

USO DEL ÓXIDO Y DEL HIDRÓXIDO DE ERBIO, ASÍ COMO DE OTROS COMPUESTOS DE ESTE METAL, EN LAS ENSEÑANZAS MEDIAS

Autor: Martínez-Troya, D.¹

RESUMEN

En este artículo se explora la utilidad pedagógica de usar óxido e hidróxido de erbio en las prácticas de laboratorio de las Enseñanzas Medias. A partir de la disolución del metal en estado elemental se obtiene el hidróxido, el sulfato, el oxalato y el carbonato de Er^{+3} y se descompone térmicamente el oxalato hasta obtener el óxido de erbio. Además se sintetizan el sulfuro de erbio a partir del catión Er^{+3} y el cloruro de erbio a partir del óxido del metal.

Palabras clave: Óxido de erbio; Hidróxido de erbio; Carbonato de erbio; Oxalato de erbio; Sulfuro de erbio; Sulfato de erbio; Cloruro de erbio.

ABSTRACT

In this paper I study the pedagogic advantages of using erbium oxide and erbium hydroxide in laboratory practices in Middle School. After solving the metal in acid or water, I accomplish the formations of erbium hydroxide, sulfate, oxalate and carbonate, and the erbium oxide by thermal decomposition of the oxalate. In addition, I synthesize erbium sulfide from an Er^{+3} solution and erbium chloride out of the oxide.

Key words: Erbium oxide; Erbium hydroxide; Erbium carbonate; Erbium oxalate; Erbium sulfide; Erbium sulfate; Erbium chloride.

INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

El erbio es el primero de los lantánidos que he decidido utilizar en la serie de artículos dedicados a la síntesis de óxidos e hidróxidos de los metales de los grupos d y f. El mero uso de una «tierra rara» resulta atractivo para el químico, con independencia del objetivo final del trabajo de laboratorio. El concepto erróneo de que los lantánidos son metales tan raros como escasos hace que no se utilicen en las habituales prácticas de laboratorio que llevamos a cabo en los institutos, hasta el punto de quedar aislados en esas dos filas, bajo la tabla periódica, a modo de elementos inútiles o pintorescos. La realidad es que el tulio, el más escaso de los lantánidos si excluimos al prometio (sintético), es más abundante que el yodo. De la misma manera, el cerio es cinco veces más abundante que el plomo, por lo que no podemos considerar que los lantánidos sean particularmente escasos². En este sentido, la mera inclusión de algún lantánido en las prácticas de laboratorio de los centros de enseñanza, favorece el conocimiento de este grupo de elementos tradicionalmente olvidados. Hasta tal punto los lantánidos quedan fuera de todo aprendizaje químico, que a lo largo de mi licenciatura de Química, jamás

¹ Daniel Martínez Troya vaergael@gmail.com

² Greenwood, N.N., Earnshaw, A. (1990). Chemistry of the Elements. Oxford, Gran Bretaña: Pergamon Press, p. 1425.

utilicé ninguno de ellos en alguna práctica. Ni siquiera son habituales en los ejercicios de formulación y nomenclatura, donde de vez en cuando aparecen como elementos extraños, hasta el punto de que un alumno no distingue entre un elemento habitual de la corteza, como es el cerio, y por ejemplo el protactinio, un actínido radiactivo y por tanto fuera de nuestro interés. Como ejemplo lamentable del ostracismo de estos elementos, tengo que reconocer que a la hora de apuntar en el diario de laboratorio los pasos que iba dando en la obtención de estos compuestos, he tenido que rectificar varias veces las fórmulas, porque me equivocaba al escribir Er, pues no salía de forma natural el símbolo del metal, y acababa escribiendo el del estaño, o peor aún, el del escandio (que tampoco es muy habitual).

Al margen de la abundancia de los lantánidos, hay que resaltar una baja toxicidad³, en el sentido de que los compuestos del erbio no parecen tener una peligrosidad que vaya más allá del inherente a la manipulación de compuestos químicos más o menos puros, a pesar de ser un metal pesado. No obstante, hacen falta estudios sistemáticos que corroboren esto (con todos los lantánidos), dado que hasta ahora no se han llevado a cabo a gran escala, aunque a causa del mayor uso de ellos su extracción en China es rentable, lo que ha provocado una mayor exposición de parte de la población a estos metales, por lo que comienzan a llevarse a cabo estudios donde se observa una toxicidad que hay que considerar⁴.

DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

En este trabajo comenzaré disolviendo el erbio en disoluciones de ácido nítrico y ácido sulfúrico, cuyos procesos de oxidación del metal son visualmente muy diferentes. A partir de la disolución de erbio en ácido nítrico, donde encontramos el catión Er^{+3} de color rosa, pasará a obtener el carbonato, el hidróxido y el oxalato correspondiente tras la adición en exceso de Na_2CO_3 , NaOH y $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$. En estos procesos se obtienen respectivamente $\text{Er}_2(\text{CO}_3)_3$, $\text{Er}(\text{OH})_3$ y $\text{Er}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ que son de colores rosa pálido, tan parecidos entre sí que son prácticamente indistinguibles. En este sentido, no merece la pena llevar a cabo todos estos ensayos en el laboratorio con el alumnado, pero el precipitado de oxalato de erbio se produce de forma instantánea y es un compuesto muy definido, bastante diferente al carbonato y al hidróxido, mucho más gelatinosos y con gran cantidad de agua atrapada, que tarda mucho en evaporarse si no queremos filtrar el precipitado a través de un Büchner.

Como experiencia verdaderamente atractiva llevaré a cabo la disolución del erbio en agua caliente, lo que nos da una idea bastante clara de la relativa semejanza que tienen estos lantánidos con los alcalinos y alcalinotérreos. El erbio comienza pronto a oxidarse pasando a Er^{+3} mientras que el H^+ del agua pasa a H_2 gaseoso. La reacción es rápida y muy vistosa, de gran interés pedagógico para el alumnado, porque tenemos un

³ Haley, T. J. (1965). Pharmacology and Toxicology of the Rare Earth Elements. J. Pharm. Sc, 54, p. 663. Cf. Emsley, J. (2003). Nature's building blocks: an A-A guide to the elements. Oxford, Gran Bretaña: Oxford University Press, p. 136.

⁴ Xia Q, Liu H X, Yang X D, et al. (2012). The Neural Toxicity of Lanthanides: An Update and Interpretations. Sci. China Chem., 42, 9, p. 1308.

metal estable, que se oxida de forma rápida en contacto con el agua. Esta reacción acaba produciendo $\text{Er}(\text{OH})_3$ en forma de capa que queda flotando en la parte superior del tubo de ensayo. Merece la pena trabajar con el erbio simplemente para ver esta reacción, que apenas si se produce al llevarla a cabo en agua fría.

A partir de la disolución ácida del Er^{+3} obtendré, trabajando en la campana, el Er_2S_3 de color pardo amarillento. Igualmente, por descomposición térmica del oxalato de erbio, haré el óxido de erbio, que emplearé posteriormente en la síntesis del ErCl_3 .

A pesar de que en mis artículos suelo analizar la utilidad de los hidróxidos y los óxidos de los metales en las enseñanzas medias y me ciño por tanto a acuocomplejos, hidróxidos y óxidos, me ha parecido interesante ampliar un poco los compuestos objetivo, considerando que es un metal poco conocido por el alumnado. Supongo que haré otro tanto con el resto de lantánidos.

La valencia habitual del erbio en todos estos compuestos es +3, que es la única valencia estable del metal, por lo que no es necesario remarcar su estado de oxidación. No obstante, es habitual que se escriba en el sistema de formulación Stock, por ejemplo óxido de erbio (III), en los suministros de empresas tan importantes como Sigma-Aldrich⁵.

Entre los lantánidos, la información acerca del erbio y de sus compuestos, es poco habitual, siendo habitual tratarlos a todos en conjunto al tener unas características físico-químicas muy parecidas.

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD

A) EL METAL ERBIO

El erbio es un metal que presenta un color gris plateado cuando está en forma masiva, mientras que en estado purulento tiene un color gris oscuro⁶. Para apreciar su brillante superficie hay que raspar con una lima, pero lentamente se recubre de una pátina blancuzca formada por Er_2O_3 que hace que pierda su aspecto metálico en ambientes húmedos, como veremos en las imágenes. El erbio que he utilizado como material de partida lo adquirí en el mercado chino y tiene, según afirma el vendedor, un 99,9% de pureza. Su aspecto es granuloso y hay pocas superficies que mantengan el brillo metálico esperado.



⁵ <https://www.sigmaaldrich.com/ES/es/product/aldrich/203238> (Recuperado el 16/12/2023)

⁶ Patnaik, P. (2003). Handbook of Inorganic Chemicals, McGraw-Hill, edición PDF, p. 293.

Cuando se lima su superficie para obtener un poco de polvo del metal se aprecia su lustre de color plateado y muy brillante.



Sin embargo, el metal recién raspado es de un color gris bastante más oscuro, que es bastante estable a pesar de que la bibliografía indica que es pirofórico y que puede arder al aire. Al someterlo a la temperatura de la llama de butano no he apreciado la formación de Er_2O_3 de color rosado, que se hubiera diferenciado con facilidad en el color gris del erbio de partida.



No obstante, al someter el metal erbio a diferentes tratamientos, entre ellos el calentamiento a la llama de butano, se aprecia la aparición de recubrimientos blancuzcos de Er_2O_3 .



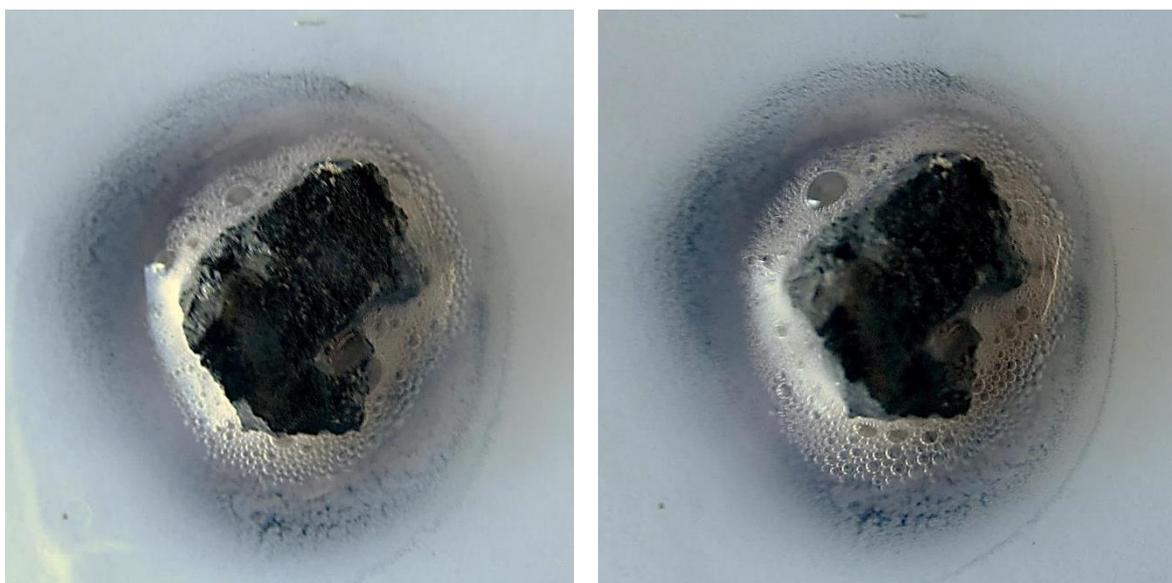
B) DISOLUCIÓN DEL ERBIO EN ÁCIDO NÍTRICO

El erbio se oxida rápidamente en una disolución concentrada de ácido nítrico en agua destilada, que es la que he utilizado para preparar la disolución base a partir de la que he obtenido el resto de compuestos. El burbujeo comienza desde el momento en el que el erbio toca la disolución ácida (en torno al 30% en volumen), produciéndose la emisión del típico NO_2 de color marrón, a la par que se forma una espuma de color rosado que revela la presencia del catión Er^{+3} . El catión trivalente del erbio tiene un color rosa pálido tanto en el acuocomplejo⁷ como en las sales en las que participa⁸. A pesar de que lo describo como «rosa pálido», se aprecia perfectamente, y es mucho más intenso del que yo veía en el $[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+2}$ que incluso me costaba bastante captarlo con la cámara.

La reacción química de oxidación del erbio en ácido nítrico es:

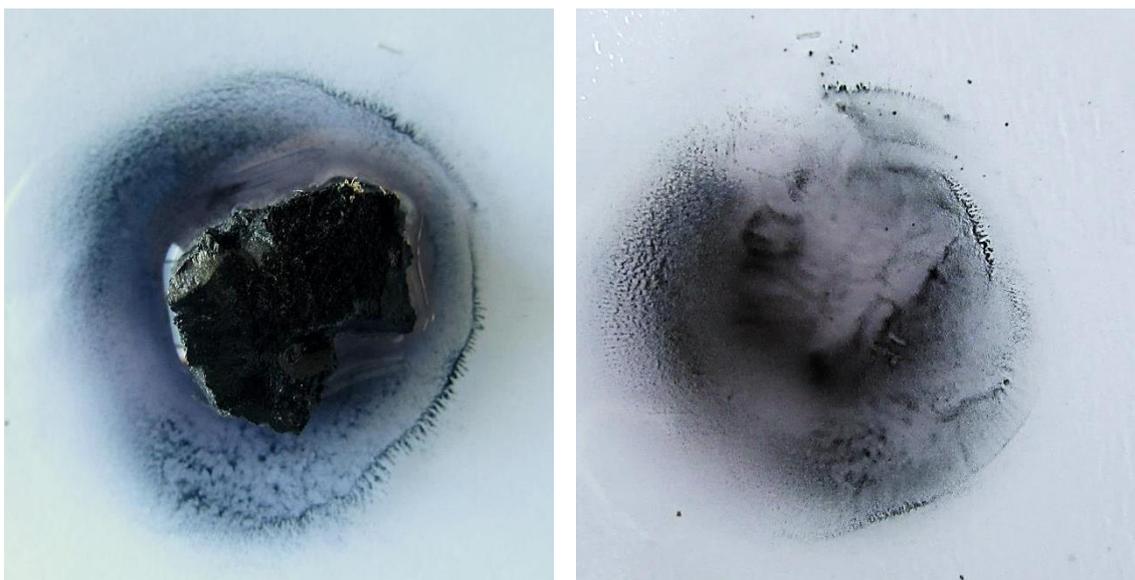


La disolución del erbio con el HNO_3 produce un polvo oscuro que ensucia la espuma que aparece con el burbujeo, pero que acaba en el fondo del tubo de ensayo por gravedad, por lo que debe de tratarse de Er en polvo desprendido del metal. Esto es algo que ocurre con el ácido sulfúrico en menor medida, ya que posee un poder oxidante mucho menor por lo que la disolución del erbio es más lenta y ordenada, y transcurre sin que se desmorone el trozo de erbio. Podemos ver con gran detalle esto que comento cuando colocamos el metal en un vidrio de reloj con un poco de disolución de nítrico. El burbujeo es muy evidente así como la aparición de un polvo gris oscuro, con un tono quizás azulado, en se aprecia perfectamente y que no parece reaccionar con el ácido.



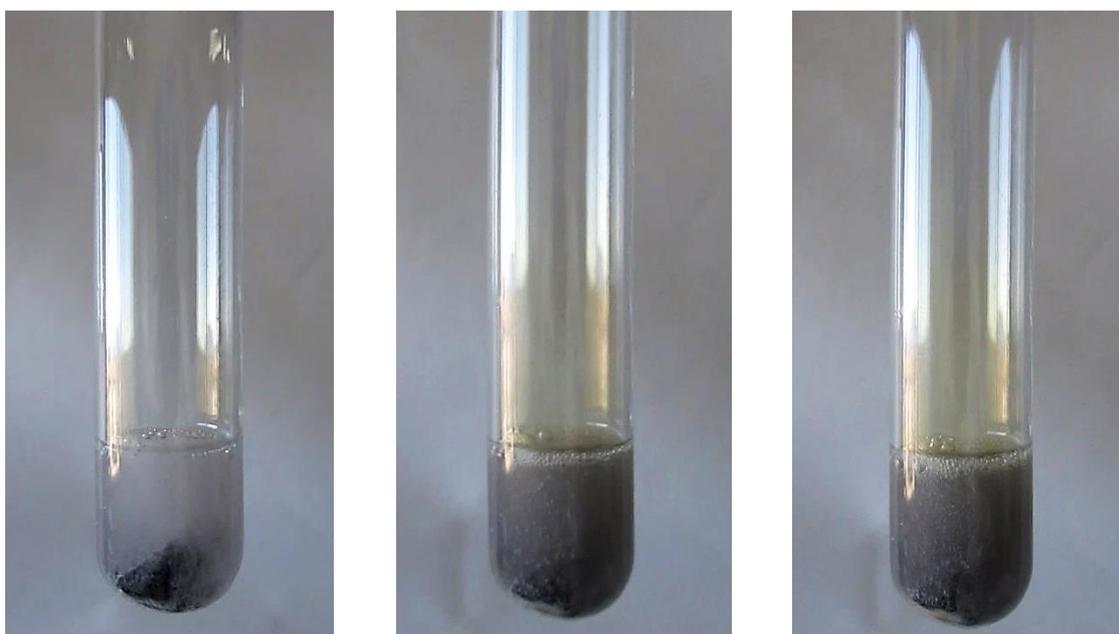
⁷ Housecroft, C.E., Sharpe, A.G. (2005). Inorganic Chemistry. Harlow, Gran Bretaña: Pearson, p.745.

⁸ Greenwood, N.N., Earnshaw, A. op.cit.p. 1443.

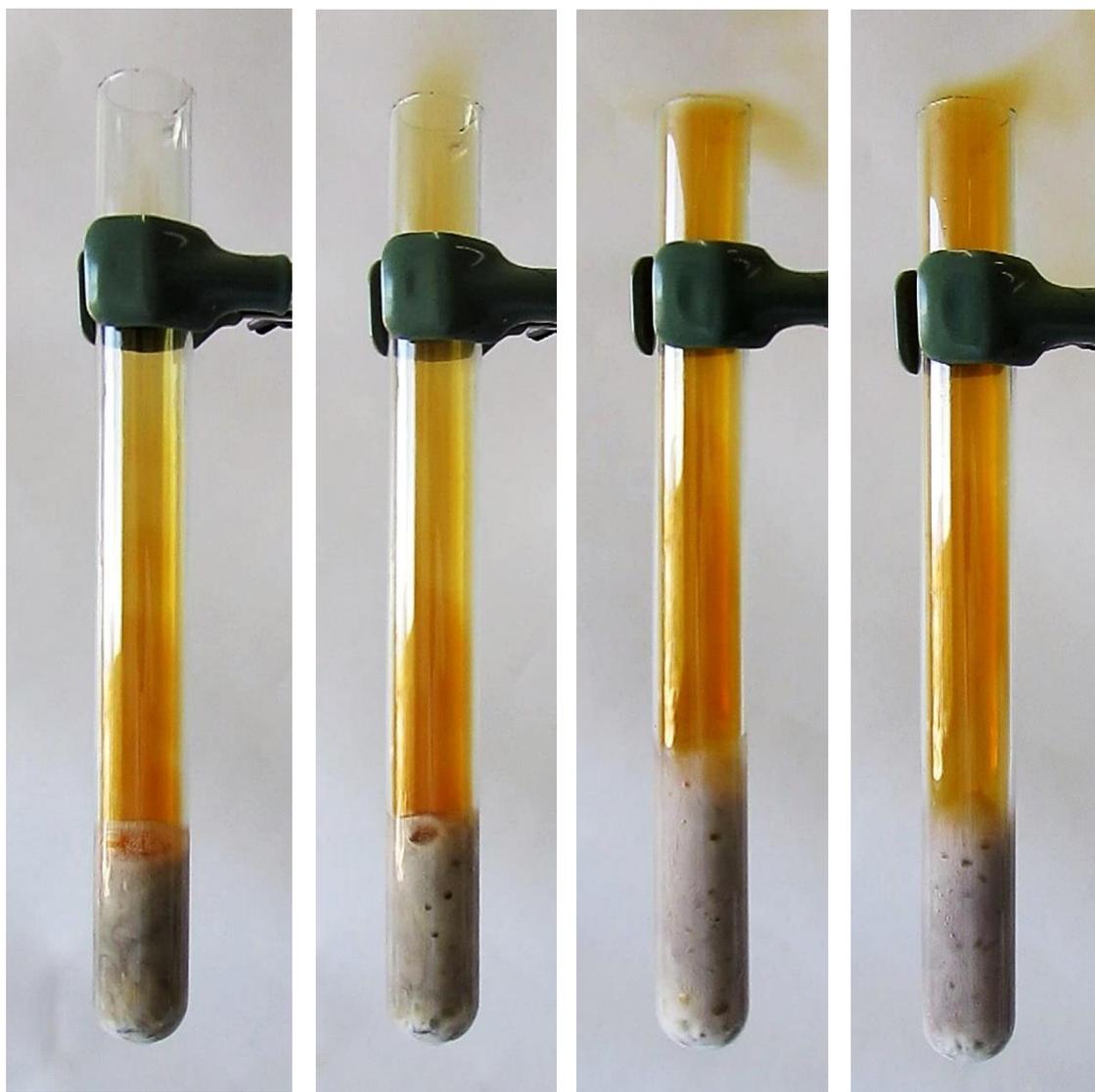
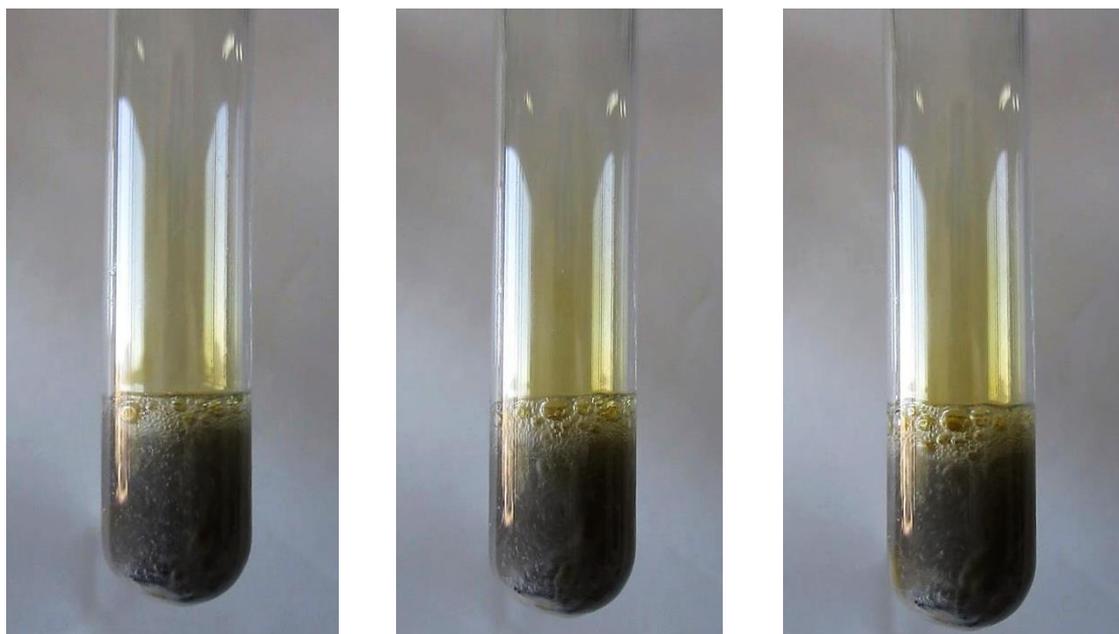


En un tubo de ensayo se produce el mismo resultado, aunque tras quitar el trozo de metal, decantar la disolución y añadir un poco de agua destilada, se obtiene una disolución del acuocomplejo $[\text{Er}(\text{H}_2\text{O})_8]^{+3}$ en la que el color rosa claro se aprecia perfectamente. Los acuocomplejos de los lantánidos han sido estudiados sistemáticamente y parecen tener un número de coordinación de 9, tipo $[\text{Ln}(\text{H}_2\text{O})_9]^{+3}$ desde el lantano hasta el samario, mientras que es de 8, tipo $[\text{Ln}(\text{H}_2\text{O})_8]^{+3}$ desde el disprosio al lutecio⁹ con alternancias entre 8 y 9 en los elementos intermedios.

Cuando ponemos en contacto el erbio con la disolución ácida en un tubo de ensayo, la reacción es mucho más llamativa. Vemos las imágenes:



⁹ Cotton, S. (2005). Establishing coordination numbers for the lanthanides in simple complexes. *Comptes Rendus Chimie*, 8, 2, pp: 129-145.



Una vez que se ha producido la reacción en un grado suficiente, he sacado el trozo de metal y he añadido un poco de agua destilada para poder apreciar mejor el color del catión. Durante unas horas el color de la disolución es púrpura o azul rosáceo, pero lentamente se va depositando un polvo negro en el fondo del tubo de ensayo que debe de ser erbio que no ha reaccionado o algún tipo de impureza. Entonces se observa un cambio de color en la disolución, que pasa a ser de un rosa pálido y perfectamente transparente.



Una vez que todo el metal en suspensión ha precipitado transvasé con cuidado la disolución a otro tubo de ensayo y entonces se obtiene el color esperado para el Er^{+3} . Resulta curioso que cuando se disuelve el erbio en ácido sulfúrico la disolución final no sólo no se oscurece sino que el color rosado es ligeramente distinto, como veremos en el siguiente apartado. De cualquier forma esta reacción de oxidación del erbio es sencilla y muy interesante como actividad de laboratorio con el alumnado. Es conveniente ejecutarla en la vitrina, por el desprendimiento de NO_2 que es bastante irritante.

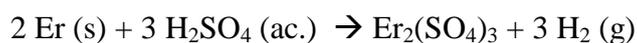
Vemos el resultado bajo la iluminación de los fluorescentes del laboratorio y en una fotografía hecha con el flash de la cámara, donde se ve la transparencia de la disolución.



B) DISOLUCIÓN DEL ERBIO EN H_2SO_4 Y FORMACIÓN DEL SULFATO

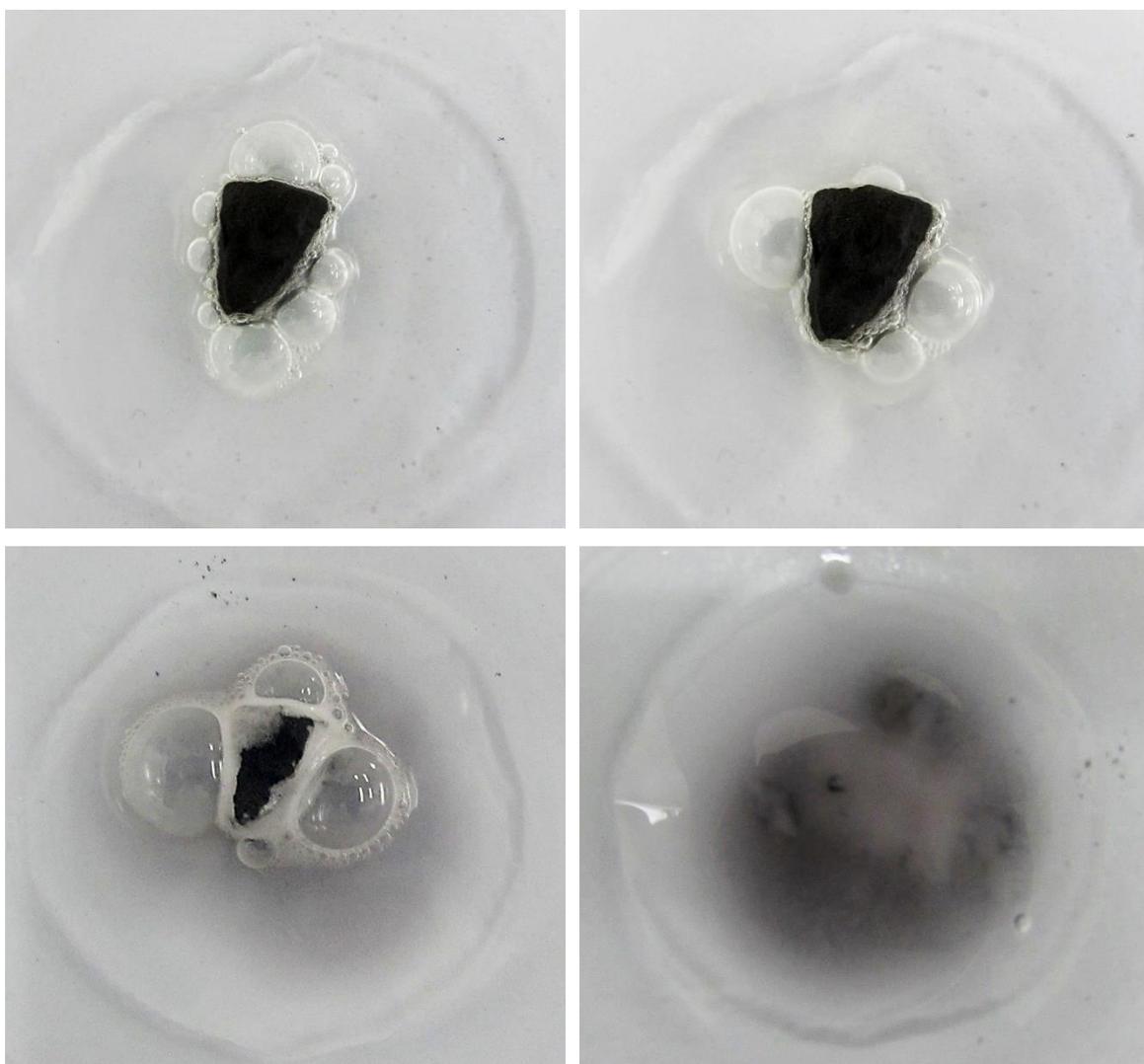
Cuando llevamos a cabo el mismo experimento de disolución en presencia de ácido sulfúrico con una concentración de un 30% en volumen el resultado es muy diferente. La reacción se produce de forma inmediata, pero es más contenida, las burbujas que se forman de hidrógeno gaseoso son bastante grandes y el metal se ennegrece por momentos, probablemente por la formación de gránulos de polvo de erbio que surgen al desintegrarse la red cristalina del metal por la oxidación. La reacción que se produce es interesante precisamente porque con la formación del Er^{+3} precipita el sulfato de erbio, de un tono que va del blanco al rosa pálido, sin que la disolución pierda el tono rosa propio del Er^{+3} .

La reacción que se produce es¹⁰:



La precipitación posterior del sulfato de erbio se produce debido a la existencia de un equilibrio complejo entre el $\text{Er}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ que ha precipitado, el Er^{+3} que queda libre en disolución, y la concentración de ácido sulfúrico presente en el medio, de manera que a mayor sea la concentración del ácido, menor es la solubilidad del sulfato¹¹. De esta manera durante la maduración de la disolución obtenemos un precipitado de $\text{Er}_2(\text{SO}_4)_3$, aunque en disolución permanecen concentraciones menores de Er^{+3} y $\text{Er}_2(\text{SO}_4)_3$.

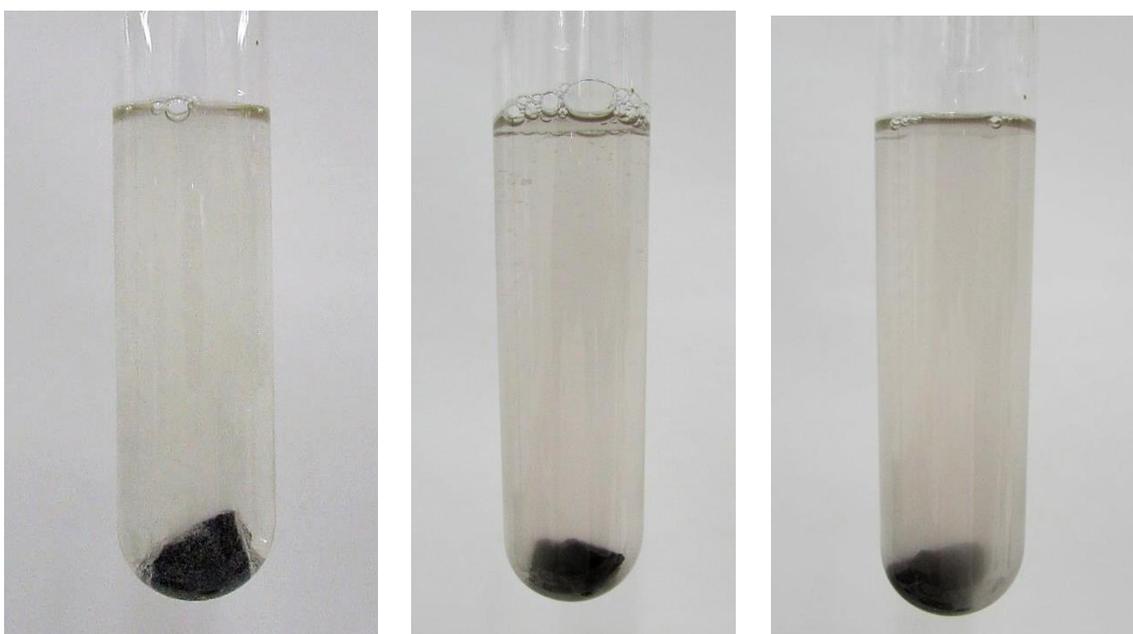
Si repetimos la experiencia anterior y sometemos al erbio a la acción de la disolución de ácido sulfúrico en un vidrio de reloj se ve que se forma menos polvo de color oscuro durante el proceso. Vemos las fotografías del proceso:



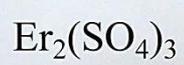
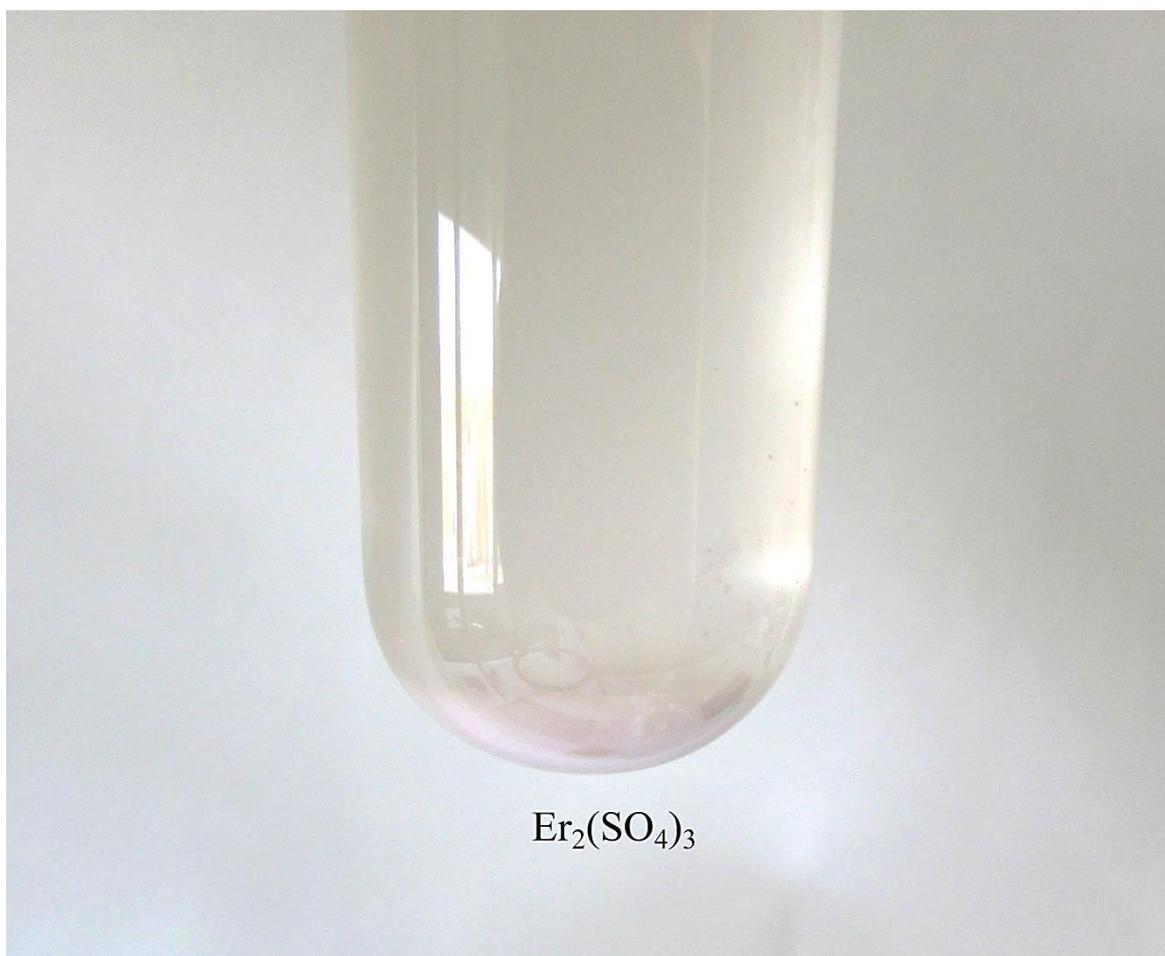
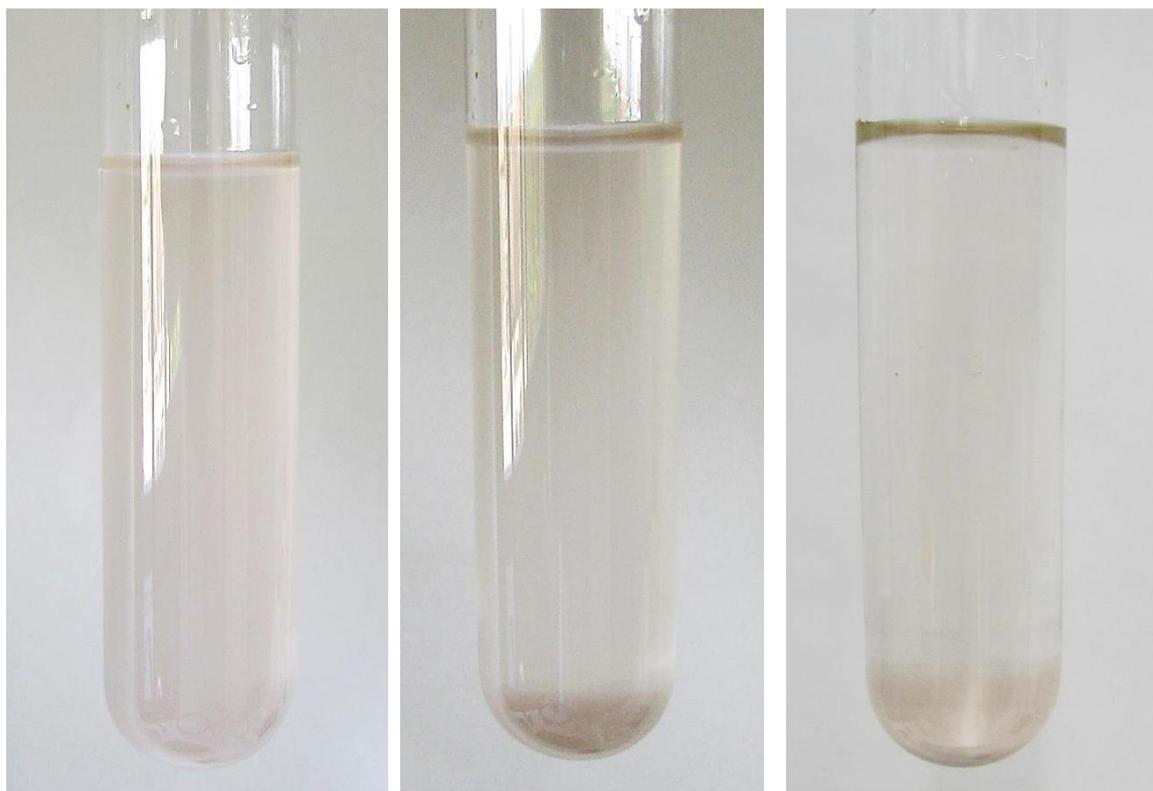
¹⁰ Patnaik, P. Op.cit. p. 294.

¹¹ Das, G. et al. (2019). Rare earth sulfates in aqueous systems: Thermodynamic modeling of binary and multicomponent systems over wide concentration and temperature ranges. J. Chem. Thermodynamics, 131, pp: 49-79, p. 63.

En el tubo de ensayo en cambio se observa perfectamente la formación del hidrógeno partiendo de la superficie del metal como se puede ver en las imágenes:

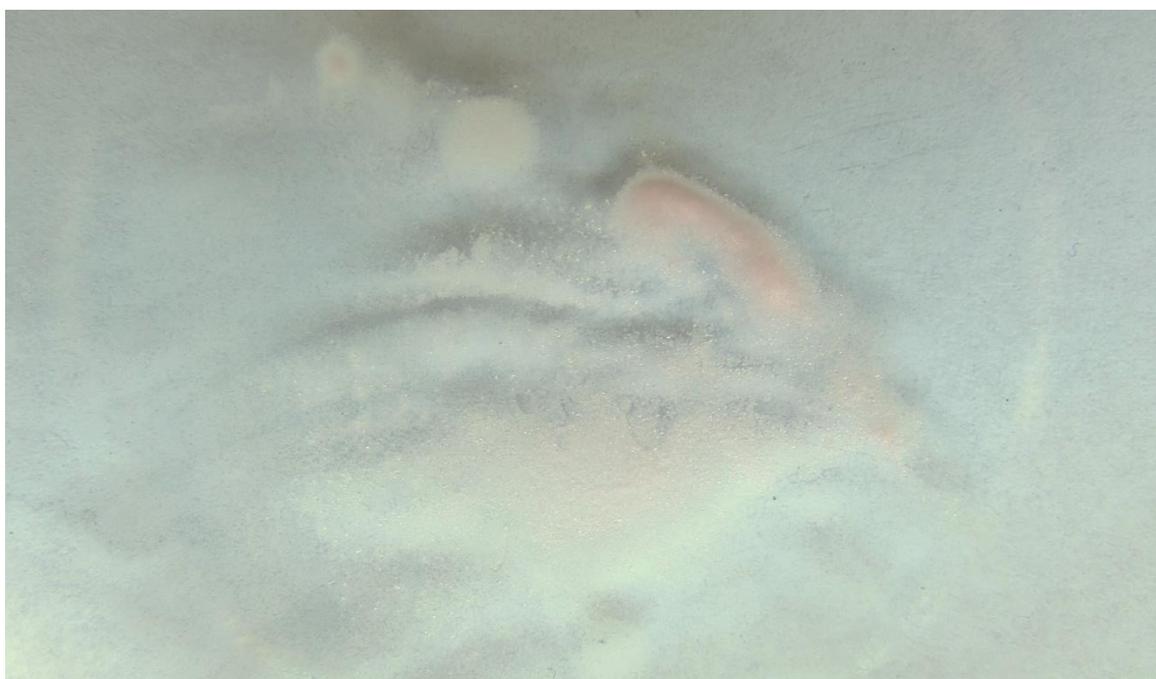


Sin embargo tras extraer el erbio para evitar que la disolución sea demasiado densa el color cambia y se vuelve transparente y rosa, precipitando el sulfato.





En estas imágenes se puede ver el color rosado¹² del $\text{Er}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ en el fondo del tubo, un sulfato que cuando está hidratado se disuelve en agua con gran dificultad, pero si es anhidro se disuelve rápidamente¹³. En las dos imágenes que siguen se puede ver el compuesto fotografiado sobre fondos de diferente color. Es difícil captar el tono rosado exacto con el que se aprecia en el laboratorio, pero he tratado de que se parezca lo más posible.



¹² Perry, D.L. (2011). Handbook of Inorganic Compounds. Boca Raton, EEUU: CRC Press, p. 165.

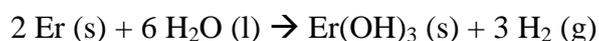
¹³ Fresenius, C.R. (1880). Manual of Qualitative Chemical Analysis. Nueva York, EEUU: John Wiley & Sons Publishers, p. 124.



C) FORMACIÓN DEL HIDRÓXIDO POR HIDRÓLISIS EN AGUA

Una de las reacciones químicas más interesantes del erbio es su reacción de oxidación con el agua, donde el metal se oxida a Er^{+3} mientras que el H^+ del agua se reduce a H_2 . Es una reacción de hidrólisis que se produce de forma lenta a la temperatura ambiente, pero que con agua caliente se lleva a cabo con gran rapidez en los lantánidos¹⁴, y en el caso del erbio, es muy visual y atractiva.

La reacción en medio neutro es la siguiente¹⁵:



Teniendo en cuenta que el potencial rédox¹⁶ del erbio es $\epsilon(\text{Er}^{+3}/\text{Er}) = -2.31\text{V}$, se comprende que sea inestable en el agua y reduzca al hidrógeno, mientras que acaba formando el hidróxido correspondiente, que queda en la parte superior del tubo.

¹⁴ Cotton, F.A., Wilkinson, G. (1990). Química Orgánica Avanzada. Méjico D.F., Méjico: Editorial Limusa. P. 1190.

¹⁵ Adaptado a partir de: Winter, M.J. (Departamento de Química, Universidad de Sheffield): <https://winter.group.shef.ac.uk/webelements/erbium/chemistry.html> (Consultado el 20/12/2023).

¹⁶ Cotton, S. (2006). Lanthanide and Actinide Chemistry. West Sussex, UK: John Wiley & Sons p. 20.

Aquí muestro una serie de imágenes del Er en agua a unos 80°C:



Se ve perfectamente cómo las burbujas parten de la superficie del metal.

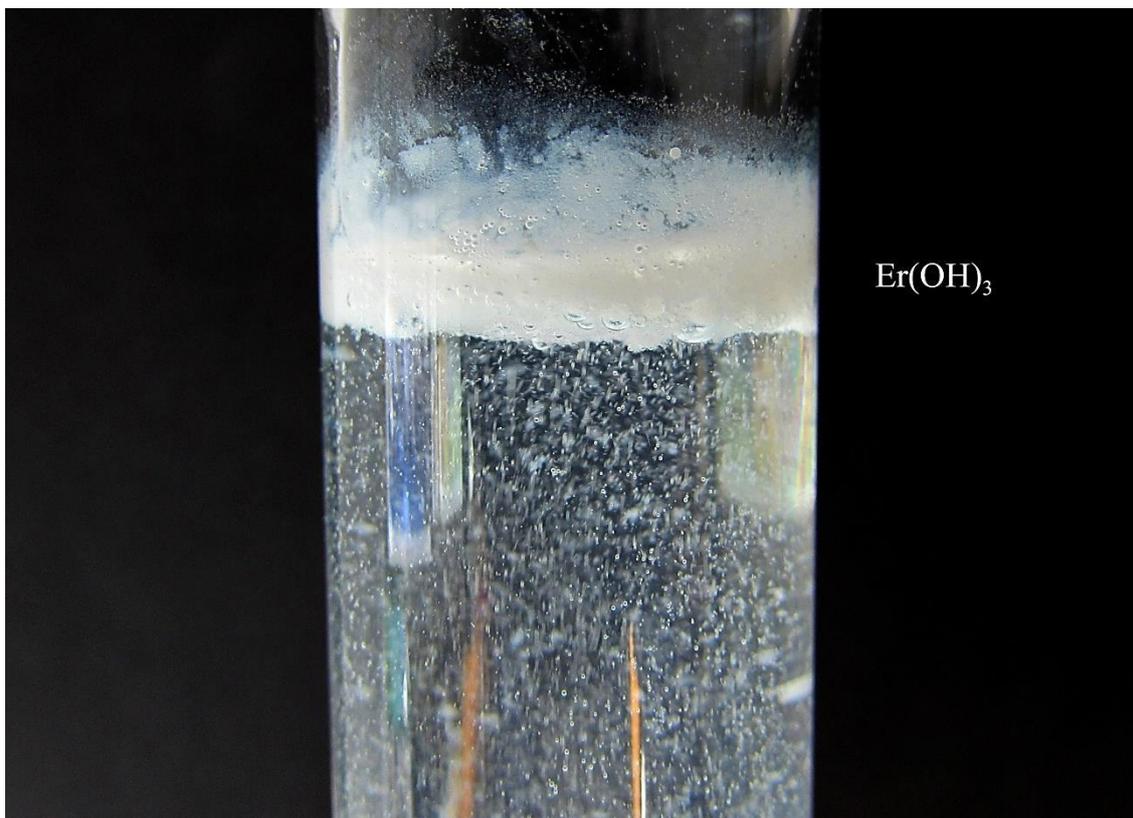


El catión Er^{+3} , de la misma manera que sucede con el resto de lantánidos, hidroliza el agua, y eso es algo que se observa a partir de pH neutro o básico. La contracción lantánida, hace que el catión tenga menos radio del esperado y eso, junto a la elevada carga, hace que el catión sea un ácido de Lewis duro e inestable al agua cuya hidrólisis se ve favorecida, un fenómeno que se acentúa al aumentar Z y disminuir los radios¹⁷. Esa es la razón por la que el Er^{+3} acaba descomponiendo al agua y formando el hidróxido¹⁸:



En este sentido, primero se produce la reacción rédox entre el agua y el metal, de manera que se formaría el Er^{+3} como acuocomplejo $[\text{Er}(\text{H}_2\text{O})_8]^{+3}$ de color rosado, sin embargo, dicho catión es demasiado ácido y acaba hidrolizando al agua si el pH es neutro o básico, incorporando un grupo hidroxilo al tiempo que suelta un protón, escrito como hidronio en la reacción de arriba. En el caso del erbio el resultado final de la hidrólisis es el $\text{Er}(\text{OH})_3$ de color rosa pálido, que queda sobrenadando a causa de las burbujas de H_2 que lo han ido llevando hacia arriba, para caer por gravedad horas más tarde.

Aquí tenemos el hidróxido que se va formando a medida que aparece el Er^{+3} .



¹⁷ Cotton, F.A., Wilkinson, G. (1990). Química Inorgánica Avanzada. Méjico, Méjico: Limusa, p. 1193.

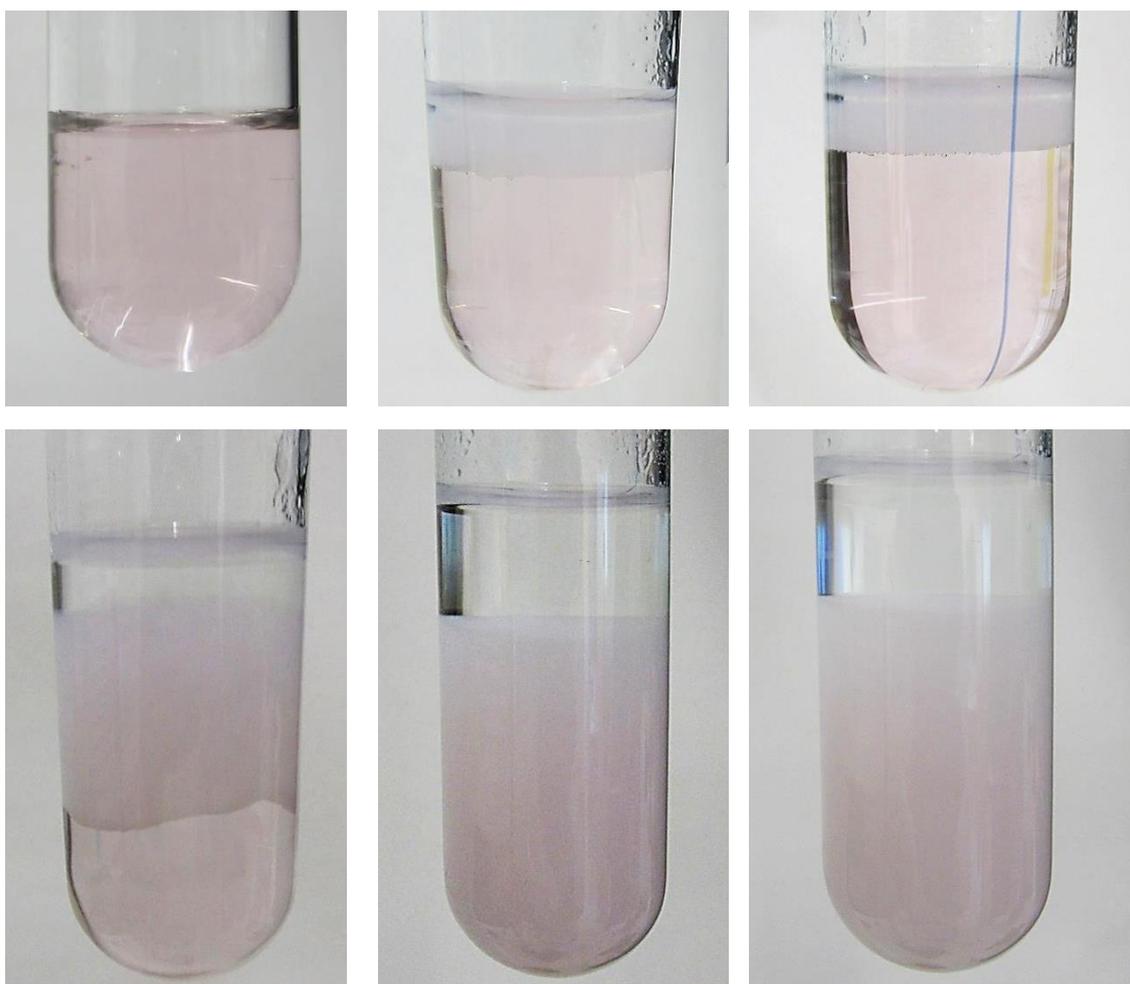
¹⁸ Cotton, F.A., op.cit. p. 1193.

D) FORMACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE ERBIO CON SOSA

Sin embargo, siguiendo la tradición por la que suelo disolver en ácido el metal de partida, la síntesis del $\text{Er}(\text{OH})_3$ la llevaré a cabo a partir de la disolución ácida del erbio en HNO_3 . A medida que se añade NaOH a la disolución, el pH va aumentando hasta que comienza a formarse el hidróxido de erbio. El pH al que comienza a aparecer la turbidez correspondiente al hidróxido es de aproximadamente 7,2 y debido a que los hidróxidos de los elementos lantánidos no son anfóteros, es decir, no se redisuelven al seguir añadiendo base para formar los correspondientes aniones polihidroxo¹⁹. De este modo la formación del hidróxido de erbio, partiendo de un medio ácido sigue la reacción habitual:

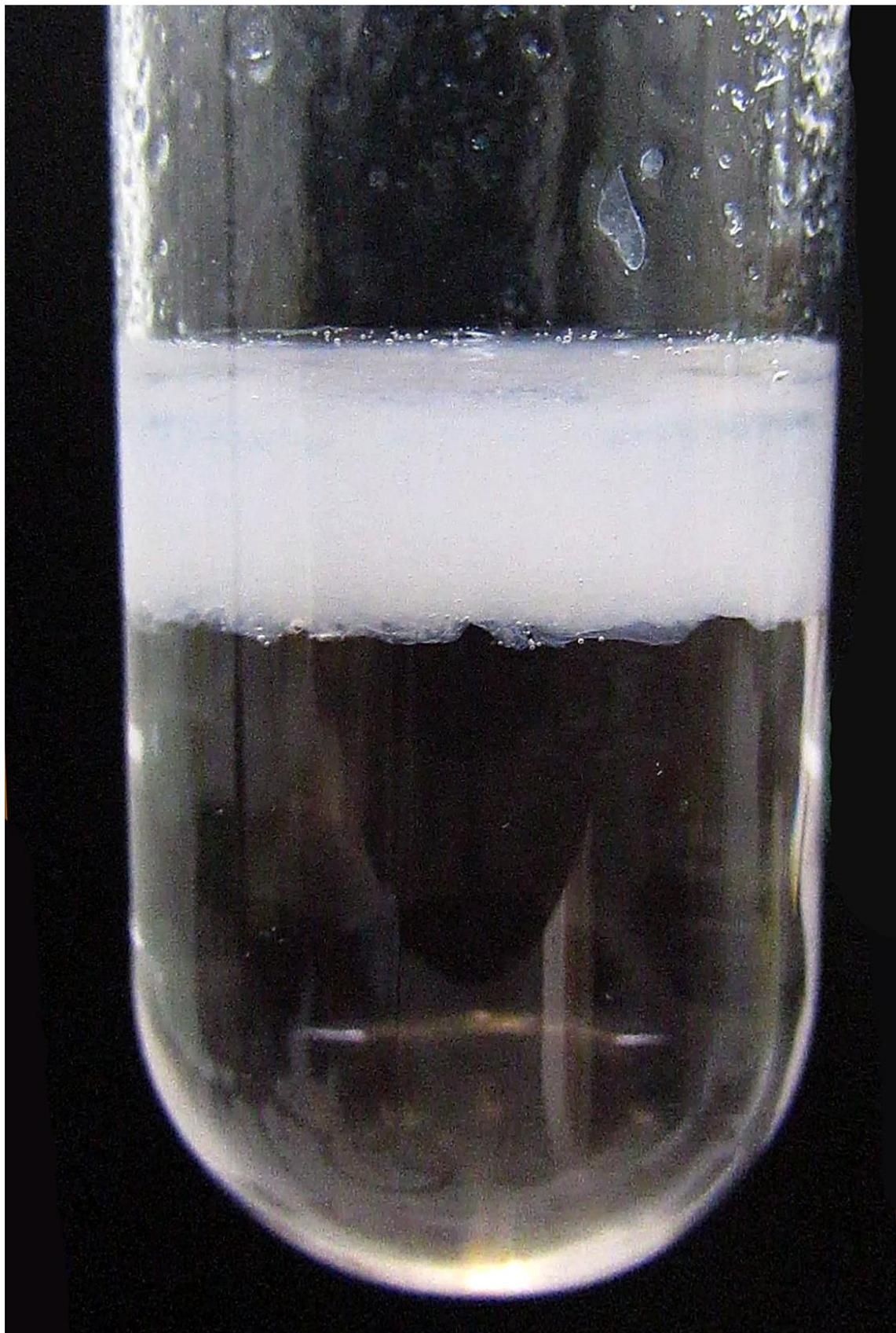


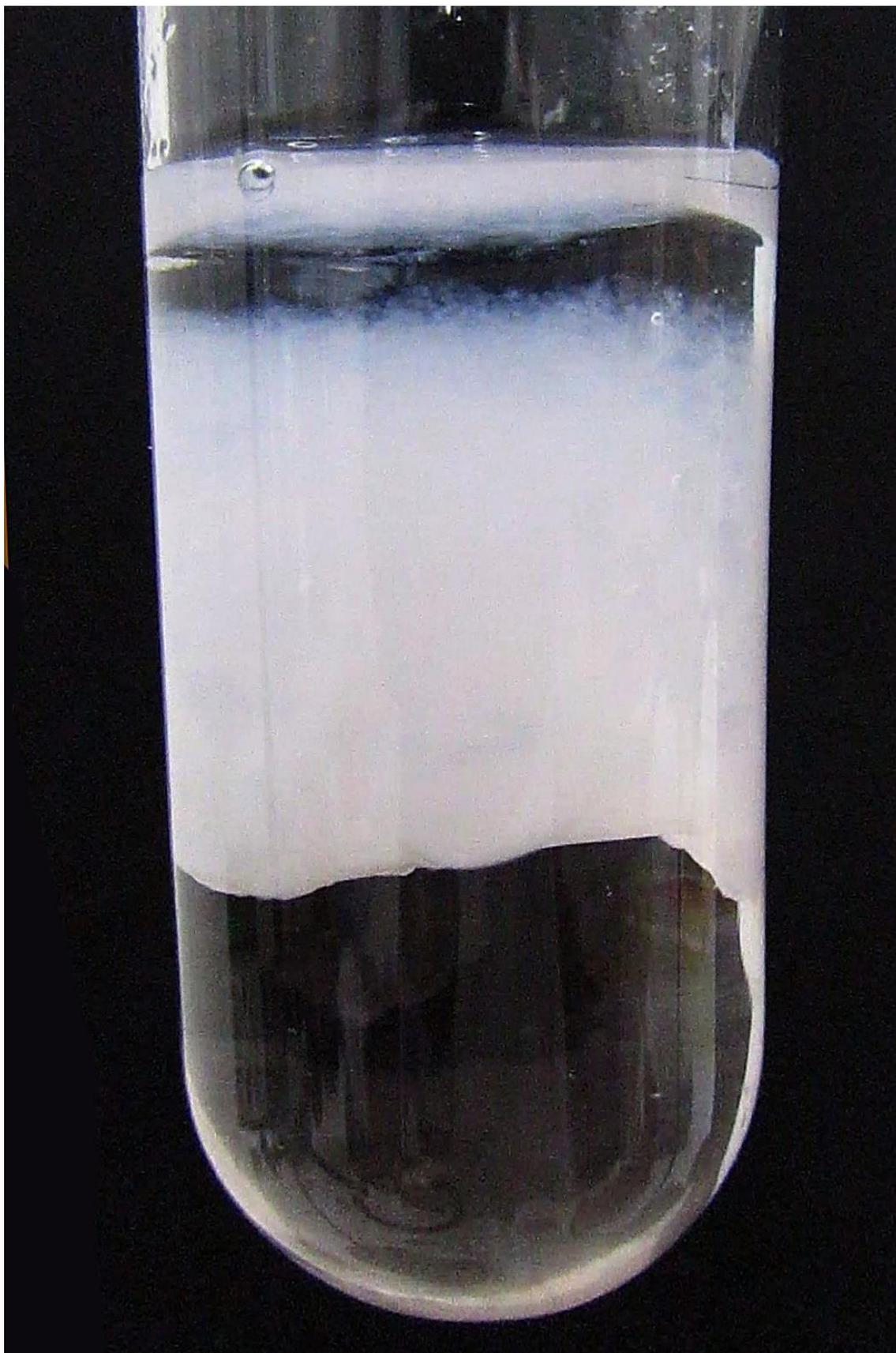
El $\text{Er}(\text{OH})_3$ es de color rosa claro y de aspecto gelatinoso, pero que puede cristalizar sin problemas y no es meramente un óxido hidratado²⁰. Podemos ver la serie de imágenes en las que he ido añadiendo una disolución concentrada de NaOH en agua destilada sobre la disolución ácida de Er^{+3} .



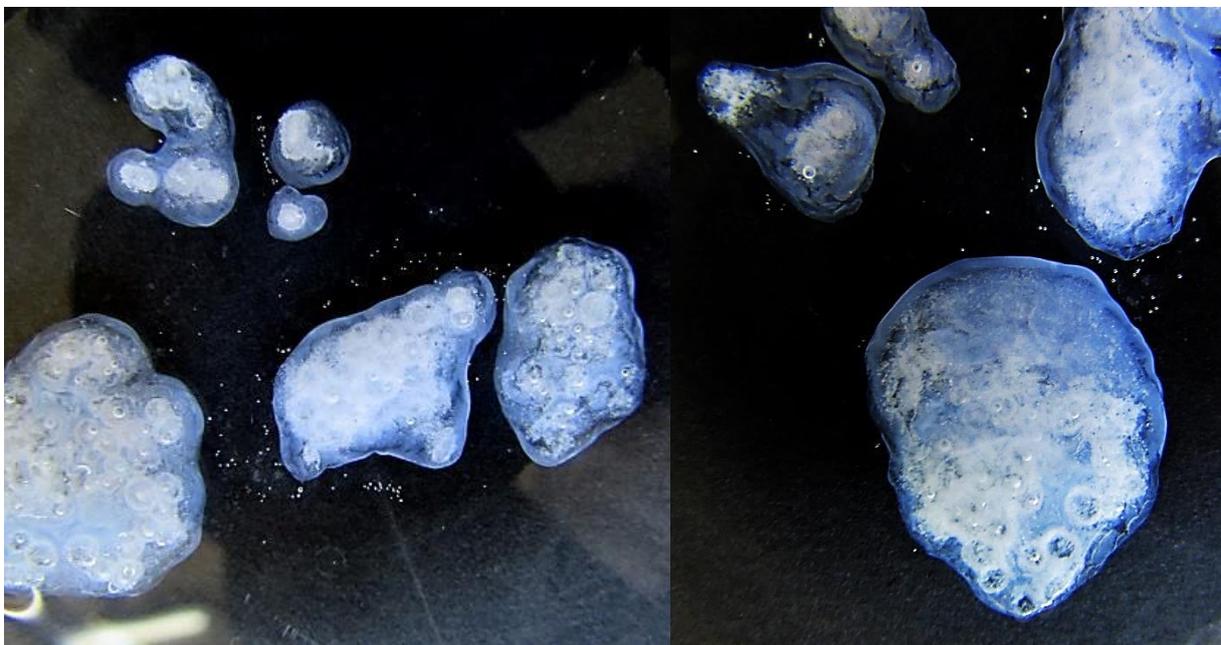
¹⁹ Burriel Martí, F., Lucena Conde, F., Arribas Jimeno, S., Hernández Méndez, J. (1992). Química Analítica Cualitativa. Madrid, España: Paraninfo, p. 629.

²⁰ Cotton, F.A. op.cit. p. 1191.

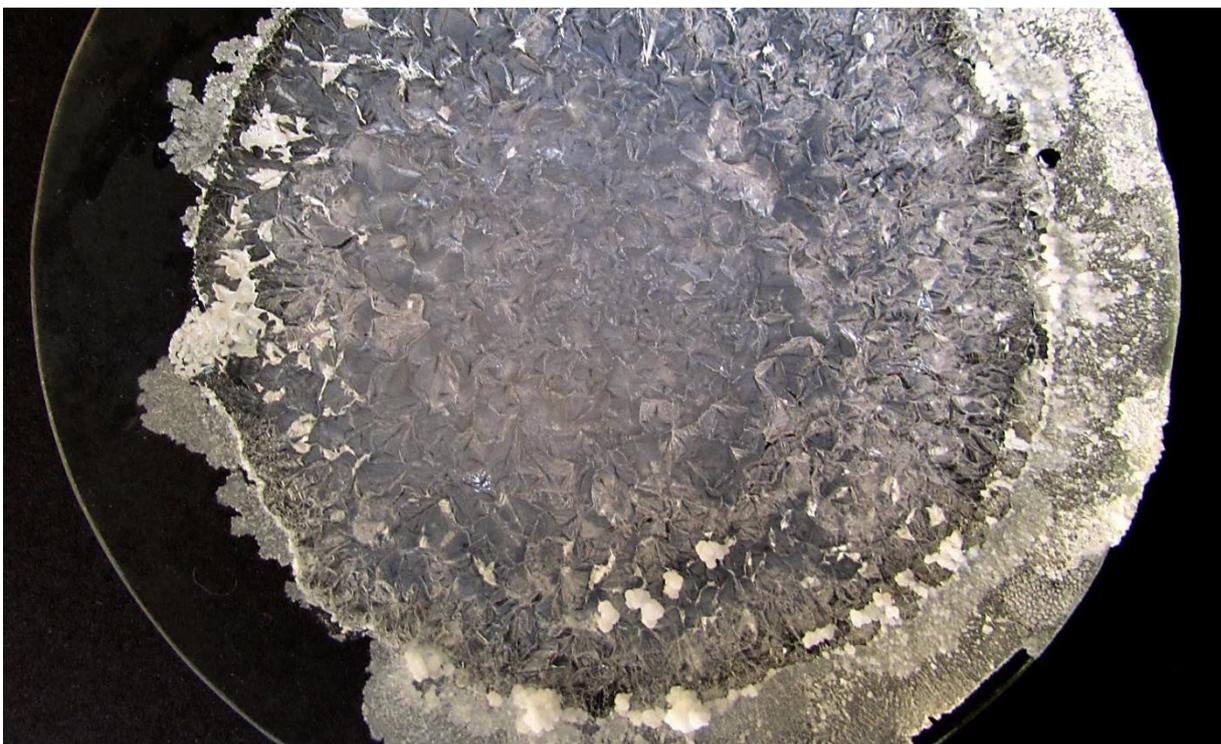




Uno de los ensayos más bonitos que pueden hacerse para obtener hidróxidos y ver su estructura con detalle consiste en añadir unas perlas de NaOH sobre una disolución ácida del metal, en este caso el Er^{+3} , dispuesta en un vidrio de reloj. Aquí podemos apreciar el aspecto gelatinoso del hidróxido de erbio que se va formando alrededor de cada bolita de NaOH.



El $\text{Er}(\text{OH})_3$ puede cristalizar a pesar de ese carácter gelatinoso si se deja madurar el tiempo suficiente, aunque aquí lo que vemos son cristales de NaOH recubiertos por el hidróxido:



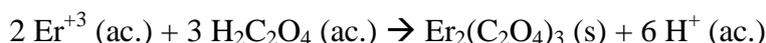
Basta lavar con cuidado el precipitado con un poco de agua destilada para que el hidróxido de sodio, completamente soluble se disuelva en el agua, dejando al hidróxido de erbio insoluble en el vidrio de reloj. Hay que llevar a cabo el proceso con cuidado para no arrastrar al precipitado de erbio, aunque obviamente hay formas más eficientes de separarlos.

Aquí vemos cómo queda el resultado de la cristalización anterior tras lavar con agua repetidas veces hasta que no quedaba rastro del NaOH.



E) OXALATO DE ERBIO

La precipitación del Er^{+3} a partir de la adición de ácido oxálico sobre una disolución del metal en HNO_3 , así como la formación de oxalato de erbio, es un método de separación cuantitativa propio de los lantánidos²¹. El oxalato de erbio, al igual que ocurre con el resto de lantánidos, precipita de forma rápida y aunque al principio el precipitado parece tener un aspecto gelatinoso varias horas después queda en el fondo del tubo una sustancia bien definida que puede filtrarse y obtenerse con un aspecto cristalino. Es la vía más importante para obtener óxidos en los lantánidos²², y por descomposición térmica del oxalato, obtendré el óxido de erbio en el siguiente apartado. La precipitación de los oxalatos es rápida y homogénea, de modo al añadir las primeras gotas del ácido oxálico disuelto en agua destilada, en una concentración en exceso sobre el Er^{+3} , se observa la aparición de una niebla blanca de una forma muy conspicua. Eso se debe a la insolubilidad de la sal, cuya K_{ps} ²³ es de $9 \cdot 10^{-31}$, que facilita una precipitación cuantitativa del erbio. Por otra parte la forma química del ácido oxálico depende de las condiciones de pH de la disolución y al pH de la disolución ácida de partida el oxálico actúa sin desprotonarse, aunque al reaccionar con el Er^{+3} la pequeña cantidad libre de $[\text{C}_2\text{O}_4]^{-2}$ y precipitar de inmediato, la formación del oxalato se ve favorecida, de manera que la reacción global se puede escribir como²⁴:



No obstante en condiciones neutras o básicas se pueden producir mezclas entre sales con diferentes aniones²⁵, con el oxalato $[\text{C}_2\text{O}_4]^{-2}$ y el $[\text{HC}_2\text{O}_4]^{-1}$. Por otra parte, el $\text{Er}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ resultante tiene moléculas de agua unidas a la estructura, pero la bibliografía da valores diferentes, con 3, 6 y 10 moléculas de agua según las condiciones de precipitación. Es habitual representarlo como $\text{Er}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pero hay discrepancias al respecto²⁶ como ya he indicado por lo que en muchos textos aparece simplemente como $\text{Er}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, algo común a los oxalatos de los lantánidos.

En las siguientes imágenes ilustro el proceso de formación del $\text{Er}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ hidratado. Durante su formación no se aprecia con nitidez el tono rosado del compuesto²⁷ pero una vez que se filtra y se deja secar, el compuesto exhibe una tonalidad rosada tal y como ocurre con la mayor parte de los compuestos del erbio (III). A partir de este oxalato de erbio se puede obtener el óxido calentando al aire.

²¹ Cotton, F.A. op.cit. p. 1192.

²² *Ibidem*, p. 1192.

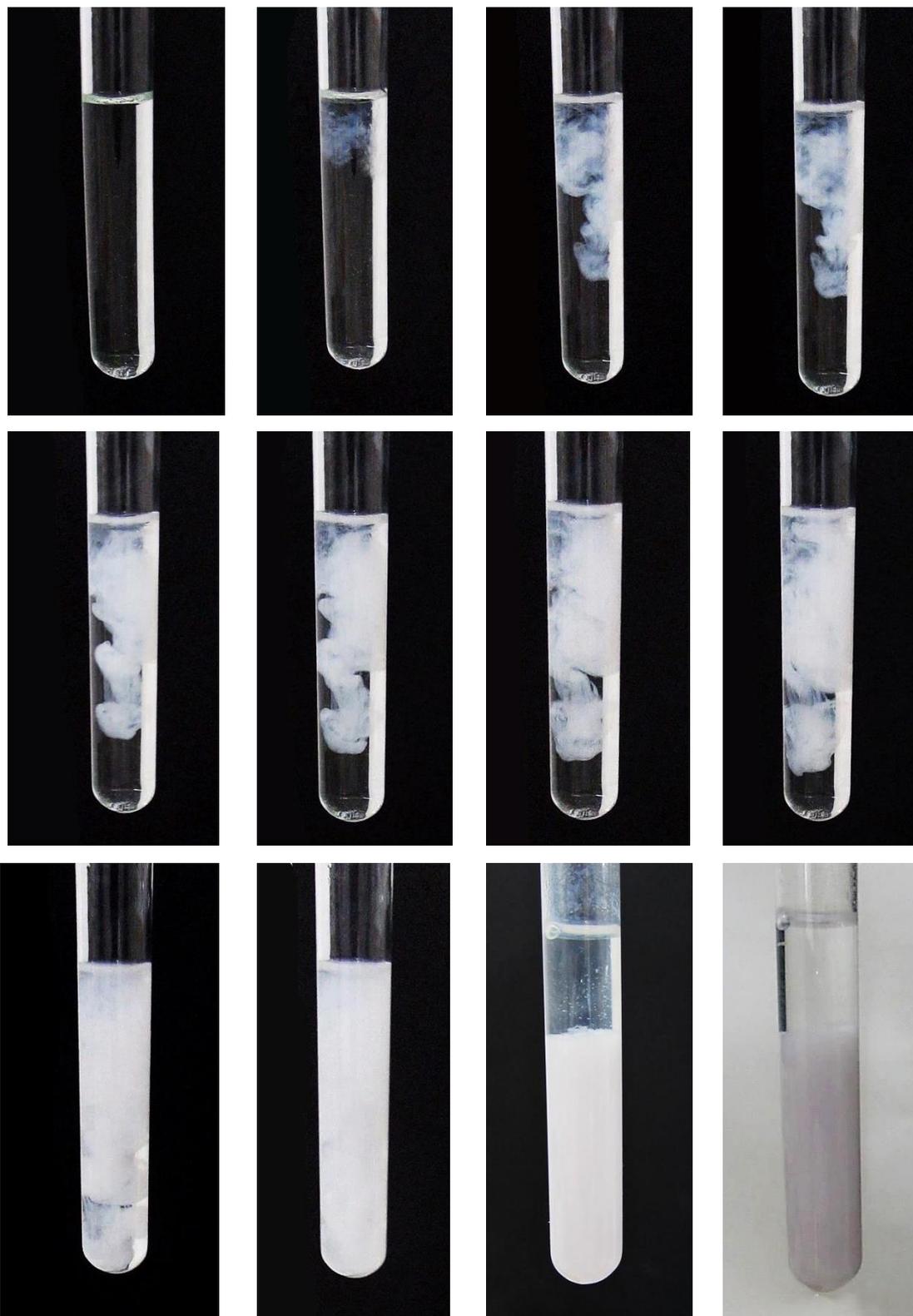
²³ Dong-Yong Chung, Eung-Ho Kim, Eil-Hee Lee, Jae-Hyung Yoo. (1998). Solubility of Rare Earth Oxalate in Oxalic and Nitric Acid Media. *Journal of Industria and Engineering Chemistry*, 4, 4, pp:277-284, p.282.

²⁴ *Ibidem*. Ver el conjunto de equilibrios del diprótico y de la formación de los complejos y precipitado.

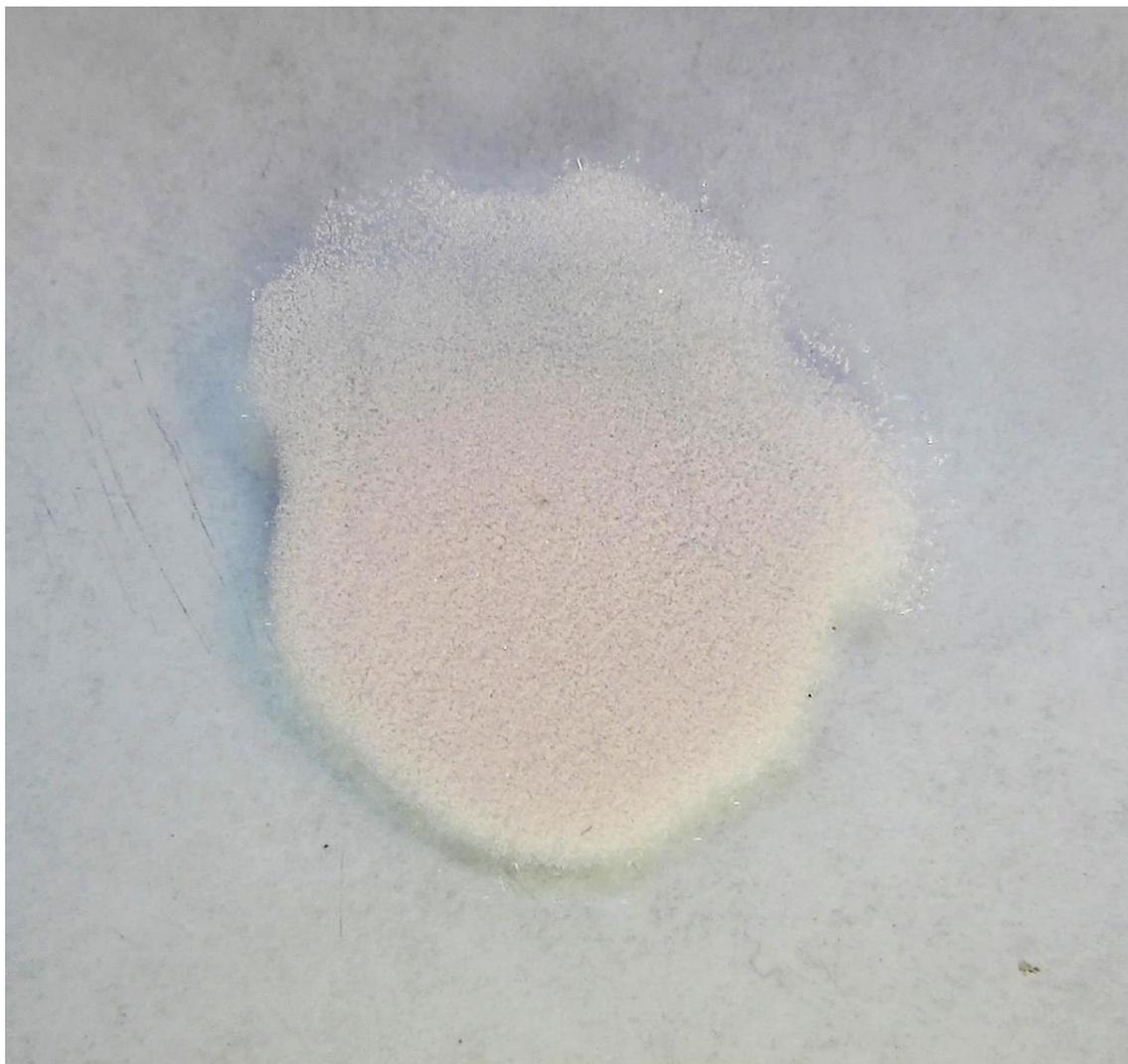
²⁵ Cotton, F.A., op.cit. p. 1192.

²⁶ Alemayehu, A., Zakharanka, A., Tyrpekl, V. (2022). Homogeneous Precipitation of Lanthanide Oxalates. *ACS Omega*, 7, 14, pp:12288-12295.

²⁷ Perry, D.L., op.cit. p. 164. (Para el decahidrato).



He cambiado el fondo del color en la última de las fotografías para que el color rosa del precipitado se aprecie mejor en las imágenes. He de reconocer que en vivo el color rosa pálido del $\text{Er}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ se ve con claridad y no hay duda al respecto del color que ofrece a la luz, tanto del sol como de los fluorescentes del laboratorio. En la siguiente imagen vemos el compuesto filtrado y con un aspecto cristalino.



F) OBTENCIÓN DEL ÓXIDO DE ERBIO

La ruta habitual de elaboración del óxido de erbio es precisamente por descomposición térmica del oxalato. El oxalato de erbio se deshidrata al ser calentado al aire a temperaturas que van de los 90 a los 370°C, mientras que a partir de los 450°C se obtiene un oxicarbonato $\text{Er}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ de color igualmente rosado y que se descompone finalmente al óxido de erbio Er_2O_3 a partir de los 600°C previa formación del carbonato del metal²⁸. A lo largo de todo el proceso hay leves cambios de color en los diferentes compuestos de descomposición, ya sea el oxalato hexahidrato de partida, el trihidrato, el oxicarbonato, el carbonato o finalmente el óxido de erbio; pero en todo momento la tonalidad rosa es la dominante y el color del óxido de erbio sigue siendo rosa pálido²⁹, característico de los derivados del Er^{+3} .

²⁸ Balboul, B.A.A. (2000). Thermal decomposition study of erbium oxalate hexahydrate. *Thermochemica Acta*, 351, 1-2, pp. 55-60.

²⁹ Perry, D.L., op.cit. p. 164.

Las reacciones de descomposición del oxalato se pueden agrupar en cuatro pasos, considerando las diferentes reacciones de deshidratación como si fueran un único paso. Para esta cadena de reacciones de descomposición térmica me he basado en la que se ha establecido para el neodimio, que es completamente análoga³⁰. Destaca la producción de monóxido y de dióxido de carbono según la reacción correspondiente, por lo que es importante llevar a cabo la experiencia en la campana de extracción y evitar así la exposición al CO (g) por pequeña que sea la emisión.



Estas reacciones pueden solaparse dado que, aunque se producen a diferentes temperaturas sucesivamente, dichas temperaturas son las óptimas, por lo que las reacciones son viables antes y después de dicha temperatura de referencia.

Veamos algunas de las fotografías del proceso donde caliento a la temperatura de la llama de butano una cantidad del oxalato de erbio obtenido previamente. A pesar de que en el proceso de descomposición hay bastantes compuestos intermedios no he apreciado un cambio significativo de color durante el tiempo que he estado calentando. Durante una media hora he sometido el oxalato a la llama y aunque probablemente debiera de haber estado calentando mucho más tiempo para una formación completa del Er_2O_3 , la textura del compuesto ha cambiado y el color parece haberse vuelto un poco más beige, aunque es difícil de ver por la palidez de los lantánidos.



³⁰ De Almeida, L., Grandjean, S., Vigier, N., Patisson, F. (2012). New insights on the thermal decomposition of lanthanide (III) and actinide (III) oxalates: from neodymium and cerium to plutonium. *Eur.J.Inorg.Chem.*, 31, pp: 4986-4999.

Para apreciar el color rosado del Er_2O_3 pongo el compuesto obtenido sobre dos fondos diferentes, uno blanco y otro negro.



G) OBTENCIÓN DEL CLORURO DE ERBIO

El cloruro de erbio es un ejemplo de los haluros de este metal. Se describe como polvo de color rosa, delicuescente y soluble en agua³¹, característica esta última que permite diferenciarlo del Er_2O_3 de partida, que es insoluble³². La síntesis más habitual de estos compuestos lantánidos es la ruta del «cloruro de amonio»³³ que tiene la ventaja de ser común para los lantánidos y permite obtener cloruros anhidros, dado que el NH_4Cl y el Er_2O_3 carecen de agua. El principal problema que he encontrado a la hora de llevar a cabo la reacción es el bajo punto de sublimación³⁴ del NH_4Cl , sobre unos 338°C y que obliga a que la primera parte de la reacción se lleve a cabo a menor temperatura. En cambio la temperatura de fusión del Er_2O_3 es de 2344°C permite calentar sin ningún problema la mezcla de reacción.

La primera fase de reacción consiste en la formación de un pentacloroerbiato de amonio, aunque en la bibliografía también aparece la formación de un hexacloroerbiato de amonio a temperatura inferior a la temperatura de sublimación del cloruro de amonio. La segunda fase en cambio se lleva a cabo a mayor temperatura de manera que el compuesto se descompone dejando el ErCl_3 en el fondo del recipiente dado que su temperatura de fusión es de 776°C . Sin embargo, a veces el ErCl_3 es arrastrado por el NH_4Cl al sublimar, por lo que hay que cuidar la temperatura a la que se lleva a cabo la reacción, algo que yo no he hecho bien y he obtenido un resultado poco satisfactorio.

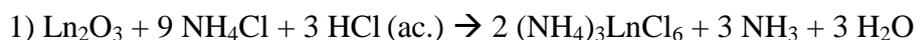
³¹ <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/66277#section=Experimental-Properties>

³² <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5123419#section=Physical-Description>

³³ Meyer, G. (1989). "The Ammonium Chloride Route to Anhydrous Rare Earth Chlorides—The Example of YCl_3 ". En Harry R. Allcock *Inorganic Synthesis, volumen 25* (p. 146). Nueva York, EEUU: John Wiley & Sons.

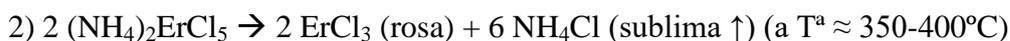
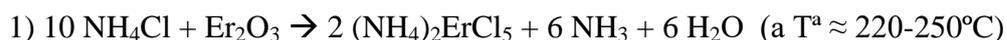
³⁴ <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/25517#section=Boiling-Point>

De hecho una variante que no necesita controlar tanto la temperatura recurre a hacer reaccionar el óxido con ácido clorhídrico para formar el haluro hidratado, y posteriormente deshidratar por calentamiento con NH_4Cl en exceso³⁵. Las reacciones de esta ruta para cualquier lantánido serían³⁶:



No obstante yo he preferido utilizar la vía seca, a pesar de que no he tenido el éxito esperado a causa de un deficiente control de la temperatura. Hubiese podido controlar la temperatura de la primera fase fijando la temperatura en un horno, pero supuse que podría hacerlo manteniendo el fuego y retirándolo de forma que el cloruro de amonio no sublimara. Como la temperatura del laboratorio era de unos 12°C , el NH_4Cl no llegaba a escapar del tubo, y sublimaba visiblemente sobre las paredes del tubo, de modo que podía retirarlo del fuego antes de que la temperatura superara la aconsejable. Sin embargo el resultado no fue del todo el deseado.

Las reacciones son las siguientes, con exceso de cloruro de amonio³⁷:



Según el libro de Brauer, la reacción de síntesis del $(\text{NH}_4)_2\text{ErCl}_5$ debe llevarse a cabo durante unas 6 a 8 horas para que la reacción se complete³⁸, un tiempo que yo he acertado excesivamente para acomodarlo al horario escolar (qué se le va a hacer). Durante esta primera reacción sí he notado la aparición de un leve olor a amoníaco, pero no tanto como esperaba, lo que advertía que la reacción no se estaba llevando a cabo de la manera adecuada.

Para llevar a cabo esta reacción he partido de 0.08g de Er_2O_3 y de 1.12g de NH_4Cl , que he mezclado y calentado durante una hora por medio de un mechero de alcohol que retiraba cada vez que veía que se empañaba el vidrio con el NH_4Cl sublimado. Entonces me pareció una buena idea, porque los alumnos podrían ver muy bien los procesos de sublimación y sublimación inversa, pero la reacción se ve comprometida por un deficiente control de la temperatura. De repetir esta reacción con otros lantánidos preferiré cualquier otro método ciertamente.

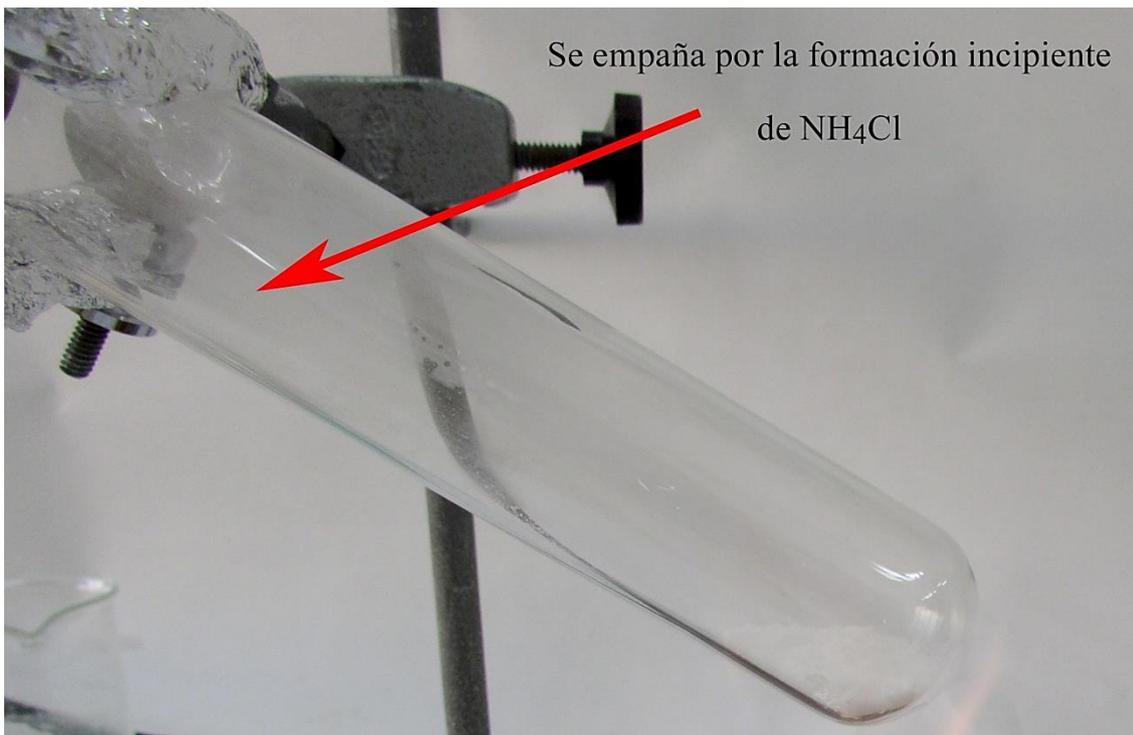


³⁵ Housecroft, C.E., Sharpe, A.G. op.cit. p. 749.

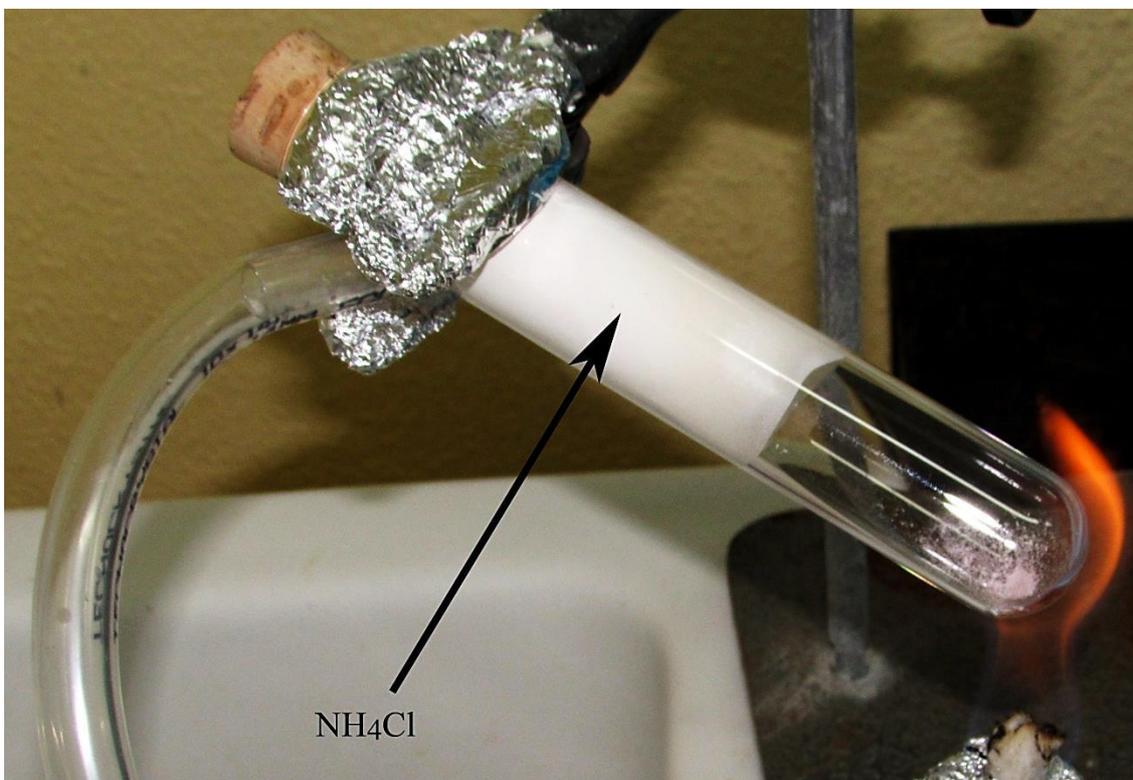
³⁶ Cotton, S. (2006). op.cit. p. 26.

³⁷ Meyer, G. op.cit. p. 146.

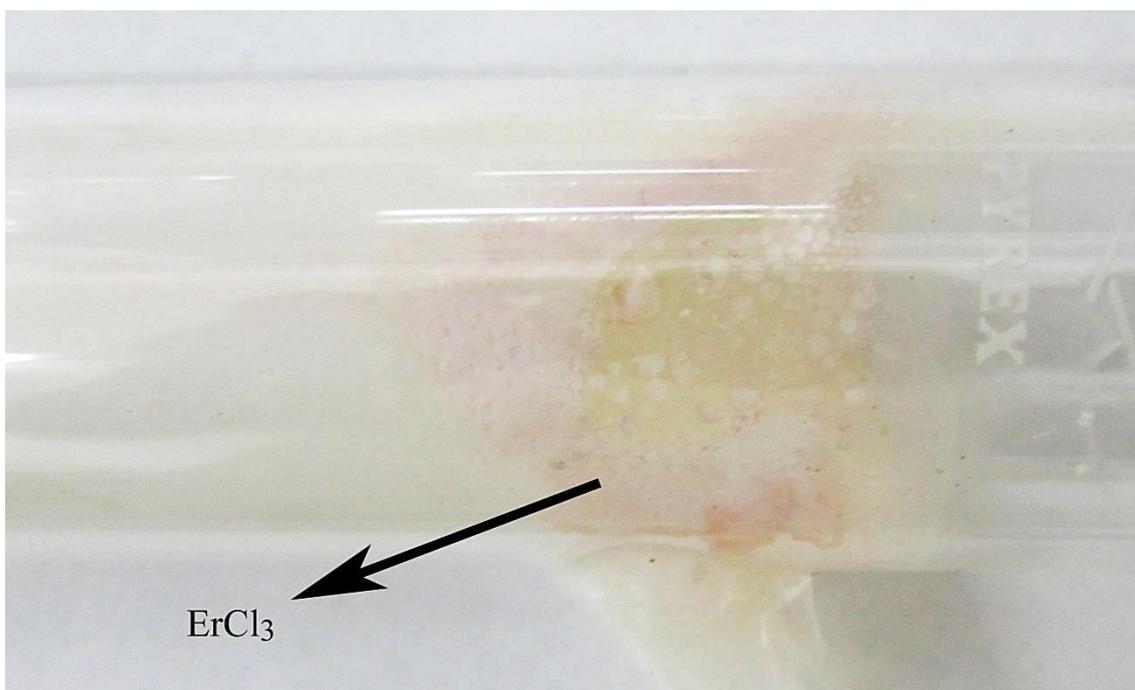
³⁸ Brauer, G. (1963). Handbook of preparative Inorganic Chemistry. Volume 1. Londres, Gran Bretaña: Academic Press, p. 1147.



Cuando transcurrió una hora de tedioso calentamiento, conecté el tubo de ensayo con derivación (parecido a un Schlenk pero sin llave) en el que había introducido la mezcla a un Venturi para hacer el vacío y calenté sin prestar demasiada atención a la temperatura. El calentamiento se produjo entonces de forma excesivamente rápida y el NH_4Cl sublimó sobre las paredes del recipiente en apenas unos pocos minutos.



En el fondo probablemente haya quedado una mezcla de ErCl_3 y Er_2O_3 que apenas si se diferencian a causa de tener un color prácticamente igual. Lo cierto es que esta segunda reacción hay que llevarla a cabo con mucho más cuidado, pues si se calienta demasiado rápido y subiendo la temperatura en exceso, el cloruro de amonio al sublimar arrastra mecánicamente³⁹ parte de la producción del ErCl_3 que va a quedar formando parte de la cristalización del cloruro de amonio en la sublimación inversa sobre las paredes del tubo. Ese incidente puede verse muy bien en las imágenes. He raspado y disuelto sin problemas la sustancia rosada que aparece en la parte superior del tubo, por lo que es obvio que es ErCl_3 (soluble), frente al Er_2O_3 (insoluble).



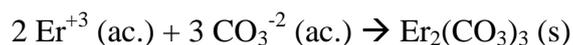
³⁹ Martincic, M., Frontera, C., Pach, E., Ballesteros, B., Tobias, G. (2016). Synthesis of dry SmCl_3 from Sm_2O_3 revisited. Implications for the encapsulation of samarium compounds into carbon nanotubes. *Polyhedron*, 116, pp: 116-121, p. 117.



H) CARBONATO DE ERBIO

El carbonato de erbio es un compuesto insoluble de color rosa pálido⁴⁰. La formación del $\text{Er}_2(\text{CO}_3)_3$ se logra sin dificultades añadiendo a la disolución ácida de Er^{+3} bien una disolución saturada de Na_2CO_3 en agua destilada, bien directamente el Na_2CO_3 sólido. En principio esta es la estrategia más recomendable⁴¹. Como el CO_3^{-2} es una base, reaccionará con el ácido de la disolución de partida y se producirá la emisión de CO_2 en gran cantidad, por lo que hay que hacerlo poco a poco para que no se desborde el tubo de ensayo a causa de la reacción de neutralización. Se han descrito especies mixtas del tipo $\text{Er}_2(\text{OH})_4\text{CO}_3$ e incluso formas no estequiométricas obtenidas por medio de la hidrólisis de tricloroacetato de erbio⁴². Sin embargo el producto habitual de la reacción de precipitación es $\text{Er}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ con un número de moléculas de agua que oscila entre 2 y 3, pero que suele no ser un entero, lo que sugiere que la hidratación del carbonato no es estable⁴³.

La reacción de precipitación del $\text{Er}_2(\text{CO}_3)_3$, sin considerar la hidratación del metal en su esfera de coordinación, es la siguiente:



⁴⁰ Perry, D.L., op.cit. p. 163.

⁴¹ Song, L., Rongjun, M. (2007). Synthesis and Characterization of Hydrated Holmium and Erbium Carbonates. Asian Journal of Chemistry, 19, 3, pp: 1883-1887.

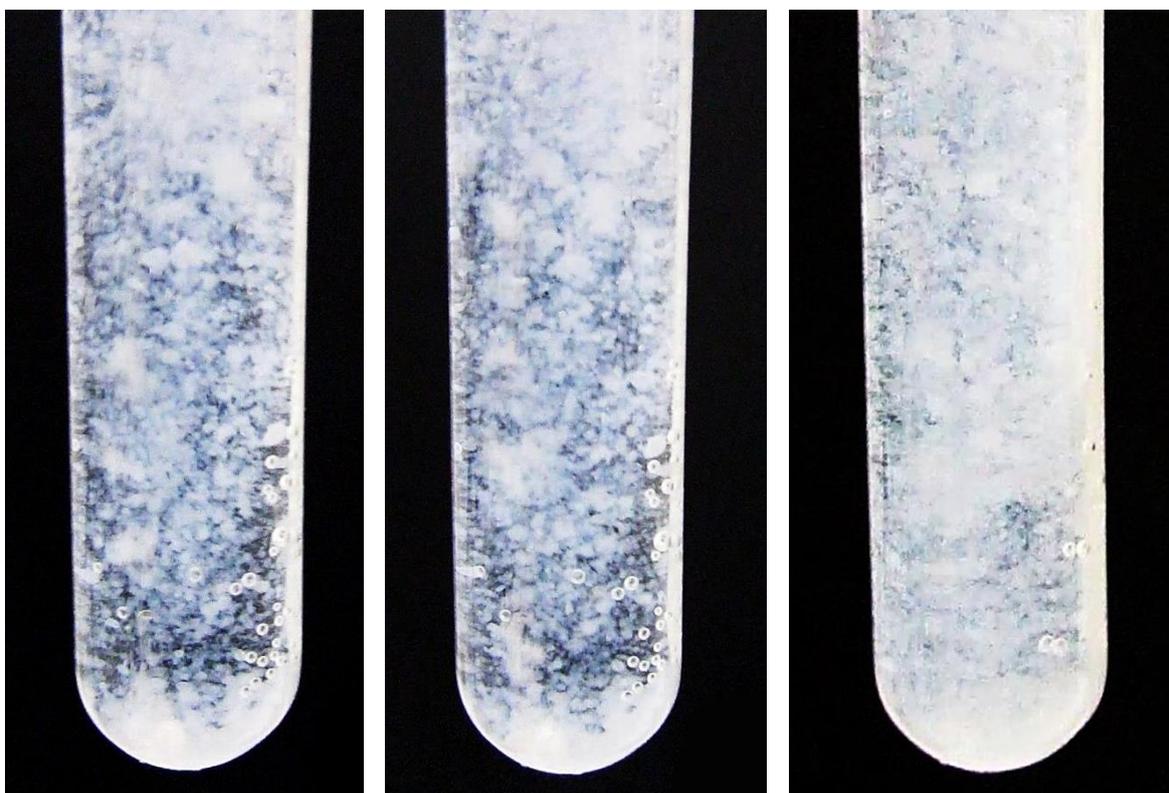
⁴² Ibídem. Cf. Cotton, F.A. op.cit. p. 1193 (considera que es la mejor vía para obtener los carbonatos).

⁴³ Sungur, A., Kizilyalli, M. (1983). Synthesis and structure of $\text{Gd}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($n=2,3$). Journal of the Less Common Metals, 93, 2, pp: 419-423.

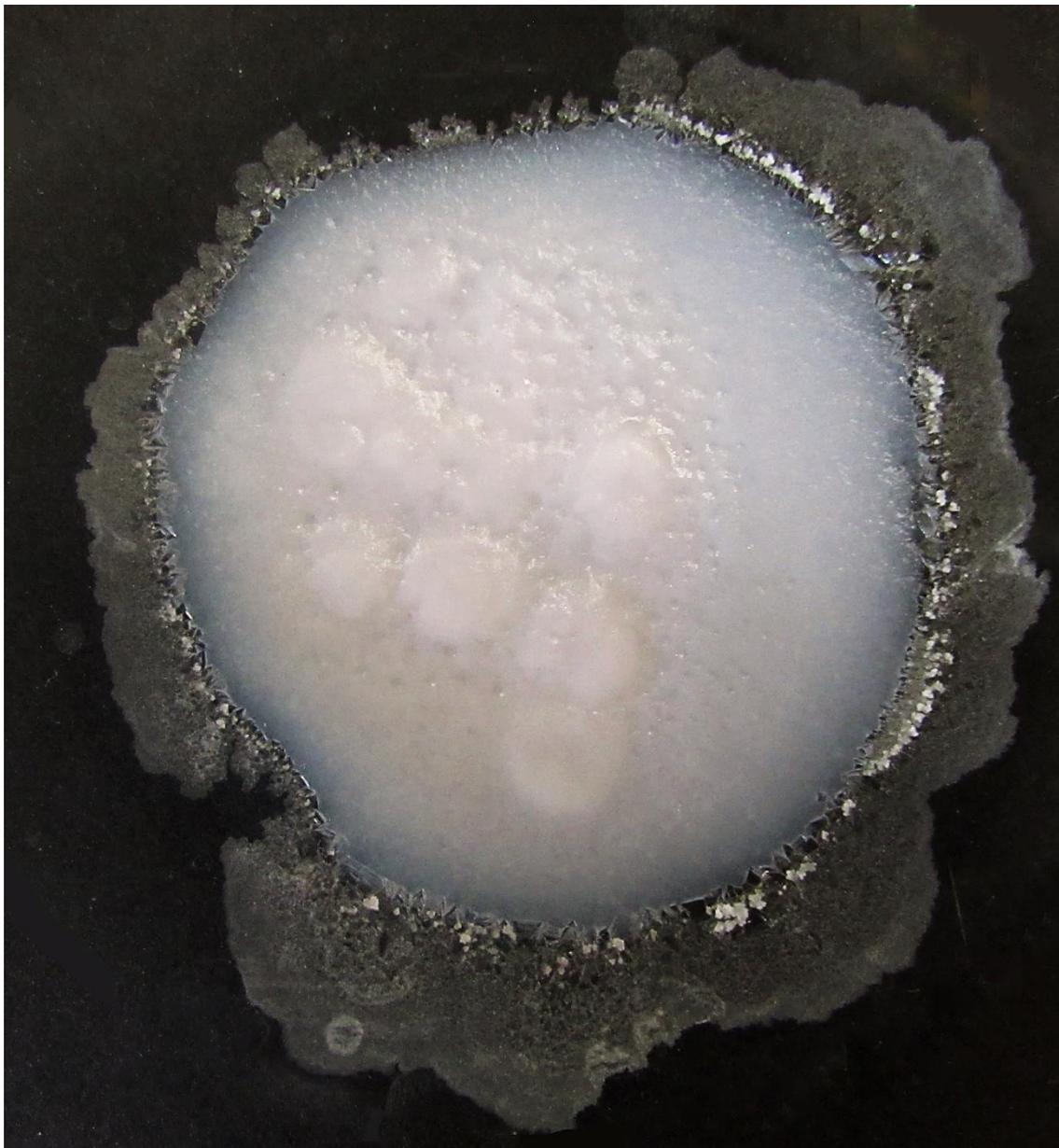
Podemos ver el resultado de la precipitación en la serie de fotografías que incluyo a continuación. En la última imagen cambio el fondo para que se aprecie mejor el color rosado del carbonato de erbio.



El precipitado aparece en forma de grumos, una textura diferente a la de los precipitados anteriores. Estos grumos caen al fondo por gravedad rápidamente. En las imágenes ampliadas se puede ver el proceso con claridad, distinguiéndose algunas burbujas de CO_2 en la parte de abajo a medida que aumenta el precipitado.



Tras separar por simple decantación (sin filtrar) el $\text{Er}_2(\text{CO}_3)_3$ queda como se ve en la imagen, aunque el color rosado en vivo se aprecia mucho mejor que en la fotografía, donde apenas si se capta una leve tonalidad rosácea demasiado pálida.



I) OBTENCIÓN DEL SULFURO DE ERBIO

El Er_2S_3 es un compuesto de color pardo o pardo rojizo⁴⁴, por lo que representa una novedad entre tantos compuestos del erbio que tienen un color rosado. No obstante su color varía mucho dependiendo de la fase en la que se encuentre, ya que recién formado, en el tubo de ensayo, presenta un aspecto pardo amarillento, mientras que una vez filtrado y seco, se oscurece y se vuelve de un color marrón ocre. La forma habitual

⁴⁴ Perry, D.L., op.cit. p. 165.

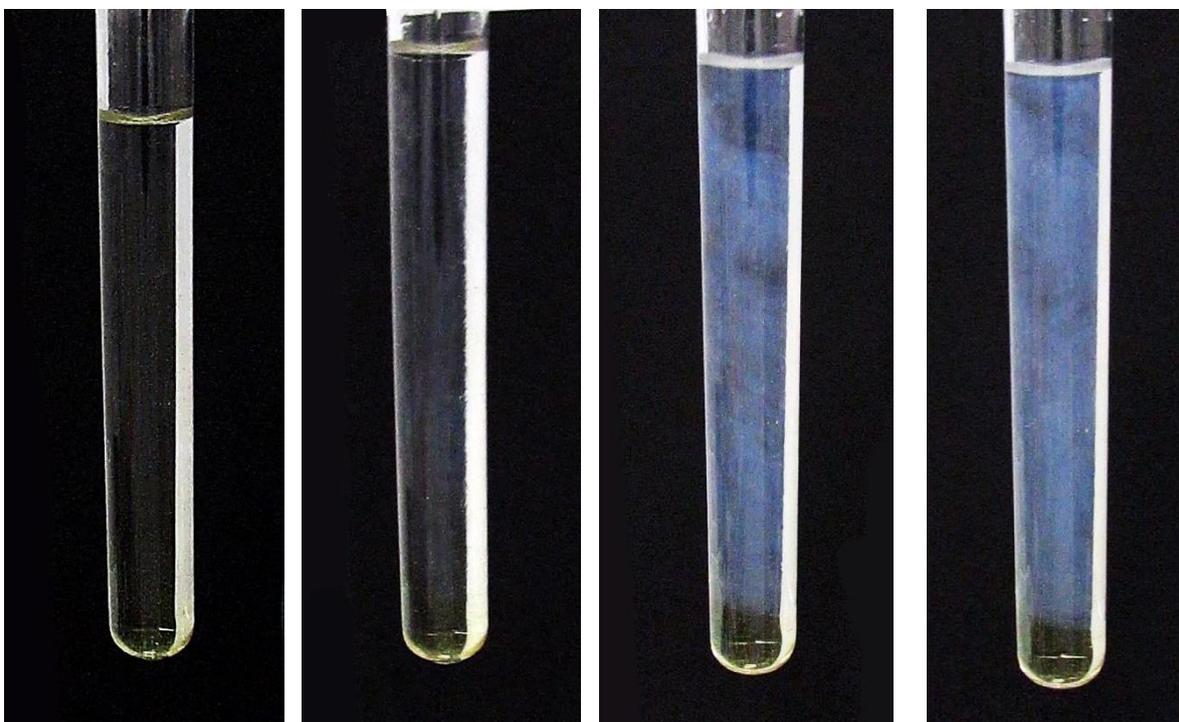
de preparar los sulfuros de los lantánidos consiste en someter el catión trivalente al H_2S (g) para formar el sulfuro estequiométrico correspondiente⁴⁵. Para ello basta con añadir Na_2S a la disolución ácida que contiene al Er^{+3} de manera que el S^{-2} provoque la precipitación del Er^{+3} y paralelamente se forme sulfuro de hidrógeno, que se escapa del tubo con su particular hedor a huevos podridos que obliga a hacer la reacción en el interior de la campana de extracción. El sulfuro de erbio, según se indica en la página web de suministradores del compuesto⁴⁶, es parcialmente soluble en agua, lo que explicaría el color amarillento de las aguas madres, una vez que ha precipitado buena parte del Er_2S_3 en el fondo del tubo.

La reacción de precipitación del Er_2S_3 es:



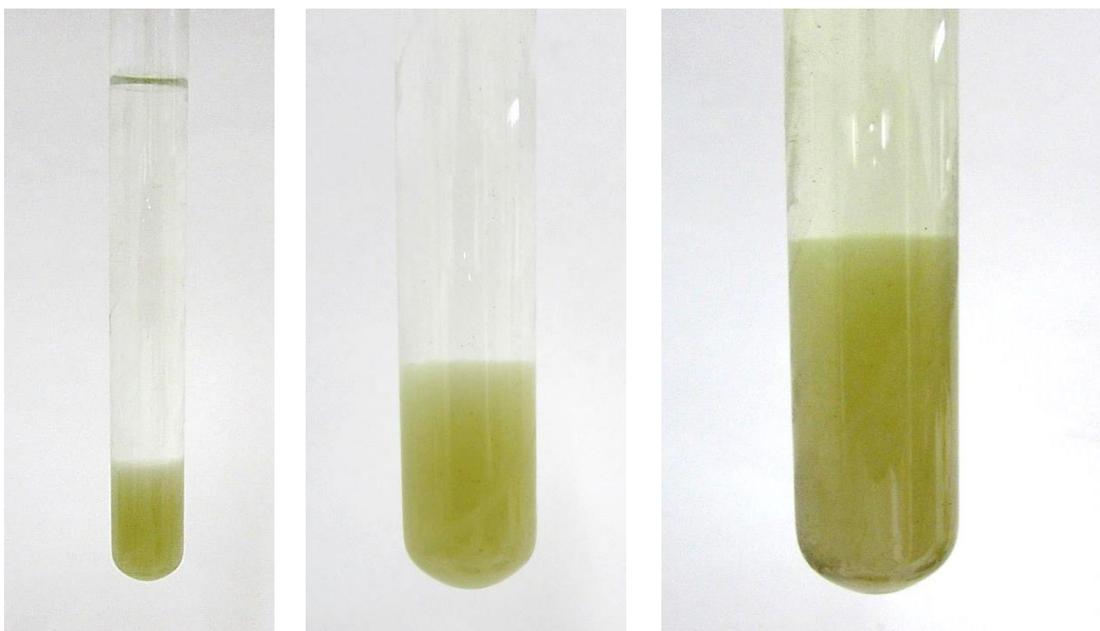
Para llevar a cabo la experiencia he añadido primero unas gotas de Na_2S disuelto en agua destilada, y más tarde unas escamas de Na_2S directamente a la disolución de ácido nítrico que contiene al catión de Er^{+3} . El desprendimiento de H_2S se produce de forma bastante perceptible desde el primer momento, por lo que hay que llevar a cabo la reacción en la campana de extracción. A medida que aumenta la concentración de S^{-2} va precipitando el Er_2S_3 como precipitado de color pardo amarillento, de igual modo que parte del sulfuro de erbio se solubiliza y colorea la disolución con un tono amarillo.

Aquí vemos las fotografías del proceso de precipitación:



⁴⁵ Cotton, S. (2006). op.cit. p. 32.

⁴⁶ <https://www.alfa-chemistry.com/product/erbium-sulfide-cas-12159-66-9-48979.html>
(Acceso el 24/12/2023)



Tras filtrar el resultado tiene un color más oscuro, pero que al secarse vuelve a oscurecerse hasta el color marrón pardo definitivo.



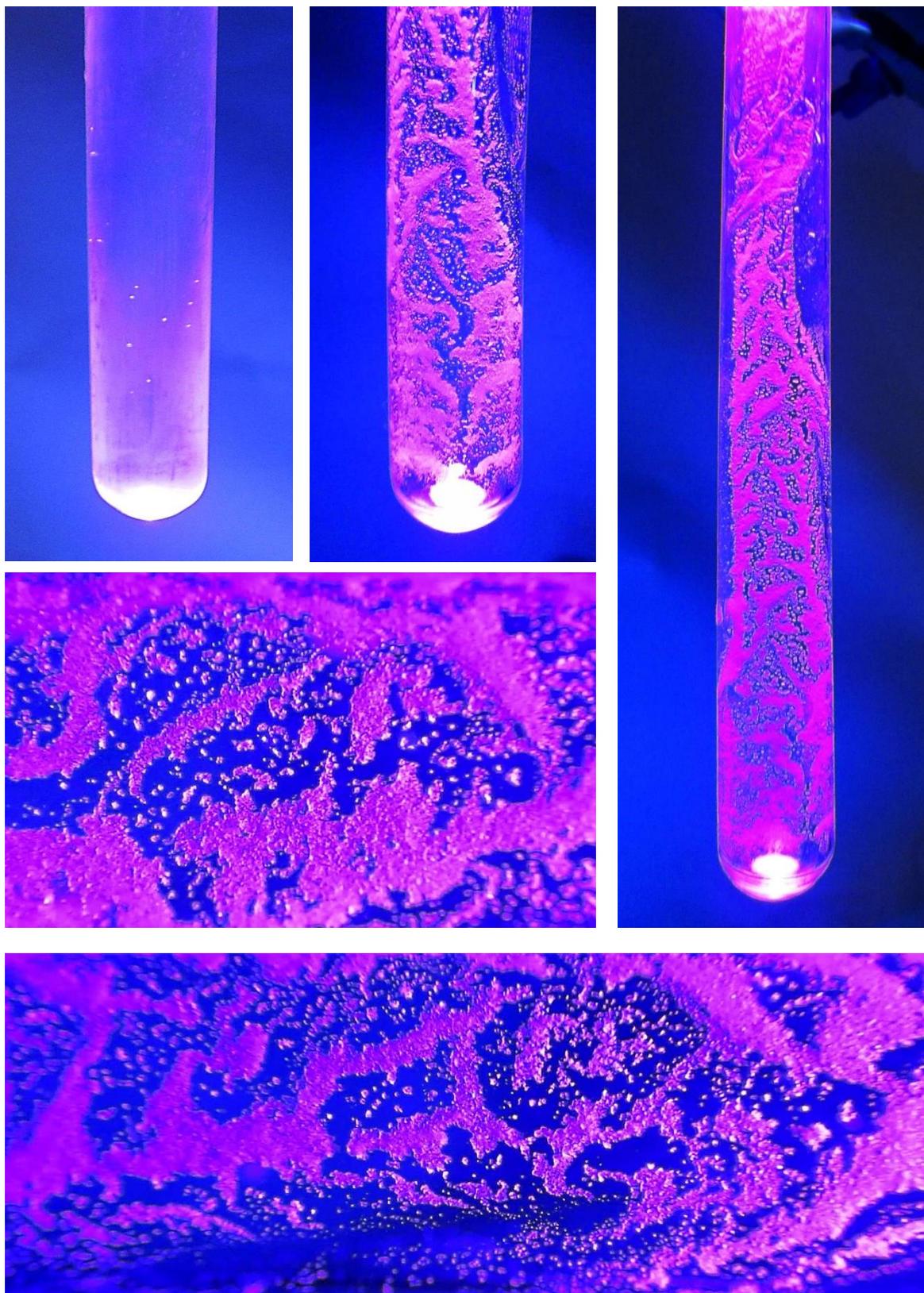
J) LUMINISCENCIA DEL ERBIO (III)

Casi todos los lantánidos en su estado de oxidación +3, con excepción⁴⁷ del La^{+3} (f^0) y del Lu^{+3} (f^{14}) presentan luminiscencia con la luz ultravioleta, particularmente destacable en los casos del Eu^{+3} y del Tb^{+3} , pero que a baja temperatura puede observarse en prácticamente todos los lantánidos. Esta fluorescencia se debe a transiciones 4f-4f como es de esperar⁴⁸ al ver que sólo está ausente en los cationes con f^0 y f^{14} . En el caso particular del Er^{+3} la fluorescencia es de color rosa, pero fácilmente perceptible en condiciones de oscuridad y usando luz negra, como podemos ver.

⁴⁷ Shriver, D.F., Atkins, P. (2006). Inorganic Chemistry. Oxford, UK: Oxford University press, p.578.

⁴⁸ Housecroft, C.E., Sharpe, A.G. op.cit. p. 746.

En la primera de las imágenes vemos la fluorescencia de una disolución ácida de Er^{+3} donde tenemos el acuocomplejo $[\text{Er}(\text{H}_2\text{O})_8]^{+3}$ mientras que en las otras vemos la fluorescencia de los restos de $\text{Er}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ sobre las paredes del tubo de vidrio.



CONCLUSIONES

El erbio es un metal poco conocido al que puede sacársele partido en las Enseñanzas Medias gracias a que algunas de sus reacciones son sencillas y permiten extender la química habitual de nuestros laboratorios a elementos quizás más exóticos pero igualmente atractivos.

De entre todas las reacciones del erbio que he llevado a cabo en este artículo, considero que la oxidación del metal en agua caliente, seguido de la hidrólisis y formación del $\text{Er}(\text{OH})_3$ es la más interesante desde el punto de vista académico. La cadena formada por la reacción de óxido-reducción, seguida por la de hidrólisis con formación de un hidróxido que a su vez es insoluble, permite ejemplificar con una única experiencia varios conceptos químicos de gran importancia.

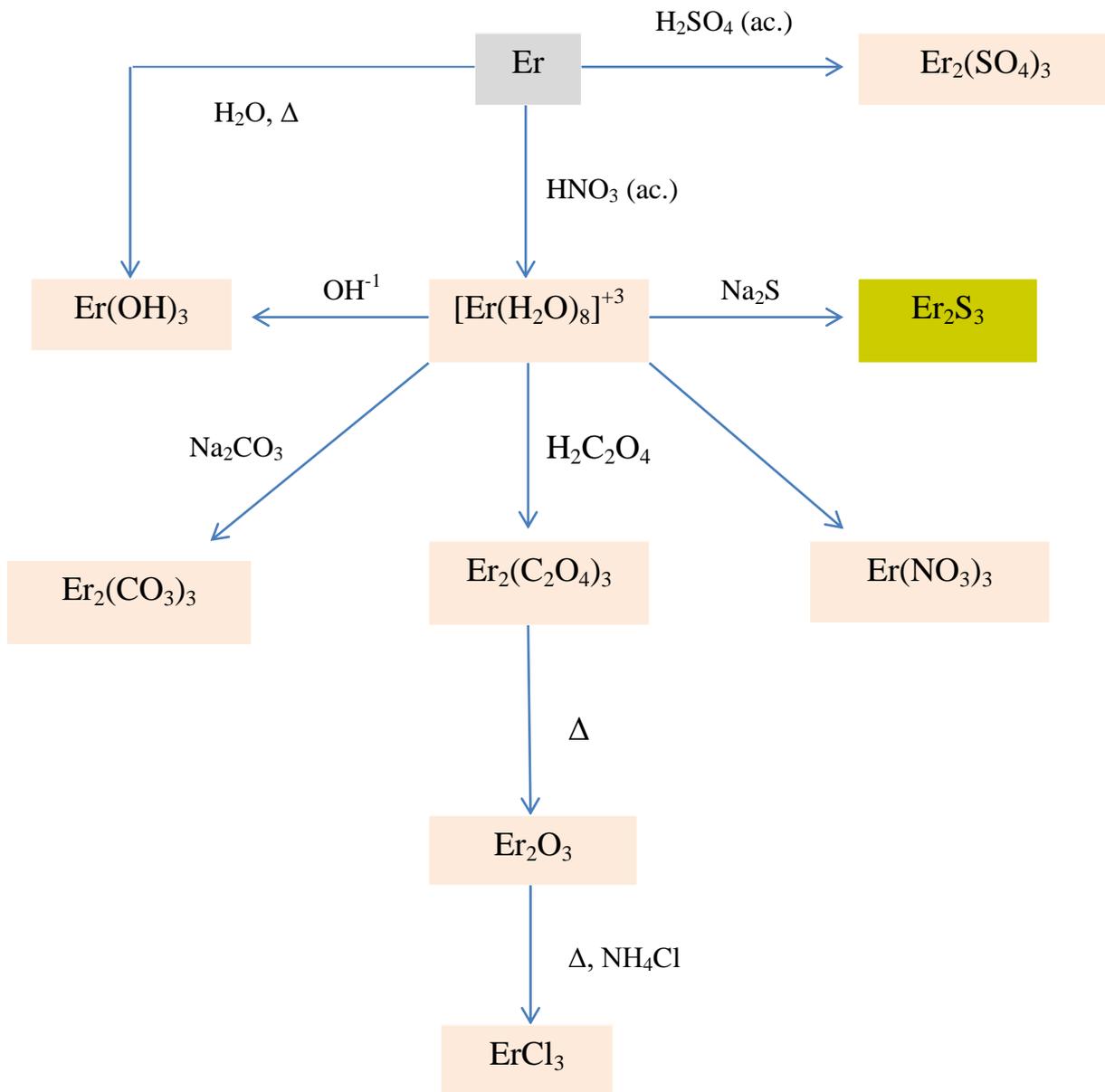
Por otra parte hay una cadena de reacciones de gran atractivo pedagógico que se puede llevar a cabo en un laboratorio de nivel medio como el nuestro. Así es muy interesante obtener el Er^{+3} por oxidación del metal en ácido nítrico, formar el oxalato de erbio a través de una precipitación cuantitativa, comprobar la luminiscencia de este compuesto por medio de una lámpara de rayos ultravioleta, antes de llevar a cabo la síntesis del óxido de erbio por descomposición térmica del oxalato, que es una reacción prototípica de los lantánidos. Si a la formación del Er_2O_3 le unimos la síntesis de ErCl_3 usando una vía más adecuada que la que yo he empleado aquí, tenemos una serie de reacciones concatenadas de enorme potencial pedagógico.



Una ventaja que presenta el erbio, por otra parte, es que según los estudios realizados hasta el momento, es un metal de baja toxicidad y por tanto apropiado para ser utilizado en los laboratorios de Secundaria y Bachillerato.

En cambio, un problema obvio que hay que considerar antes de emplearlo con el alumnado, es el hecho de que la mayor parte de los compuestos del erbio (III) que he obtenido en este artículo, es de color rosa pálido. Las diferencias entre las diferentes tonalidades son escasas, y en gran medida dependen más de las condiciones en las que se han sintetizado que de las que pudiera haber entre los compuestos puros. Hay que tener en cuenta que no tengo un particular interés en purificar los productos de síntesis, debido al enfoque cualitativo de la publicación. Eso hace que el alumnado tenga dificultades a la hora de seguir la progresión de las reacciones o que encuentre interés cuando los compuestos buscados tienen aproximadamente la misma apariencia. Por eso, no es razonable incluir más de un compuesto de erbio en las prácticas, salvo que sea la cadena de reacciones sugerida más arriba.

Este es el cuadro final de las diferentes reacciones del erbio que he usado en esta investigación básica:



BIBLIOGRAFÍA

- Alemayehu, A., Zakharanka, A., Tyrpekl, V. (2022). Homogeneous Precipitation of Lanthanide Oxalates. *ACS Omega*, 7, 14, pp:12288-12295.
- Balboul, B.A.A. (2000). Thermal decomposition study of erbium oxalate hexahydrate. *Thermochimica Acta*, 351, 1-2, pp. 55-60.
- Brauer, G. (1963). *Handbook of preparative Inorganic Chemistry. Volume 1.* Londres, Gran Bretaña: Academic Press.
- Burriel Martí, F., Lucena Conde, F., Arribas Jimeno, S., Hernández Méndez, J. (1992). *Química Analítica Cualitativa.* Madrid, España: Paraninfo.
- Cotton, F.A., Wilkinson, G. (1990). *Química Orgánica Avanzada.* Méjico D.F., Méjico: Editorial Limusa.
- Cotton, S. (2005). Establishing coordination numbers for the lanthanides in simple complexes. *Comptes Rendus Chimie*, 8, 2, pp: 129-145.
- Cotton, S. (2006). *Lanthanide and Actinide Chemistry.* West Sussex, Gran Bretaña: John Wiley & Sons.
- Das, G. et al. (2019). Rare earth sulfates in aqueous systems: Thermodynamic modeling of binary and multicomponent systems over wide concentration and temperature ranges. *J. Chem. Thermodynamics*, 131, pp: 49-79.
- De Almeida, L., Grandjean, S., Vigier, N., Patisson, F. (2012). New insights on the thermal decomposition of lanthanide (III) and actinide (III) oxalates: from neodymium and cerium to plutonium. *Eur.J.Inorg.Chem.*, 31, pp: 4986-4999.
- Dong-Yong Chung, Eung-Ho Kim, Eil-Hee Lee, Jae-Hyung Yoo. (1998). Solubility of Rare Earth Oxalate in Oxalic and Nitric Acid Media. *Journal of Industria and Engineering Chemistry*, 4, 4, pp: 277-284.
- Emsley, J. (2003). *Nature's building blocks: an A-A guide to the elements.* Oxford, Gran Bretaña: Oxford University Press.
- Fresenius, C.R. (1880). *Manual of Qualitative Chemical Analysis.* Nueva York, EEUU: John Wiley & Sons Publishers.
- Greenwood, N.N., Earnshaw, A. (1990). *Chemistry of the Elements.* Oxford, Gran Bretaña: Pergamon Press.
- Haley, T. J. (1965). *Pharmacology and Toxicology of the Rare Earth Elements.* J. Pharm. Sc, 54.
- Housecroft, C.E., Sharpe, A.G. (2005). *Inorganic Chemistry.* Harlow, Gran Bretaña: Pearson.
- Martincic, M., Frontera, C., Pach, E., Ballesteros, B., Tobias, G. (2016). Synthesis of dry SmCl₃ from Sm₂O₃ revisited. Implications for the encapsulation of samarium compounds into carbon nanotubes. *Polyhedron*, 116, pp: 116-121.
- Meyer, G. (1989). "The Ammonium Chloride Route to Anhydrous Rare Earth Chlorides—The Example of YCl₃". En Harry R. Allcock *Inorganic Synthesis*, volume 25. Nueva York, EEUU: John Wiley & Sons.
- Patnaik, P. (2003). *Handbook of Inorganic Chemicals*, McGraw-Hill, edición PDF.

- Perry, D.L. (2011). Handbook of Inorganic Compounds. Boca Raton, EEUU: CRC Press.
- Shriver, D.F., Atkins, P. (2006). Inorganic Chemistry. Oxford, UK: Oxford University press.
- Song, L., Rongjun, M. (2007). Synthesis and Characterization of Hydrated Holmium and Erbium Carbonates. Asian Journal of Chemistry, 19, 3, pp: 1883-1887.
- Sungur, A., Kizilyalli, M. (1983). Synthesis and structure of $Gd_2(CO_3)_3 \cdot nH_2O$ (n=2,3). Journal of the Less Common Metals, 93, 2, pp: 419-423.
- Xia Q, Liu H X, Yang X D, et al. (2012). The Neural Toxicity of Lanthanides: An Update and Interpretations. Sci. China Chem., 42, 9.

OTROS RECURSOS EMPLEADOS

Fichas de compuestos químicos:

Para el Er_2O_3 :

<https://www.sigmaaldrich.com/ES/es/product/aldrich/203238>

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5123419#section=Physical-Description>

Para $ErCl_3$:

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/66277#section=Experimental-Properties>

Para NH_4Cl :

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/25517#section=Experimental-Properties>

Para Er_2S_3 :

<https://www.alfa-chemistry.com/product/erbium-sulfide-cas-12159-66-9-48979.html>

Para compuestos del erbio:

<https://winter.group.shef.ac.uk/webelements/erbium/chemistry.html>