

Luis F. García Uc, Juan Hernández Tecorralco y Romeo de Coss

# Quetzalcoatlita: mineral descubierto en México con propiedades cuánticas

México es un país con una extensa diversidad de minerales, algunos de los cuales no han sido lo suficientemente estudiados. Uno de ellos es la quetzalcoatlita, que tiene una hermosa coloración azul y forma de erizo, y fue nombrado así en honor al dios prehispánico Quetzalcóatl. Además de su belleza, poco se sabe de sus propiedades, pero su estructura cristalina y composición química podrían dar origen a exóticas y fascinantes características, las cuales harían a este mineral un interesante compuesto para novedosas aplicaciones tecnológicas.

En septiembre del año 2021 y la Mineral Cup –la cual es una competencia internacional organizada en redes sociales, como X e Instagram (Mineral Cup, 2025)– reunió 32 piedras preciosas para competir por el título del mineral del año. En esta edición, figuraban minerales muy conocidos por el público, como el grafito, el zirconio y el cuarzo, pero todos éstos serían derrotados por una piedra muy poco conocida y de origen mexicano, la quetzalcoatlita (Figura 1). Este mineral fue descubierto en 1973 en una mina cercana a Moctezuma, Sonora, México (Williams, 1973), y fue nombrado en honor del dios mexica Quetzalcóatl, en alusión a su color azul capri.

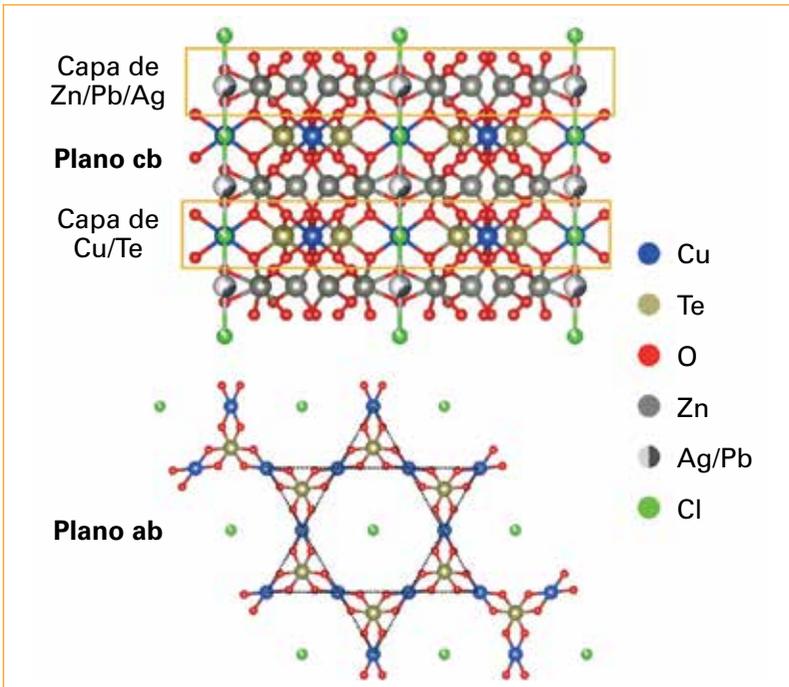
Al momento de su descubrimiento se pensó que era parte de otro mineral ya conocido en esa época, pero un análisis químico demostró que se trataba de un nuevo compuesto. La quetzalcoatlita presenta delgados filamentos unidos en una hermosa forma de erizo y, a pesar de que su apariencia está bien descrita, poco se sabe de sus propiedades, por lo que resultó ser un mineral tan bello como enigmático. No obstante, de los estudios que existen a la fecha podemos inferir algunas de sus fascinantes propiedades.





**Figura 1.** Quetzalcoatlita encontrada en la mina Blue Bell, California, EUA. Fuente: Hudson Institute of Mineralogy (2022) / Daniel J. Evanich.

■ **Estructura cristalina y composición química:**  
 ■ **combinación de cobre, telurio y otros elementos**  
 ■ Entre todos los aspectos visibles de la quetzalcoatlita resalta el color, un precioso azul que se puede



**Figura 2.** Estructura de la quetzalcoatlita desde una vista lateral (arriba) donde se aprecian las capas que contienen a las redes de Kagomé separadas por las capas de Zn; y una vista superior (abajo) donde se puede observar la formación de la red de Kagomé en la capa.

comparar con el color del agua de ciertas playas del Caribe mexicano, el cual se debe a la mezcla de los diferentes elementos presentes en su composición química. Los elementos que conforman la quetzalcoatlita son: plomo, telurio, zinc, metales nobles como cobre y plata, así como hidrógeno, oxígeno y cloro. De tal manera que la fórmula general es  $Zn_6Cu_3(TeO_3)_2O_6(OH)_6AgPbCl$  (Burns y cols., 2000).

Las propiedades de un material están determinadas en parte por cómo están ordenados sus átomos, es decir, por cómo se encuentran distribuidos en el espacio. El ordenamiento de la quetzalcoatlita es algo peculiar (véase la **Figura 2**), ya que está conformada de capas de cobre en una red de Kagomé perfecta, la cual es una red conformada de triángulos que comparten el vértice (véase la **Figura 3**).

En la quetzalcoatlita los átomos de cobre (Cu) se encuentran colocados en los vértices de una “estrella de David”, en cuyo centro se encuentra posicionado un átomo de cloro (Cl). Además, en la parte interna de cada triángulo de la estrella se encuentra un átomo de telurio (Te), lo que crea una estructura hexagonal secundaria. Todo esto no sería posible sin los átomos de oxígeno (O) que unen a los átomos metálicos. No hay que olvidar a la plata (Ag) y el plomo (Pb), cuyas presencias dentro del mineral se identificaron hasta el año 2000, cuando Burns y cols. reportaron que en la quetzalcoatlita había una mezcla de estos dos elementos.

Ahora bien, todo esto lo sabemos gracias a los estudios con difracción de rayos X, técnica que permite determinar las posiciones de los átomos en un material donde sus átomos están ordenados de manera regular y periódica, a la cual llamamos estructura cristalina. Pero aún queda un misterio por resolver sobre su estructura, ya que la técnica de difracción de rayos X presenta limitaciones para identificar la posición de átomos muy ligeros, como el hidrógeno, razón por la cual a la fecha no hay reportes que indiquen el lugar exacto de estos átomos en la estructura cristalina de la quetzalcoatlita.

Finalmente, las capas que contienen a las redes de Kagomé no interactúan directamente, ya que están separadas por capas de átomos de zinc (Zn), lo que favorece un carácter casi bidimensional.

### Candidato potencial a líquido de espín cuántico

A pesar de haber sido descubierta hace casi 50 años, solamente se ha determinado de manera parcial la forma en que sus átomos están arreglados, por lo que aún se desconoce mucho sobre este mineral, de modo que queda un nicho de oportunidades de donde podrían surgir novedosas investigaciones. La red de Kagomé que forman los átomos de Cu en este mineral es una de las características más interesantes que podría relacionarse con un estado magnético especial llamado líquido de espín cuántico (QSL, por sus siglas en inglés).

Un QSL es usualmente definido como un estado de la materia en el que los momentos magnéticos de los átomos —que podemos imaginar como pequeños imanes atómicos— no se alinean en un patrón fijo, ni siquiera a una temperatura de cero kelvin o  $-273^{\circ}\text{C}$ . Desde el punto de vista termodinámico, el QSL no es tan diferente del estado paramagnético, estado en el que los pequeños imanes atómicos están desordenados (véase la Figura 4 superior izquierda) como resultado del incremento de la temperatura. La diferencia es que en un QSL los imanes atómicos no se organizan en un solo patrón, ya que existe una combinación de muchas posibles configuraciones diferentes que cambian constantemente, debido a efectos cuánticos. En otras palabras, el estado de menor energía no tiene un solo ordenamiento magnético, sino una superposición de muchas formas posibles que suceden al mismo tiempo. Para ver la conexión que hay entre la quetzalcoatlita y los QSL es necesario visualizar el magnetismo que podrían generar los átomos de Cu en la red de Kagomé.

Los pequeños imanes atómicos suelen representarse con flechas que pueden girar y apuntar en cualquier dirección. En la quetzalcoatlita, cada átomo de Cu tiene su propia flecha, lo que significa que en cada vértice de la estrella de David podemos ubicar una flecha en distintas direcciones y sentidos. Además, el momento magnético que se asocia al Cu es pequeño y presenta fluctuaciones cuánticas fuertes; es decir, se necesitará muy poca energía para hacerlos rotar, lo que genera diferentes estados magnéticos. La primera distribución de estas flechas sería un estado donde todas las flechas apuntan en

### Recuadro 1. Red de Kagomé

El término *Kagomé* proviene de los vocablos japoneses *kago*: canasta de bambú y *me*: patrón. Éste es un modelo muy popular para el tejido de canastas (Figura 3) y está compuesto por triángulos que comparten vértices, con lo que se crea una especie de estrella con un centro hexagonal. Esta estrella suele llamarse “estrella o escudo de David” en el judaísmo.

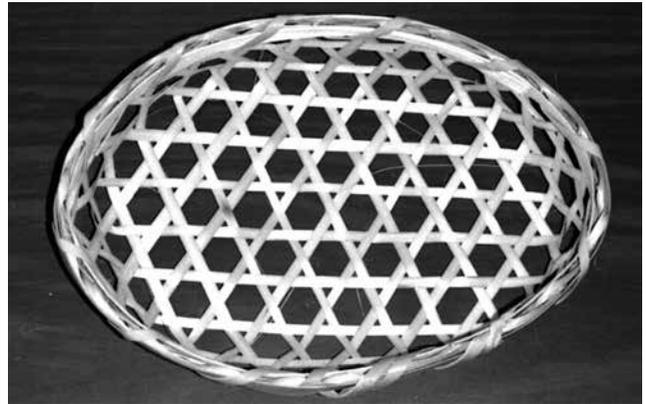


Figura 3. Red de Kagomé tejida en una canasta de bambú. Fuente: *Physics Today*, 2023.

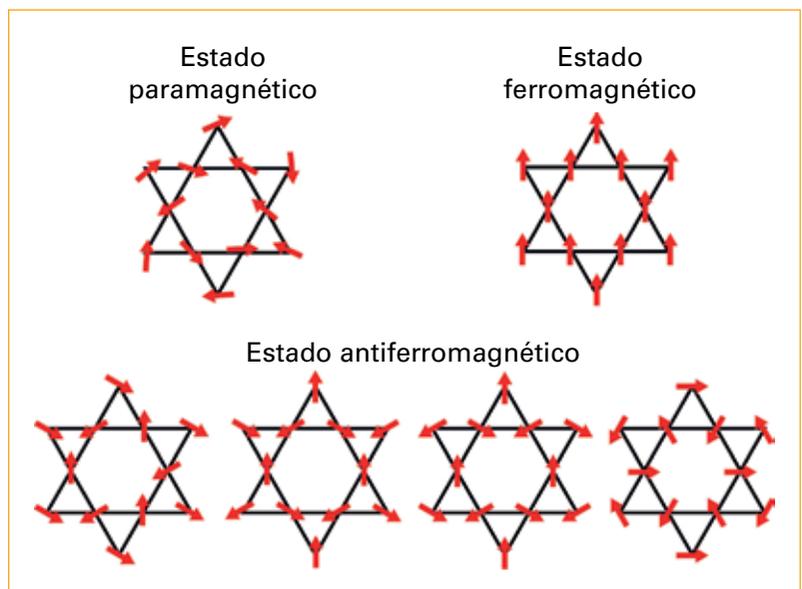
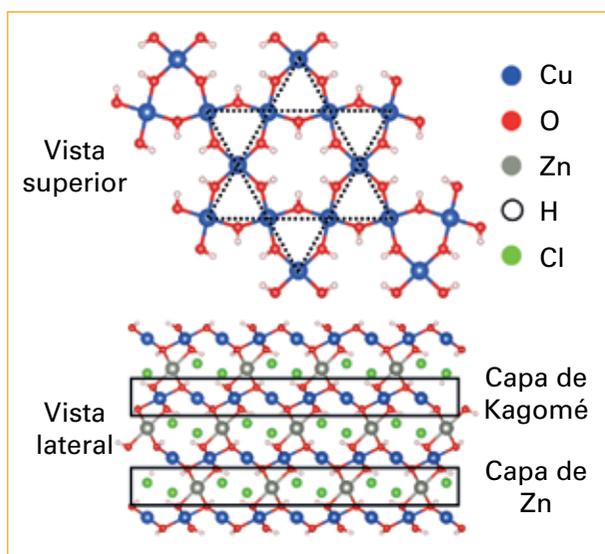


Figura 4. Posibles estados magnéticos en la estrella de David.

direcciones aleatorias, lo cual corresponde a un paramagneto (Figura 4, superior izquierda). En el otro extremo está el estado ferromagnético, en el que todas las flechas apuntan en una misma dirección y sentido, lo que genera un momento magnético neto diferente de cero (Figura 4, superior derecha).

Finalmente, tendríamos el estado antiferromagnético, en el que el momento magnético neto es cero; pero existen múltiples configuraciones posibles que podríamos tomar en cuenta, como se ve en la Figura 4 (abajo). Se ha dicho en la literatura que en una red de Kagomé con orden antiferromagnético, todas las configuraciones posibles tienen la misma energía, es decir, ninguna es más estable que otra. Esto ocasiona que sea difícil definir un único estado base o de menor energía, debido a que cada uno tiene la misma probabilidad de existir. Esto da origen a una gran variedad de estados exóticos y fenómenos de naturaleza cuántica. De tal manera que, si en un sistema cristalino existen diferentes configuraciones donde ninguna es más probable de existir sobre otra, entonces podría originarse una superposición de todas las configuraciones antiferromagnéticas posibles y, por ende, presentar un estado de QSL. Un ejemplo de esto es el caso de la herbertsmithita (Pustogow y cols., 2017).



**Figura 5.** Estructura de la herbertsmithita desde una vista superior (arriba), donde se aprecian las capas que contienen a las redes de Kagomé; y lateral (abajo) donde se observa la separación de las capas que contienen a las redes de Kagomé por capas de Zn.

La herbertsmithita (Figura 5) es un potencial candidato para presentar un comportamiento de QSL, donde su estructura se parece mucho a la de la quetzalcoatlita: capas que contienen redes de Kagomé de átomos de Cu separadas por capas de átomos de Zn. A través del análisis de la susceptibilidad magnética —es decir, observando qué tanto puede magnetizarse un material en un campo magnético externo—, se vio que mientras aumentamos la cantidad de Zn y disminuimos la cantidad de Cu en el mineral, podemos pasar de un estado con carácter ferromagnético a otro donde aparentemente no se tiene un orden magnético. Esto ha sugerido la existencia de un comportamiento de QSL en la herbertsmithita.

■ **Un largo camino por recorrer**

La comunidad científica ha propuesto que los líquidos de espín cuántico podrían ser útiles para el desarrollo de tecnologías cuánticas (Unesco, 2025), de tal suerte que éste es uno de los principales intereses en el estudio de este tipo de compuestos. La quetzalcoatlita presenta características que podría conferirle un carácter de QSL, por lo que sería factible considerarla como un posible candidato a presentar este exótico estado de la materia. Sin embargo, queda un largo camino por recorrer en el estudio de sus propiedades magnéticas, así como en el desarrollo de experimentos novedosos que ayuden a “ver” el estado de QSL. Para la quetzalcoatlita aún es pronto para concluir que es un material cuántico, pero algo queda claro: la corona de la Mineral Cup 2021 la ganó con honores.

■ **Luis F. García Uc**

Departamento de Física Aplicada, Cinvestav-IPN, Unidad Mérida. [luisf.garcia@cinvestav.mx](mailto:luisf.garcia@cinvestav.mx)

■ **Juan Hernández Tecorralco**

Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México. [juanht@fisica.unam.mx](mailto:juanht@fisica.unam.mx)

■ **Romeo de Coss**

Departamento de Física Aplicada, Cinvestav-IPN, Unidad Mérida. [romeo.decoss@cinvestav.mx](mailto:romeo.decoss@cinvestav.mx)

### Lecturas recomendadas

Dumé, I. (2021), “Promising quantum spin liquid candidate may fall short”, *PhysicsWorld*. Disponible en: <https://physicsworld.com/a/promising-quantum-spin-liquid-candidate-may-fall-short/>, consultado el 4 de abril de 2025.

Hudson Institute of Mineralogy (2022), “Quetzalcoatlite”, *Mindat.org*. Disponible en: <https://www.mindat.org/min-3343.html>, consultado el 4 de abril de 2025.

### Referencias específicas

Burns, P., J. Pluth, J. Smith, P. Eng, I. Steele *et al.* (2000), “A new octahedral-tetrahedral structure from a  $2 \times 2 \times 40 \mu\text{m}^3$  crystal at the Advanced Photon Source-GSE-CARS Facility”, *American Mineralogist*, 85(3-4): 604-607. Disponible en: [DOI:10.2138/am-2000-0424](https://doi.org/10.2138/am-2000-0424), consultado el 4 de abril de 2025.

Norman, M. R. (2018), “Copper Tellurium Oxides – A Playground for Magnetism”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 452:507-511. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.006>, consultado el 4 de abril de 2025.

Mineral Cup (2025), *Mineralcup.org* [en línea]. Disponible en: <https://www.mineralcup.org/>, consultado el 4 de abril de 2025.

Unesco (2025), *International Year of Quantum Science and Technology (IYQ)* [en línea]. Disponible en: <https://quantum2025.org/>, consultado el 4 de abril de 2025.

Pustogow, A., Y. Li, I. Voloshenko, P. Puphal, C. Krellner *et al.* (2017), “Nature of optical excitations in the frustrated kagome compound Herbertsmithite”, *Physical Review B*, 96(24). Disponible en: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.241114>, consultado el 4 de abril de 2025.

Williams, S. (1973), “Quetzalcoatlite,  $\text{Cu}_4\text{Zn}_8(\text{TeO}_3)_5(\text{OH})_{18}$ , a new mineral from Moctezuma, Sonora”, *Mineralogical Magazine*, 39(303):261-263. Disponible en: [https://rruff.geo.arizona.edu/doclib/MinMag/Volume\\_39/39-303-261.pdf](https://rruff.geo.arizona.edu/doclib/MinMag/Volume_39/39-303-261.pdf), consultado el 4 de abril de 2025.