The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Una memoria cuántica por fin mejoró al crecer: el hito real y la máquina que no es

Google Quantum AI mostró, por primera vez con claridad, que una memoria cuántica de código de superficie puede operar por debajo del umbral: al hacer crecer el código de distancia 3 a 5 y 7, la tasa de error lógico cayó exponencialmente (unas 2,14× por cada dos pasos), y la mayor, una memoria de distancia 7 con 101 qubits, vivió más que su mejor qubit físico —más allá del punto de equilibrio— con corrección de errores en tiempo real. Es un hito de ingeniería largamente buscado. También es un solo qubit lógico actuando como memoria, con una tasa de error aún lejos de lo que exigen los algoritmos reales, sin operaciones lógicas realizadas, con un suelo de errores inexplicado que los autores señalan y con muchos órdenes de magnitud de escalado por delante. Un umbral cruzado, no un ordenador entregado.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Quantum error correction below the surface code threshold*, Google Quantum AI and Collaborators, Nature 638, 920 (2025) · DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y

El momento en que la curva se dobló en la dirección correcta

Durante treinta años, la corrección de errores cuánticos se ha apoyado en una promesa que nunca se había cumplido de forma limpia. La teoría dice que si distribuyes una unidad de información cuántica —un qubit *lógico*— entre muchos qubits físicos ruidosos, y si esos qubits físicos son lo bastante buenos, entonces añadir *más* de ellos debería hacer que el qubit lógico sea *mejor*, con errores que caen exponencialmente a medida que crece el código. La trampa está en el "si": por debajo de un umbral crítico de ruido, más qubits ayudan; por encima, más qubits solo añaden más ruido. Todos los experimentos anteriores habían vivido del lado equivocado de esa línea, o no habían mostrado la tendencia con claridad. Hacer crecer el código empeoraba las cosas, no las mejoraba.

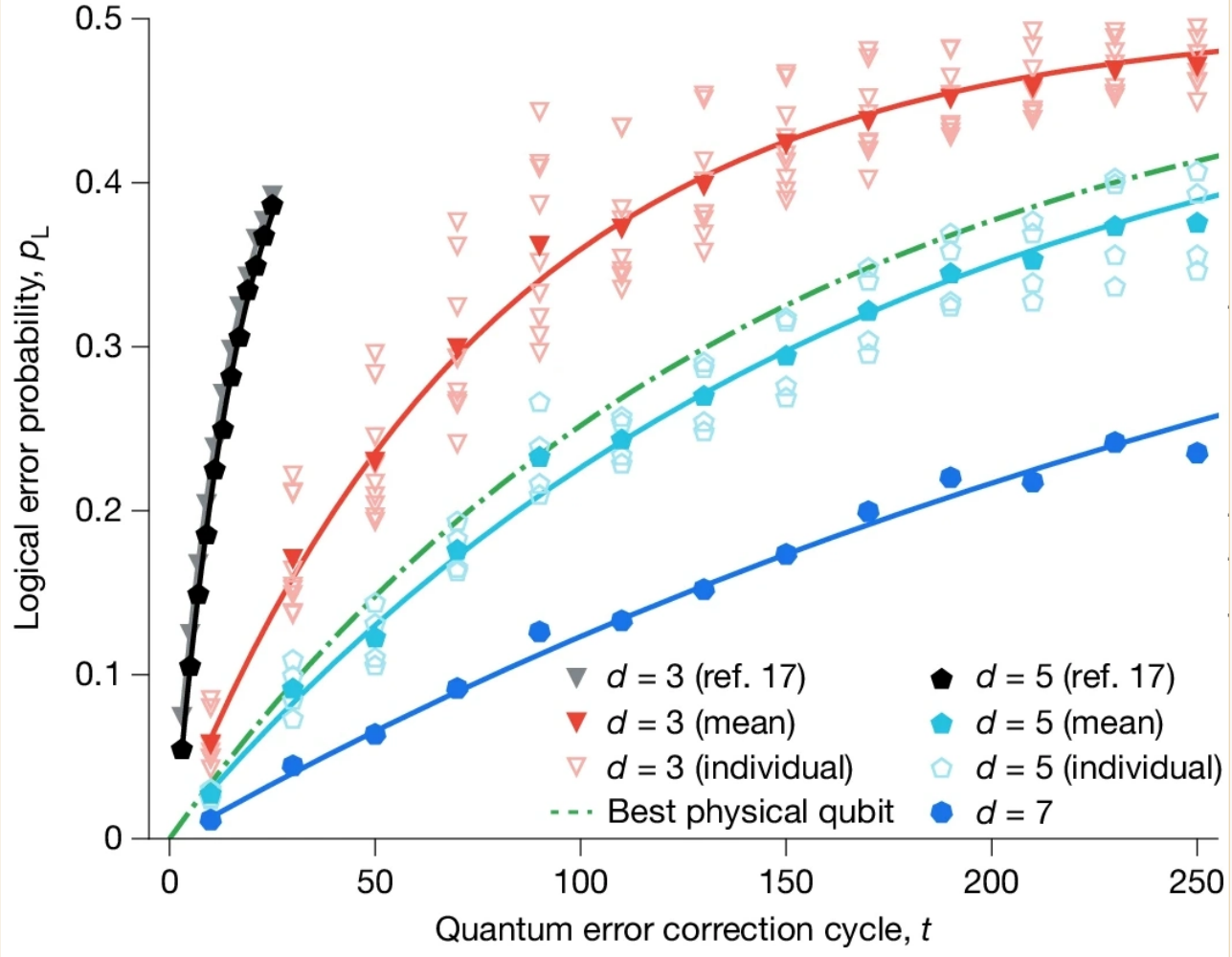
En diciembre de 2024, Google Quantum AI informó de la primera demostración clara del otro régimen. En Willow, su generación más nueva de procesadores superconductores, construyeron memorias de código de superficie con distancias 3, 5 y 7, y observaron que la tasa de error lógico *bajaba* cada vez que el código se hacía más grande: por un factor de $\Lambda = 2{,}14 \pm 0{,}02$ por cada dos pasos de distancia. La mayor, una memoria de distancia 7 con 101 qubits, mantuvo un qubit lógico con un error de $0{,}143\ \% \pm 0{,}003\ \%$ por ciclo de corrección y —el titular dentro del titular— sobrevivió *más tiempo que su mejor qubit físico*, por un factor de $2{,}4 \pm 0{,}3$. Eso se llama estar "más allá del punto de equilibrio", y es la primera vez que todo el aparato de corrección de errores se paga a sí mismo en este hardware.

Es un hito genuino, y merece precisión sobre qué tipo de hito es. Es una prueba de que la escala ahora va en la dirección correcta. No es un ordenador cuántico funcional, y el artículo no afirma serlo.

Qué significan "código de superficie", "distancia" y "por debajo del umbral"

Un **qubit lógico** es una unidad protegida de información cuántica codificada entre muchos qubits físicos. El **código de superficie** es una forma particular de hacer esa codificación en una cuadrícula 2D, donde qubits adicionales de "medición" comprueban constantemente errores sin perturbar la información almacenada. La **distancia** del código d no es una distancia física: es el número más pequeño de errores bien colocados que puede corromper el qubit lógico sin que el código lo note. Un d mayor es un parche más grande y robusto: gasta más qubits físicos (aproximadamente $2d^2 - 1$) y corrige más errores simultáneos, hasta $(d - 1)/2$. Así que los tres tamaños probados aquí, distancias 3, 5 y 7, corrigen 1, 2 y 3 errores simultáneos y gastan aproximadamente 17, 49 y 97 qubits físicos; la memoria de distancia 7 que construyó Google usó 101, un poco por encima de ese mínimo de libro.

"**Por debajo del umbral**" es la frase crucial. La corrección de errores solo ayuda si la tasa de error físico está por debajo de un valor crítico; ahí, cada aumento de distancia suprime exponencialmente la tasa de error lógico. El factor de supresión Λ mide esto: $\Lambda > 1$ significa que hacer crecer el código ayuda, y cuanto mayor es Λ, mejor. Google informa de $\Lambda \approx 2{,}14$, lo que significa que cada aumento de dos pasos en la distancia redujo aproximadamente a la mitad la tasa de error lógico. Que Λ esté cómodamente por encima de 1 es todo el resultado.



Cómo se acumula el error lógico a lo largo de los ciclos de corrección, para las memorias de distancia 3, 5 y 7 (de arriba abajo). La línea a observar es la verde discontinua: el *mejor qubit físico individual* del chip. La memoria de distancia 7 (azul, la más baja) acumula error más lentamente que esa línea, así que el qubit codificado vive más que el mejor qubit físico del que está construido: "más allá del punto de equilibrio", por un factor de 2,4×. Este es el resultado de vida útil; la propia supresión por debajo del umbral (Λ = 2,14, al crecer el código de distancia 3 a 5 y 7) está en los números del texto.

Qué hicieron los autores

- Construyeron memorias de código de superficie en dos chips Willow: un procesador de 105 qubits que ejecutó los códigos de distancia 3, 5 y 7 para la prueba de escalado (el mayor, una memoria de distancia 7 con 101 qubits y 49 qubits de datos), y un procesador de 72 qubits que ejecutó una memoria de distancia 5 con un decodificador en tiempo real y códigos de repetición de alta distancia.
- Midieron cómo cambiaba el error lógico *por ciclo* al aumentar la distancia del código de 3 a 5 y 7, extrayendo el factor de supresión Λ.
- Compararon la vida útil del qubit lógico con la del mejor qubit físico individual en el mismo chip,

para probar el "punto de equilibrio".
- Ejecutaron el código de distancia 5 con un **decodificador en tiempo real** —hardware clásico que interpreta las comprobaciones de error tan rápido como se producen— hasta un millón de ciclos, para mostrar que la corrección de errores puede seguir el ritmo de la máquina.
- Llevaron códigos de **repetición** más simples hasta distancia 29 para buscar las fuentes raras y profundas de error que fijan un suelo de rendimiento.

Qué encontraron

- **El código está por debajo del umbral.** El error lógico por ciclo cayó por $\Lambda = 2{,}14 \pm 0{,}02$ por cada aumento de dos en distancia: una supresión exponencial limpia, el comportamiento prometido por la teoría y que ningún procesador había mostrado definitivamente.
- **La memoria de distancia 7 alcanzó 0,143 % ± 0,003 % de error por ciclo**, y vivió **2,4 ± 0,3 veces más** que su mejor qubit físico: más allá del punto de equilibrio.
- **La decodificación en tiempo real siguió el ritmo.** El decodificador promedió 63 microsegundos de latencia a distancia 5 frente a un tiempo de ciclo de 1,1 microsegundos, sostenido durante un millón de ciclos: la corrección de errores corrió en vivo, no solo en análisis posterior.
- **Queda una fuente de error rara y profunda.** En las pruebas con códigos de repetición, el rendimiento quedó limitado finalmente por ráfagas de errores correlacionados que ocurren aproximadamente **una vez por hora** (una de cada 3×10^9 ciclos), fijando un suelo de error cerca de 10^{-10} cuyo origen, dicen los autores, **aún no se comprende**.

Qué no demuestra

- **No** es un ordenador cuántico haciendo computación. Es una *memoria* cuántica: almacena y protege un qubit lógico. No realiza operaciones lógicas (puertas) entre qubits lógicos y no ejecuta ningún algoritmo.
- **No** está a un qubit de máquinas útiles. Un qubit lógico de distancia 7 gasta unos 101 qubits físicos; una tasa de error por ciclo de 0,1 % sigue muy por encima de los ~10^{-6} a 10^{-10} que necesitan los algoritmos reales. Cerrar esa brecha implica ir a distancias mucho mayores —muchos más qubits físicos por qubit lógico— y los algoritmos útiles necesitan *miles* de qubits lógicos a la vez. El presupuesto de qubits físicos para eso llega a millones.
- El **"si se escala" hace trabajo real**. La conclusión del artículo es que el rendimiento del dispositivo, *si se escala*, podría cumplir los requisitos de grandes algoritmos. Mostrar que la tendencia es correcta en un qubit lógico no es lo mismo que haber construido la máquina escalada, y nada aquí garantiza que la tendencia sobreviva a tamaños mucho mayores.
- El **suelo de error inexplicado es un problema vivo**. Las ráfagas correlacionadas que limitan el rendimiento del código de repetición son, en palabras de los autores, órdenes de magnitud mayores de lo esperado y bloquearían aplicaciones tolerantes a fallos mayores hasta entenderse: una falla abierta, declarada con claridad, no un detalle resuelto.
- No dice nada sobre **romper cifrado o "supremacía cuántica" para tareas útiles**. Eso requiere

la máquina tolerante a fallos completa para la que esto es una piedra de fundación, no una demostración.

Qué tan fuerte es la evidencia

- **La afirmación central es sólida e importante.** Funcionamiento por debajo del umbral con una supresión exponencial limpia en tres distancias de código, además de una vida útil más allá del punto de equilibrio y un decodificador en tiempo real funcional, es exactamente la combinación que el campo intentaba alcanzar, y se demuestra directamente, no por inferencia. No es un artefacto de hype; es un resultado real de ingeniería de un grupo líder.
- **Los autores son cuidadosos con su alcance.** Lo encuadran como *memoria* por debajo del umbral, señalan ellos mismos el suelo de errores correlacionados inexplicado y condicionan el futuro a ese visible "si se escala". El exceso, cuando aparece, está en la cobertura que redondea "una memoria corregida por errores mejora al crecer" a "la computación cuántica ya está aquí".
- **El estado honesto es un paso fundacional, dado con limpieza.** Un qubit lógico, protegido lo bastante bien para que añadir redundancia por fin ayude, con un camino largo, difícil y aún no garantizado de escalado, puertas lógicas y errores inexplicados por delante.

Por qué importa

La computación cuántica tolerante a fallos siempre ha tenido algo de problema de huevo y gallina: las máquinas que serían útiles necesitan tasas de error que ningún qubit físico puede alcanzar, y la solución —corrección de errores— solo funciona si el hardware ya es lo bastante bueno para estar por debajo del umbral. Cruzar esa línea, aunque sea una vez, aunque sea en un solo qubit lógico, cambia la pregunta de "¿es posible?" a "¿hasta dónde puede escalarse y con qué rapidez?". Ese es un cambio real y significativo, y por eso el resultado merece atención.

Pero el mismo cuidado que hace confiable el resultado es lo que debe templar la historia que lo rodea. Es el primer ladrillo de una fundación, bien colocado. No es el edificio, y quienes lo colocaron son los primeros en decirlo. La forma correcta de seguir la computación cuántica en los próximos años es exactamente esta curva poco glamorosa: si el factor de supresión se mantiene cuando crecen los códigos, si las puertas lógicas pueden hacerse tan limpiamente como la memoria lógica y si alguna vez se explica ese misterioso error de una vez por hora.

Resumen limpio

Google Quantum AI mostró, por primera vez con claridad, que una memoria cuántica de código de superficie puede operar *por debajo del umbral*: al hacer crecer el código de distancia 3 a 5 y 7, la tasa de error lógico cayó exponencialmente (unas 2,14× por cada dos pasos), y la mayor, una memoria

de distancia 7 con 101 qubits, vivió más que su mejor qubit físico —más allá del punto de equilibrio— mientras la corrección de errores corría en tiempo real. Es un hito genuino y largamente buscado en la ingeniería de ordenadores cuánticos. También es un solo qubit lógico actuando como memoria, con una tasa de error aún lejos de lo que exigen algoritmos reales, sin operaciones lógicas realizadas, con un suelo de errores inexplicado que los autores señalan y con muchos órdenes de magnitud de escalado por delante. Un umbral cruzado, no un ordenador entregado.

Sources

Google Quantum AI and Collaborators, Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 638, 920 (2025)
https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y

Author Correction: Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 653, E5 (2026) — corrects a Fig. 3a axis label and legend keys; does not affect the below-threshold (Fig. 1) results
https://www.nature.com/articles/s41586-026-10559-8