

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2025,
Volumen 9, Número 5.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5

TRANSFORMACIÓN DEL ZNS DURANTE EL PROCESO DE TOSTACIÓN. UN ANÁLISIS TERMODINÁMICO

**TRANSFORMATION OF ZNS DURING THE ROASTING
PROCESS. A THERMODYNAMIC ANALYSIS**

Florentino Estrada Gómez

Met-Mex Peñoles, México

Francisco Raul Carrillo Pedroza

Universidad Autónoma de Coahuila, México

Aurelio Hernandez Ramirez

Instituto Politécnico Nacional, México

Ma. de Jesus Soria Aguilar

Universidad Autónoma de Coahuila, México

Transformación del ZnS durante el Proceso de Tostación. Un Análisis Termodinámico

Florentino Estrada Gómez ¹

florentino_estrada@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-7519-226X>

Met-Mex Peñoles

México

Francisco Raul Carrillo Pedroza

raul.carrillo@uadec.com.mx

<https://orcid.org/0000-0002-0413-0676>

Facultad de Metalurgia

Universidad Autónoma de Coahuila

México

Aurelio Hernandez Ramirez

ahernandezr@ipn.mx

<https://orcid.org/0000-0002-1901-618X>

Escuela Superior de Ingeniería Química e

Industrias Extractivas

Instituto Politécnico Nacional

México

Ma. de Jesus Soria Aguilar

ma.soria@uadec.com.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3910-7772>

Facultad de Metalurgia

Universidad Autónoma de Coahuila

México

RESUMEN

El proceso de Tostación – Lixiviación - Electrobtcención o RLE (por sus siglas en inglés) es el más utilizado para la obtención de zinc a partir de sus sulfuros. La tostación, como primera etapa extractiva, juega un papel importante en la calidad del producto (calcina) que se obtiene, y que depende de la materia prima (concentrado de sulfuros de zinc, ZnS). En este artículo se abordan las reacciones químicas del proceso de tostación y se analizan la termodinámica de este y el efecto de las diferentes especies minerales en la calidad de la calcina. A través del seguimiento de la tostación de diferentes concentrados, los resultados muestran la interdependencia entre los contenidos de dichas especies con las especies resultantes, resaltando el impacto de los minerales de hierro, el cual, dependiendo de la especie, afecta considerablemente el producto y, en consecuencia, la siguiente etapa de extracción.

Palabras clave: zinc, esfalerita, tostacion

¹ Autor principal

Correspondencia: raul.carrillo@uadec.com.mx

Transformation of ZnS During the Roasting Process. A Thermodynamic Analysis

ABSTRACT

The roasting-leaching-electrowinning (RLE) process is the most used method for obtaining zinc from its sulfides. Roasting, as the first stage of extraction, plays an important role in the quality of the product (calcine) obtained, which depends on the raw material (zinc sulfide concentrate, ZnS). This article discusses the chemical reactions involved in the roasting process and analyzes its thermodynamics and the effect of different mineral species on the quality of the calcine. By monitoring the roasting of different concentrates, the results indicate that there is interdependence between the contents of these species and the resulting species, highlighting the impact of iron minerals, which, depending on the species, significantly affect the product and, consequently, the next stage of extraction.

Keywords: zinc, sphalerite, roasting

*Artículo recibido 24 septiembre 2025
Aceptado para publicación: 29 octubre 2025*



INTRODUCCIÓN

El zinc es un metal que se presenta en la naturaleza en minerales como calamina, smithsonita y esfalerita, de los cuales este último es el más común; alrededor del 90% del zinc primario producido a nivel mundial proviene de concentrados de este mineral. El 80% del zinc producido a nivel global es obtenido a través de un proceso electrolítico y el resto por procesos pirometalúrgicos (Hellgren et al., 2024; Cifuentes et al., 2014; Kania y Saternus, 2002). Debido al alto contenido de azufre en los concentrados de zinc no es posible realizar una extracción directa, por lo tanto, es necesario oxidar el sulfuro contenido en el mineral para obtener compuestos que sean fácilmente lixiviables en medio acuoso; este proceso es comúnmente conocido como el proceso de tostación (Leiva et al., 2022; Wang et al., 2022; Qin et al., 2020).

El proceso de tostación consiste en una reacción química a atmósfera controlada y temperaturas por debajo del punto de fusión del material a procesar y sus productos reaccionados, por lo que este tipo de operación es factible para realizar reacciones de oxidación, reducción, sulfatación y clorinación. Para el caso de los concentrados de zinc, la reacción que se lleva a cabo es una oxidación la cual implica distintas etapas, como secado, calcinación, descomposición térmica y sulfatación a una temperatura promedio de 950°C (Bai et al. 2024; Tang et al., 2021).

En los próximos años la calidad de los concentrados de zinc disponibles será menor debido al incremento en el contenido impurezas, así como la variación en la composición mineralógica y a la disminución del tamaño de partícula. El incremento en el contenido de otros elementos menores y compuestos en la materia prima como el plomo (0.5 – 1.5 %), cobre (0.3 – 1.0%) y sílice (3.0 – 4.5%) tienen un impacto significativo debido a que forman especies mineralógicas con bajos puntos de fusión, los cuales pueden provocar el colapso del lecho fluidizado, por lo que será necesario determinar el comportamiento de éstas para minimizar su efecto durante el procesamiento de este tipo de materia prima (Zhu et al. 2023; Ke et al., 2008).

En este sentido, conocer los fundamentos del proceso de tostación permite determinar el efecto de las condiciones de operación y características fisicoquímicas a las cuales es posible procesar concentrados con altos contenidos de plomo, cobre y sílice manteniendo la continuidad operativa a escala industrial.



Con ello, se puede evitar la formación de compuestos con bajo punto de fusión y por ende impedir la sinterización del lecho fluidizado en el proceso de tostación mediante el ajuste de la composición química y mineralógica de las mixturas de concentrado de zinc a tratar (Ke et al., 2018).

Las especies mineralógicas predominantes en los concentrados de zinc, son la esfalerita (ZnS), pirrotita (FeS) y pirita (FeS₂). Dependiendo del contenido de estos compuestos, el proceso de tostación puede presentar variaciones significativas. En la Tabla 1 se presenta un ejemplo de la distribución mineralógica de un concentrado de zinc típico, además de las cantidades de SO₂(g) generado y el oxígeno requerido para las reacciones que se llevan a cabo en la etapa de tostación (Pankka et al., 2023; Zhang et al., 2022).

Tabla 1. Tratamiento de una tonelada de concentrado de zinc

Concentrado		Tostación			
Compuesto	Contenido (kg)	Compuesto	Contenido (kg)	SO ₂ producido	Oxígeno requerido (kg)
ZnS	13.8	ZnS	13.8		
ZnS	714.2	ZnO	596.9	469	352
ZnS	32	ZnSO ₄	53		21
PbS	23	PbSO ₄	29.3		6.3
FeS	74	Fe ₂ O ₃	67.3	53.9	47.2
FeS ₂	70.5	Fe ₂ O ₃	46.9	75.3	51.8
CuS	7.5	CuO	6.3	5	1.9
Otros	65	Otros	65		
Total	1000		878.5	603.2	480.2

El cobre está presente en los concentrados de zinc como covelita (CuS), calcocita (Cu₂S) y calcopirita (CuFeS₂). El cobre forma compuestos con el hierro con bajos puntos de fusión, lo cual implica que incremente la aglomeración del material debido a la formación de compuestos que forman fases líquidas a un rango de 800 – 900 °C. En el caso de la sílice (o cuarzo), por lo general se encuentra libre en los concentrados y reacciona principalmente con los óxidos de zinc y plomo formando silicatos, los cuales tienen un mayor efecto que los compuestos generados con cobre en el grado de aglomeración del material en suspensión en el lecho fluidizado (Shishin et al., 2023; Degterov et al., 2000).

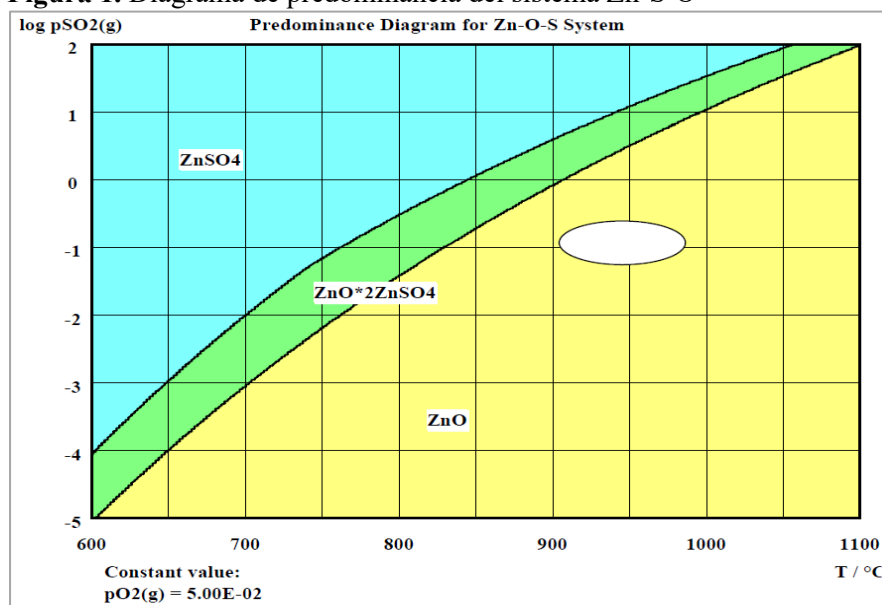
De acuerdo con lo anterior, se puede resumir que, en el proceso de tostación, la presencia de elementos menores como el plomo, cobre y sílice tienen un impacto significativo; en los próximos años la calidad de los concentrados de zinc disponibles será menor debido al incremento en el contenido impurezas, por lo que será necesario determinar el comportamiento de éstas para minimizar su efecto durante el procesamiento de este tipo de materia prima.

Termodinámica de la tostación

En esta sección se expone un análisis termodinámico basado en diagramas de predominancia, usando el software HSC 6.1 (Roine, 2022), para los principales elementos que contribuyen a la aglomeración del lecho fluidizado.

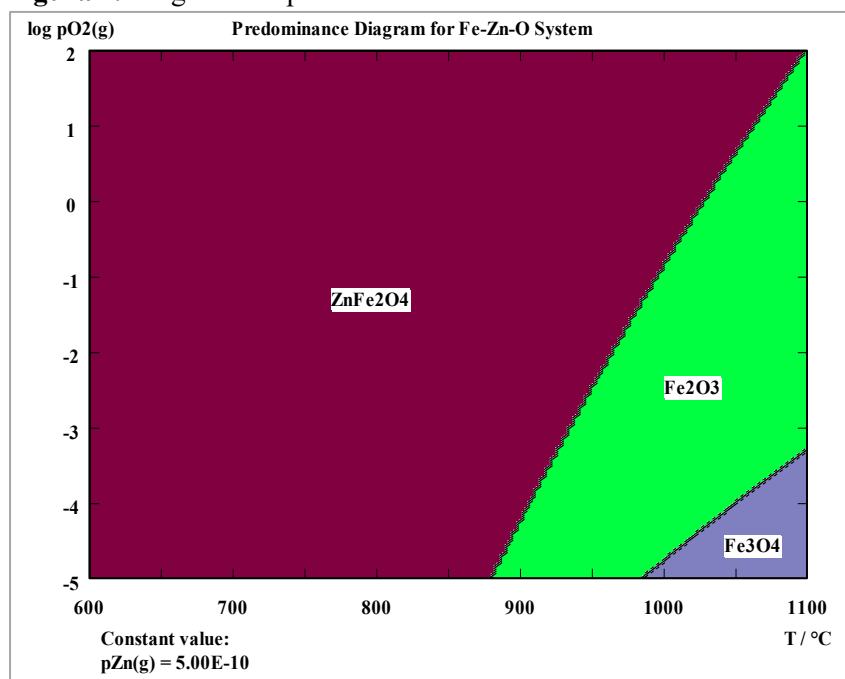
Zinc. El zinc es el elemento predominante en forma de esfalerita, cuya reacción de oxidación es muy exotérmica y pueden mantener altas temperaturas de combustión como es el caso de los tostadores a escala industrial. El equilibrio de las reacciones es controlado por las presiones parciales del oxígeno y del dióxido de azufre, en la Figura 1 se presenta el diagrama de predominancia de para el sistema Zn-S-O en función de la presión parcial de SO_2 y la temperatura. En este diagrama se señala la sección, como un círculo blanco, a la presión y temperatura que representan las condiciones de operación de proceso, se observa cuales compuestos son factibles de formarse en función de la temperatura, por lo que se puede concluir que temperaturas menores a 820°C aproximadamente favorecen a la formación de sulfato de zinc.

Figura 1. Diagrama de predominancia del sistema Zn-S-O



Hierro. Es el segundo elemento con mayor contenido en los concentrados de zinc, este elemento presenta dos estados de oxidación (Fe^{2+} y Fe^{3+}), existiendo una amplia variedad de compuestos asociados a este metal. La wurzita, especie mineral de esfalerita con contenido de hierro (Fe, Zn)S es uno de los compuestos más abundantes en los concentrados de zinc. Se ha demostrado experimentalmente que la difusión de gas en una oxidación controlada se puede presentar un compuesto de Fe, S y O en estado líquido a 920°C , es por esto por lo que se ha asociado el contenido de hierro en el concentrado al grado de aglomeración de la calcina obtenida (Zhu et al., 2023). La mayoría del hierro contenido en los concentrados se oxida formando Fe_2O_3 el cual reacciona con el óxido de zinc para formar ferritas, esta reacción se ve favorecida por altas temperaturas en el proceso de tostación, así como de altos tiempos de residencia. Generalmente alrededor del 90% del hierro contenido se convertirá en ferrita de zinc a temperaturas superiores a 900°C , tal como se muestra en la zona de interés de la Figura 2.

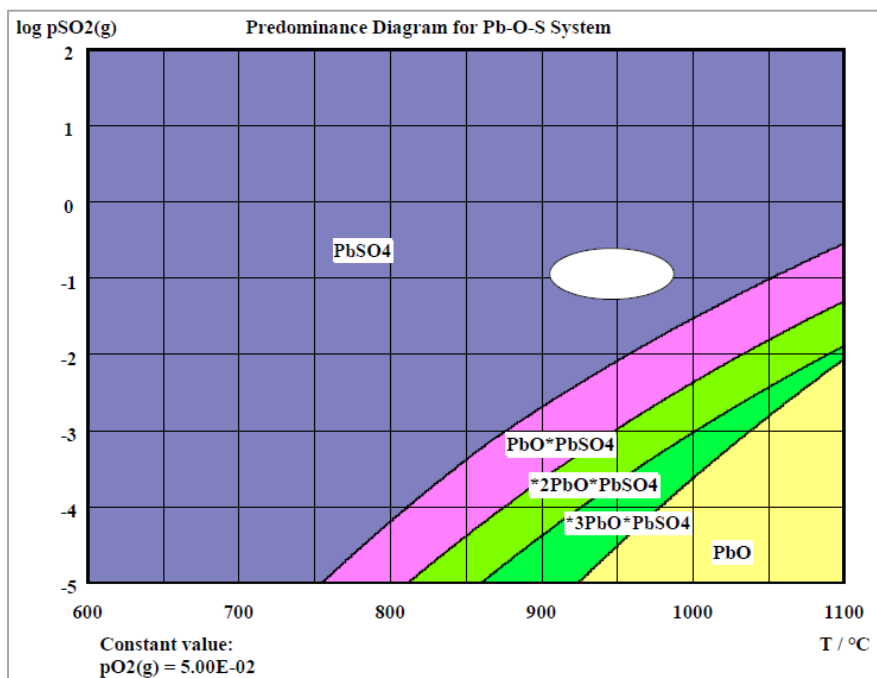
Figura 1. Diagrama de predominancia del sistema Fe-Zn-O



Plomo. El sistema Pb-S-O es un sistema complejo donde existen diferentes especies mineralógicas; el sulfato de plomo puede formar muchos compuestos intermedios con óxido de plomo y sulfatos básicos. Las condiciones de proceso a escala industrial se señalan en el diagrama de la Figura 3, mostrando que el compuesto que se forma bajo estas condiciones es el sulfato de plomo.

Al comparar los diagramas de predominancia de zinc y plomo, se observa que las áreas de estabilidad del sulfato de plomo son menores. Además, para este sistema no pueden coexistir en el gas el sulfato y óxido de plomo en equilibrio (Ke et al., 2018).

Figura 32. Diagrama de predominancia del sistema Pb-S-O

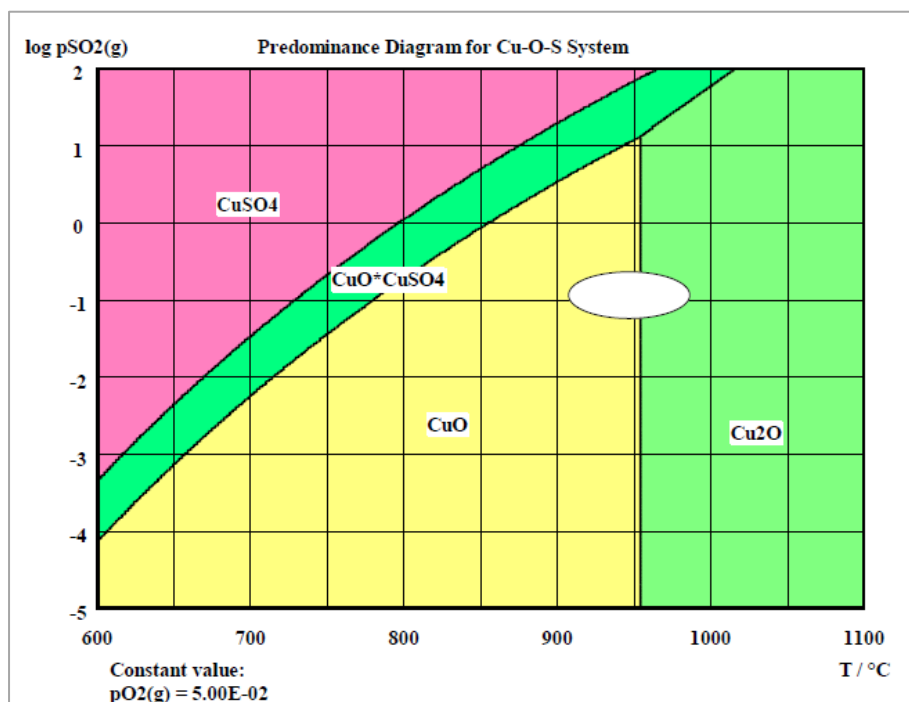


Adicionalmente se observa que se forman distintos tipos de óxidos-sulfatos, dependiendo principalmente de la presión parcial de oxígeno; el óxido de plomo solo se presenta a temperaturas mayores de 920°C y bajas presión de O₂. Y es un compuesto de gran relevancia en el grado de aglomeración de lecho fluidizado, ya que produce varios compuestos con bajo punto de fusión. Arriba de 975°C los sulfatos de plomo son reemplazados por una fase líquida constituida por óxido de plomo y sulfatos (Zhang et al. 2022).

Cobre. El sistema Cu-S-O al igual que el hierro y el plomo, es un sistema complejo. En el diagrama de predominancia de la Figura 4 se observa que para las condiciones típicas de operación del proceso de tostación, los compuestos que se pueden formar son CuO o Cu₂O. Al igual que para los otros elementos, la formación de sulfatos se ve favorecida por bajas temperaturas y altas presiones parciales de SO₂. La principal razón por la cual este sistema es tan complejo se debe principalmente a los otros elementos a los cuales está asociado el cobre en los concentrados de zinc, un ejemplo de este compuesto es la calcopirita.

El mecanismo por el cual se forma la fase líquida y los principales compuestos que la constituyen no están claramente identificados; sin embargo, el sulfato de cobre se ha identificado en aglomerados de calcina (Wang et al., 2022). Existe la posibilidad de la presencia de un ternario eutéctico entre el Cu_2S , Cu_2O y CuSO_4 alrededor de los 400°C (Klyushnikov et al., 2023; Kim et al., 2010).

Figura 3. Diagrama de predominancia del sistema Cu-S-O [10]



METODOLOGÍA

Con el objetivo de identificar, corroborar y determinar las reacciones principales que se presentan en la tostación, y el efecto de los elementos arriba señalados, presentes en los concentrados en diversas especies mineralógicas, se diseñó una serie de pruebas a escala laboratorio a diferentes temperaturas (300 , 500 , 700 , 800 , 900 , 950 y 1000°C). Estas pruebas se realizaron en una mufla marca Carbolite, modelo CWF-1300. El intervalo de temperaturas estudiado se determinó con base a un estudio previo de análisis termogravimétrico, y al análisis termodinámico. Se evaluaron distintas muestras (8 concentrados diferentes, identificados como C1 a C8), las cuales fueron analizadas en cada etapa o temperatura de tratamiento dado, para identificar las especies mineralógicas y determinar su cuantificación; para ello se empleó el análisis modal, usando un MLA (Mineral Liberation Analyzer) adaptado a un MEB (Microscopio Electrónico de Barrido).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se ha mencionado, la calidad de los concentrados de zinc depende del contenido impurezas, su composición mineralógica y el tamaño de partícula, teniendo un fuerte impacto durante el proceso de tostación, siendo necesario determinar y predecir el efecto de dichos parámetros durante su procesamiento térmico. En este sentido, conocer los fundamentos del proceso de tostación permite determinar el efecto de las condiciones de operación y características fisicoquímicas a las cuales es posible procesar concentrados con altos contenidos de plomo, cobre y sílice manteniendo la continuidad operativa a escala industrial. Con ello, se puede evitar la formación de compuestos con bajo punto de fusión y por ende impedir la sinterización del lecho fluidizado en el proceso de tostación mediante el ajuste de la composición química y mineralógica de las mixturas de concentrado de zinc a tratar.

En la Tabla 2 se presentan las materias primas (diferentes concentrados de zinc) y su composición mineralógica. Cada una de ellas se sometió al proceso de tostación, con la finalidad de dar seguimiento a la transformación de la especie de interés, la esfalerita, o sulfuro de zinc.

Tabla 2. Distribución de las especies mineralógicas en los diferentes concentrados.

Especie	Formula	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Esfalerita	(Fe,Zn)S	88.4	93.4	82.2	82.1	85.8	93.8	86.7	96.3
Zincita	ZnO	0.06	0.03	0.02	0	0.09	0.01	0.03	0
Franklinita	Fe ₂ ZnO ₄	0.01	0.25	0.03	0	1.33	0	0	0
Willemita	Zn ₂ SiO ₄	0.01	0.01	0	0	0	0.02	0.01	0
Galena	PbS	1.13	1.4	1.67	0.96	0.69	0.25	0.3	0.51
Pirita	FeS ₂	1.89	1.91	1.38	2.67	9.06	1.57	0.45	0.15
Pirrotita	Fe _(1-x) S	0.13	0.36	4.22	0.09	0.27	0.3	3.82	0.04
Calcopirita	CuFeS ₂	0.13	0.09	3.5	2.16	0.17	0.8	0.62	1.92
Cuarzo	SiO ₂	3.71	0.71	1.06	7.66	0.12	0.02	0.23	0.01

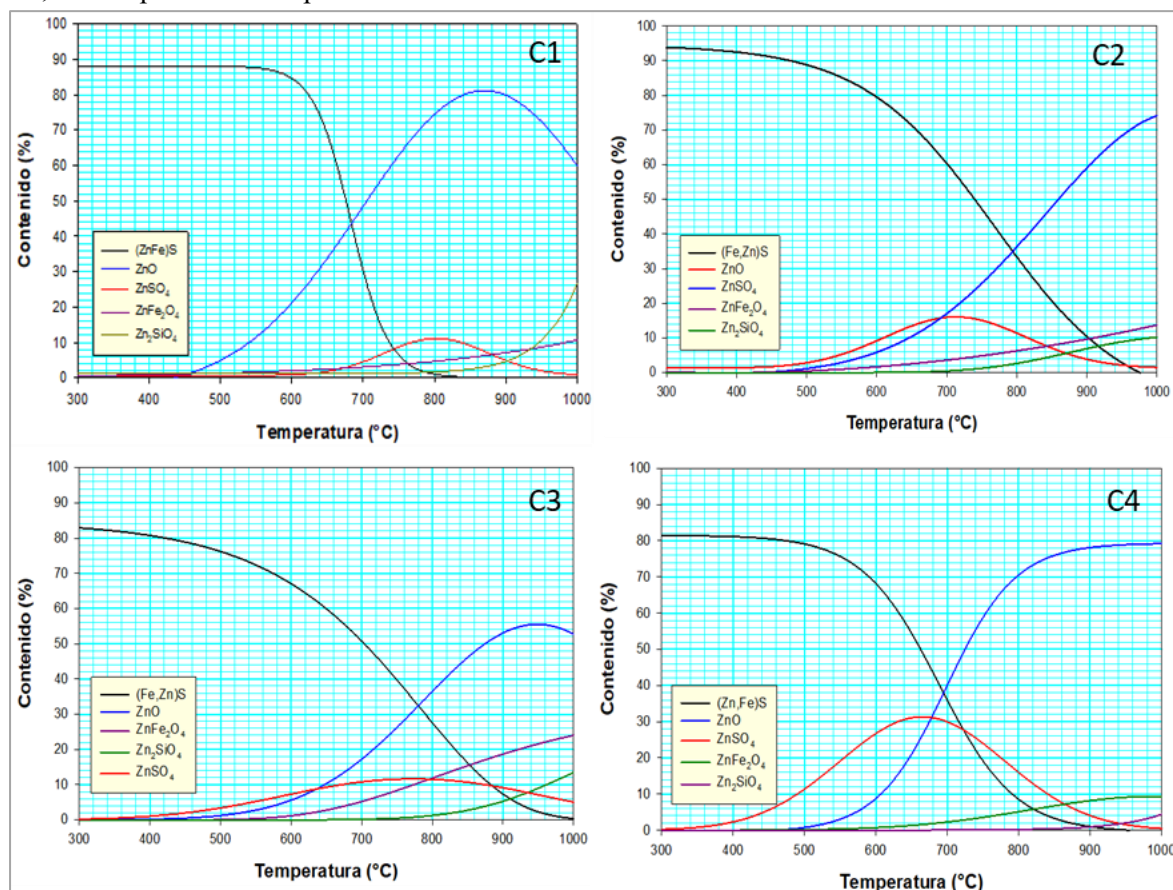
A continuación, se presentan los resultados de las tostaciones realizadas a cada uno de los concentrados.

En la Figura 5 se presenta la gráfica de las especies mineralógicas asociadas al zinc contenidas en el sólido en el rango de temperaturas estudiado para los concentrados C1 al C4. Primero, se observa que, en todas las figuras, el ZnS se descompone en función de la presencia de los demás componentes. En la Figura 5 C1 y 5 C4, el contenido de (Zn,Fe)S es prácticamente constante hasta los 600 y 500 °C,



respectivamente; sin embargo, para Figura 5 C2 y Figura 5 C3, el (ZnFe)S va disminuyendo progresivamente desde los 300 °C; esto puede asociarse al contenido de pirrotita (véase Tabla 2), el cual es mayor en estos dos últimos concentrados (C2 y C3).

Figura 5. Comportamiento de la concentración de las especies mineralógicas de los concentrados C1 al C4, con respecto a la temperatura de tostación.

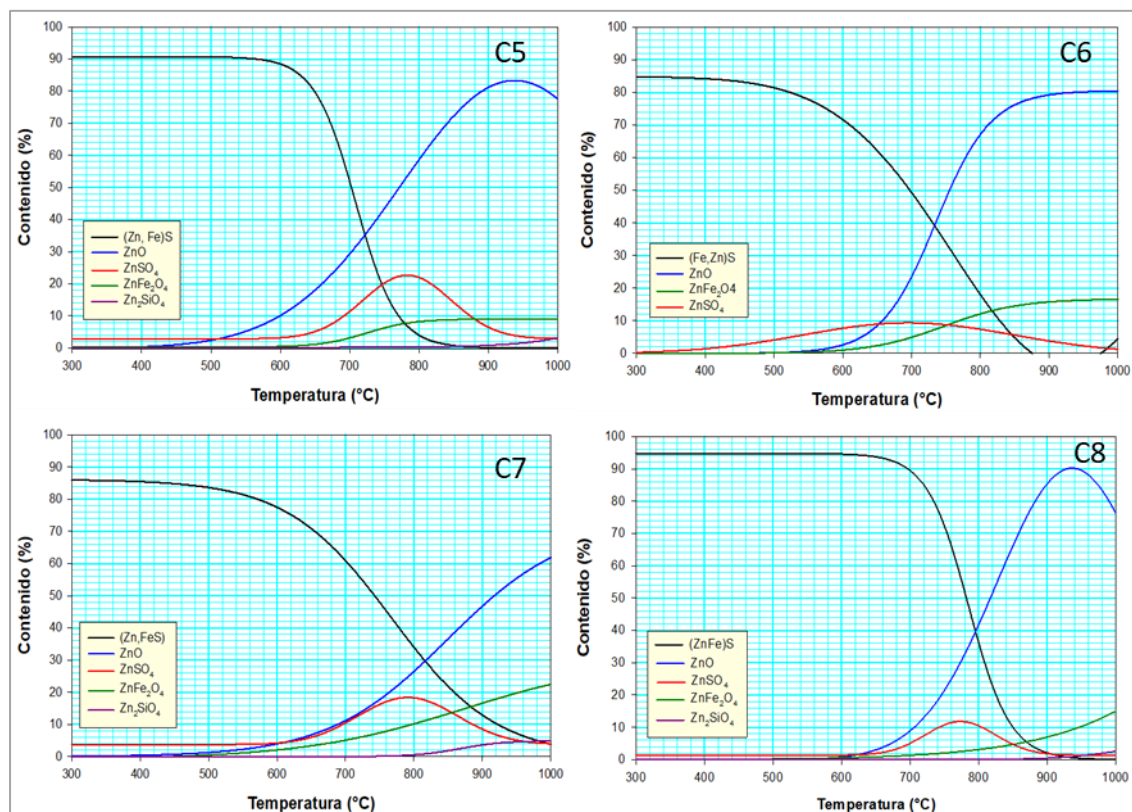


También es importante observar que, al disminuir el sulfuro, aumenta el óxido, ZnO, y que este puede mantenerse o disminuir, dependiendo si reacciona con el Fe (del Fe₂O₃ o del hierro proveniente de la descomposición de la pirrotita; al haber mayor presencia de hierro, el ZnO reacciona con el para producir la ferrita de zinc. Es interesante notar que, para el caso C4, que tiene mayor contenido de cuarzo, se forma el silicato de zinc, pero este se descompone para nuevamente obtener el óxido de zinc. En la Figura 6 se presentan las gráficas correspondientes a los concentrados C5 al C8. De manera general, se confirman las observaciones mencionadas en la figura 6, donde la mayor cantidad de óxido, ZnO, contenido en el material calcinado presenta el máximo valor en un rango de 700 a 800°C, y que a partir de los 900°C disminuye en diferentes proporciones.

A partir de los 900°C, la cantidad de zinc asociado al hierro como ferritas de zinc se incrementa de acuerdo con el contenido de hierro en el concentrado, por lo que, para concentrados con altos contenidos de hierro, principalmente en forma de pirrotita, más que en forma de pirita o calcopirita, producen ferritas de zinc, alcanzando contenidos de hasta un 20%. Por otra parte, para concentrados con bajo contenido de hierro, el contenido de ferrita en el producto final es menor al 10%.

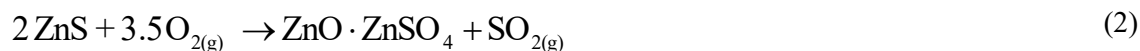
De manera similar a las ferritas de zinc, la formación de silicatos se incrementa a altas temperaturas, dependiendo la cantidad contenida en el concentrado inicial, por lo que, para concentrados con bajos contenidos de cuarzo, no se presenta la curva correspondiente al silicato de zinc, o no se forma una cantidad significativa de este compuesto.

Figura 4. Comportamiento de la concentración de las especies mineralógicas de los concentrados C5 al C8, con respecto a la temperatura de tostación.

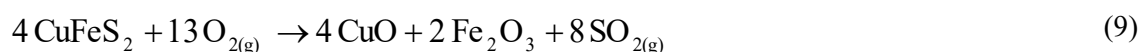


De acuerdo con los resultados obtenidos en la etapa de experimentación a nivel laboratorio, a continuación, se presentan las reacciones principales de los elementos con mayor contenido en la materia prima, en el rango de temperatura estudiado.

A partir de 300 a 500°C:



Mientras que a partir de los 500 a 800°C se empiezan a formar óxidos de otros metales:



A partir de los 800°C, estos óxidos reaccionan entre sí, generando compuestos como silicatos y ferritas de zinc:



CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis de los fundamentos termodinámicos del efecto del hierro, plomo, cobre y sílice durante el proceso de tostación de concentrados de zinc en lecho fluidizado, se concluye lo siguiente:



El plomo se encuentra presente en los concentrados de zinc como galena (PbS). A porcentajes de sulfuro de plomo menores al 2%, la especie predominante al equilibrio, bajo las condiciones de tostación, será el sulfato de plomo; pero si el porcentaje de galena es mayor al 2%, se forma óxido de plomo.

El cobre está presente en los concentrados de zinc como covelita (CuS), calcocita (Cu₂S) y calcopirita (CuFeS₂); este elemento forma compuestos con el hierro con bajos puntos de fusión. Para porcentajes mayores al 3% de cobre, este no se oxida debido a un incremento de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación de las especies mineralógicas presentes en el concentrado, por lo que sería necesario incrementar la cantidad de oxígeno alimentado al tostador para poder realizar esta operación.

La sílice se encuentra libre en los concentrados y reacciona principalmente con los óxidos de zinc y plomo formando silicatos. La cantidad de silicatos de zinc presentes al equilibrio se ven afectadas por la formación de óxido de plomo debido a la formación de una fase líquida (escoria) con alto contenido de sílice.

El contenido de óxido de zinc generado durante la tostación es el que se ve más afectado por la presencia de pirrotita y sílice en la materia prima, ya que, al haber mayor presencia de estas especies, coadyuvan a la formación de ferritas de zinc y silicatos de zinc, respectivamente.

Este hecho tiene repercusiones importantes en el procesamiento posterior de la calcina, donde este compuesto es tratado por lixiviación ácida para disolver el zinc; la especie más soluble en dicho medio es el ZnO, mientras que las ferritas y los silicatos de zinc necesitan condiciones más severas para su disolución, en cuanto a acidez, temperatura y tiempo, elevando el costo del proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bai, Y., Yang, S., Yang, S., & Wang, H. (2024). CFD study of roasting hydrodynamics in fluidized bed roaster of zinc sulfide concentrate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(48), 21078–21088. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c03196>
- Boyanov, B., Peltekov, A., & Petkova, V. (2014). Thermal behavior of zinc sulfide concentrates with different iron content at oxidative roasting. *Thermochimica Acta*, 586, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.04.005>



- Cifuentes, G., Bustos, P., Hernández, J., & Guajardo, N. (2014). Zinc electrowinning using reactive electro dialysis (RED). *Journal of the Chilean Chemical Society*, 59*(2), 2490–2493.
<https://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072014000200020>
- Degterov, S., Dessureault, Y., & Pelton, A. (2000). Thermodynamic modeling of zinc distribution among matte, slag and liquid copper. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 39(1), 43–54.
<https://doi.org/10.1179/cmqr.2000.39.1.43>
- Hellgren, S., Engström, F., & Sundqvist Öqvist, L. (2024). The characterization of residues related to the roasting–leaching–electrowinning zinc production route for further metal extraction. *Metals*, 14 (1), 73. <https://doi.org/10.3390/met14010073>
- Kania, H., & Saternus, M. (2003). Evaluation and current state of primary and secondary zinc production – A review. *Applied Sciences*, 13 (3). <https://doi.org/10.3390/app13032003>
- Ke, Y., Ping, N., Xue, K., Min, X., Chai, L., Pan, Q., & Liang, Y. (2018). Sulfidation behavior and mechanism of zinc silicate roasted with pyrite. *Applied Surface Science*, 435 (30), 1011–1019.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.202>
- Kim, B., Jeong, S., Kim, Y., & Kim, H. (2010). Oxidative roasting of low grade zinc sulfide concentrate from Gagok Mine in Korea. *Materials Transactions*, 51 (8), 1481–1485.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.M2010045>
- Klyushnikov, A., Pikalov, S., & Gulyaeva, R. (2023). Kinetics of solid-state oxidation of iron, copper and zinc sulfide mixture. **Chimica Techno Acta*, 10 (2), 10202.
<https://doi.org/10.15826/chimtech.2023.10.2.02>
- Leiva, C., Gálvez, M., Fuentes, G., Acuña, C., & Alcota, J. (2022). Effects of various precipitants on iron removal from a zinc concentrate pressure leaching solution. *Minerals*, 12 (1), 84.
<https://doi.org/10.3390/min12010084>
- Pankka, I., Salminen, J., & Taskinen, P. (2023). Thermodynamic modeling of elemental distributions of trace elements in non-ferrous iron residue hydrogen reduction. *JOM*, 75, 2026–2033.
<https://doi.org/10.1007/s11837-022-05653-x>
- Qin, S., Jiang, K., Wang, H., Zhang, B., Wang, Y., & Zhang, X. (2020). Research on behavior of iron in the zinc sulfide pressure leaching process. *Minerals*, 10 (3), 224.



<https://doi.org/10.3390/min10030224>

- Roine, A. (2022). Outokumpu HSC Chemistry for Windows: Chemical reaction and equilibrium software with extensive thermochemical database (Version 5.0) [User's Guide]. Outokumpu Research Oy. <https://www.metso.com/portfolio/hsc-chemistry/>
- Shishin, D., Chen, J., Hidayat, T., & Jak, E. (2019). Thermodynamic modelling of the Pb-As and Cu-Pb-As systems supported by experimental study. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 40, 758–767. <https://doi.org/10.1007/s11669-019-00764-6>
- Tang, K., Tan, R., & Chen, Y. (2021). Numerical simulation of single-phase flow in zinc fluidized bed furnace. In *Proceedings Volume 11928, International Conference on Image Processing and Intelligent Control (IPIC 2021)*, Lanzhou, China. <https://doi.org/10.1117/12.2611296>
- Wang, Y., Jiang, K., & Ma, H. (2022). The behavior of zinc and iron in neutralized residue during pressure leaching. **Mining, Metallurgy & Exploration*, 39, 847–854. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00561-9>
- Zhang, B., Zhang, T., & Dou, Z. (2022). A thermodynamic and experimental assessment of the recovery of copper, iron, zinc, and lead from copper slag. *Minerals*, 12 (5), 496. <https://doi.org/10.3390/min12050496>
- Zhu, H., Shang, Y., & Du, J. (2023). A fuzzy control method based on rule extraction for zinc leaching process of zinc hydrometallurgy. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 40, 1321–1331. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00771-9>

