., Suter, D., Kurizki, G. & Álvarez, G. A. (2020) Precision limits of tissue microstructure characterization by Magnetic Resonance Imaging. *Physical Review Applied* 14, 024088.
- Zwick, A. (2022) Una mirada a la resonancia magnética nuclear y la física cuántica, en Serie: hojitas de conocimiento, No 50 CIENCIA (Comisión Nacional de Energía Atómica - Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable, Argentina), 453–454. ISBN: 978-987-1323-12-8
- Zwick, A. & Álvarez, G. A. (2023). Quantum sensing tools to characterize physical, chemical and biological processes with magnetic resonance. *Journal of Magnetic Resonance Open* 16-17, 100113.

#### ■ **NOTA**

1 Hace referencia a scrambled eggs (huevos revueltos), que a su vez está relacionado con el efecto mariposa cuántico (Swingle 2018, Lewis-Swan 2019)