

Z = 16, azufre, S

Yahvé hizo llover azufre y fuego sobre Sodoma y Gomorra (Génesis 19, 24)

CE: [Ne] 3s²3p⁴; PAE: 32,065; PF: 112,8 °C (ortorrómbico), 119,0 °C (monoclínico); PE: 444,6 °C; densidad: 2,06 g/cm³ (ortorrómbico), 1,96 g/cm³ (monoclínico); χ (Pauling): 2,58; EO: -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6; isótopos más estables: ³²S, ³³S, ³⁴S, ³⁶S; sin fecha de descubrimiento, fue reconocido como un elemento en 1777 (Lavoisier, Francia).^[1]

El azufre es uno de los elementos conocidos desde la antigüedad. Su nombre deriva del latín *sulphurium*. Los egipcios lo usaban para la purificación de los templos, mientras griegos y romanos le atribuían propiedades medicinales. En la Edad Media se vinculó a Satanás con el azufre por suponer que los volcanes eran las entradas a los infiernos subterráneos. Es uno de los elementos que ocupó un papel principal en la alquimia.

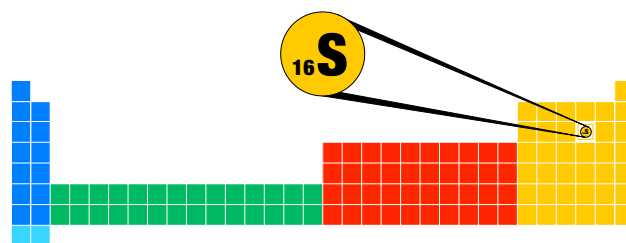
El azufre se encuentra en forma nativa en regiones volcánicas como depósitos, en aguas termales y en yacimientos subterráneos. Es un sólido amarillo, inodoro, quebradizo, insoluble en agua y soluble en disulfuro de carbono.^[1] Combinado aparece en forma de sulfuro (pirita, calcopirita, galena y blenda) y de sulfato (yeso y barita). Tanto el carbón, como el petróleo y el gas natural contienen diferentes compuestos de azufre, especialmente en forma de tiofenos. Si nos atenemos a su abundancia (0,05 %) el azufre ocupa el noveno lugar entre los elementos en la corteza terrestre. Está presente en dos aminoácidos esenciales (metionina y cisteína). La formación de enlaces S-S, como sucede en la conversión de cisteína en cistina, produce el entrecruzamiento de cadenas de proteínas.

La obtención industrial del azufre se basaba en la recogida del azufre nativo en zonas volcánicas (Figura 1) y en el proceso Frasch que usaba la inyección de vapor de agua sobrecalentado para fundir el azufre de yacimientos subterráneos y bombearlo posteriormente a la superficie. El azufre así obtenido es de elevada pureza (99 %). Hoy en día el refinado del petróleo y gas natural son las fuentes más habituales para la obtención industrial del azufre. Aproximadamente el 85 % de la producción de azufre se destina a la fabricación de ácido sulfúrico con una producción mundial de 145 Mt. EE. UU., China, Canadá, y Arabia Saudí lideran la producción de azufre en el siglo XXI.^[2]

Se conocen modificaciones alotrópicas del azufre debido tanto a las diferentes formas de unirse los átomos de azufre



Figura 1. Minería a cielo abierto de azufre en el cráter del volcán Kawah Ijen, Java Oriental, Indonesia



para formar moléculas discretas como al diferente empaquetamiento entre moléculas poliatómicas de azufre. A temperatura ambiente es estable la llamada forma α (azufre ortorrómbico) que por calentamiento da lugar a la forma β (azufre monoclínico). Ambos alotropos están formados por moléculas S₈. Se han descrito otras formas alotrópicas como S₁₂, S₆ y S₂. El azufre es el mejor aislante eléctrico conocido presentando una resistividad, ρ , de 2·10²³ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$.

La química del azufre es muy variada de acuerdo al elevado número de estados de oxidación que puede presentar. El sulfuro de hidrógeno y los sulfuros de metales y de no metales son los compuestos inorgánicos más representativos del estado de oxidación -2. Los tioles y tioéteres son los representantes orgánicos de este estado de oxidación, presentando frecuentemente un olor repulsivo muy característico como el 3-metil-1-butanotiol excretado por la mofeta rayada. El dióxido de azufre, una de cuyas fuentes son las erupciones volcánicas y que es responsable de la lluvia ácida, los sulfitos y bisulfitos son los representantes del estado +4, mientras que el trióxido de azufre, los sulfatos y peroxosulfatos pertenecen al estado +6 de oxidación. Existen compuestos de azufre poco frecuentes con estados de oxidación -1, +1, +3 y +5.

El azufre elemental se emplea para el vulcanizado del caucho y fabricación de neumáticos, para la obtención de pólvora negra y en artificios pirotécnicos. La obtención de monocapas autoensambladas, de enorme importancia para aplicaciones de nanotecnología, se basa en la facilidad de formación de enlaces metal-SH cuando se ponen en contacto tioles con superficies de oro.^[3]

Como paradoja podemos citar que mientras el azufre se encuentra en la estructura de numerosos compuestos con aplicaciones médicas beneficiosas como las sulfonamidas, primeros antimicrobianos, las penicilinas, vitaminas como la tiamina y la biotina y sustancias como el ácido lipoico, también está presente en moléculas de elevadísima toxicidad. Así, el azufre forma parte de moléculas como la yperita o mostaza de azufre (sulfuro de dicloroetileno), un agresivo de guerra química con propiedades vesicantes usado en la Primera Guerra Mundial y también se encuentra en el VX, uno de los agentes de guerra química más tóxicos que se conocen.^[4]

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, 99.^a ed., Nueva York, 2018.
- [2] Sulfur, Encyclopaedia Britannica, [bit.ly/2nxclvJ](https://www.britannica.com/entry/sulfur), visitada el 28/01/2019.
- [3] T. Rauchfuss, Under sulfur's spell, *Nature Chem.*, **2011**, *3*, 648–648.
- [4] Convención de armas químicas: Tratado multilateral establecido en 1997 que prohíbe usar las armas químicas y obliga a destruir las almacenadas, <https://www.opcw.org>, visitada el 28/01/2019.

ROBERTO MARTÍNEZ ÁLVAREZ
Departamento de Química Orgánica, Facultad de Ciencias
Químicas, UCM, 28040 Madrid.
rma@ucm.es