

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

Autor: Martínez-Troya, D.¹

RESUMEN

Siguiendo la línea de los trabajos anteriores, en este artículo se examina la utilidad pedagógica de usar óxidos, hidróxido y otros compuestos de neodimio 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 nitrato, el fosfato, el oxalato y el carbonato de Nd^{+3} y se descompone térmicamente tanto el nitrato como el oxalato hasta obtener el óxido de neodimio (III). El óxido de neodimio (III) se obtiene a su vez directamente a partir de la exposición del metal al aire. Además, se sintetizan el sulfuro y los yoduros de neodimio (II) y (III).

Palabras clave: Óxido de neodimio; Hidróxido de neodimio; Carbonato de neodimio; Oxalato de neodimio; Nitrato de neodimio; Sulfuro de neodimio; Sulfato de neodimio; Fosfato de neodimio; Yoduro de neodimio.

ABSTRACT

Continuing precedent works, in this paper I study the pedagogic advantages of using neodymium oxides, hydroxide, and other neodymium compounds in laboratory practices in High School. After solving the metal in acid or water, I accomplish the formations of neodymium hydroxide, sulfate, nitrate, phosphate, oxalate, carbonate and neodymium (III) oxide by thermal decomposition of the nitrate and oxalate. Neodymium (III) oxide can be obtained easily by air exposure of the metal. In addition, I synthesize neodymium (II) and neodymium (III) iodide and the sulfide.

Key words: Neodymium oxide; neodymium hydroxide; neodymium carbonate; neodymium oxalate; neodymium nitrate; neodymium sulfide; neodymium sulfate; neodymium phosphate; neodymium iodide.

NOTA PREVIA

Como ya he indicado en anteriores artículos, al ser los lantánidos tan parecidos entre sí resultaría más práctico englobarlos a todos en un mismo trabajo y remarcar las diferencias que encontramos entre ellos. Sin embargo, en estos artículos me gusta explorar la química de cada metal por separado, por lo que el cuerpo del artículo es esencialmente el mismo que el correspondiente al artículo del erbio, el primero que utilicé en esta línea de trabajo que estudia la bondad de los lantánidos como recurso pedagógico en los laboratorios de las enseñanzas medias. Es lógico por tanto que haya una repetición de apartados, párrafos, explicaciones y referencias.

¹ Daniel Martínez Troya vaergael@gmail.com

INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

El neodimio tiene una abundancia² en la corteza de 41.5 mg/Kg, que representa unas 11.86 veces la abundancia del erbio y es más abundante que el cadmio con 0.15mg/Kg, que el oro con 0.004mg/Kg, que la plata con 0.075mg/Kg o que el yodo con 0.45mg/Kg, por poner ejemplos conocidos. Es decir, 553 veces más abundante que la plata y 10375 veces más abundante que el oro. Por ello, como ya comenté en el artículo del erbio, incluir algún lantánido en las prácticas de laboratorio de los centros de enseñanza, favorece el conocimiento de este grupo de elementos tradicionalmente olvidados.

Al margen de la abundancia de los lantánidos, hay que resaltar una baja toxicidad³, de manera que los compuestos del neodimio no parecen tener una peligrosidad que vaya más allá de la que conlleva 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 (como ocurre 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

Siguiendo el protocolo de trabajo con los lantánidos que he llevado a cabo al escribir los artículos anteriores, en este trabajo comenzaré exponiendo un trozo metálico de neodimio tanto a agua fría como caliente, para ver qué diferencias se producen en el proceso de oxidación del metal en agua. Después pasará a disolverlo en disoluciones de ácido nítrico y ácido sulfúrico, obteniendo por desecación $\text{Nd}_2(\text{SO}_4)_3$ y $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$. A partir de la disolución de neodimio en ácido nítrico, donde encontramos el catión Nd^{+3} de color violeta, obtendré el carbonato, el hidróxido, el oxalato y el fosfato por adición en exceso de Na_2CO_3 , NaOH (y alternativamente NH_3 (ac.)), $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$, así como Na_3PO_4 . En estos procesos se obtienen respectivamente $\text{Nd}_2(\text{CO}_3)_3$, $\text{Nd}(\text{OH})_3$, $\text{Nd}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ y NdPO_4 que son de una tonalidad rosa pálido. Por descomposición térmica del $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$ y del $\text{Nd}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ sintetizaré el óxido de neodimio, aunque ya se puede separar directamente a partir de los trozos de metal procedentes del mercado, que al no estar aislados se oxidan superficialmente, formando el Nd_2O_3 que se desprende fácilmente, aunque a su vez forma una pátina primera que pasiva parcialmente al metal, como ya

² Haynes, W.M. (2016–2017). CRC Handbook of Chemistry and Physics, 97th edition. BocaRaton, EEUU: CRC Press, p. 14-17.

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.

Cf. Kyung Taek Rim, Kwon Ho Koo, Jung Sun Park. (2013). Toxicological Evaluations of Rare Earths and Their Health Impacts to Workers: A Literature Review. Safety and Health at Work, 4, 1, pp: 12-26.

veremos. El óxido de neodimio (III) obtenido por la mera exposición del metal al aire, es de color rosado o celeste pálido con visos violáceos.

De forma adicional se elabora Nd_2S_3 por reacción directa de los elementos, que se calientan dentro de un crisol. Como siempre, una reacción de gran interés es la síntesis de NdI_3 y NdI_2 por exposición directa a yodo y posterior calentamiento, al igual que ocurría en el caso del tulio. La reacción es curiosa desde el momento en el que los dos elementos entran en contacto, por lo que tiene un gran interés pedagógico, sobre todo por la química que implica.

Como es habitual para los lantánidos, la información acerca del neodimio y de sus compuestos, es escasa, siendo tradición tratarlos a todos en conjunto al tener unas características físico-químicas muy parecidas. Es lo más razonable, aunque yo haya preferido tratarlos de forma individual en esta serie de artículos que difieren escasamente unos de otros.

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD

A) EL METAL NEODIMIO

El neodimio⁵ es un metal de color blanco plateado, blando y maleable, de densidad 7.004 g/cm^3 , que se corroe fácilmente al aire formando un recubrimiento purulento de color gris celeste o rosado, dependiendo de la luz, que no protege completamente al metal, pero que basta como para que la oxidación en agua sea particularmente lenta. Al principio se adhiere bien, pero con el tiempo el grosor aumenta, se agrieta y se desprende, sin llegar a proteger al metal de forma efectiva.

Compré 10g de neodimio procedente de China, que recibí en abril, pero ya entonces presentaban una superficie de color grisácea y mate, no brillante, a pesar de venir empaquetados al vacío. Al abrir la bolsita se apreciaba la presencia de un polvo de color gris azulado, que se corresponde al color del Nd_2O_3 según la bibliografía⁶. La humedad ambiental acelera este proceso de corrosión⁷ como suele ocurrir con el resto de metales. Aunque en experimentos bien parametrizados se diga que el praseodimio es algo más resistente al aire que el europio, el lantano, el cerio y el neodimio⁸, mi experiencia con este último es contraria a ello, y la muestra de praseodimio con la que trabajé anteriormente se oxidaba a un ritmo mayor que la muestra que tengo de neodimio. Estos metales suelen protegerse sumergidos en compuestos orgánicos, bajo atmósfera neutra o en recipiente perfectamente sellados. Cuando se raspa se aprecia el color brillante del metal, pero al eliminar la capa de óxido con una disolución ácida, el resultado es una superficie negra debido a los poros que el ácido forma en la superficie⁹.

⁵ Patnaik, P. (2003). Handbook of Inorganic Chemicals, McGraw-Hill, edición PDF, pp. 597.

⁶ Patnaik, P. Op.cit. p. 600.

⁷ Ibidem, p. 598.

⁸ Haynes, W.M. Op.cit. p. 4-28.

⁹ Martínez-Troya, D. (2024). Uso del óxido y del hidróxido de samario, así como de otros compuestos de este metal, en las enseñanzas medias. Revista Bórax, 5, 1, p. 118.

Un efecto que he observado consiste en el cambio de color del Nd_2O_3 cuando recibe la luz del sol respecto al que posee cuando sólo recibe la luz de los fluorescentes del laboratorio. Bajo el sol, su color se aprecia “color lavanda”, es decir, rosáceo o violeta pálido, mientras que a la luz de los fluorescentes del laboratorio se aprecia gris celeste¹⁰, un fenómeno que me recuerda al ya visto para el Er_2O_3 . Esta disparidad de color, que es menos intensa que en el caso del óxido de erbio (III) es muy interesante de apreciar y es un fenómeno muy estudiado cuando el óxido de neodimio (III) se incorpora a cerámicas y vidrios.

Vemos algunas de las imágenes del metal:



Aquí se aprecia el polvo rosa del Nd_2O_3 que se ha formado por contacto con el aire sobre la superficie del metal neodimio puro. La temperatura del laboratorio a lo largo de estos meses no ha sido particularmente alta, manteniéndose en torno a los 20°C durante el día. El polvo se desprende fácilmente, pero para limpiar de óxido la superficie del metal no basta con frotar con un papel o con un trozo de tela, sino que hay que utilizar una lima, dado que la primera capa de óxido se une muy bien al metal y le da un aspecto pétreo, perdiendo por completo el brillo metálico. De hecho, y pese a lo que indica la bibliografía, la reacción que se produce al sumergir en agua el metal es muy lenta, incluso cuando se calienta a la llama, lo que indica que la primera capa de óxido adherida logra pasivar al metal, al menos frente a la acción del agua. Después de raspar vemos la superficie brillante, pero cubierta de arañazos y raspones. El color del metal es gris plateado, blanco y brillante, como indica el libro de P. Patnaik.

¹⁰ Spellman, F.R. (2023). The Science of Rare Earth Elements. Concepts and Applications. Boca Raton, EEUU: CRC Press, p. 66.



Trozo de metal tras limpiarlo con un paño



El mismo trozo tras rasparlo con la lima

En las imágenes siguientes vemos al metal oscurecido, tras ser sometido a una disolución ácida de sulfúrico. Los microagujeros que produce en la superficie la acción del ácido provocan que se vea de color negro mate, algo que como ya se ha indicado, es propio de la mayoría de los metales, sin embargo, aquí podemos ver zonas de un color marrón bastante conspicuo que no es habitual y que podría deberse a la presencia de praseodimio en el metal, a pesar de que el porcentaje de pureza, según la etiqueta, es del 99.5%.



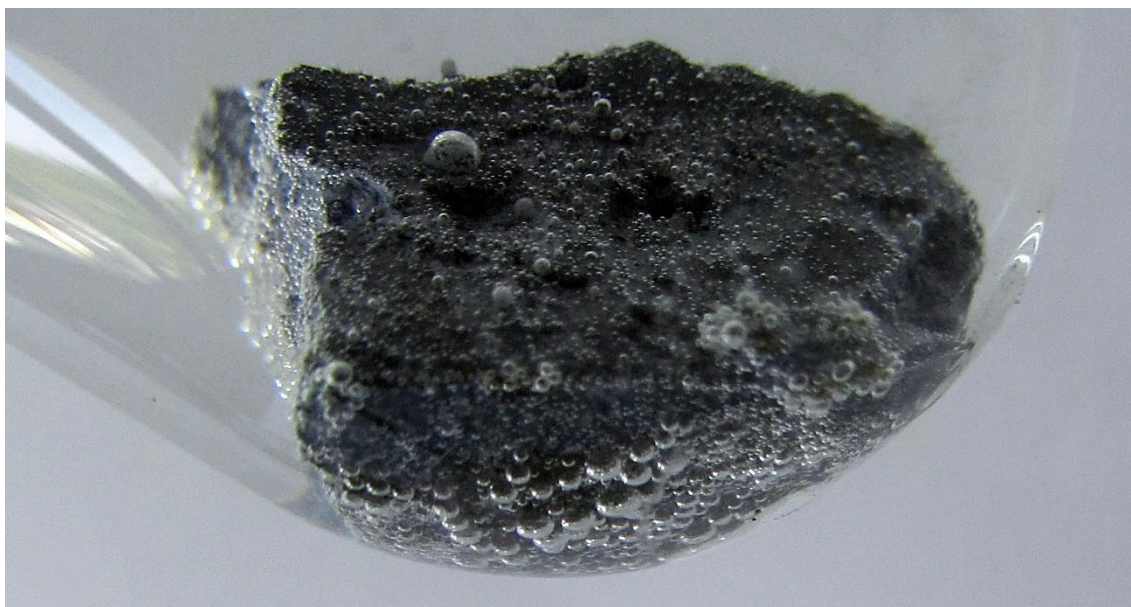
Posible presencia de Pr junto al Nd

La presencia de sulfatos más o menos insolubles e hidratados de ambos metales, del Pr contaminante, de color verde, y del Nd, de color rosado, no pueden extrañarnos dado que el praseodimio y el neodimio son difíciles de separar y suelen aparecer juntos.

Recordemos el antiguo didimio¹¹, como supuesto elemento, que en realidad era una mezcla de ambos. Estos colores verdosos del praseodimio, combinados con los tonos oscuros del metal agujereado y la coloración rosácea de los sulfatos del neodimio, podrían explicar el recubrimiento marrón observable, por mera superposición de colores.

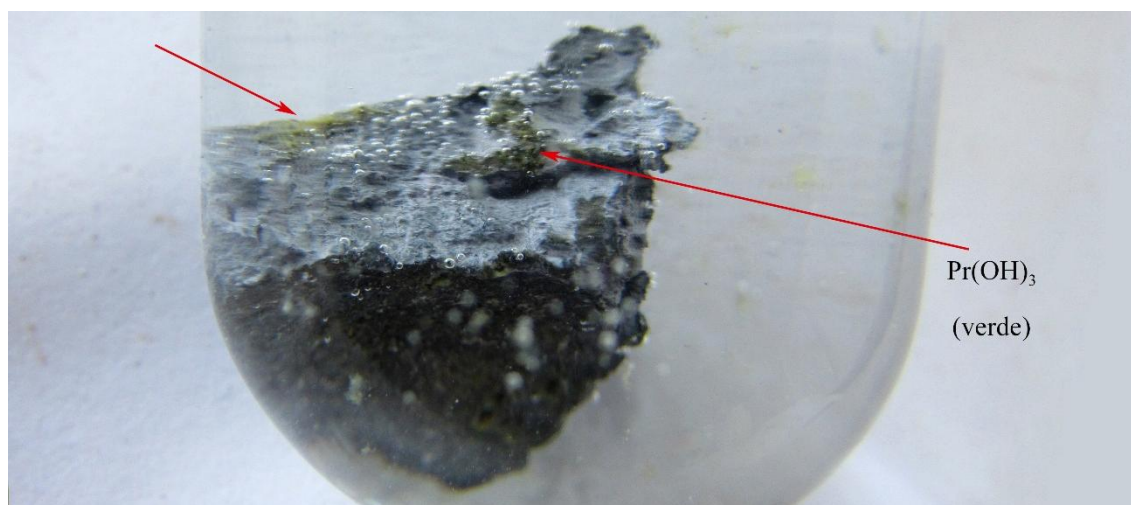
B) FORMACIÓN DEL HIDRÓXIDO POR HIDRÓLISIS EN AGUA

La reacción directa de los lantánidos con el agua es una de las reacciones más interesantes que podemos llevar a cabo en un laboratorio de secundaria. Sin embargo, al poner en contacto el neodimio con el agua tarda en producirse la típica reacción de oxidación del metal, con formación de H_2 gaseoso, que se desprende en burbujas. Al igual que ocurrió con el holmio, estos trozos de neodimio son compactos y reaccionan muy lentamente con el agua a la temperatura ambiente de $25^\circ C$. Aquí vemos que el metal se recubre rápidamente de burbujas de hidrógeno, pero la reacción es lenta y el burbujeo no es evidente a esa temperatura.

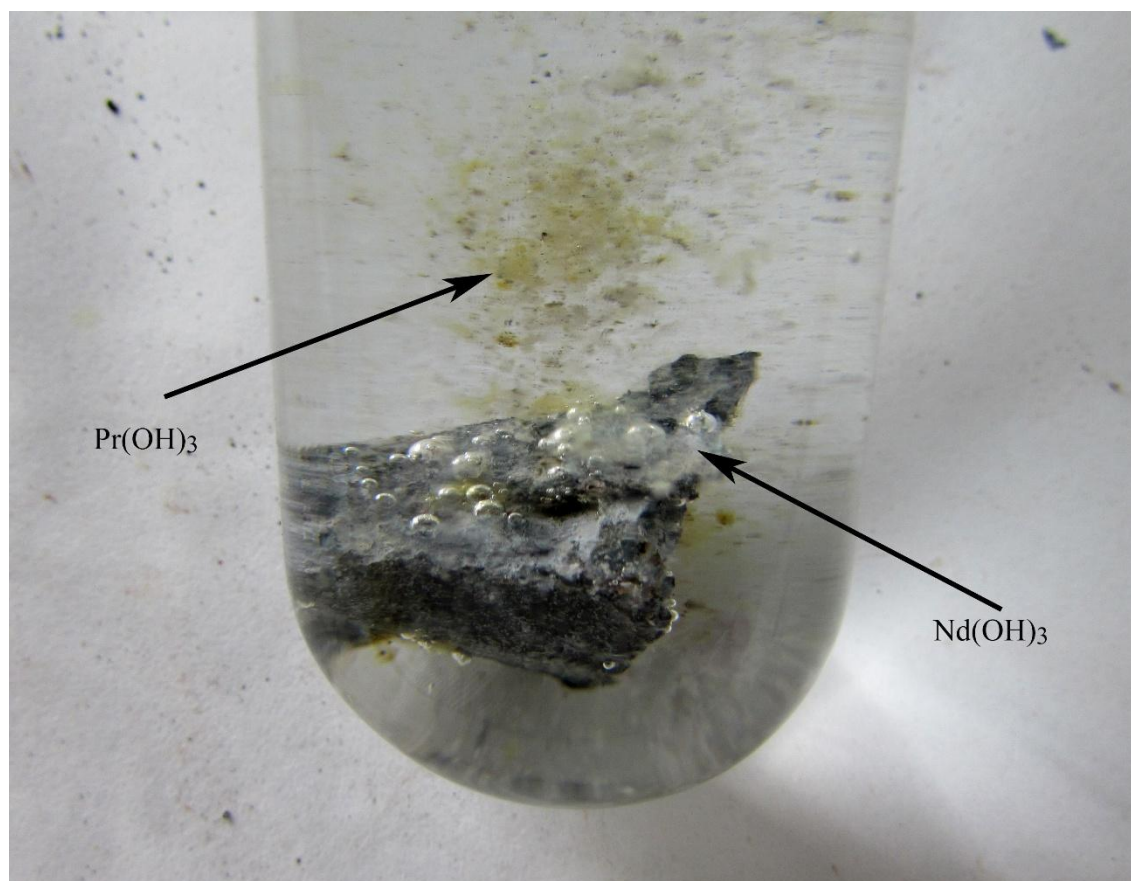


Tras dejar un trozo de neodimio unas horas en el tubo de ensayo, vemos que aparece una especie de niebla en torno al metal, que se ve de un color blancuzco pero que tarda bastante en desarrollarse hasta hacerse evidente. De hecho, antes incluso que el $Nd(OH)_3$ de color rosado, lo primero que he apreciado es la formación un compuesto de color verde recubriendo algunas zonas de la superficie en forma de parches. Este compuesto, necesariamente tiene que ser $Pr(OH)_3$, que poco a poco se desarrolla en forma de pequeñas formaciones amarillas que se diferencian mucho respecto a las correspondientes del neodimio.

¹¹ Enghag, P. (2004). Encyclopedia of the Elements. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. p. 454.



Dos días más tarde el hidróxido de neodimio (III) es visible, aunque no tiene el aspecto rosado esperado, sino que es de un color blanco sucio, que con el tiempo se vuelve beige grisáceo.



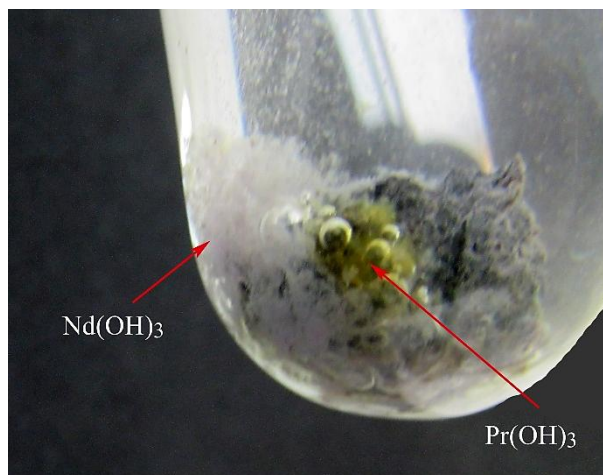
Cuando se emplea agua caliente (a unos 80°C) el proceso no cambia mucho y, aunque es cierto que hay un mayor burbujeo, no se mantiene y disminuye a medida que se enfría el agua. Las burbujas se vuelven más gruesas, aunque para ver un burbujeo

continuo es necesario calentar a la llama. No obstante, la reacción sigue siendo lenta y el burbujeo continuado se detiene al retirar la llama.

Las siguientes imágenes son precisamente de un trozo de neodimio sometido a agua caliente y calentado repetidas veces a la llama, aplicada únicamente para sostener el burbujeo durante una media hora.

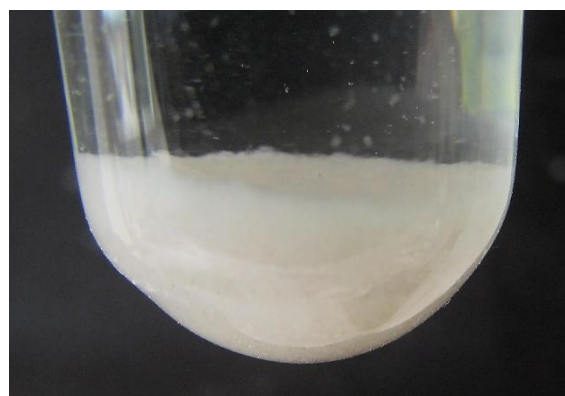


Nd en agua a 80°C



Ese mismo neodimio dos días más tarde

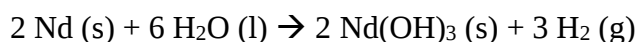
En la imagen de la derecha se aprecian perfectamente los colores de los dos hidróxidos, el de tonalidad rosa es el objetivo de la experiencia, el $\text{Nd}(\text{OH})_3$. Una vez separados los precipitados insolubles y reunidos en un solo tubo, se tiene el $\text{Nd}(\text{OH})_3$ de un color beige grisáceo, con visos azulados, que se aprecian únicamente en algunos ángulos y perspectivas, o beige rosáceo, como podemos ver en las dos imágenes siguientes en la que únicamente he cambiado el fondo.



Desde el punto de vista químico se trata de una reacción de hidrólisis, que se produce de forma lenta a la temperatura ambiente y que se acelera con agua caliente, algo típico en los lantánidos¹².

¹² Cotton, F.A., Wilkinson, G. (1990). Química Orgánica Avanzada. México D.F., México: Editorial Limusa. p. 1190.

La reacción en medio neutro es la siguiente¹³:



El potencial rédox¹⁴ del neodimio es $\varepsilon(\text{Nd}^{+3}/\text{Nd}) = -2.32\text{V}$, por lo que es inestable al agua y reduce el H^{+1} a H_2 gaseoso, formando el hidróxido correspondiente, que en el caso del neodimio tiene un color azulado o rosa¹⁵, aunque difiere bastante dependiendo de la luz empleada y de la densidad del precipitado, como ya veremos más adelante. En bastantes páginas se le define como un precipitado insoluble de color blanco¹⁶ o rosa pálido. He comprobado que el color final depende de muchos factores, entre los que están el método de obtención, la densidad del precipitado y, por supuesto, el grado de pureza.

C) DISOLUCIÓN DEL NEODIMIO EN NÍTRICO Y ACUOCOMPLEJO

En la disolución del neodimio en ácido nítrico concentrado se observa la emisión de gas NO_2 de color anaranjado. En disolución queda el catión Nd^{+3} , que tiene un color azul violeta o rosa violáceo que me ha sorprendido por su intensidad, acostumbrado a las tonalidades poco intensas de los lantánidos. Se aprecia mejor en el acuocomplejo¹⁷ que en las sales en las que participa¹⁸, como sucede con muchos lantánidos cuyas sales, hidróxidos u óxidos tienen un color más pálido.

La reacción química de oxidación del neodimio en ácido nítrico concentrado es la siguiente:



Al reaccionar vigorosamente hay que tener cuidado por si acaso rebosa el tubo de ensayo y perdemos parte de la disolución. Aquí he utilizado precisamente un segundo tubo, que tenía reservado para este menester, de manera que he separado en dos partes la disolución del neodimio trivalente. El color de las primeras fases de la disolución era rojizo, recordándome al color del samario (II), y haciéndome plantear hasta qué punto habría confundido la fugaz presencia del Sm^{+2} de color rojo con la combinación del NO_2 marrón y el amarillo del catión. De cualquier forma, aquí dicho color se mantuvo largo tiempo, para lentamente concretarse el tono de la disolución de un violeta rosado intenso.

He disuelto unos 2.5g de neodimio en unos 30 mL de disolución ácida de ácido nítrico al 40% en volumen aproximadamente. El $\text{Nd(NO}_3)_3$ tiene una solubilidad en agua de 142g por cada 100g de agua a 20°C, por lo que vemos que es muy soluble¹⁹.

¹³ Adaptado a partir de: Winter, M.J. (Departamento de Química, Universidad de Sheffield): <https://winter.group.shef.ac.uk/webelements/neodymium/chemistry.html>. (Visitado el 10/06/2025)

¹⁴ Cotton, S. (2006). Lanthanide and Actinide Chemistry. West Sussex, UK: John Wiley & Sons p. 20.

¹⁵ Perry, D.L. Op.cit. p. 285.

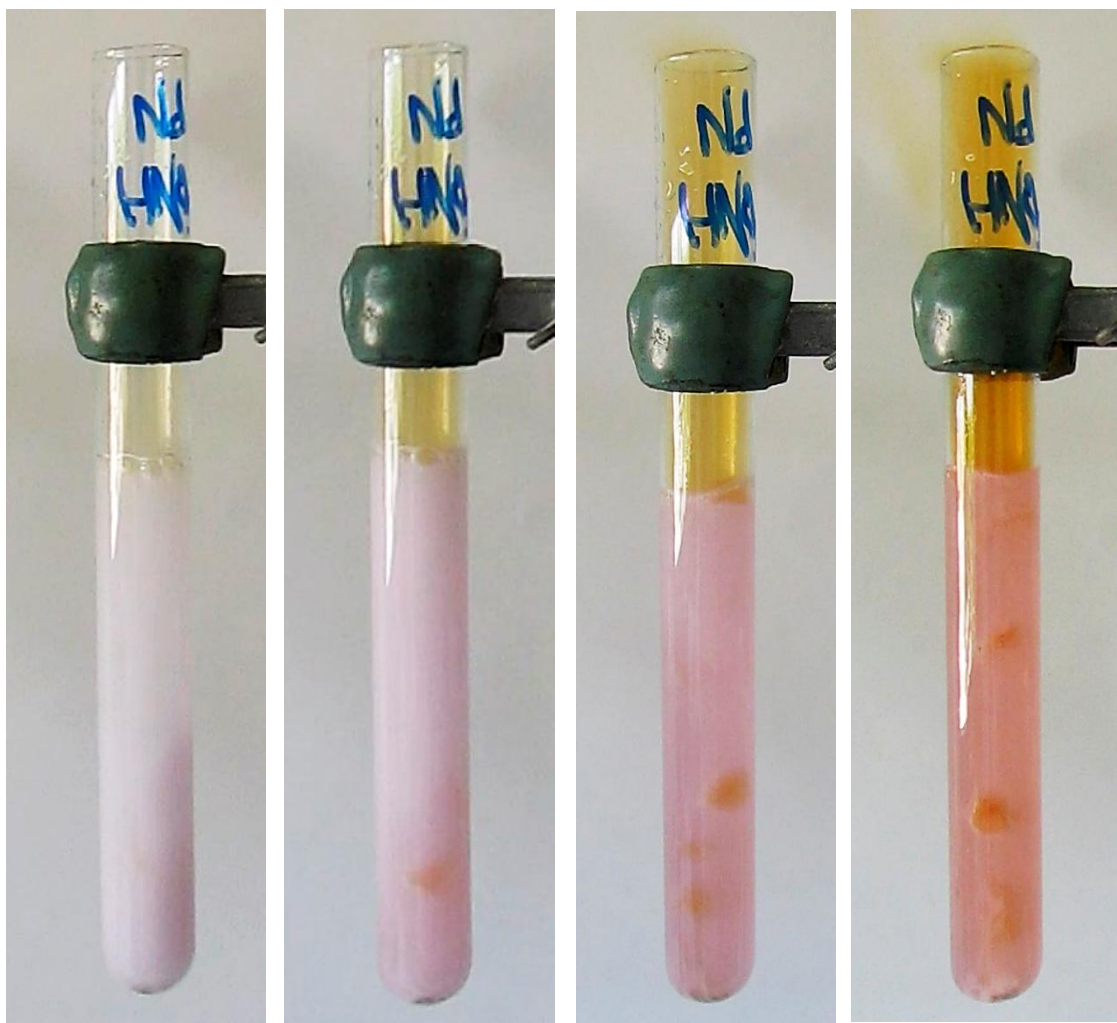
¹⁶ <https://cymitquimica.com/cas/16469-17-3?items=100> (Visitado el 10/06/2025).

¹⁷ Housecroft, C.E., Sharpe, A.G. (2005). Inorganic Chemistry. Harlow, Gran Bretaña: Pearson, p.745.

¹⁸ Greenwood, N.N., Earnshaw, A. (1990). Chemistry of the Elements. Oxford, UK: Pergamon.p. 1443.

¹⁹ Perry, D.L. Op.cit. p. 285.

Una solubilidad que crece a medida que aumenta la temperatura. El color de la disolución resultante se debe al acuocomplejo correspondiente del neodimio que, como ocurre con los lantánidos desde el lantano al neodimio²⁰, es de tipo $[\text{Ln}(\text{H}_2\text{O})_9]^{+3}$ y permite incluir hasta nueve moléculas de agua, por lo que tenemos $[\text{Nd}(\text{H}_2\text{O})_9]^{+3}$ de color violeta. Para que el color pardo anaranjado del NO_2 que se libera en el seno de las aguas madres no interfiera con el del neodimio (III) hay que esperar a que pase el tiempo y el gas vaya saliendo lentamente de la disolución. Conviene llevar a cabo la reacción en la campana de extracción, dado el carácter irritante del dióxido de nitrógeno. Vemos una serie de imágenes del proceso:



Las burbujas de NO_2 gaseoso se ven perfectamente ascender desde el fondo del tubo de ensayo hasta salir por la boca en forma de humareda anaranjada. A medida que el gas de nitrógeno va eliminándose, el color de la disolución se aprecia violeta, obteniéndose bonitos contrastes como el de la foto de la página siguiente. Al final, el tono violeta del $[\text{Nd}(\text{H}_2\text{O})_9]^{+3}$ es el que caracteriza la disolución. Al igual de lo que ocurre con otras concentraciones de los lantánidos, el color se intensifica a medida que

²⁰ Cotton, S. (2005). Establishing coordination numbers for the lanthanides in simple complexes. *Comptes Rendus Chimie*, 8, 2, pp: 129-145.

la concentración aumenta, tal y como ocurre al dejar que se evapore una cantidad para obtener el $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, de un color púrpura, según la bibliografía²¹, pero que yo llamaría rosa intenso.

A partir de esta disolución y de la del sulfato, que paso a describir a continuación, se obtendrán las sales insolubles correspondientes al carbonato, al oxalato, al fosfato, así como el hidróxido de neodimio y el óxido.

El Nd (III) en disolución acuosa no presenta luminiscencia, tal y como ocurre con otros lantánidos trivalentes, donde el agua atenúa las emisiones que se producen en el espectro del visible²². Los compuestos sólidos de neodimio (III) en cambio sí pueden presentar fluorescencia, aunque con picos en el IR y, según el tamaño de partícula, en el visible²³. Esto ocurre por ejemplo con el óxido de neodimio (III). De cualquier forma, la fluorescencia que pudiera exhibirse va a ser débil, por ello trataré de realizar algunas fotografías en condiciones diferentes, sabiendo de antemano que no es de esperar ninguna emisión nítida, y que probablemente sean reflejos de la propia luz de la lámpara ultravioleta lo que capten y haga que tome con prudencia las imágenes.



D) DISOLUCIÓN DEL NEODIMIO EN H_2SO_4

En este caso, empleando una disolución de ácido sulfúrico en agua de aproximadamente 40% en volumen, el neodimio se disuelve rápidamente, desencadenando un burbujeo continuado hasta que desaparece el trozo de metal. El sulfato de neodimio hidratado es totalmente soluble en agua fría, disminuyendo en agua caliente²⁴, como es habitual en los sulfatos de los lantánidos. El trozo de metal que he utilizado para realizar la disolución tenía una masa de 1.25 g que he disuelto en un volumen de ácido de unos 35mL hasta desaparición completa. La reacción de disolución

²¹ Perry, D.L. (2011). Handbook of Inorganic Compounds. Boca Raton, EEUU: CRC Press, p. 285.

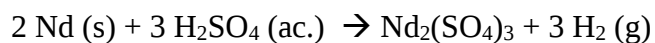
²² Hasegawa, M., Ohmagari, H., Tanaka, H., Machida, K. (2022). Luminiscence of lanthanides complexes: From fundamental to prospective approaches related to water- and molecular-stimuli. Journal of Photochemistry & Photobiology, C: Photochemistry Reviews, 50, p. 5.

²³ Goel, P., Arora, M. (2015). Mechanism of photoluminescence enhancement and quenching in Nd_2O_3 nanoparticles– ferroelectric liquid crystal nanocomposites. Royal Society of Chemistry, 5, 14974.

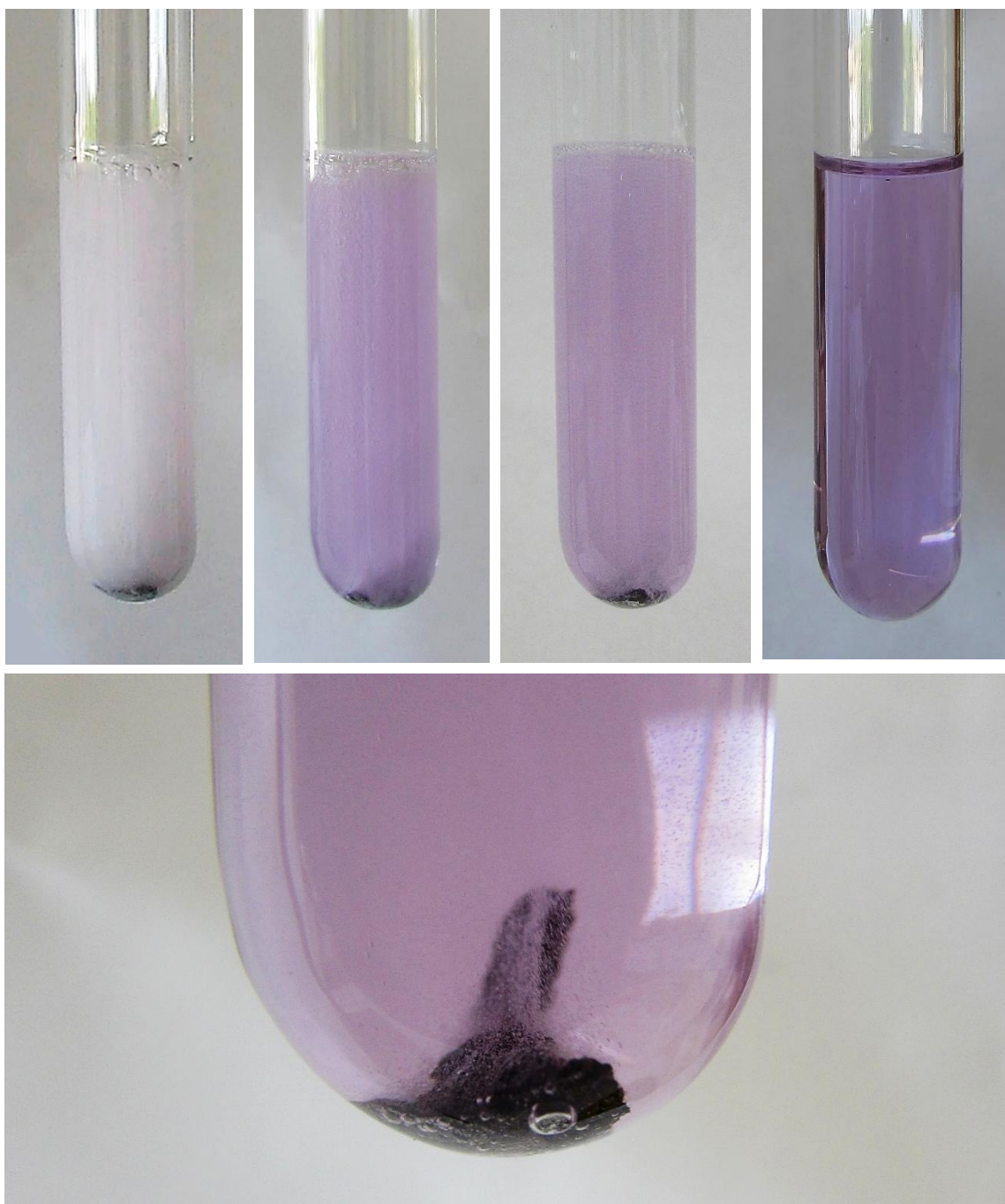
²⁴ Perry, D.L. Op.cit. p. 286.

en ácido sulfúrico es más lenta que la que he llevado a cabo en ácido nítrico, por lo que el burbujeo es menor y no hay peligro de que se salga la disolución por el borboteo.

La reacción que se produce es²⁵:



Al igual que ocurría con el HNO_3 se produce gran cantidad de burbujas, en este caso de H_2 , lo que facilita seguir la reacción. A medida que avanza la reacción, el color de la disolución se va tornando violáceo hasta adquirir el característico del catión trivalente $[\text{Nd}(\text{H}_2\text{O})_9]^{+3}$.



²⁵ Housecroft, C.E., Sharpe, A.G. Op.cit. p. 749.

En el fondo se ve el trozo de neodimio de color negro, de cuya superficie salen miles de burbujas de H_2 . En disolución queda $Sm_2(SO_4)_3$ que precipitará a medida que se evapore el agua, para lo que podemos calentar el precipitado (que contiene parte de las aguas madres si no lo hemos filtrado) para que el H_2SO_4 se elimine²⁶ por ebullición y descomposición a la temperatura de $337^\circ C$, mientras que el $Nd_2(SO_4)_3$ permanece estable hasta temperaturas más altas²⁷. Por ello una alternativa factible para obtener el sulfato hidratado en mayor cantidad y pureza consistiría en calentar el tubo tras llevar a saturación, dejando que se evapore el agua unos días y filtrando los cristales que se formen abajo.

A la temperatura del laboratorio estos días, de unos $32^\circ C$, el precipitado de neodimio más estable es $Nd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$, mientras que el $Nd_2(SO_4)_3 \cdot 5H_2O$ es el más estable a partir de $80^\circ C$ ²⁸. Igualmente, a menor pH, menor solubilidad²⁹, lo que sugiere incluso forzar la precipitación acidificando la disolución por adición de H_2SO_4 .

E) NITRATO Y SULFATO DE NEODIMIO

a) El nitrato de neodimio (III)

El color del $Nd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ se describe como púrpura³⁰ en el libro de D. L. Perry, pero en los que he obtenido, el color sería rosa intenso, aunque con visos violetas, coherente con la descripción de algunos proveedores³¹. El $Nd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ es delicuescente e higroscópico y mantiene en todo momento un aspecto húmedo, incluso segundos después de haberlo llevado a sequedad por calentamiento sobre la malla de asbesto. Debido a que se forma directamente al oxidar el metal puro en HNO_3 y agua destilada, podemos llevarla a sequedad y obtener la sal «pura» sin que se produzcan productos derivados indeseables.

Basta con calentar un poco, pues el agua se pierde fácilmente tras el calentamiento, considerando que el compuesto se funde³² a los $55^\circ C$, pero no debemos calentar en exceso para que no se descomponga el compuesto, por lo que se recomienda simplemente hacerlo sobre la rejilla de amianto. Además, su temperatura de ebullición³³ es de $83^\circ C$, por lo que se perderá si no ponemos cuidado. La descomposición térmica se produce a temperaturas muy superiores, que sólo se alcanzan al aplicar la llama directamente a un tubo de ensayo.

²⁶ Haynes, W.M.(2016–2017). Handbook. Op.cit. 15-19.

²⁷ Stern, K.H., Weise, E.L. (1966). High Temperature Properties and Decomposition of Inorganic Salts. Part 1. Sulfates. Washington, EEUU: National Standard Reference Data System. p. 25

²⁸ 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. 60.

²⁹ Ibídem, p. 63.

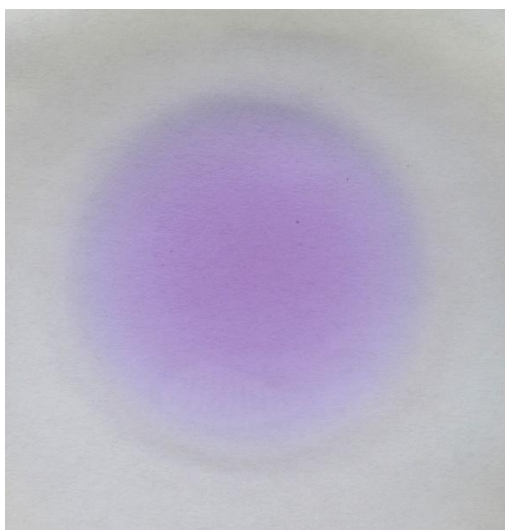
³⁰ Perry, D.L. Op.cit. p. 285. Cf. Haynes, W.M.(2016–2017). Handbook. Op.cit. 4-75.

³¹ <https://www.aemree.com/neodymium-nitrate-hexahydrate.html> (Visitado el 11/06/2025).

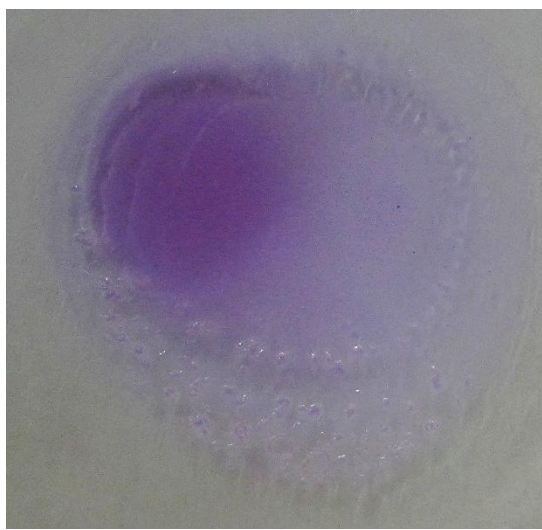
³² Melnikov, P., Arkhangelsky, I.V., Nascimento, V., Silva de Olivera, L.C. (2019). Thermoanalytical behavior of neodymium nitrate hexahydrate $Nd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 139, 6.

³³ <https://heegermaterials.com/neodymium/830-neodymium-nitrate.html> (Consultado el 11/06/2025)

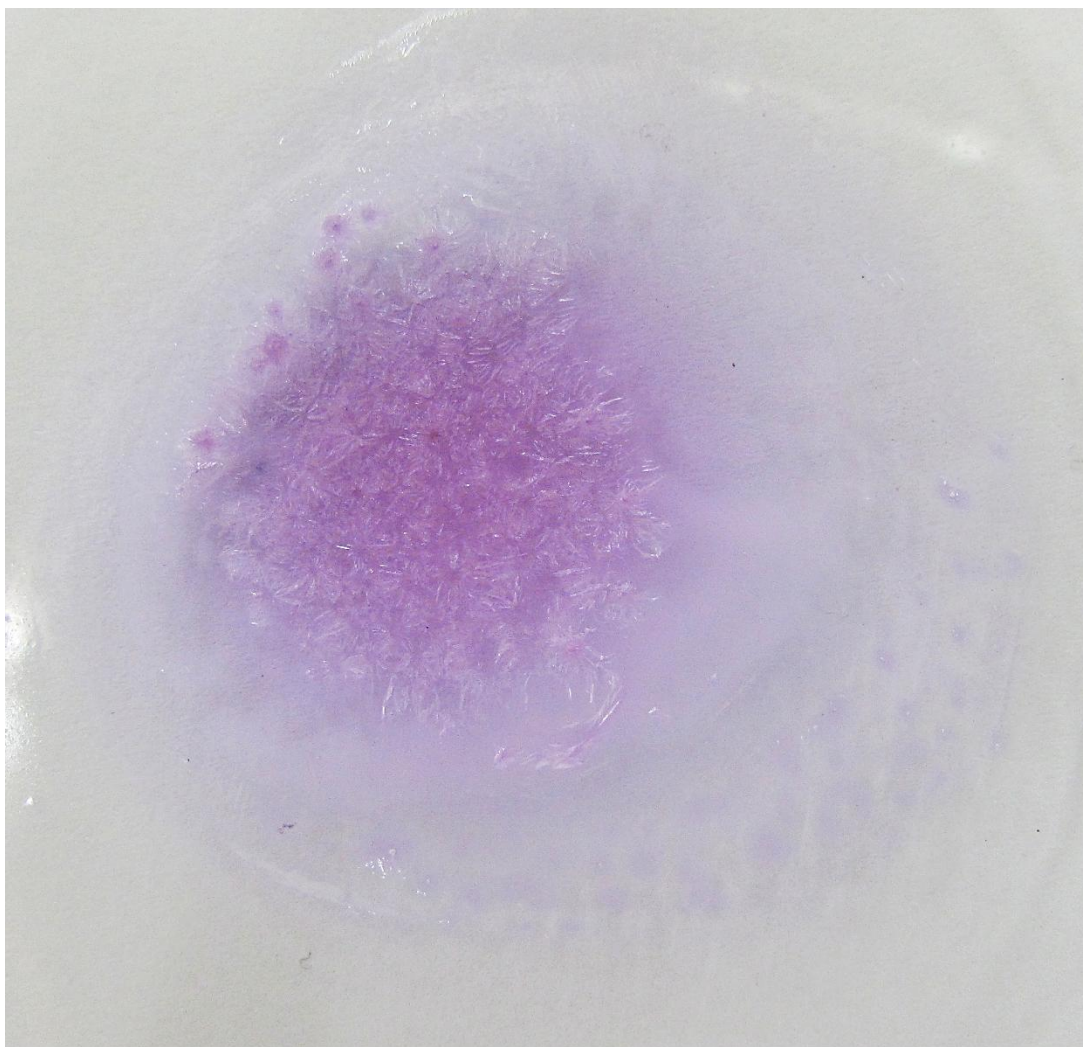
Vemos una imagen del nitrato de neodimio formado:



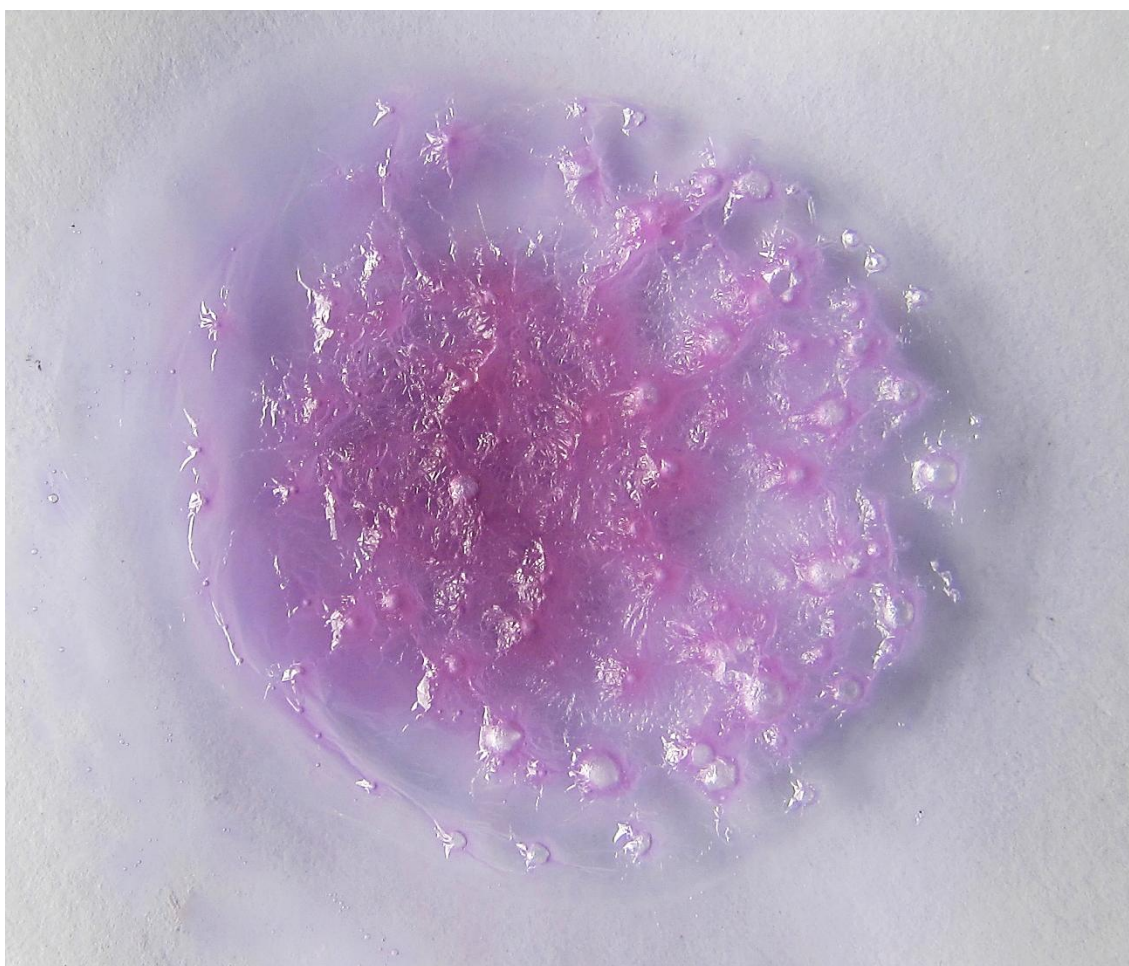
Disolución concentrada de Nd^{+3} en HNO_3



Cristalización por evaporación

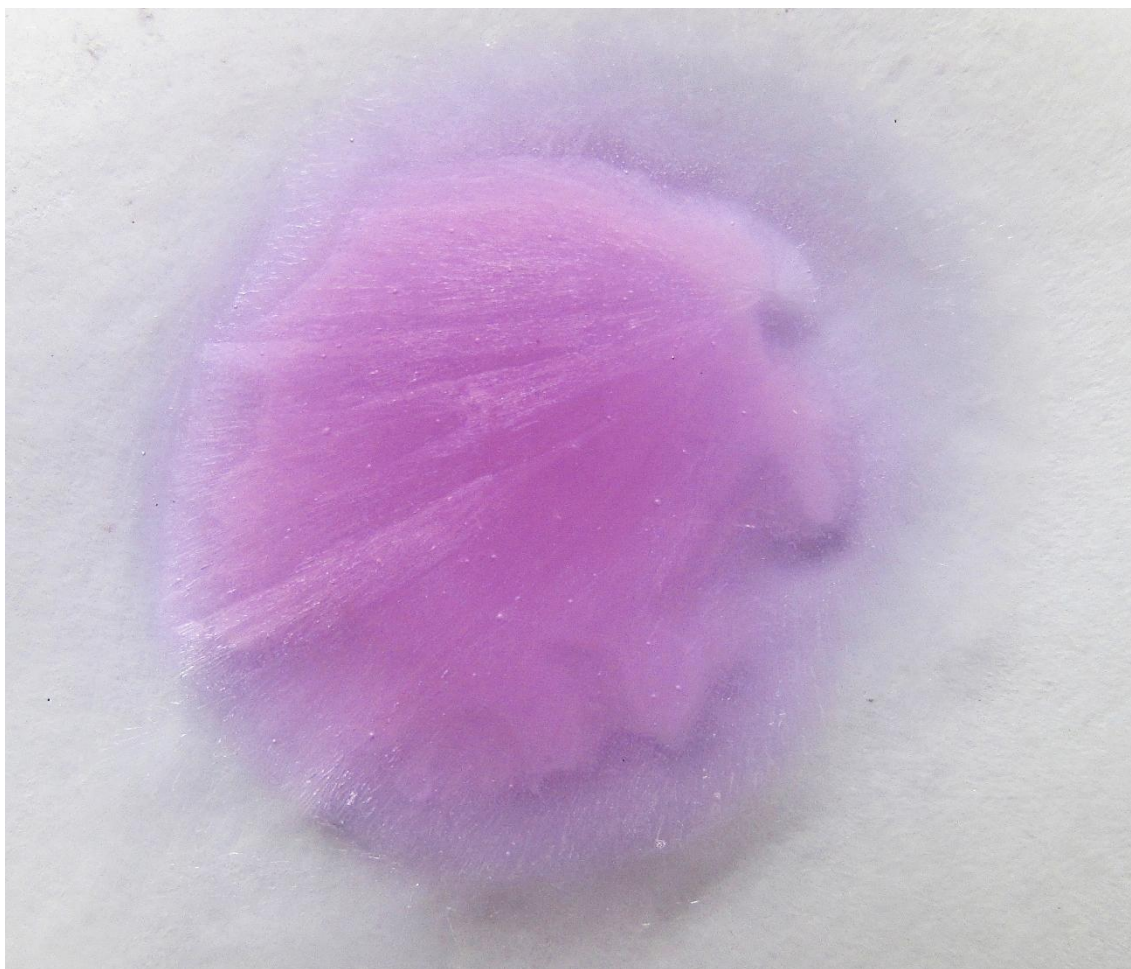


Al calentar en la rejilla de amianto el color se intensifica y se vuelve violeta. Según la bibliografía³⁴, este compuesto deshidratado completamente deshidratado $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$, es de color violeta, mientras que el hidratado, $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, es de color púrpura. Estas variaciones se aprecian mucho mejor en el ensayo de síntesis de Nd_2O_3 por descomposición térmica del nitrato de neodimio (III). Ahí el color del compuesto deshidratado es violeta, a veces prácticamente corinto. Tras calentar, el compuesto se rehidrata en instantes.



Dejando el compuesto en el vidrio de reloj, absorbe agua de la atmósfera y cambia tanto su textura como su color, volviéndose de un tono pastel.

³⁴ Perry, D.L. Op.cit. p. 285.



La combinación de rosa, lila o violeta, dependiendo de la luz y del ángulo utilizado, hacen que el compuesto sea muy agradable de ver.

b) El sulfato de neodimio (III)

Siguiendo el mismo proceso que en el caso anterior, dejé una porción del Nd^{+3} en las aguas madres de la disolución de ácido sulfúrico. Al día siguiente y con una temperatura que oscilaba a lo largo de del día entre los 35°C del día y los 20°C de la noche, parte del $\text{Nd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ había cristalizado en forma de pequeños cristales de color rosa. Según el libro de D. Perry el compuesto octahidratado tiene un tono púrpura, mientras el deshidratado es rosa³⁵. En este caso el compuesto hidratado me parece rosa, y al calentarlo un poco sobre la rejilla de amianto, se aprecia como precipita en mayor proporción y el precipitado se torna más cristalino. Este fenómeno por el que la solubilidad de un sulfato disminuye al aumentar la temperatura es bastante habitual en los lantánidos. La influencia del pH es importante a la hora de considerar qué especie catiónica tenemos en disolución, dado que se relaciona con la concentración de sulfatos en el medio, lo que abre el abanico de posibles cationes tipo Nd^{+3} , $[\text{Nd}(\text{SO}_4)]^{+1}$ e incluso aniones como $[\text{Nd}(\text{SO}_4)_2]^{-1}$ que aparecen en ambientes con alta concentración de

³⁵ Perry, D.L. Op.cit. p. 286.

sulfatos. Aunque a la hora de la cristalización del $\text{Nd}_2(\text{SO}_4)_3$ esto es irrelevante, sí habría que considerarlo cuando tenemos la intención de precipitar sales insolubles o hidróxidos de los lantánidos³⁶. De manera que para bajar la concentración de SO_4^{2-} en el medio, es una precaución apropiada diluir la concentración del metal, en el caso de que se vaya a echar el agente precipitante sobre la disolución ácida.

El sulfato de neodimio (III) es higroscópico, pero no parece verse afectado por las condiciones de humedad de la atmósfera tanto como el compuesto de nitrato, y de hecho no he apreciado cambios en su superficie. Al calentar para llevar a sequedad hay que considerar que el $\text{Nd}_2(\text{SO}_4)_3$ hidratado se funde³⁷ a los 350°C y se descompone³⁸ a los 800°C , por lo que a temperatura más baja se descompondrá el ácido sulfúrico. De esta manera, al llevar a sequedad se puede producir un denso humo blanco causado por la evaporación paulatina del ácido, que cursa con descomposición parcial³⁹ a partir de 340°C a SO_3 (una descomposición térmica que se logra de forma completa a temperaturas mucho más altas⁴⁰). Cualquiera de estos compuestos H_2SO_4 , SO_2 y SO_3 es extraordinariamente higroscópico por lo que forma densas nubes blancas al agrupar el vapor de agua del aire.

Aquí vemos unas imágenes del sulfato de neodimio (III) obtenido:



Cristalización por evaporación ambiente



Tras calentar en rejilla de amianto

Tras calentar más tiempo el compuesto se funde parcialmente al no estar puro, formando una pasta oleosa como consecuencia de la presencia de sulfúrico, una contaminación que no me preocupa para los propósitos pedagógicos del artículo.

³⁶ Han, K. (2020). Characteristics of Precipitation of Rare Earth Elements with Various Precipitants. *Minerals*, 10, 178. p. 2.

³⁷ Haynes, W.M.(2016–2017). *Handbook*. Op.cit. 4-75.

³⁸ Perry, D.L. Op.cit. p. 286.

³⁹ https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_version=2&p_card_id=0362&p_lang=en

⁴⁰ Barbarossa, V., Brutti, S., Diamanti, M., Sau, S., De Maria, G. (2006). Catalytic thermal decomposition of sulphuric acid in sulphur–iodine cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 7, pp: 883-890.

Vemos precisamente cómo queda el $\text{Nd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ tras un calentamiento más prolongado:



F) ACIDEZ DEL ACUOCOMPLEJO DE NEODIMIO

Aunque ya he tratado este aspecto anteriormente, creo interesante volver a analizar la formación de hidróxido de neodimio a partir de la oxidación del metal en agua. A modo de calco directo del artículo del erbio, recordemos que el catión Nd^{+3} , de la misma manera que sucede con el resto de lantánidos, hidroliza el agua, algo que se observa incluso a partir de pH ligeramente ácido, pero sobre todo en el rango neutro o básico, como es de esperar.

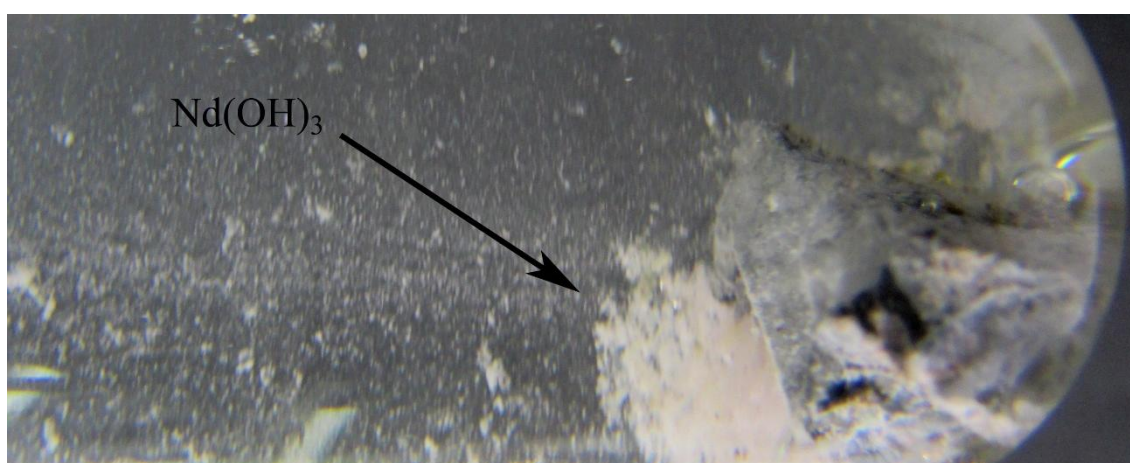
La explicación de esta acidez se tiene al considerar la contracción lantánida, que hace que el catión tenga menos radio del esperado y eso, junto a la elevada carga, provoca que el catión sea un ácido de Lewis duro e inestable al agua. La hidrólisis del agua se ve favorecida por el aumento de Z y la disminución del radio⁴¹. Así el Nd^{+3} acaba descomponiendo al agua y formando el hidróxido⁴² a un pH prácticamente neutro. Aquí vemos uno de los pasos intermedios en la formación del hidróxido insoluble:



⁴¹ Cotton, F.A., Wilkinson, G. op.cit. p. 1193.

⁴² Ibídem.

La reacción de formación cuantitativa del hidróxido correspondiente⁴³ se produce para el neodimio a $\text{pH}=7.31$ ⁴⁴. De esta manera, primero se produce la reacción redox entre el agua y el metal, formándose Nd^{+3} como acuocomplejo $[\text{Nd}(\text{H}_2\text{O})_9]^{+3}$ de color rosado. Como el catión es demasiado ácido, acaba hidrolizando al agua cuando el pH es levemente básico, incorporando un grupo hidroxilo al tiempo que suelta un protón, que escribo como hidronio en la reacción anterior. Para lograr fácilmente ese efecto he empleado agua del grifo que aquí, en la sierra de Cádiz (como suele ocurrir en tantas otras partes), es ligeramente básica, lo que favorece la formación del hidróxido. En este caso, como vemos, además del hidróxido de neodimio (III) de color rosado o blanco, dependiendo de la fuente de información que consultemos, tenemos hidróxido de praseodimio (III) de color verde amarillento.



G) FORMACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE NEODIMIO

a) Con NaOH en tubo de ensayo

El color del $\text{Nd}(\text{OH})_3$ se encuentra en la horquilla que va del azulado al rosa⁴⁵, pero también podemos encontrar definiciones como blanco⁴⁶ o gris⁴⁷, una paleta que, en conjunto, nos permite hacernos una idea clara de lo que esperar. En mi caso, cuando he obtenido el compuesto por reacción directa con agua, el color es grisáceo, o beige rosáceo, como ya he mostrado en imágenes anteriores. Sin embargo, cuando empleo disoluciones básicas, de NaOH o de NH_3 , el color es más claro y limpio, con un rosa pálido que se aprecia únicamente cuando se pone el precipitado sobre un fondo blanco.

Para obtener el hidróxido de neodimio (III) hidratado añadiré unas gotas de la disolución del metal en ácido nítrico, donde está como catión $[\text{Nd}(\text{H}_2\text{O})_9]^{+3}$ de color

⁴³ Burriel Martí, F., Lucena Conde, F., Arribas Jimeno, S., Hernández Méndez, J. (1992). Química Analítica Cualitativa. Madrid, España: Paraninfo. p. 629.

⁴⁴ Moeller, T. (1975). The Chemistry of the Lanthanides. Oxford, UK: Pergamon Press. p. 91.

⁴⁵ Perry, D.L. Op.cit. p. 285.

⁴⁶ Suministrador: <https://cymitquimica.com/cas/16469-17-3?items=100> (Consultado el 11/06/2025)

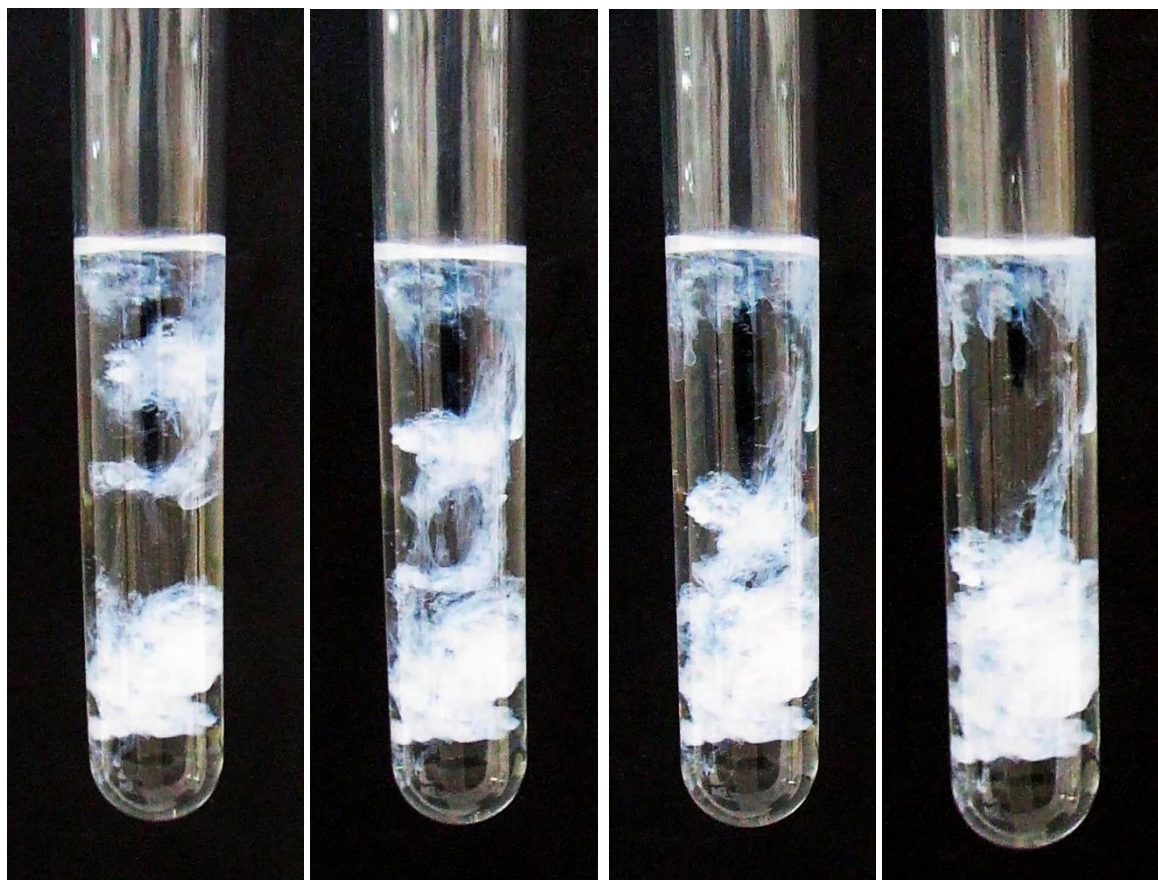
⁴⁷ <https://easchem.en.made-in-china.com/product/qZTAboPKEUcM/China-Neodymium-Hydroxide-Powder-with-CAS-No-16469-17-3-and-ND-OH-3-3n-4n-5n.html> (Consultado el 11/06/2025)

rosa o violeta, sobre una disolución concentrada de NaOH en agua destilada. Sabemos que los hidróxidos de los lantánidos no son anfóteros tal y como he reseñado en el apartado anterior, por lo que no se redisuelven a pH alto, y no hay peligro al trabajar con disoluciones de basicidad alta. En este caso la concentración del metal es alta (en torno a 1M) por lo que el precipitado se forma de manera inmediata, generando un sólido definido. En cualquier caso, es un hidróxido hidratado, pero no se trata de un óxido hidratado⁴⁸, tal y como ocurre con los lantánidos en general, como ya remarqué en el artículo del erbio.

Al añadir las gotas se forma el precipitado de color blanco translúcido, que a medida que se adensa se aprecia bien rosa, bien celeste rosáceo, siempre que el fondo sea blanco, ya que con el fondo negro, el color que se ve, tanto con la cámara como a simple vista, es el blanco. Como es habitual, genera estructuras típicas con forma de estalactitas, que se quedan colgando desde la superficie del agua hasta que caen por gravedad. La formación del hidróxido de neodimio, partiendo de un medio ácido sigue la reacción habitual:

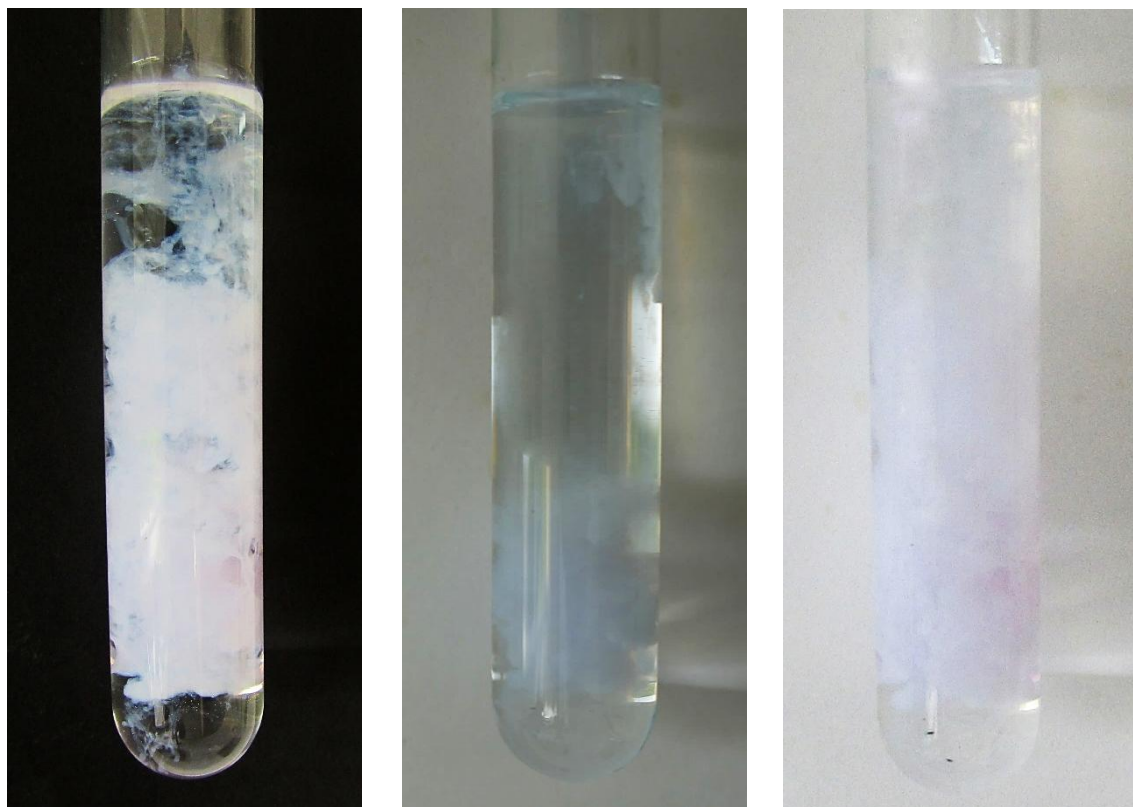


Aquí podemos ver algunas imágenes del precipitado $\text{Nd}(\text{OH})_3$ que se forma al añadir gotas de Nd^{+3} en medio ácido sobre una disolución básica de sosa.



⁴⁸ Cotton, F.A. op.cit. p. 1191.

En las siguientes imágenes vemos el mismo hidróxido con un color diferente dependiendo del fondo y de distintas condiciones de luminosidad. Como son colores más bien pálidos, se aprecian mejor las tonalidades utilizando el fondo blanco, que es donde se ve el color del compuesto. En cambio, tomando el fondo negro, tenemos matices blancos. La primera foto la hice poniendo fondo negro e iluminando el precipitado bajo la luz de los fluorescentes y la luz del sol. En la imagen de en medio sólo tenemos la luz procedente de las ventanas y un fondo blanco. La tercera de las imágenes es igual que la primera, salvo por el fondo blanco.

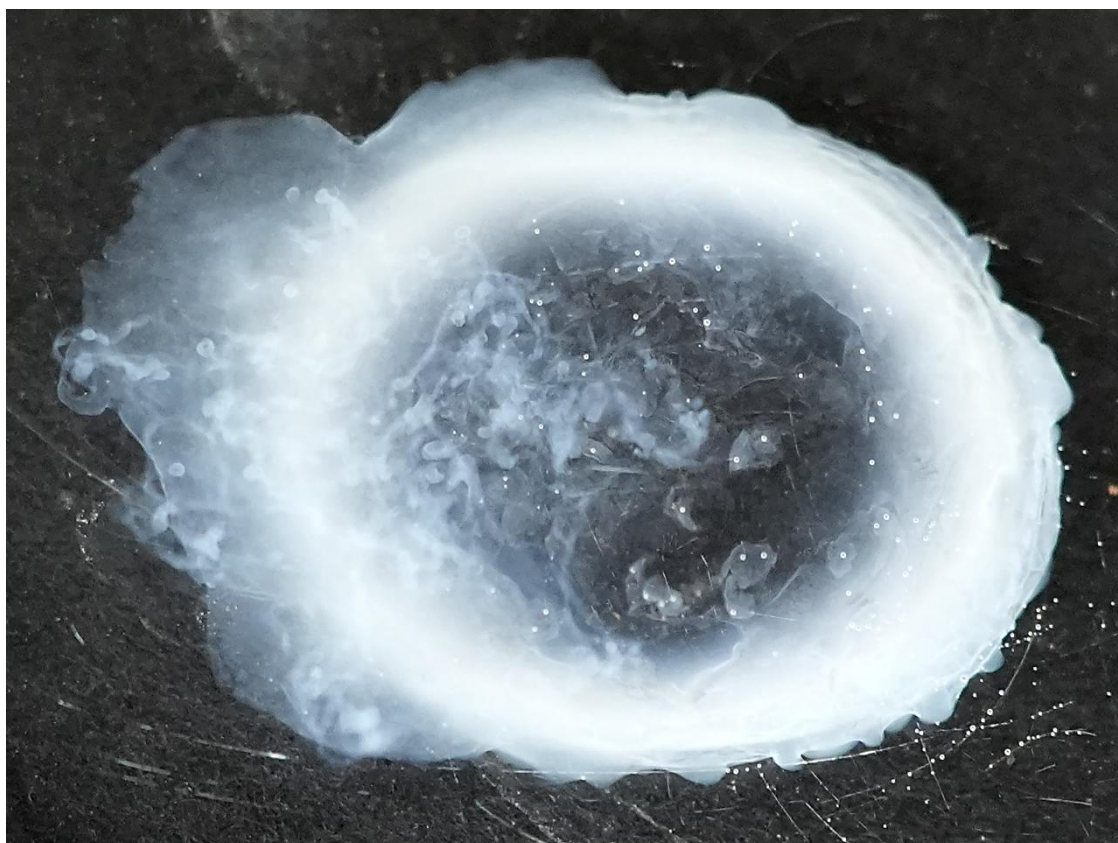
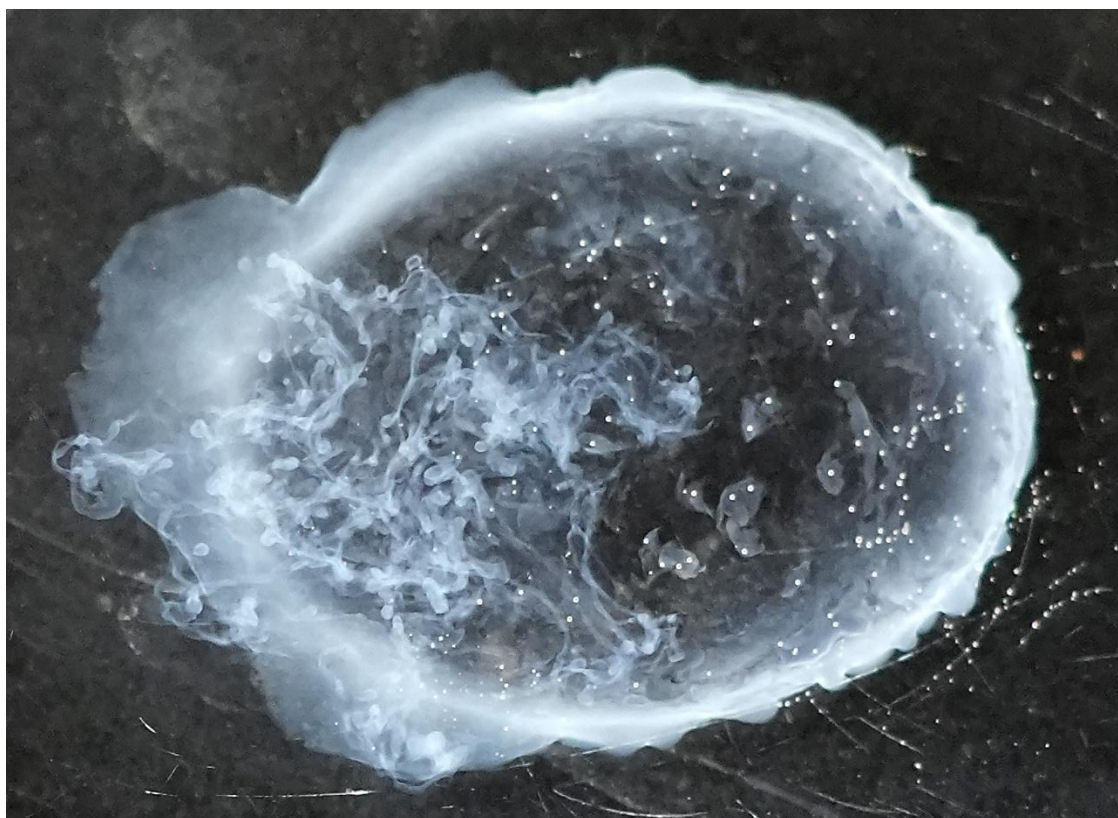


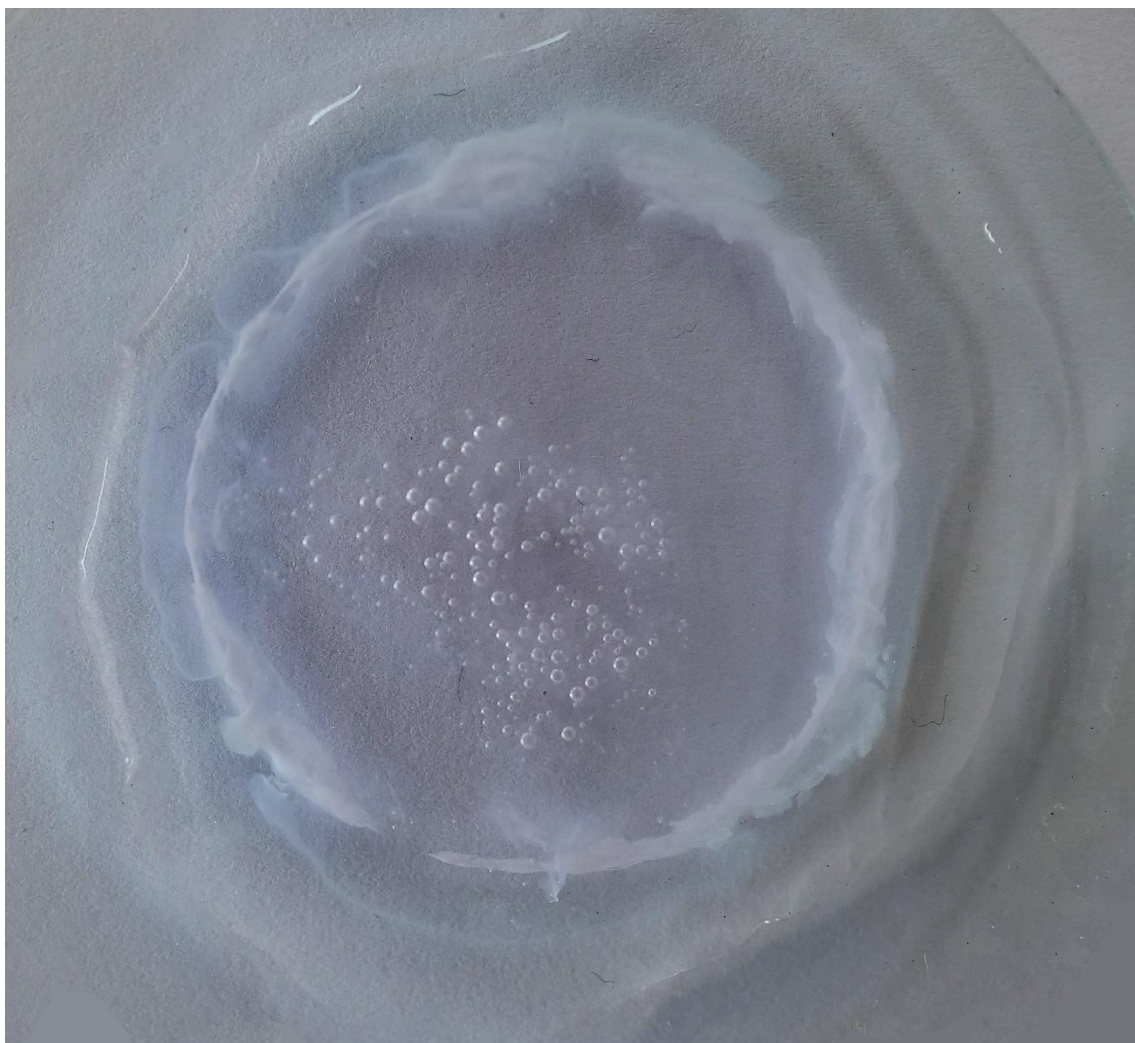
b) Con NaOH en vidrio de reloj

He hecho previamente una disolución de NaOH en agua destilada con una concentración alta y la puse sobre un vidrio de reloj siguiendo la metodología habitual en estas prácticas. Como añadiré unas gotas de la disolución ácida del Nd^{+3} , el hidróxido se formará de repente, al estar el ácido en mucha menor cantidad que la base, dominante en el vidrio de reloj.

El color rosado del $\text{Nd}(\text{OH})_3$ que se forma instantáneamente apenas se observa cuando pongo el fondo negro. Al cambiar a fondo blanco se realza el tono rosado, aunque muy pálido, pero desaparecen todas las estructuras en forma de pliegues y nebulosidad que resultan tan interesantes desde el punto de vista estético. Es por ello por lo que la mayor parte de las fotografías están hechas utilizando un fondo negro, de modo que se puedan apreciar los detalles.

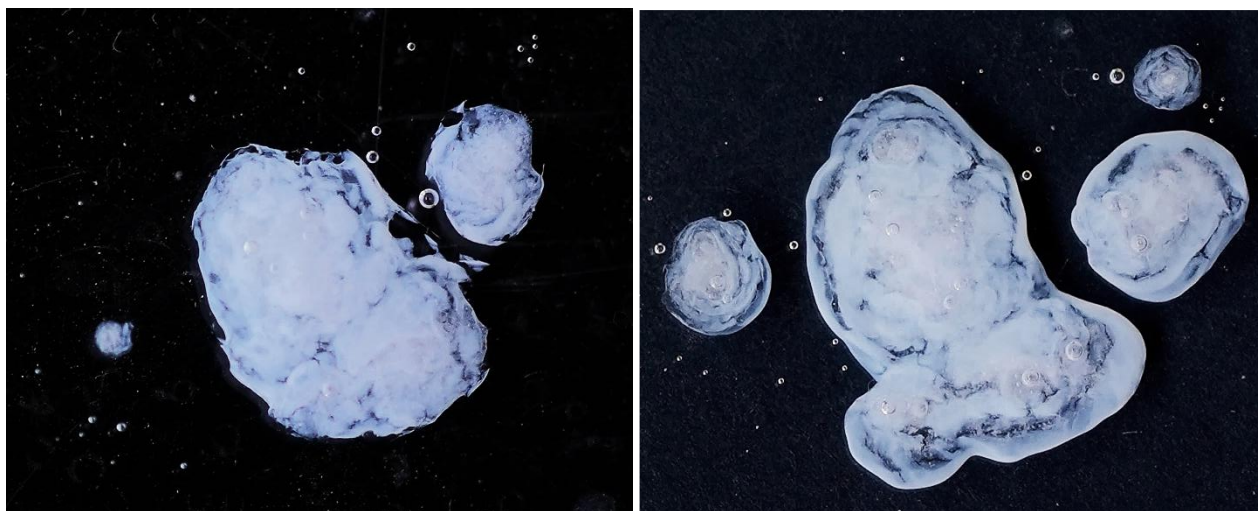
Vemos a continuación algunas imágenes:

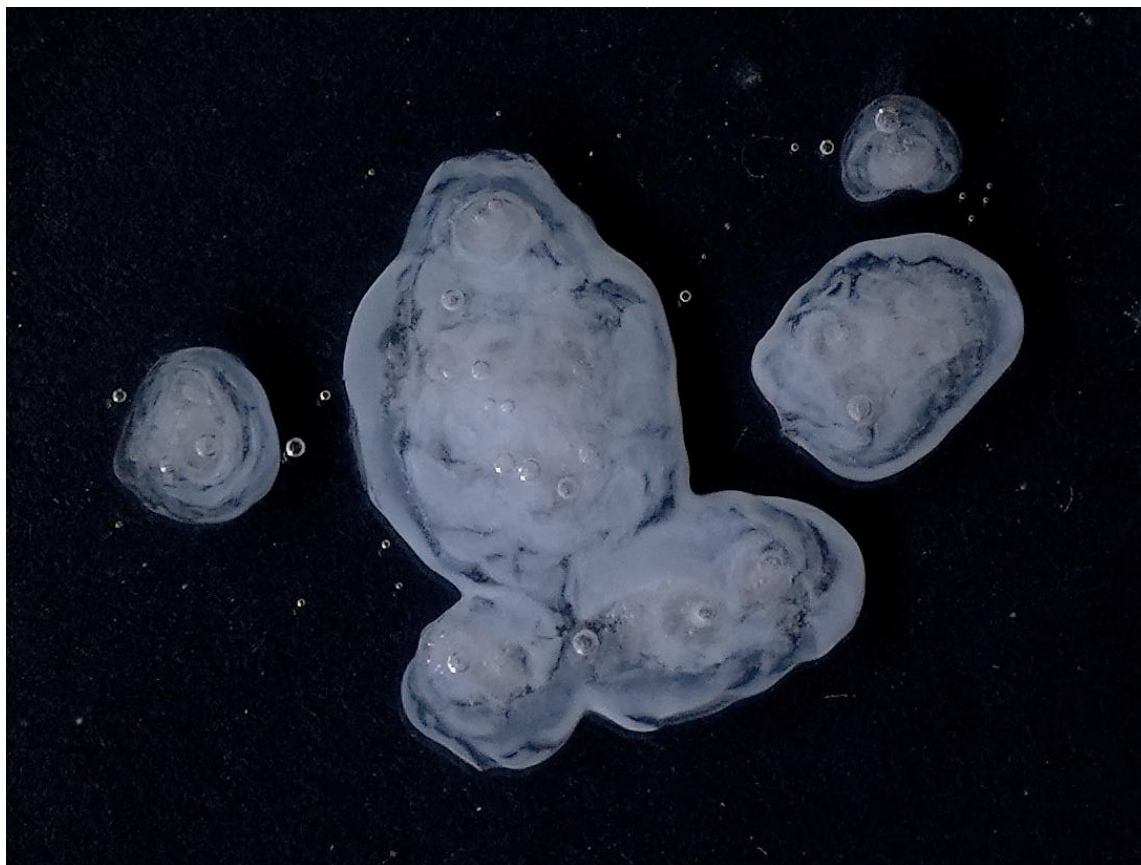




c) NaOH sólido sobre la disolución de Nd^{+3}

Si dejo caer unas bolitas de NaOH sobre la disolución ácida y diluida de Nd^{+3} , entonces el precipitado de $\text{Nd}(\text{OH})_3$ las recubre rápidamente, formando estructuras de mayor densidad alrededor de la base.





c) Con NH_3 (ac.) y Nd^{+3}

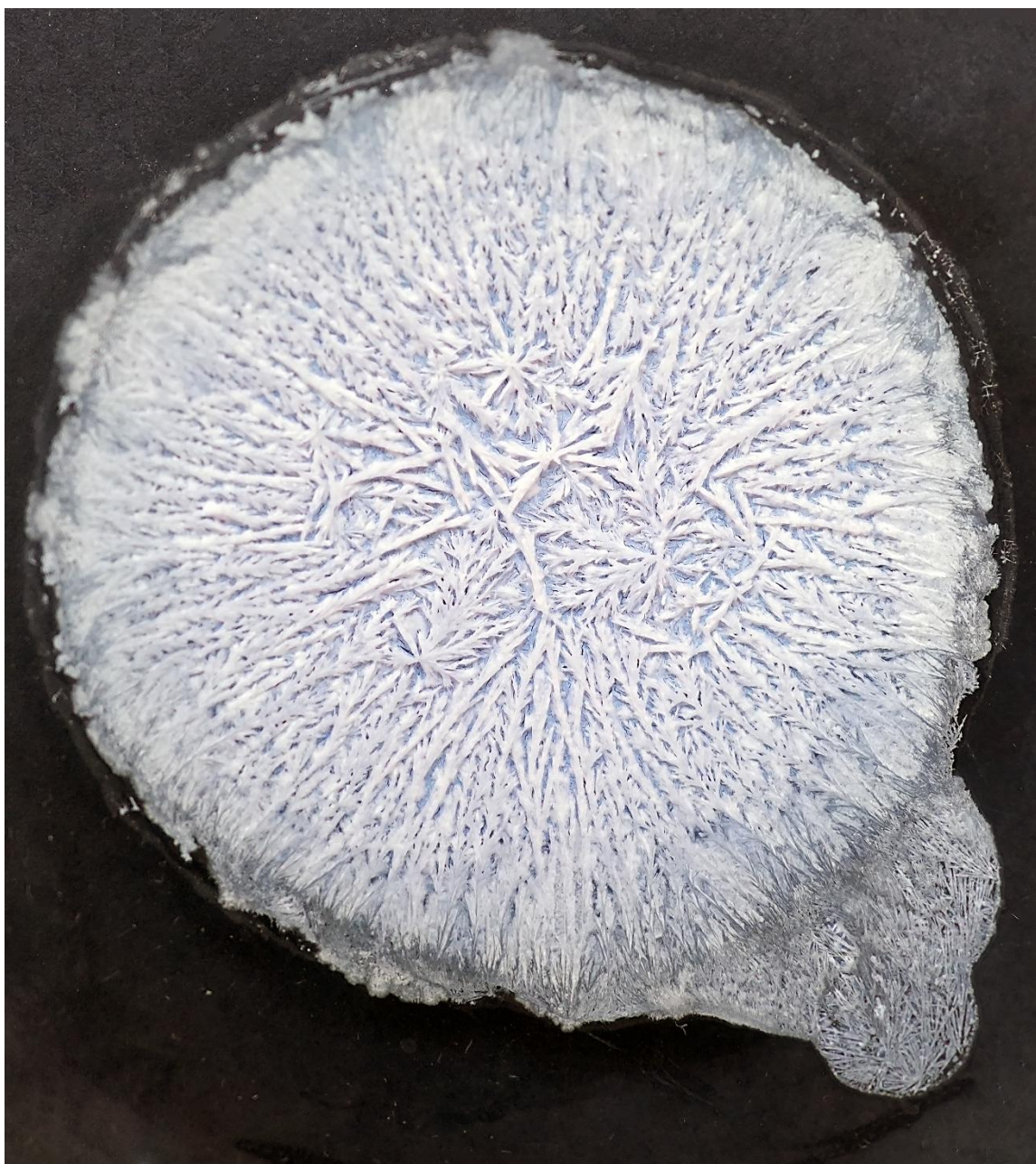




Hice varias pruebas empleando concentraciones diferentes de neodimio (III), pero no he observado cambios reseñables en la estructura del precipitado, aunque sí en el color con el que se aprecia, considerando que la iluminación del laboratorio era la misma en las dos imágenes que vemos en estas páginas. No obstante, ni el color ni la iluminación en mis fotografías están estandarizados.

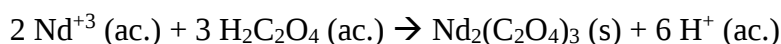
En ambos casos el precipitado forma estructuras semejantes a tejidos o a películas finas semitransparentes, que tienen una gran belleza y que ya hemos visto en otros lantánidos. Se añaden unas gotas de la disolución ácida concentrada de Nd^{+3} sobre un poco de disolución de amoníaco al 40% en volumen puesta de antemano en un vidrio de reloj. El precipitado que se forma, correspondiente al hidróxido de neodimio (III), tiene un color grisáceo o blanquecino al verse sobre fondo negro, aunque en la segunda fotografía (hecha con una cámara diferente) se nota un tono azulado que coincide con el que veo en la realidad.

Aquí tenemos un ejemplo de cómo queda el producto impuro obtenido con una disolución de sosa concentrada en el tubo de ensayo, una vez retiradas las aguas madres, dejando cristalizar por evaporación del líquido restante.



H) OXALATO DE NEODIMIO

El catión de Nd^{+3} , que está en una concentración de 1M en una disolución de ácido nítrico, precipita rápidamente al ser añadido en una disolución concentrada de ácido oxálico y es un método de separación cuantitativa propio de los lantánidos⁴⁹. En este caso he añadido con un gotero pequeñas cantidades de la disolución del neodimio sobre la disolución del ácido oxálico en agua destilada. El oxalato de neodimio (III) precipita en forma de un precipitado blanco y es bastante compacto, como es habitual en los oxalatos. Es la vía más importante para obtener óxidos en los lantánidos⁵⁰, y por descomposición térmica del oxalato, permite obtener el óxido de neodimio (III), que es el resultado final de la descomposición. Al añadir las primeras gotas de la disolución ácida con el Nd^{+3} (he usado para ello la disolución realizada con el ácido nítrico) sobre la disolución de oxálico, se observa la aparición de formas definidas que se estiran en hilachos, pero que se van al fondo con rapidez. El producto de solubilidad⁵¹ del oxalato de neodimio (III) es de $1.3 \cdot 10^{-31}$. De esta manera tenemos una precipitación cuantitativa del metal. Como ya se analizó en el artículo del erbio, la forma química del ácido oxálico depende de las condiciones de pH de la disolución. Al pH de la disolución ácida de partida el oxálico no desprotona, pero el Nd^{+3} puede reaccionar con la pequeña cantidad libre de $[\text{C}_2\text{O}_4]^{-2}$ y precipitar de inmediato. Al salir del equilibrio, la formación del oxalato se ve favorecida y la reacción global se puede escribir como⁵²:



En condiciones neutras o básicas se pueden producir mezclas entre sales con diferentes aniones⁵³, con el oxalato $[\text{C}_2\text{O}_4]^{-2}$ y el $[\text{HC}_2\text{O}_4]^{-1}$. El $\text{Nd}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ precipitado tiene 10 moléculas de agua⁵⁴ presentándose como $\text{Nd}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$, un número de moléculas de agua que parece fijo para los tres primeros lantánidos⁵⁵. El color del oxalato de neodimio (III) se describe en el libro de Dale L. Perry como cristales de color rosa⁵⁶, pero el color apenas se aprecia si el fondo no es blanco.

En las siguientes imágenes se ve el efecto de añadir unas gotas de la disolución ácida de Nd^{+3} sobre una disolución de ácido oxálico concentrado en tubo de ensayo. Al igual que tantas otras veces sucede con los lantánidos, el color rosado no se aprecia cuando se emplea un fondo negro.

⁴⁹ Cotton, F.A. op.cit. p. 1192.

⁵⁰ Ibídem, p. 1192.

⁵¹ 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.

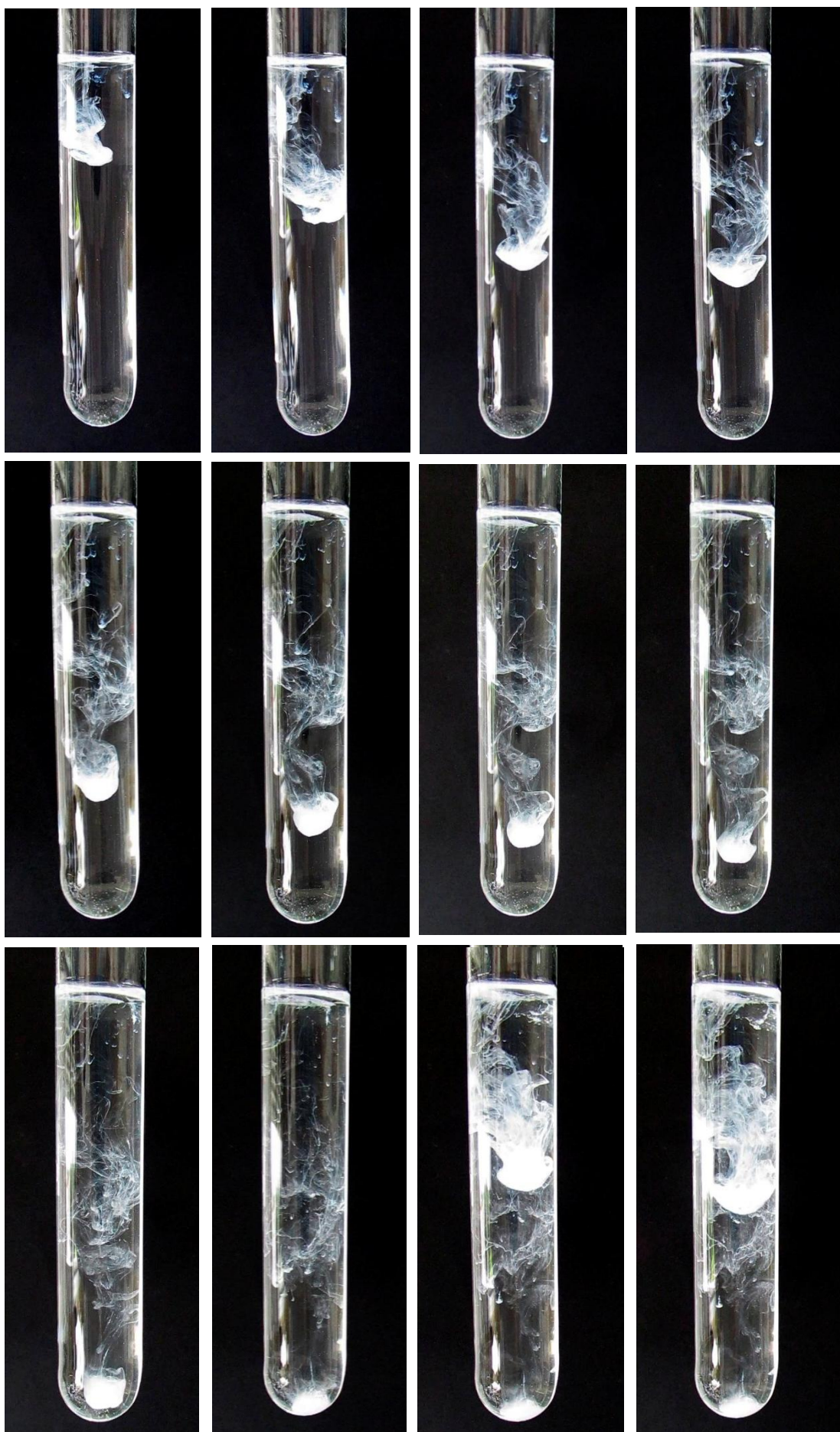
⁵² Ibídem. Ver el conjunto de equilibrios del diprótico y de la formación de los complejos y precipitado.

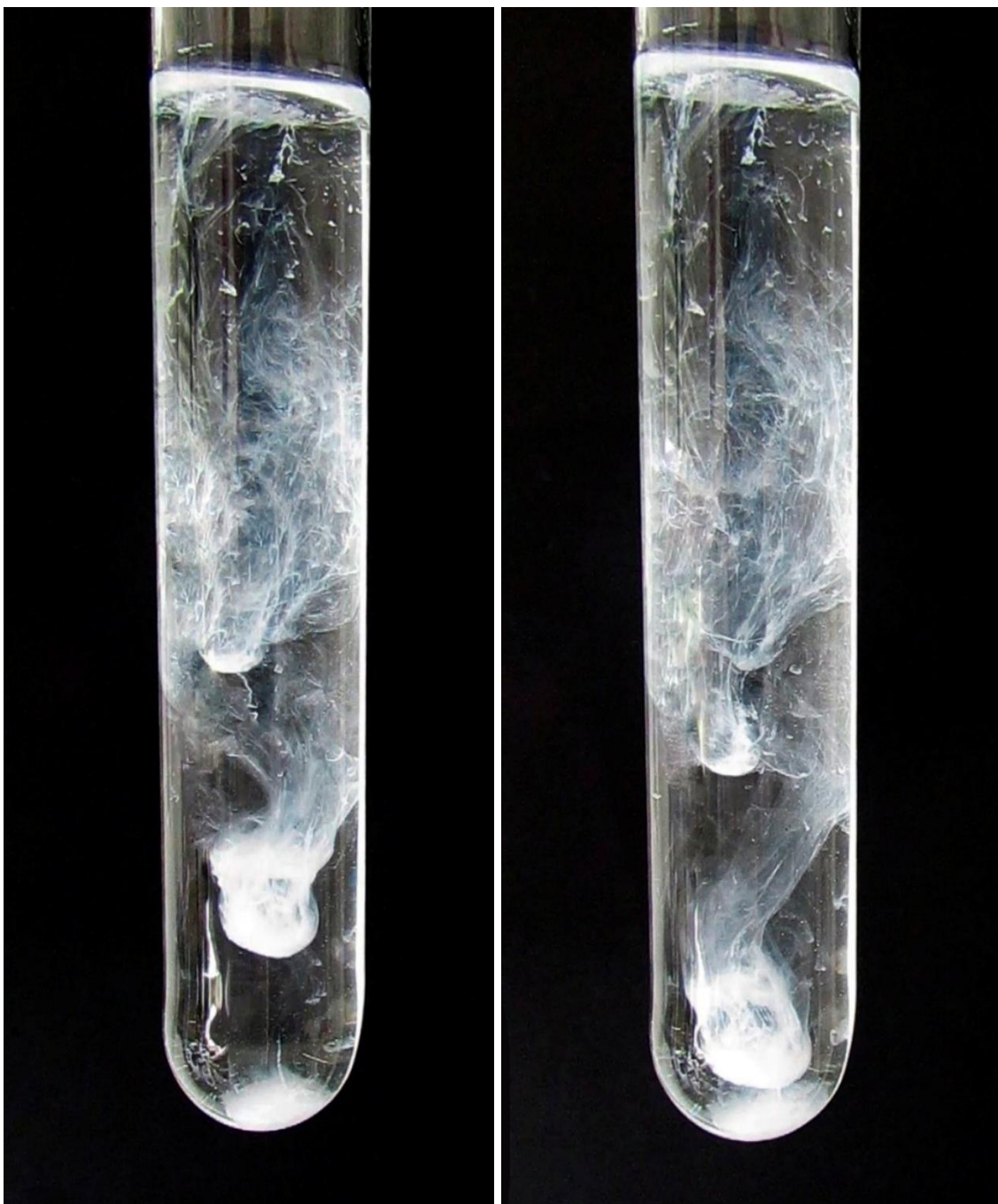
⁵³ Cotton, F.A., op.cit. p. 1192.

⁵⁴ Perry, D.L. Op.cit. p. 285.

⁵⁵ Alemayehu, A., Zakharanka, A., Tyrpekl, V. (2022). Homogeneous Precipitation of Lanthanide Oxalates. ACS Omega, 7, 14, pp:12288-12295.

⁵⁶ Perry, D.L., op.cit. p. 340.





En el vidrio de reloj se aprecian muy bien las hebras de color blanco que forma el compuesto, que se entrelazan creando efectos de gran belleza. El compuesto se va adensando poco a poco hasta que al final cubre la superficie del vidrio de reloj hasta formar una especie de niebla de aspecto lechoso cuya tonalidad es de un rosa tan pálido que cuesta identificarlo cuando el fondo no es completamente blanco. Entonces, sí se aprecia el color rosado del oxalato, con esa palidez tan característica de los lantánidos.

Aquí vemos una imagen con resolución, donde se ve la estructura fibrosa habitual en los oxalatos.



Una última imagen muestra el $\text{Nd}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$, una vez seco, habiendo dejado que se evaporen los restos de aguas madres sobre un vidrio de reloj, tras haber decantado la cosecha obtenida en el tubo de ensayo. El compuesto rosado se localiza en el centro, mientras que los cristales de oxalato se han formado alrededor de él, de manera que se ve una corona de cristales incoloros y alargados rodeando al oxalato de neodimio (III). El oxalato de sodio, que es perfectamente soluble en las aguas madres, sólo se visibiliza al cristalizar por medio de la evaporación paulatina del agua.



I) ÓXIDO DE NEODIMIO (III)

El óxido de neodimio (III) es un compuesto para cuyo color encontramos una descripción muy variada según la bibliografía consultada. En el libro de D. L. Perry se describe como polvo celeste⁵⁷ (*blue powder*) pero también, de color marrón (*technical material has a brown color*)⁵⁸. Sin embargo también aparece como polvo rosa pálido⁵⁹ (aunque en la fotografía referente el compuesto es claramente azul), o como blanco⁶⁰ o

⁵⁷ Perry, D.L. Op.cit. p. 285. Igualmente sucede en Haynes, W.M.(2016–2017). Handbook. Op.cit. 4-75.

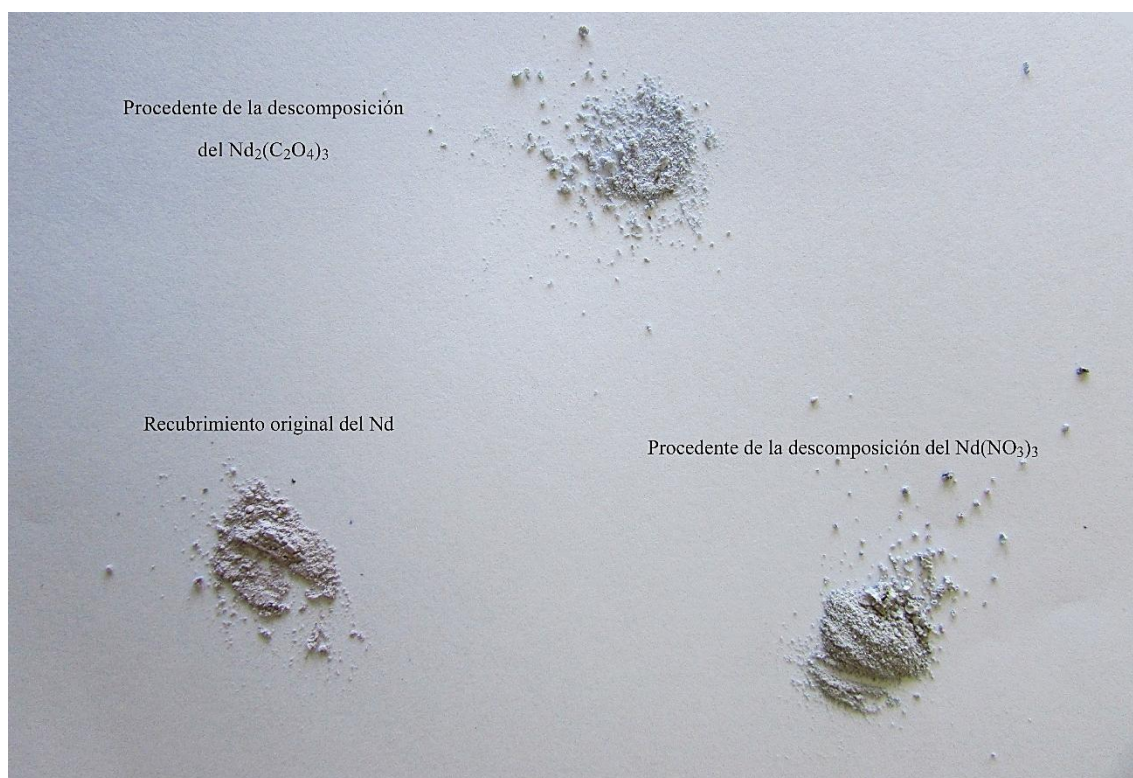
⁵⁸ Además de la referencia de D.L. Perry, Op.cit. véase: <https://wanfengtech.en.made-in-china.com/product/SiqQBgtPaAWE/China-Brown-Gray-Powder-Praseodymium-Neodymium-Oxide.html> (consultado el 13/06/25).

⁵⁹ <https://www.smart-elements.com/shop/neodymiumiii-oxide-9999-nd2o3-powder-bulk/> (consultado el 13/06/25).

⁶⁰ <https://www.srlchem.com/product/details/7584/37499/Neodymium-III-Oxide-extrapure-AR-999> (consultado el 13/06/25).

gris levemente azulado⁶¹. Esta variedad de aspectos se relaciona, como ya he indicado anteriormente, con su particular forma de absorber y reflejar la luz, según sea la fuente empleada para iluminarlo. Así al sol se aprecia “color lavanda”, rosáceo o violeta pálido, y a la luz de los fluorescentes del laboratorio se ve grisáceo o gris celeste⁶². Además, la forma de obtención y, como consecuencia, el tamaño de partícula, influye mucho en el color final del compuesto, por lo que es normal que haya distintas tonalidades para muestras con diferente historia química.

En la imagen podemos ver precisamente esto mismo, con tres óxidos de neodimio (III) obtenidos de tres formas distintas. Arriba vemos el Nd_2O_3 obtenido a partir de la descomposición térmica del oxalato de neodimio (III), tiene un color gris azulado, precisamente tal y como se describe mayoritariamente en la bibliografía. A la izquierda tenemos el Nd_2O_3 recuperado a partir del recubrimiento purulento del metal neodimio, tal y como venía en la bolsa procedente de China; su color es rosa pálido. En tercer lugar vemos el Nd_2O_3 que se ha sintetizado a través de la descomposición térmica del $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$ y tiene una tonalidad gris con visos verdosos.



El óxido de neodimio es higroscópico⁶³, aunque no he apreciado cambios superficiales en los óxidos obtenidos, como sí suele advertirse con los compuestos higroscópicos expuestos a la atmósfera. Un aspecto a destacar del compuesto es que, según se indica en el libro de D. L. Perry, presenta fluorescencia roja (muy leve) en condiciones concretas, pero no he observado nada al respecto. Tiene sentido que la luminiscencia del visible sea en el rojo, ya que la emisión principal se produce en la

⁶¹ <https://www.nanoshel.com/product/neodymium-oxide-powder> (consultado el 13/06/25).

⁶² Spellman, F.R. Op.cit. p. 66.

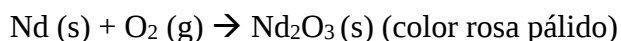
⁶³ Perry, D.L. Op.cit. p. 285.

banda de IR⁶⁴. De cualquier forma, y aunque he hecho algunas fotografías bajo la lámpara de UV, no he hallado ninguna emisión, salvo las reflexiones de la propia lámpara, que siempre resultan engañosas.

a) El óxido de neodimio (III) a partir de la oxidación del metal por el O₂ atmosférico

El neodimio metálico reacciona directamente con el oxígeno del aire⁶⁵ y lo hace recubriéndose de una concreción terrosa del óxido que se desprende fácilmente, salvo la capa más interna, íntimamente ligada a la superficie del metal. Según la referencia dada en el libro de C. K. Gupta, a la temperatura de 95°C y bajo condiciones de humedad relativa del 75%, el neodimio se corroe a la velocidad de 210 mg/cm² al día. Es decir, se corroe unas cuatro veces más rápido que el praseodimio.

La reacción de oxidación se describe por medio de la ecuación:



b) El óxido de neodimio (III) a partir de la descomposición térmica del Nd₂(C₂O₄)₃

La descomposición térmica del oxalato de neodimio (III) depende de la composición del gas bajo el que se está llevando a cabo la reacción, de ahí que los intermedios difieran dependiendo de si la atmósfera es rica en O₂ o si en cambio carece del mismo. En cualquier caso, el resultado final es el Nd₂O₃. Según el libro de K. C. Pyles, a la presión atmosférica la deshidratación del Nd₂(C₂O₄)₃·10H₂O comenzaría a

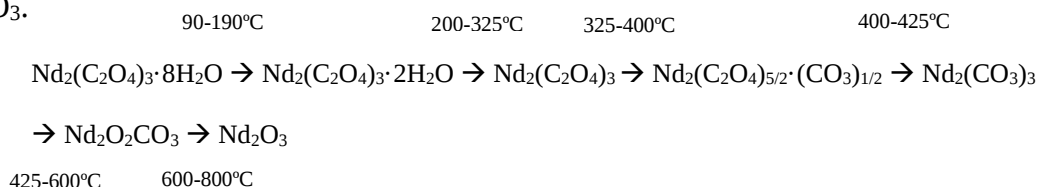
⁶⁴ Goel, P., Arora, M. Op.cit.

⁶⁵ Gupta, C.K., Krishnamurthy, N. (2004). Extractive Metallurgy of Rare Earths. CRC Press. Libro electrónico. p. 21.

los 50°C y pasaría a estar anhidro a partir de los 250°C, en una franja que arranca a los 250°C y termina a los 445°C (dos grupos de investigación diferentes obtuvieron estas temperaturas tan distintas, de ahí la horquilla). Sin embargo, a partir de los 735°C, el compuesto permanecería como óxido estable⁶⁶.

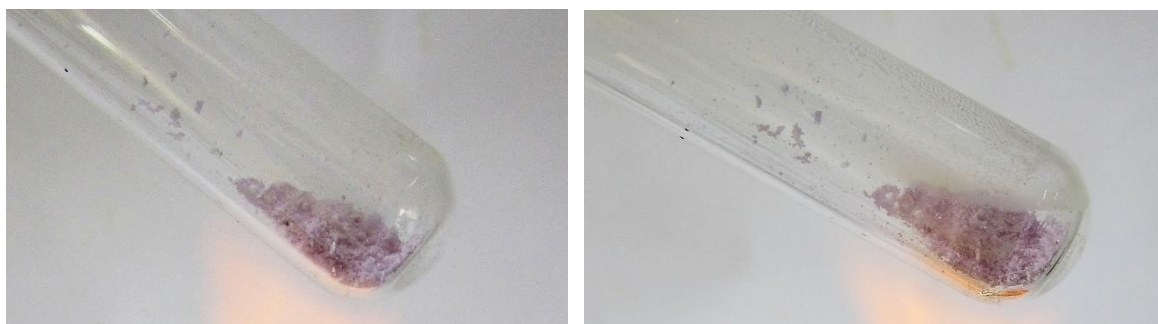
Según el artículo de V. A. Sharov⁶⁷ el compuesto tiene una sola etapa estable entre el decahidrato y el anhidro, pero el número de moléculas de agua estaría entre 3 y 4, según la gráfica, dándonos el compuesto $\text{Nd}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (si nos quedamos con el entero más bajo). En la descomposición del oxalato anhidro se ha constatado la existencia de $\text{Nd}_2\text{O}_2 \cdot \text{CO}_3$ como intermedio⁶⁸, en la compleja cadena de reacciones que propone el investigador.

Sin embargo, el interesante artículo de L. de Almeida⁶⁹, se parte del octahidrato $\text{Nd}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, dándonos una cadena teórica pero viable de la descomposición a Nd_2O_3 .



Vemos algunas de las imágenes del proceso, comenzando con la primera donde tenemos el $\text{Nd}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ de color rosa. Apenas hay que esperar un minuto, tras empezar el calentamiento a la llama de alcohol, para ver que el compuesto se va ennegreciendo rápidamente. Esto se debe a los restos de carbono procedentes de la descomposición del oxalato que van recubriendo la superficie del material. Con el transcurso del tiempo, la sustancia va clareando, a causa de la combustión paulatina del residuo de carbono, hasta que queda el óxido de neodimio (III) de color gris azulado o celeste.

Vemos unas imágenes del curioso experimento:

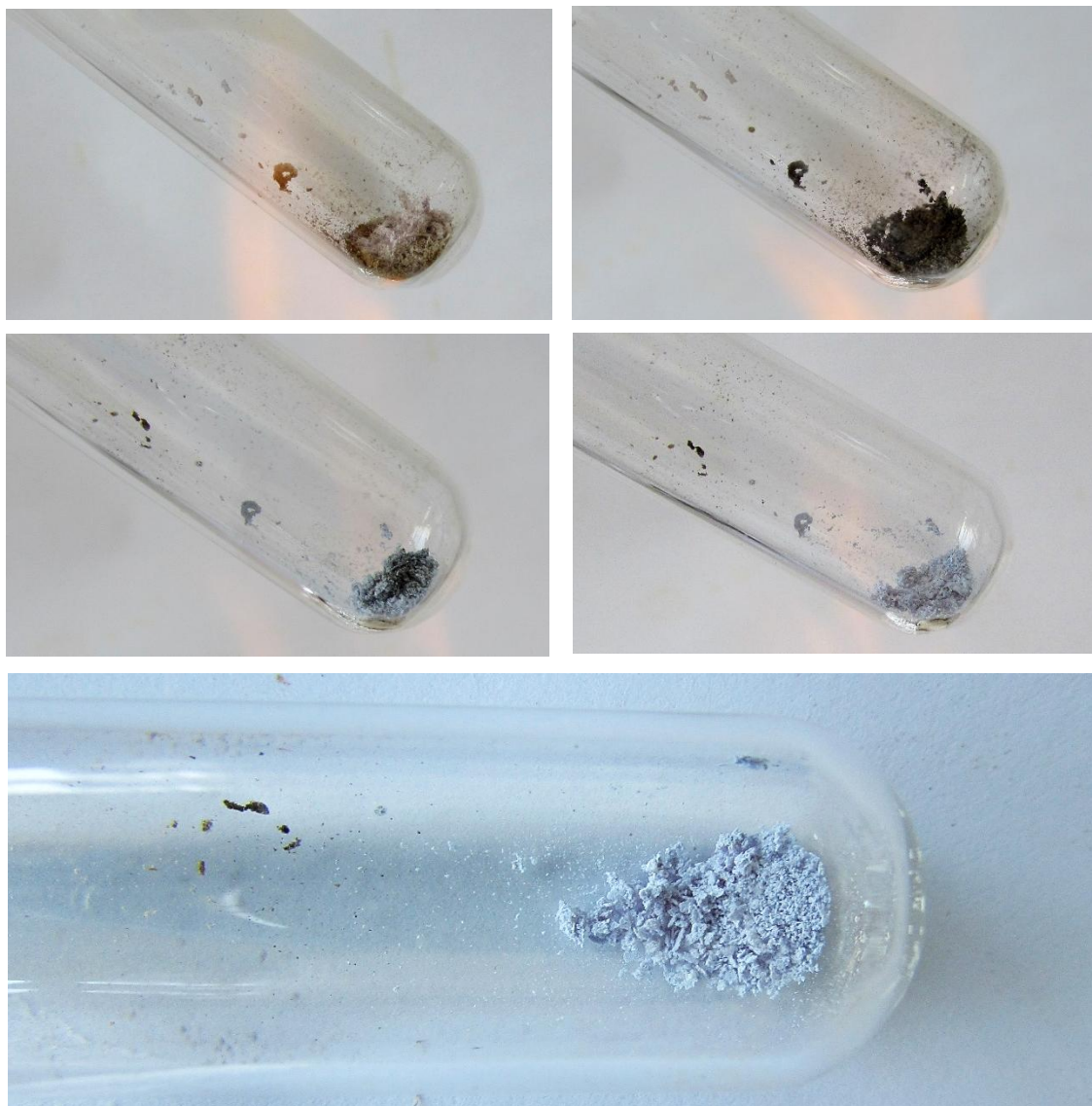


⁶⁶ Pyles, K.C. (1970). Studies of Rares Earth Acid Oxalates. Masters Theses. 4022. p. 22.
<https://thekeep.eiu.edu/theses/4022>

⁶⁷ Sharov, V.A., Bezdenezhnykh, G.V. (1981). Thermal Decomposition of Lanthanide, Yttrium, and Scandium Oxalates and Carbonates. Russian Chemical Reviews, 50, 7. pp: 630-635. p. 631.

⁶⁸ Ibídem, p. 633.

⁶⁹ 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.



Por descomposición del nitrato de neodimio (III)

La descomposición del nitrato de neodimio (III) al aire genera Nd_2O_3 como resultado estable a partir de los 600°C ⁷⁰. Al calentar el $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ se empieza a fundir⁷¹ a partir de los 55°C , cuando se transforma en un clúster de seis unidades, $6[\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ que va perdiendo poco a poco agua y ácido nítrico hasta acabar formando Nd_2O_3 .

La descomposición del nitrato se puede resumir en tres pasos, válidos para la mayor parte de los lantánidos⁷², salvo para el cerio y el samario, de manera que el nitrato anhidro se convierte en el óxido nitrato de neodimio (III) y finalmente forma el

⁷⁰ Balboul, B. A.A., Myhoub, A.Y.Z. The characterization of the formation course of neodymium oxide from different precursors: A study of thermal decomposition and combustion processes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89, 1, pp. 95-101.

⁷¹ Melnikov, P., Arkhangelsky, I.V., Nascimento, V.A. et al. (2018). Thermal decomposition of praseodymium nitrate hexahydrate $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. *J Therm Anal Calorim* 133, 929-934.

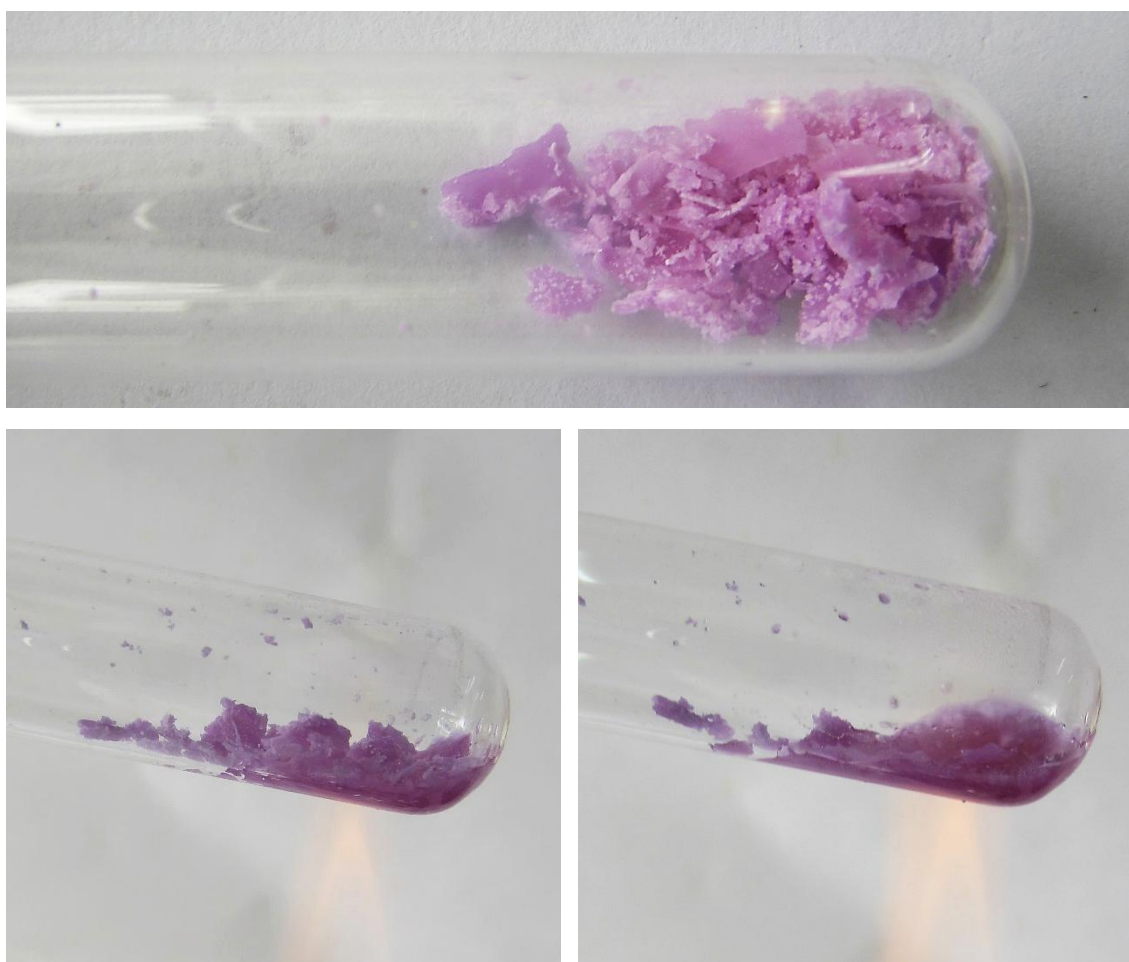
⁷² Strydom, C.A., van Vuuren, C.P.J. (1987) Thermal decomposition of Cerium (III) nitrate. *Journal of Thermal Analysis*, 32, pp. 157-160.

óxido. De manera que la cadena de reacciones se puede simplificar como sigue, siguiendo la descripción de Strydom y van Vuuren⁷³:



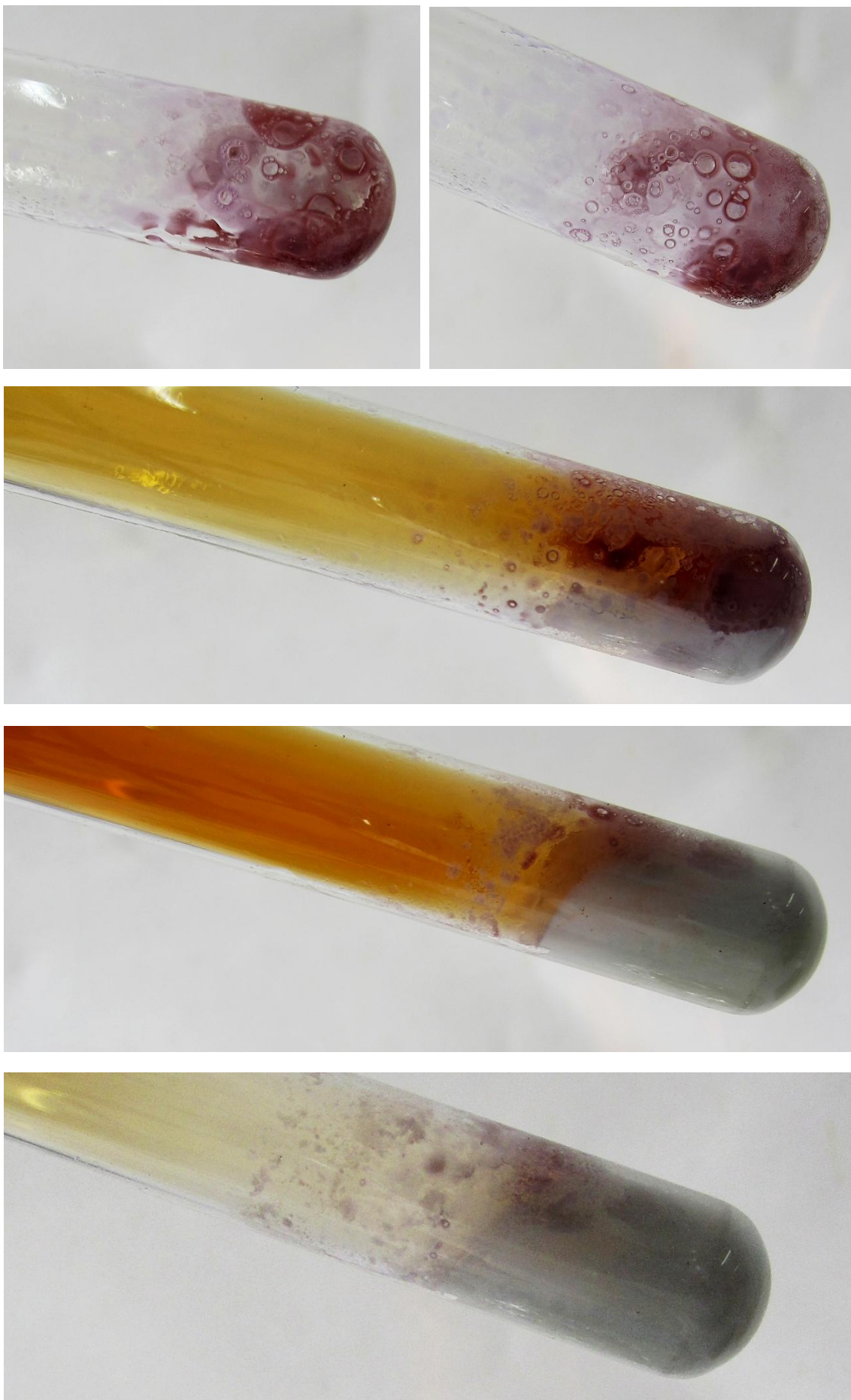
En la descomposición del nitrato se emiten agua, NO, NO₂ y N₂O₅ que escapan al ser gaseosas. Podemos seguir fácilmente el proceso de descomposición del nitrato Nd(NO₃)₃ hidratado en el laboratorio gracias a la formación del NO₂ de color naranja, que escapa al aire dentro de la campana. Al ir calentando, poco a poco la emisión del óxido de nitrógeno NO₂ cesa y obtenemos el óxido de color gris pálido con tonos azulados. Es muy interesante ver el contraste de color entre el nitrato de neodimio hidratado (de color rosa, aunque el libro de D. L. Perry lo defina como púrpura) y el color del nitrato anhidro (de color prácticamente rojo, descrito como violeta por la misma referencia⁷⁴).

Vemos aquí el proceso de descomposición del nitrato de neodimio, en imágenes, partiendo del Nd(NO₃)₃·6H₂O, cuyo color rosa intenso resulta muy llamativo.



⁷³ Van Vuuren, C.P.J., Strydom, C. A. (1986). The thermal decomposition of neodymium nitrate, *Thermochimica Acta.*, 1986, 104 293298.

⁷⁴ Perry, D.L. Op.cit. p. 285.





J) OBTENCIÓN DE LOS YODUROS DE NEODIMIO (II) Y (III)

De la misma forma que sucede con otros lantánidos, tenemos dos yoduros para el neodimio: el yoduro de neodimio (II) y el yoduro de neodimio (III). El más habitual es el NdI_3 , que es el único que aparece en el libro de W.M. Haynes y en el de D. L. Perry, caracterizado como polvo higroscópico de color verde⁷⁵. En cambio, el NdI_2 es descrito como sólido de color violeta oscuro, casi negro⁷⁶.

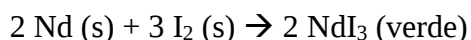
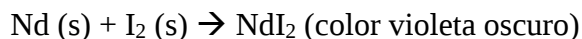
Debido a que me gusta que aparezcan ambos compuestos a la vez, pongo directamente en contacto el metal con un exceso de I_2 . Por lo general, la diferencia de colores es tal que permite distinguir dónde se ha formado el diyoduro y dónde el triyoduro, dependiendo de la relación casual de masas en el tubo de ensayo. Además, la superficie desnuda del neodimio se recubre rápidamente con el yodo nada más entrar en contacto con las bolitas del no metal. En general, esta primera reacción suele conducir al diyoduro, pero en este caso parece que el primer color que recubre la superficie es verde, correspondiendo al NdI_3 . Habitualmente la síntesis de los haluros de los lantánidos se logra a partir de la ruta del «cloruro de amonio»⁷⁷ que tiene la ventaja de ser común para los lantánidos y permite obtener cloruros anhidros, pero he preferido obtener sendos yoduros poniendo directamente en contacto los elementos y calentando. Al igual que otras veces he combinado un trozo macizo de neodimio con limaduras del metal, para llevar a cabo la reacción con el metal en diferentes texturas. He añadido yodo en exceso, pero para calcular el exceso he considerado sobre todo la masa de virutas de neodimio, dado que el trozo del metal solo será accesible en su superficie y reaccionará de forma diferente a las limaduras, como ha sucedido tantas otras veces. El problema es que los yoduros se forman recubriendo al metal, y en el caso de las limaduras, al ser pequeñas, resulta más difícil apreciar el color en detalle.

⁷⁵ Haynes, W.M. Op.cit. p. 4-75. Cf. Perry, D.L., op.cit. p. 285.

⁷⁶ https://winter.group.shef.ac.uk/webelements/compounds/neodymium/neodymium_diiiodide.html (Visitado el 14/06/25). Para violeta oscuro: Bulgakov, R. (2007). Chemiluminescence in the reaction of LnI_2 ($\text{Ln} = \text{Dy}, \text{Nd}$) with water. Russian Chemical Bulletin, 56, 10, pp: 1956-1959, p. 1957.

⁷⁷ 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.

Las reacciones implicadas en la obtención del NdI_2 y del NdI_3 son las siguientes⁷⁸:

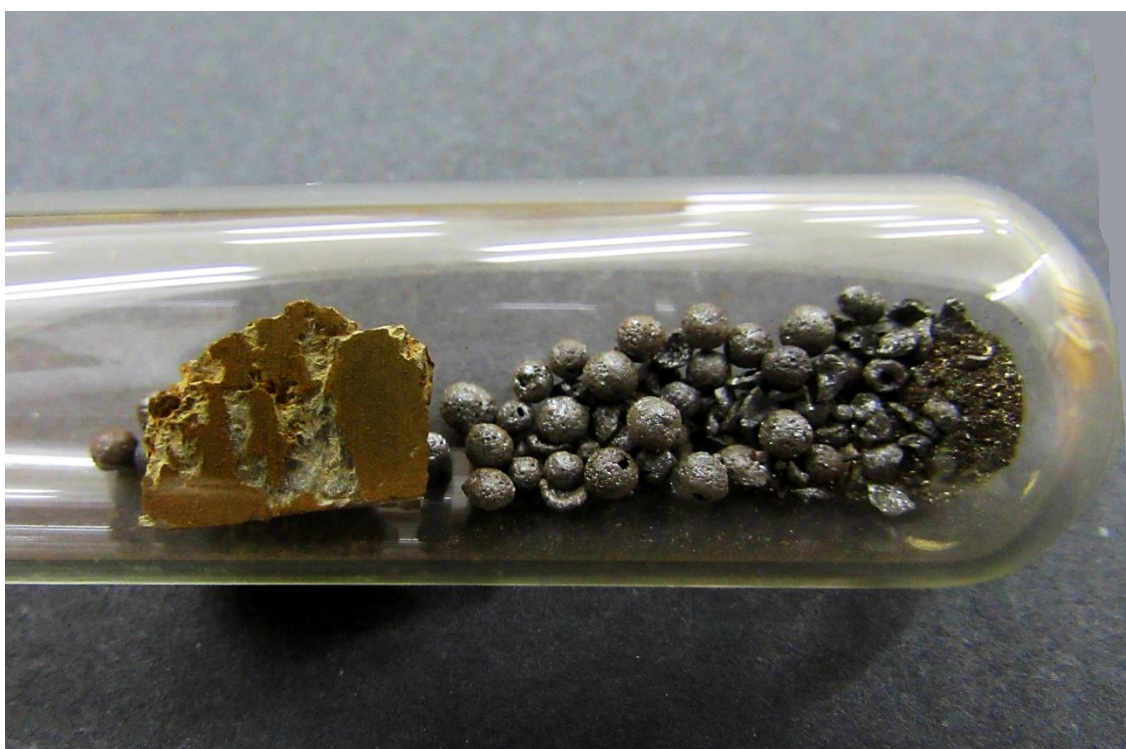
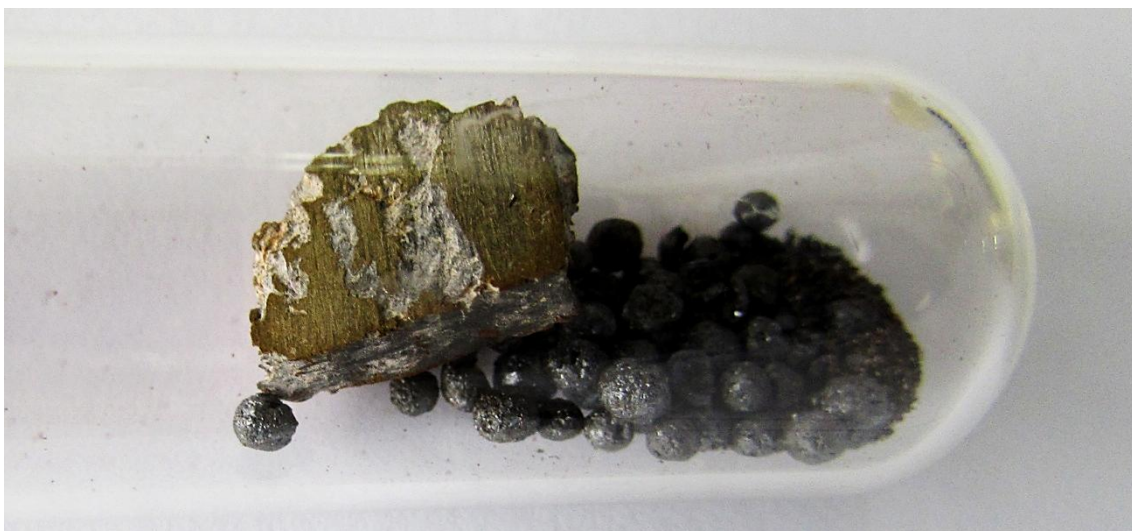


Reacción entre el Nd y el I_2 antes de calentar

Para llevar a cabo la reacción calentaré una cantidad de neodimio de 1.85g, donde las raspaduras son unos 0.25g. He raspado la superficie para que el metal esté completamente expuesto a la acción del yodo, del que he añadido en torno a 1g, cantidad en exceso respecto a la masa de limaduras (que hubiera requerido 0.7g de I_2 para reaccionar estequiométricamente). La reacción entre el yodo y el neodimio, al igual que ocurría con otros lantánidos, se produce de forma instantánea nada más entrar ambos compuestos en contacto. Lo primero que se produce es la formación de una capa superficial de color verdoso, que se aprecia perfectamente debido a la pérdida del brillo en las superficies expuestas tras haberlas limado. Desde el punto de vista académico resulta muy atractivo, al ser una reacción superficial que se produce de forma instantánea, sin calentar. Al calentar el fondo del tubo de ensayo con la mano, el recubrimiento se intensifica y adquiere una tonalidad marrón violácea, que debe corresponder a la presencia de ambos yoduros, particularmente destacable en las aristas del trozo macizo como podemos comprobar en las imágenes.



⁷⁸ Cotton, S. (2006). Op.cit.pp: 26-28.



Se puede considerar que en la primera imagen hay una tonalidad verdosa que se asociaría al NdI_3 , al contrario de lo habitual, que se suele formar el yoduro del metal en su estado divalente. Sin embargo, a medida que pasa el tiempo, el color rojizo se intensifica, por lo que probablemente se esté formando a la par el NdI_2 , de color violeta. La mezcla del verde y del violeta produciría tonalidades marrones que coinciden perfectamente con lo que vemos en las superficies del trozo de neodimio.

La reacción se puede completar de hecho, por fricción mecánica, sin calentar, como podemos ver en la serie de experimentos llevados a cabo por el grupo de Daniel Werner, que siempre releo con envidia⁷⁹.

Reacción entre el Nd y el I_2 calentando a la llama

La reacción es muy exotérmica y violenta, conllevando la aparición de una luz violeta muy llamativa, en forma de chispas. El metal parece ponerse al rojo vivo y, en este caso, ha provocado que el borosilicato se funda, formándose una especie de ampolla que acabó por resquebrajarse y quebrarse. En el seno de la ampolla se aprecia una sustancia absolutamente negra, cuyos bordes se veían de color verde, aunque no he conseguido ninguna fotografía de cierta calidad para mostrarlo. Es probable que el color negro se deba al NdI_2 porque tras romperse el vidrio evoluciona y se torna mucho más claro. Hay que considerar que el NdI_3 se funde⁸⁰ a los 787°C y que el NdI_2 lo hace a los 562°C (según la referencia del grupo de Winter), valores que se han superado ampliamente ya que la temperatura de ablandamiento⁸¹ del borosilicato es de 821°C .

El resultado final, una vez se enfría el tubo y escudriñamos los productos que se han formado, no es tan obvio como otras veces en las que he llevado a cabo este mismo experimento con otros lantánidos. Alrededor del núcleo de neodimio metálico, que no ha reaccionado por entero, aunque sí más de lo que yo esperaba, se ha formado una costra de color verdoso rica en NdI_3 , con un tono anaranjado o marrón en algunas zonas que probablemente se deba a la presencia adicional de yodo o de NdI_2 . En cambio, hay otras zonas algo más periféricas donde hay tonalidades violetas con intensidades muy variadas, que van desapareciendo a medida que entran en contacto con la humedad y el oxígeno de la atmósfera y que corresponderían a NdI_2 mayoritariamente. Tanto el NdI_2 como el NdI_3 reaccionan con el agua y el oxígeno produciendo oxiyoduro e hidróxido de neodimio⁸². Se puede ver precisamente cómo se degradan los compuestos recién formados en el fondo del tubo con el paso de los minutos: los colores palidecen, la textura se deshace y se torna untuosa por la higroscopicidad, hasta transformarse por completo en un compuesto muy diferente, probablemente $\text{Nd}(\text{OH})_3$. En algunas partes del producto vemos, desde el final mismo de la reacción, zonas de una sustancia de

⁷⁹ Werner, D., Badea, D., Schönzart, J., Eimermacher, S., Bätz, P.; Wickleder, M.S., Zegke, M. (2022). Facile Solvent-Free Mechanochemical Synthesis of UI_3 and Lanthanoid Iodides. *MDPI Chemistry*, 4, pp: 1672–1678. <https://doi.org/10.3390/chemistry4040108>.

Particularmente interesante el anexo de *Supporting information* (p. 18).

⁸⁰ Haynes, W.M. Op.cit. p. 4-75.

⁸¹ <https://valleydesign.com/Datasheets/Corning-Pyrex-7740.pdf> (Consultado el 14/06/25)

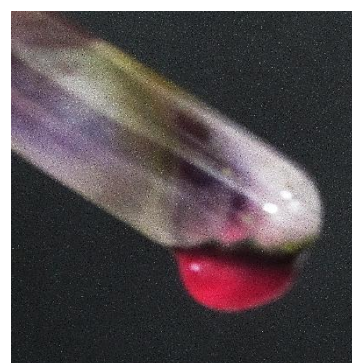
⁸² Moeller, T. Op.cit. p. 84.

color blanco inmaculado que sólo puede tratarse de un hidróxido de neodimio (III), antes de hidratarse y tornarse rosácea, como veremos en la siguiente serie de fotografías.

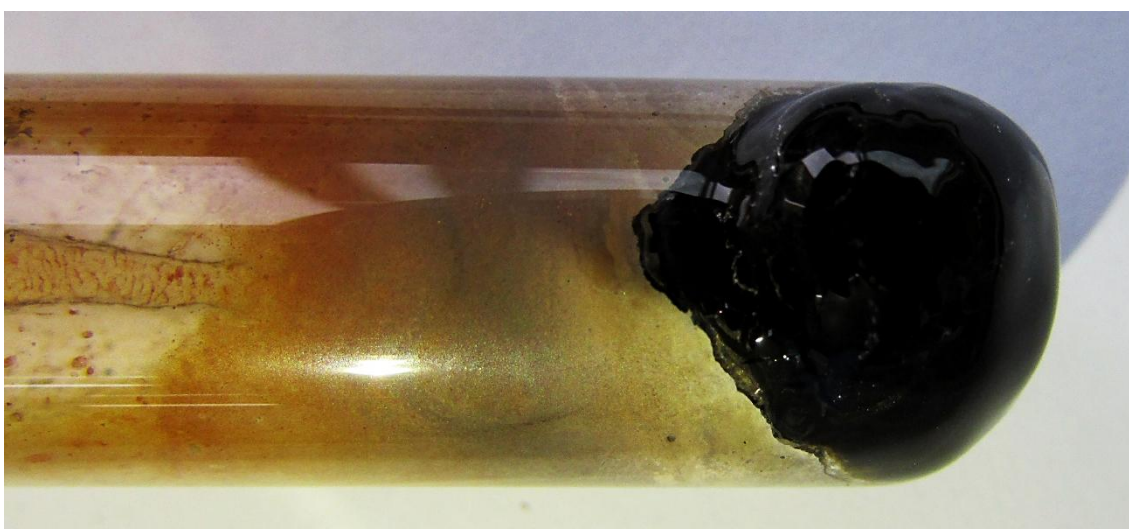
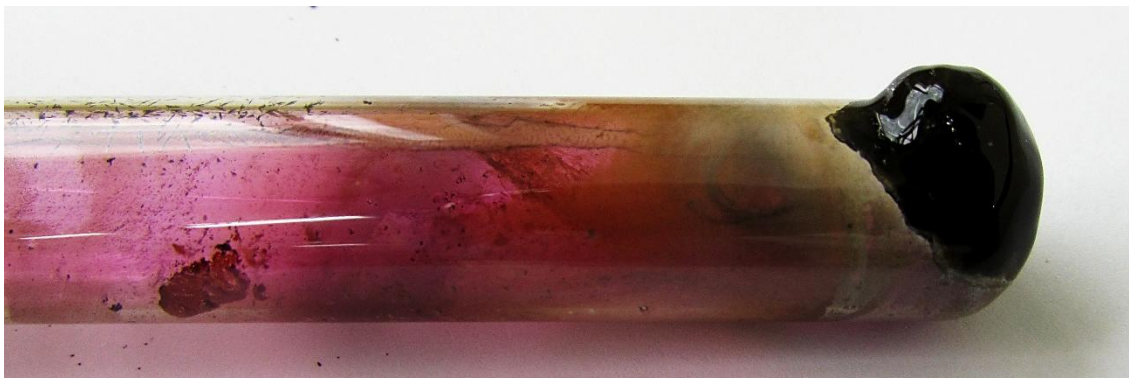
Reacción a la llama



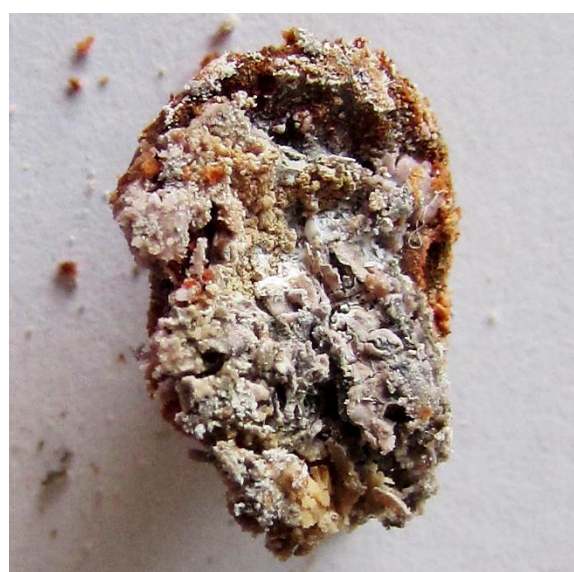
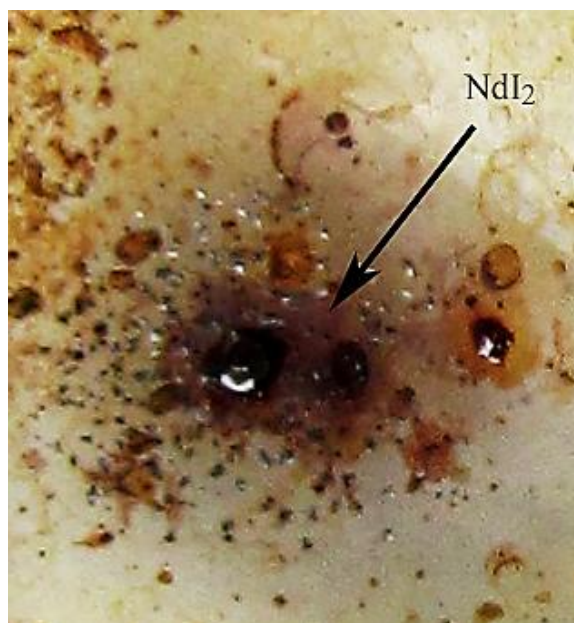
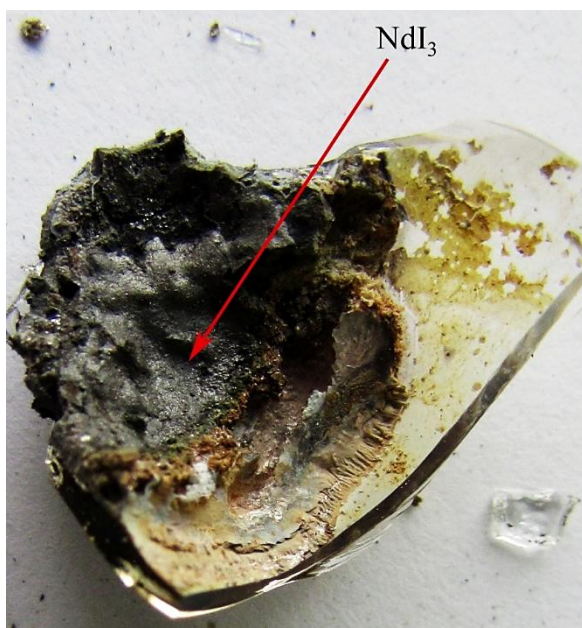
En las cuatro imágenes de la última fila se aprecia cómo se va reblandeciendo el vidrio de borosilicato, formando un abombamiento en el que se acomoda la mezcla de productos. Al retirar y dejar enfriar el tubo, vi con nitidez un cerco de color verde alrededor de la ampolla negra que se había formado, pero que todavía estaba el rojo vivo. En la fotografía de la derecha puede intuirse ese cerco verde sobre la ampolla roja, aunque la imagen es tan mala que apenas se ve.



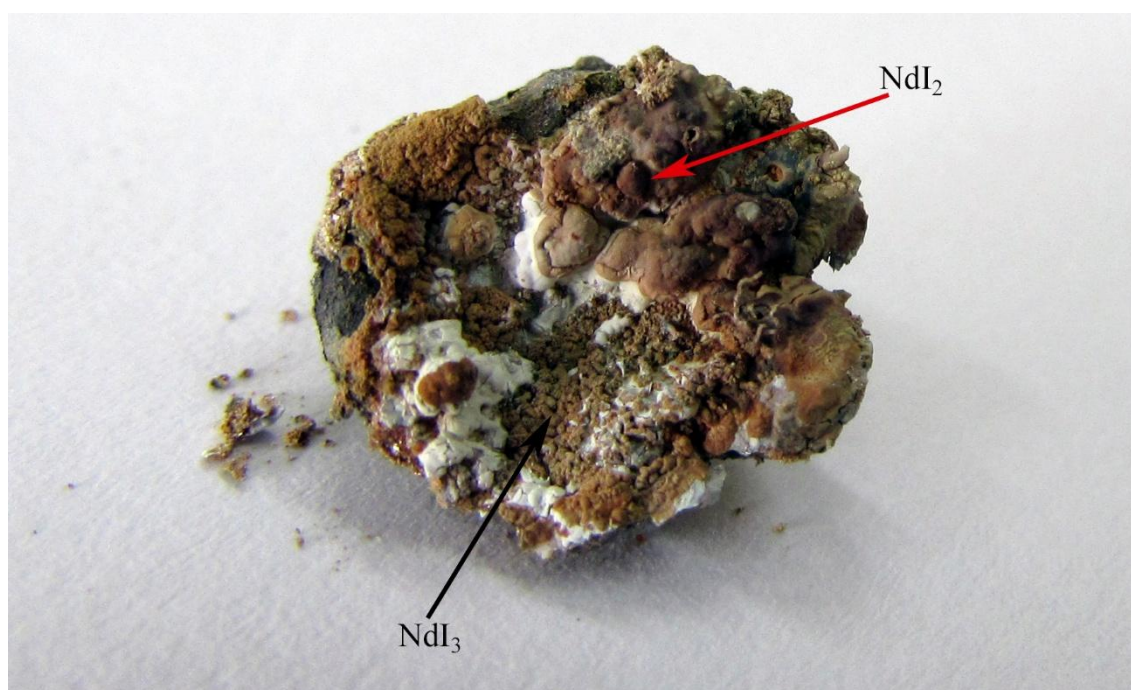
Vemos como queda el tubo una vez que se ha enfriado. Se ve muy bien el yodo gaseoso que ha quedado en exceso, de color violeta, así como franjas de color pardo y otras blanquecinas, y el bulto negro donde está recogido el producto. Al calentar repetidas veces para eliminar el exceso de yodo se acentúa el color verdoso, pero desaparece más tarde al reaccionar con el aire, probablemente.



Al dar un pequeño golpe sobre la mesa de trabajo de la vitrina, el fondo del tubo se desprende, dejando ver un conglomerado de colores donde dominan los tonos verdosos, marrones y violetas, lo que nos asegura que están nuestros productos buscados, pero con un alto grado de mezcla.



En las cuatro imágenes anteriores, correspondientes a la segunda y tercera fila, se aprecia la degradación paulatina de la mezcla obtenida de compuestos. El color verde, que era más evidente al romperse el tubo, fue aclarándose hasta adquirir el tono rosado que caracteriza la cuarta imagen, indicando que se ha transformado con toda probabilidad en un compuesto de neodimio. Saber concretamente en cual es difícil, ya que podemos tener oxiyoduros, hidróxidos e incluso hidroxicarbonato o un carbonato de neodimio (III) hidratado, pues estos compuestos absorben el CO_2 atmosférico con gran facilidad. Todos estos compuestos presentan colores pálidos con algún tono rosado.

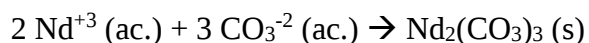


Sin embargo, a pesar de toda la complicación que se deriva de no haber realizado la reacción en unas condiciones apropiadas para obtener un único compuesto puro, es decir, bajo atmósfera inerte como mínimo, y calentando suavemente a vacío el resultado para eliminar el yodo remanente, lo cierto es que la identificación de los compuestos resulta relativamente fácil por el color. Al menos eso me ha parecido al mirar el resultado directamente, mientras que las imágenes no muestran los colores con la viveza debida. Sin embargo, una sustancia que me ha llamado fuertemente la atención y que aparece desde el mismo momento en el que rompo el fondo del tubo, es el compuesto de color blanco puro que se mantiene prácticamente hasta el final, cuando se torna rosado, al igual que toda la muestra. Como se ha producido a alta temperatura, habiendo oxígeno en el tubo, no sería extraño que se hubiese formado Nd_2O_3 , pero no he encontrado ninguna referencia donde se indique que sea de un color tan blanco. Si se observa en las imágenes es un color tan blanco, que resulta difícil de ignorar, aunque tal vez, en determinadas condiciones, podría tener ese color en concreto, aunque podría tratarse de alguna contaminación con lantano, pero me parece excesiva.

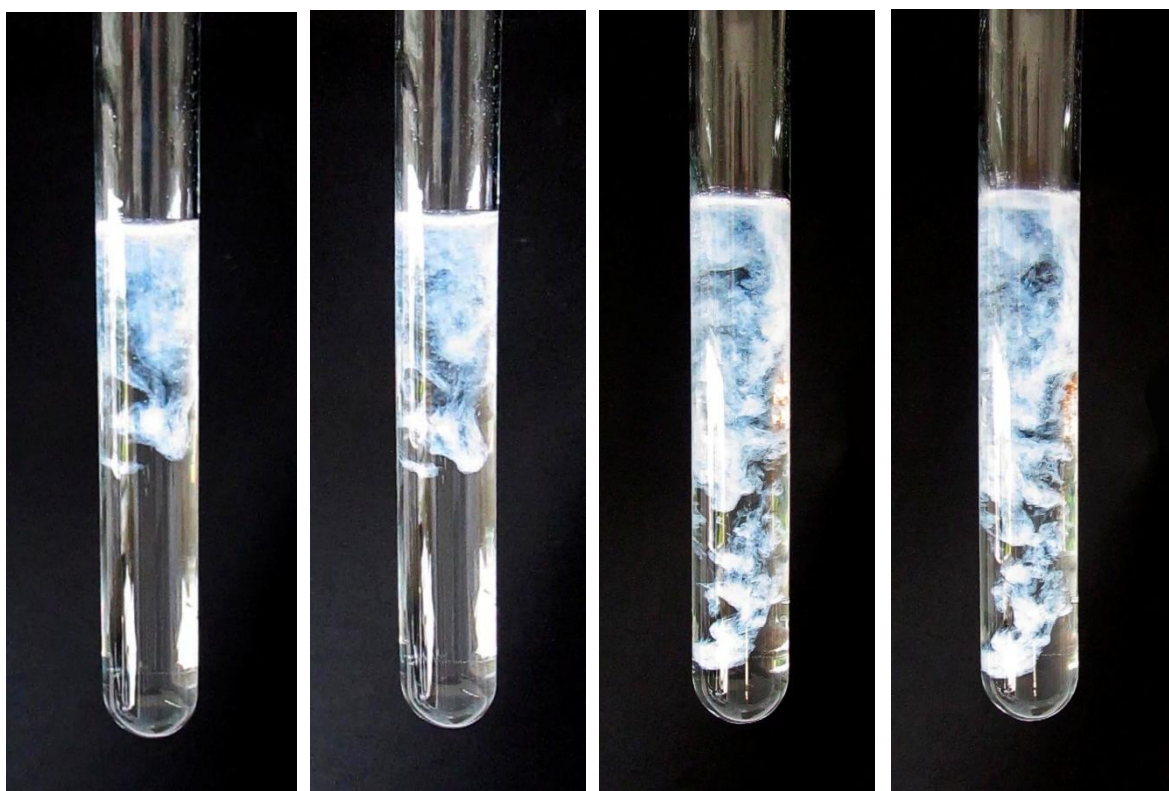
K) CARBONATO DE NEODIMIO (III)

El carbonato de neodimio (III) es un compuesto insoluble de color rosa claro y brillo sedoso, que se ve bien en el precipitado seco, mientras que el texto de D.L. Perry lo describe como polvo púrpura pálido, que precipita con un número indeterminado de moléculas de agua⁸³. La formación del $\text{Nd}_2(\text{CO}_3)_3$ se logra sin dificultades añadiendo gotas de la disolución ácida de Nd^{+3} sobre una disolución saturada de Na_2CO_3 en agua destilada⁸⁴. 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.

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



El precipitado aparece en forma de grumos densos y gelatinosos que caen al fondo por gravedad rápidamente, teniendo en cuenta la alta concentración de los dos reactivos. Aquí vemos la serie correspondiente a la precipitación en el tubo de ensayo al añadir unas gotas de la disolución de Nd^{+3} sobre la disolución concentrada de carbonato de sodio.



⁸³ Perry, D.L., op.cit. pp. 283-284.

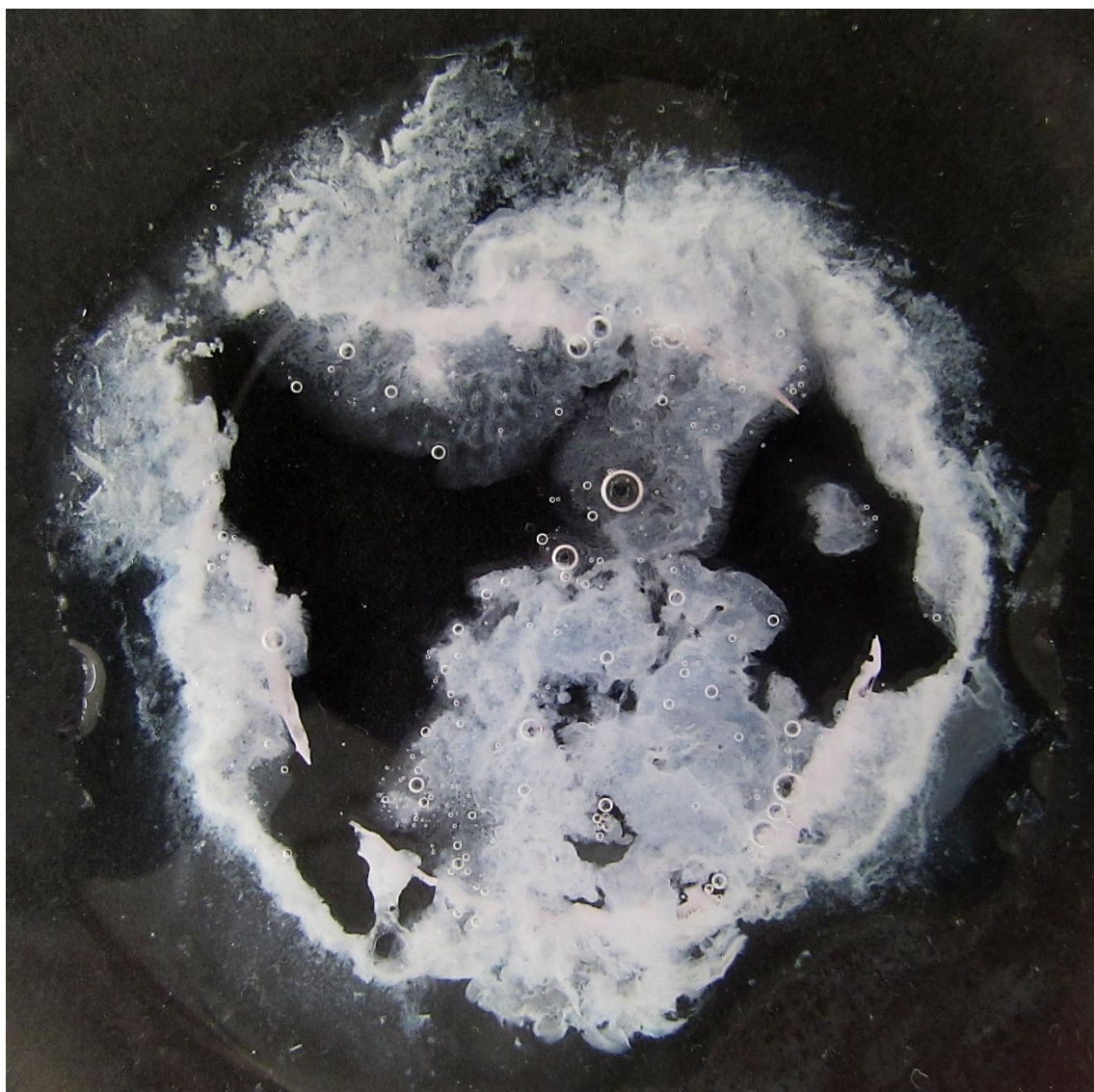
⁸⁴ Para ver los compuestos análogos de holmio y erbio: Song, L., Rongjun, M. (2007). Synthesis and Characterization of Hydrated Holmium and Erbium Carbonates. Asian Journal of Chemistry, 19, 3, pp: 1883-1887.

En el vidrio de reloj vemos cómo reacciona el Nd^{+3} añadido sobre una disolución de Na_2CO_3 para formar el $\text{Nd}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$.



En todos los casos, merece la pena comparar cómo cambia el color percibido al variar el fondo de negro a blanco. El tono rosado, con ciertos visos únicamente se ve cuando el fondo es blanco, mientras que parece mucho más blanco, incluso azulado, cuando el fondo es negro (como por otra parte es lógico).





L) OBTENCIÓN DEL SULFURO DE NEODIMIO (III)

El sulfuro de neodimio (III) se describe como un polvo de color marrón⁸⁵, particularmente como sólido amorfo. En esa misma referencia también se indica la posibilidad de que sea verde o amarillo, aunque algunos suministradores lo describen como un polvo de color negro⁸⁶ y otros como gris⁸⁷, por lo que encontramos la misma variabilidad de tonos que en otros compuestos semejantes de los lantánidos. Parece claro que según el método de obtención y según el tamaño de partícula, los colores pueden variar ostensiblemente. De la misma manera que ocurría con otros sulfuros de los lantánidos, la síntesis real del compuesto puro queda lejos de nuestro alcance y lo único que podemos pretender es observar al menos la formación de un compuesto inestable, probablemente no estequiométrico entre el S^{-2} y el Nd^{+3} , sobre todo en condiciones acuosas.

a) Poniendo en contacto el Nd^{+3} con Na_2S

Los cambios observados al poner una escama de Na_2S sobre un poco de disolución ácida de Nd^{+3} procedente de la disolución del metal con ácido nítrico son prácticamente idénticos a los observados con otros lantánidos. Se va disolviendo S^{-2} , que en gran parte se libera como H_2S gaseoso (lo que es perfectamente perceptible y obliga a hacer la reacción en vitrina) y a la vez va formando un precipitado gris que va intensificando su color a medida que transcurren los minutos. La mera sucesión de colores (que casan con los que dan los proveedores) evidencia que hay más de un compuesto y probablemente tengamos sulfuros de neodimio entre ellos. Destaca la aparición de un polvo gris oscuro que se va formando sobre la escama de Na_2S y que tiene que tratarse de Nd_2S_3 estequiométrico o no, de Nd_2O_2S , insoluble y de color azul pálido⁸⁸, o de mezclas complejas de estos compuestos. Con el tiempo, estos colores van desapareciendo, dejando un precipitado uniforme y de color rosa que se corresponde con el $Nd(OH)_3$ más o menos hidratado.

Según los proveedores el Nd_2S_3 es insoluble en agua, pero soluble en ácido⁸⁹. A medida que el pH va subiendo por la emisión de H_2S aumenta la posibilidad de que vaya precipitando el sulfuro de neodimio (III) alrededor de la escama de Na_2S que se deshace. No obstante, la composición concreta del precipitado es difícil de conocer, a causa de su inestabilidad, sobre todo sabiendo que pueden existir sulfuros de neodimio no estequiométricos. Los sulfuros de lantánidos, no estequiométricos, así como los oxisulfuros de los lantánidos, son compuestos conocidos, que pueden aparecer de forma paralela al sulfuro estequiométrico según algunas investigaciones. Por ello, identificar

⁸⁵ Samsonov, G.V., Radzikovskaya, S.V. (1961). The Chemistry of Rare-Earth and Actinide sulphides. Russian Chemical Reviews, 30,1,pp: 28-41. p. 31.

⁸⁶ <https://easchem.en.made-in-china.com/product/VdaGohMPEUkZ/China-Neodymium-Sulfide-Powder-CAS-No-12035-32-4-ND2s3-2n5-3n-3n5.html> (Consultados 15/06/25)

⁸⁷ <https://www.samaterials.es/neodymium/2648-neodymium-sulfide-nd2s3-powder.html> (Consultado el 15/06/2025)

⁸⁸ Samsonov, G.V., Radzikovskaya, S.V. Op.cit. p. 31.

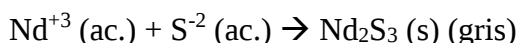
⁸⁹ <https://cymitquimica.com/cas/12035-32-4/> (Consultado el 15/06/2025)

de forma precisa lo que sucede en este experimento es difícil, sobre todo en un laboratorio como el nuestro. En este sentido hay muchos ejemplos donde pueden formarse LnS , Ln_2S_3 y $\text{Ln}_2\text{O}_2\text{S}$, aunque las condiciones de síntesis de las referencias sean diferentes y verdaderamente controladas, no como aquí sucede⁹⁰.

De cualquier forma, al llevar a cabo el experimento, se aprecia la formación de un precipitado de color gris azulado. A lo largo de todo el proceso el pH permanece ácido, aunque al final, pasadas unas horas, el pH se acerca a la neutralidad, tras haber añadido varias escamas de Na_2S . Es probable que el “ Nd_2S_3 ” formado se descomponga en el ácido que domina el medio y que el sulfuro se vaya eliminando lentamente a la atmósfera en forma de H_2S , lo que provoca una paulatina subida del pH y la posible precipitación del Nd^{+3} en forma de hidróxido a lo largo del tiempo, algo que se acomoda bien con el color final observado.

La síntesis descriptiva propuesta tampoco es extraña, ya que una forma habitual de preparar los sulfuros de los lantánidos consiste en someter el catión trivalente al H_2S (g) para formar el sulfuro estequiométrico correspondiente⁹¹.

La reacción de precipitación del Nd_2S_3 sería supuestamente:



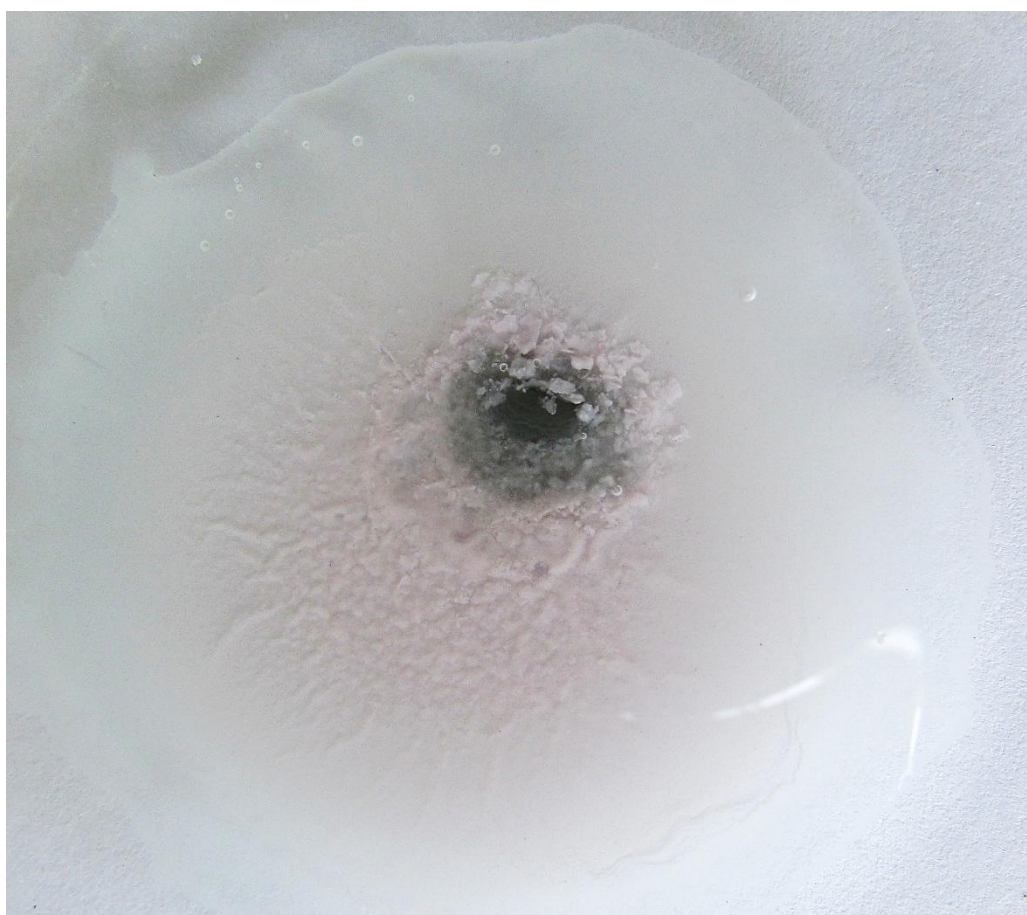
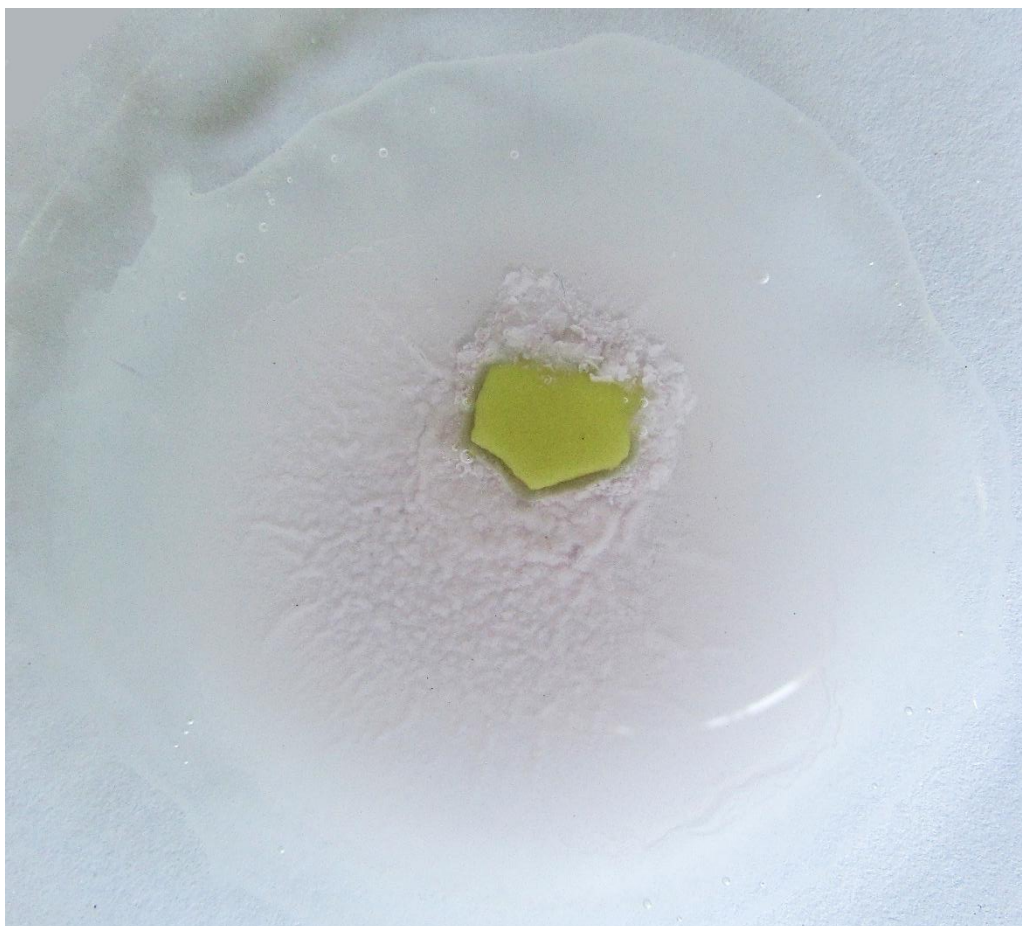
Aunque esta vía de formación fugaz del sulfuro de neodimio (III) es inapropiada para síntesis, debido a la hidrólisis del agua presente⁹², nos permite hacernos una idea del color gris resultante.

Aquí vemos las fotografías del proceso de formación del “ Nd_2S_3 ” donde sobre la disolución de neodimio en ácido nítrico he puesto una escama de sulfuro de sodio para ver qué cambios se producen alrededor de la misma. A pesar de que como síntesis es del todo inadecuada, los colores y el desarrollo de la experiencia son muy satisfactorios desde el punto de vista visual (no desde el olfativo, claro). Para lograr que se forme el precipitado de color gris he tenido que diluir la disolución de partida del Nd^{+3} en HNO_3 , que era del 1M, a unos 0.1M. De esta manera, he reducido bastante el número de escamas de sulfuro de sodio que tenía que añadir. Al principio lo intenté con la disolución ácida concentrada y me vi obligado a parar, porque estaba empleando demasiado sulfuro para neutralizar el ácido. De esta manera, lo más apropiado es trabajar con disoluciones de Nd^{+3} neutras o ácidas, pero diluidas. El precipitado de $\text{Nd}(\text{OH})_3$ rosa se ve perfectamente bajo la segunda escama de Na_2S añadida.

⁹⁰ Tran, N.B. (2020). Synthesis of rare-earth monosulfide RESx (RE = Gd, Ho) compacts by reaction sintering. Tesis, Instituto Muroran de Tecnología, Japón. (Con holmio en vez de neodimio).
Cf. Marin, C. (2016). Synthesis and Applications of Lanthanide Sulfides and Oxides. Student Research Projects, Dissertations, and Theses - Chemistry Department. 71.
Cf. Suponitskii, Yu.L., Kuz'micheva, G.M., Eliseev, A.A. (1988). Lanthanide Oxide sulphides. Russian Chemical Reviews, 57, 3, pp: 367-384.

⁹¹ Cotton, S. (2006). op.cit. p. 32.

⁹² Moeller, T. Op.cit. p. 92

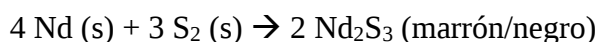


Sobre la escama de sulfuro de sodio se forma un recubrimiento gris que debe ser “Nd₂S₃” y que se descompone a medida que pasan las horas. De hecho, tres horas más tarde, no quedaba nada, salvo el precipitado de color rosa correspondiente al Nd(OH)₃.

b) Por calentamiento de los dos elementos

He llevado a cabo la reacción entre ambos elementos en un crisol cerrado, con una cantidad de azufre ligeramente superior a la estequiométrica. He empleado un trozo de neodimio macizo y una parte en forma de limaduras. La reacción parece haberse dado bien, habiendo marchado durante más de una hora, hasta que el olor acre de los óxidos de azufre, que inevitablemente se producen, disminuyó por completo. El producto obtenido es una costra de color marrón que rodea el núcleo de metal, mientras que alrededor todo parece impregnado de un polvo negro. Aquí, de hecho, aparecen los dos colores que la bibliografía da para el Nd₂S₃.

Las reacciones asociadas correspondientes serían⁹³:

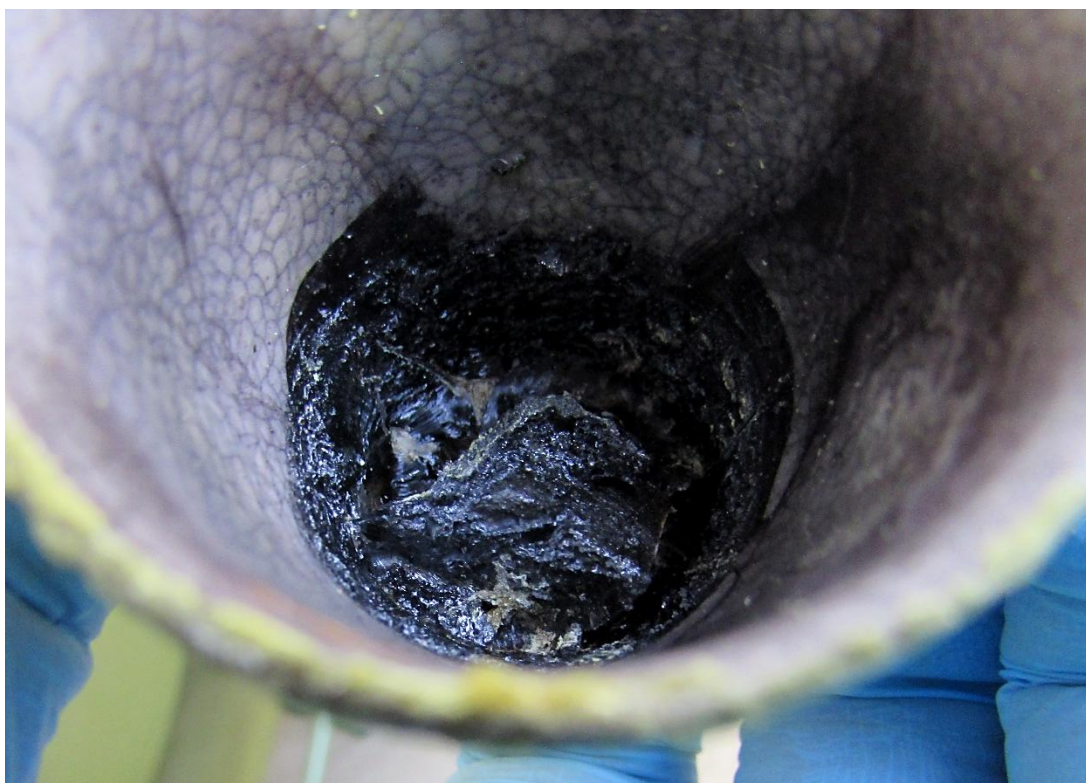


He utilizado 5.5g entre un cubo y las limaduras de neodimio y una cantidad de azufre ligeramente por encima de la estequiométricamente necesaria, unos 2 g respecto a los 1.83g estequiométricos. He dejado que la reacción se lleve a cabo durante una hora en la vitrina y esperé hasta que se enfrió por completo para levantar la tapa del crisol.

Vemos las imágenes del proceso, llevado a cabo en la campana de extracción. En el fondo del crisol se ha formado una torta de producto negro que me ha costado bastante desprender del fondo, así como el trozo de neodimio en el centro, adherido a la porcelana. Además, en las paredes hay un tono rosado inequívoco del neodimio.



⁹³ Moeller, T. op.cit. p. 90.



El recubrimiento sobre el trozo de neodimio es marrón. Podría pensar que se trata de azufre, pero he mantenido el fuego bastante tiempo como para asegurarme de que el azufre reaccionase con el neodimio o con el oxígeno del aire. Por otra parte, la temperatura de fusión⁹⁴ del Nd_2S_3 es de 2200°C , por lo que no hay problemas a la hora de mantener la temperatura durante mucho tiempo.



M) FOSFATO DE NEODIMIO

El fosfato de neodimio (III) es un compuesto cristalino de color púrpura pálido⁹⁵, y en este caso la cosecha de cristales se obtuvo por evaporación sin problemas y con ejemplares de buen tamaño. Para precipitar el fosfato de neodimio (III) voy a añadir unas gotas de disolución de Nd^{+3} en ácido nítrico sobre una disolución concentrada de Na_3PO_4 . Aunque pueda protonarse el fosfato y formar especies hidrogenadas, la mayor parte del precipitado será $\text{NdPO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, hidratado con un número variable de moléculas de agua⁹⁶. Su producto de solubilidad a 25°C presenta un valor⁹⁷ de $10^{-24.5}$ por lo que precipitará inmediatamente, aunque dependiendo del pH haya que tener en cuenta la existencia de equilibrios complejos donde podemos encontrar especies en disolución del tipo $[\text{NdH}_2\text{PO}_4]^{+2}$, $[\text{NdHPO}_4]^{+1}$, $[\text{Nd}(\text{HPO}_4)_2]^{-1}$ e incluso NdPO_4 sin precipitar. La

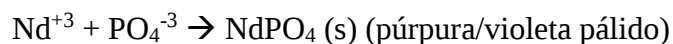
⁹⁴ Samsonov, G.V., Radzikovskaya, S.V. Op.cit. p. 31.

⁹⁵ <https://easchem.en.made-in-china.com/product/oOUGqNeZrCcx/China-Neodymium-Phosphate-Crystal-Powder-CAS-No-14298-32-9-Ndpo4-3n-4n-5n.html> (Visitado el 15/06/2025)

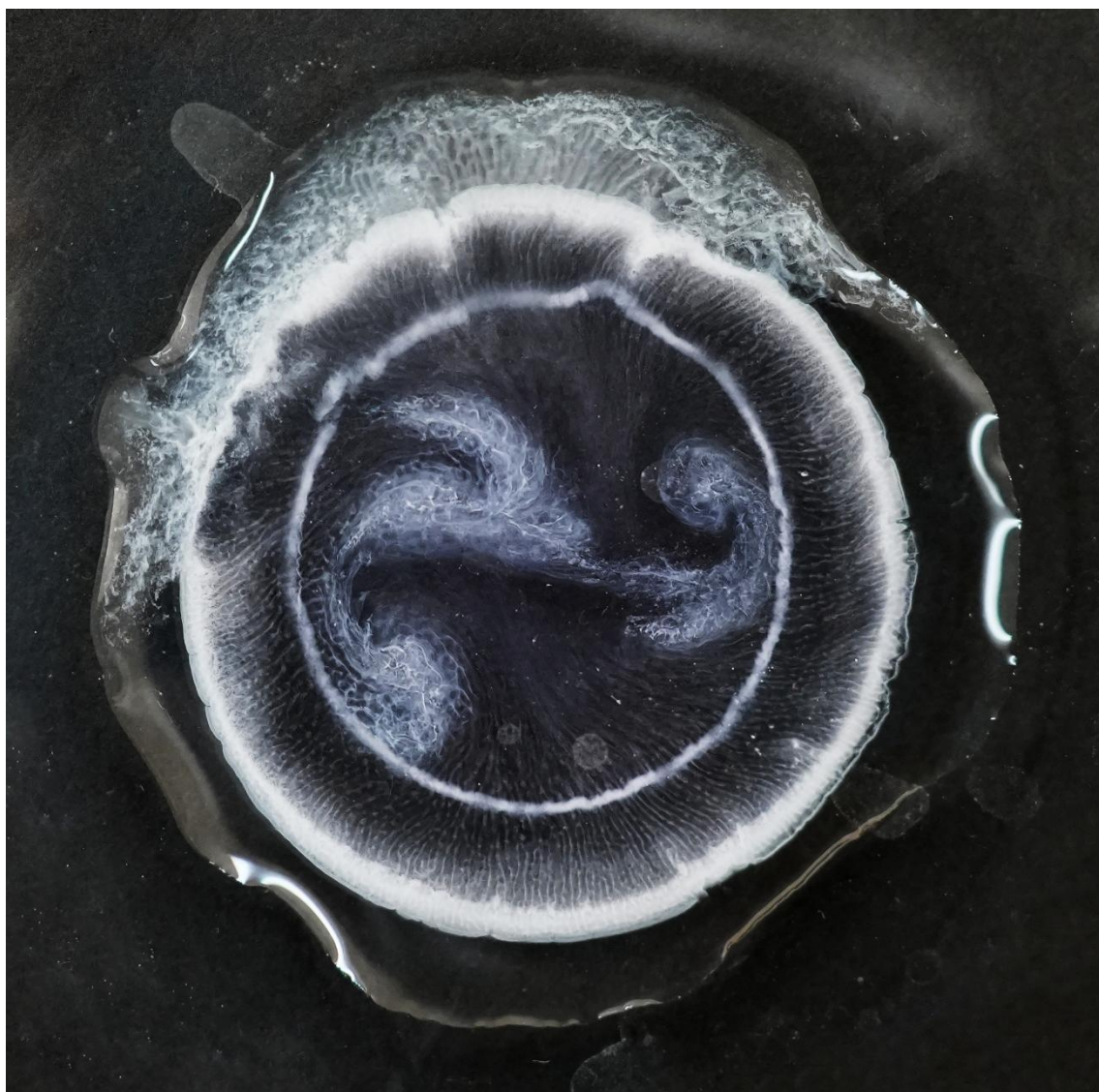
⁹⁶ Perry, D.L. Op.cit. p. 285.

⁹⁷ Spahiu, K., Bruno, J. (1995). A selected thermodynamic database for REE to be used in HLNW performance assessment exercises. SKB-TR--95-35. Suecia. p. 36.

insolubilidad de los fosfatos de las tierras raras es muy alta y permanecen insolubles en amplios rangos de pH, como es el caso de 3-13 para el lantano⁹⁸, no siendo muy diferente para el resto de metales y en concreto para el fosfato de neodimio⁹⁹. La reacción de precipitación principal será:

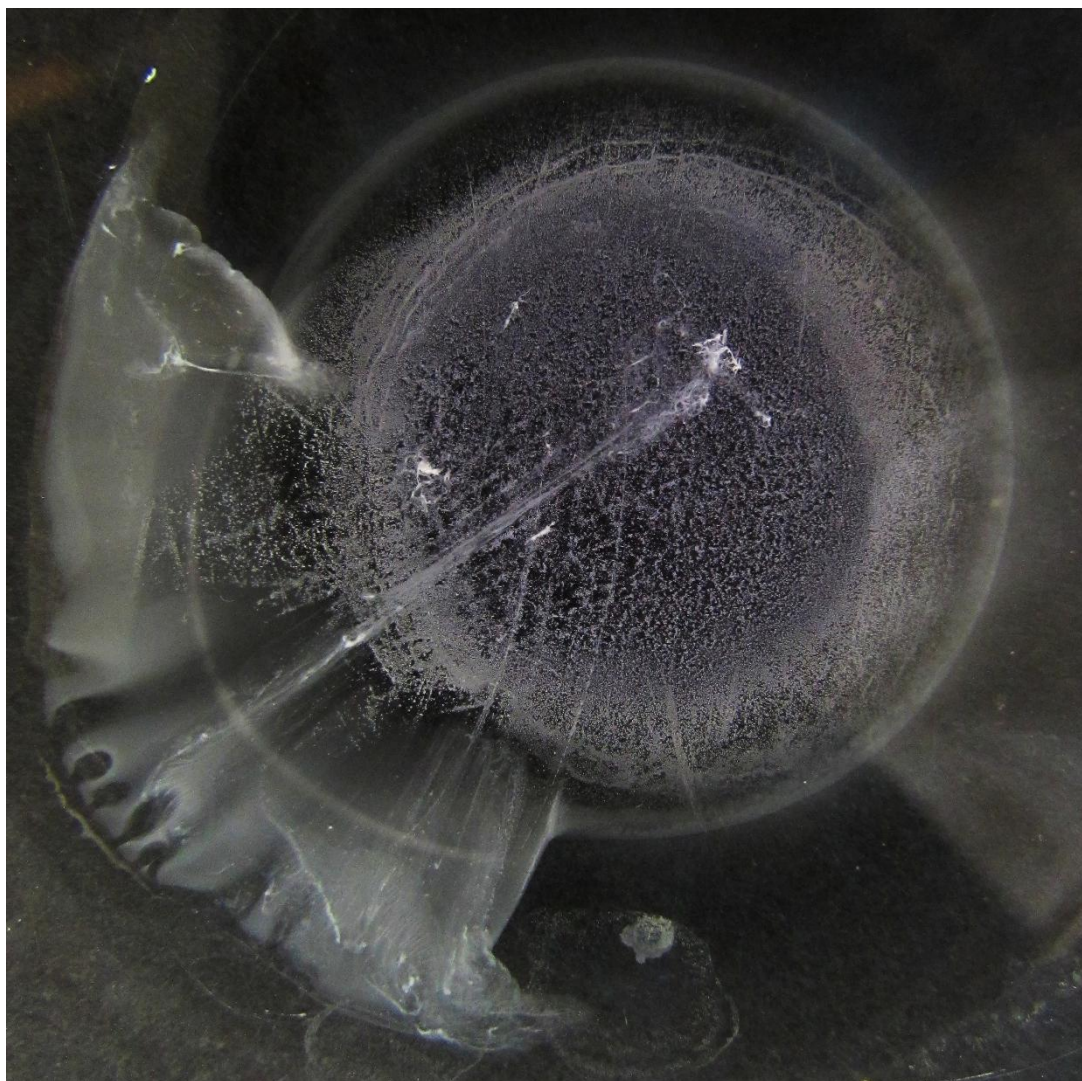


Vemos algunas imágenes de la formación del fosfato de neodimio (III) obtenido al añadir unas gotas de disolución ácida de Nd^{+3} sobre una disolución de fosfato de sodio en un vidrio de reloj:



⁹⁸ Zhi, Y. et al. (2020). Emerging lanthanum (III)-containing materials for phosphate removal from water: A review towards future developments. *Environment International*, 145, 106115, p.6.

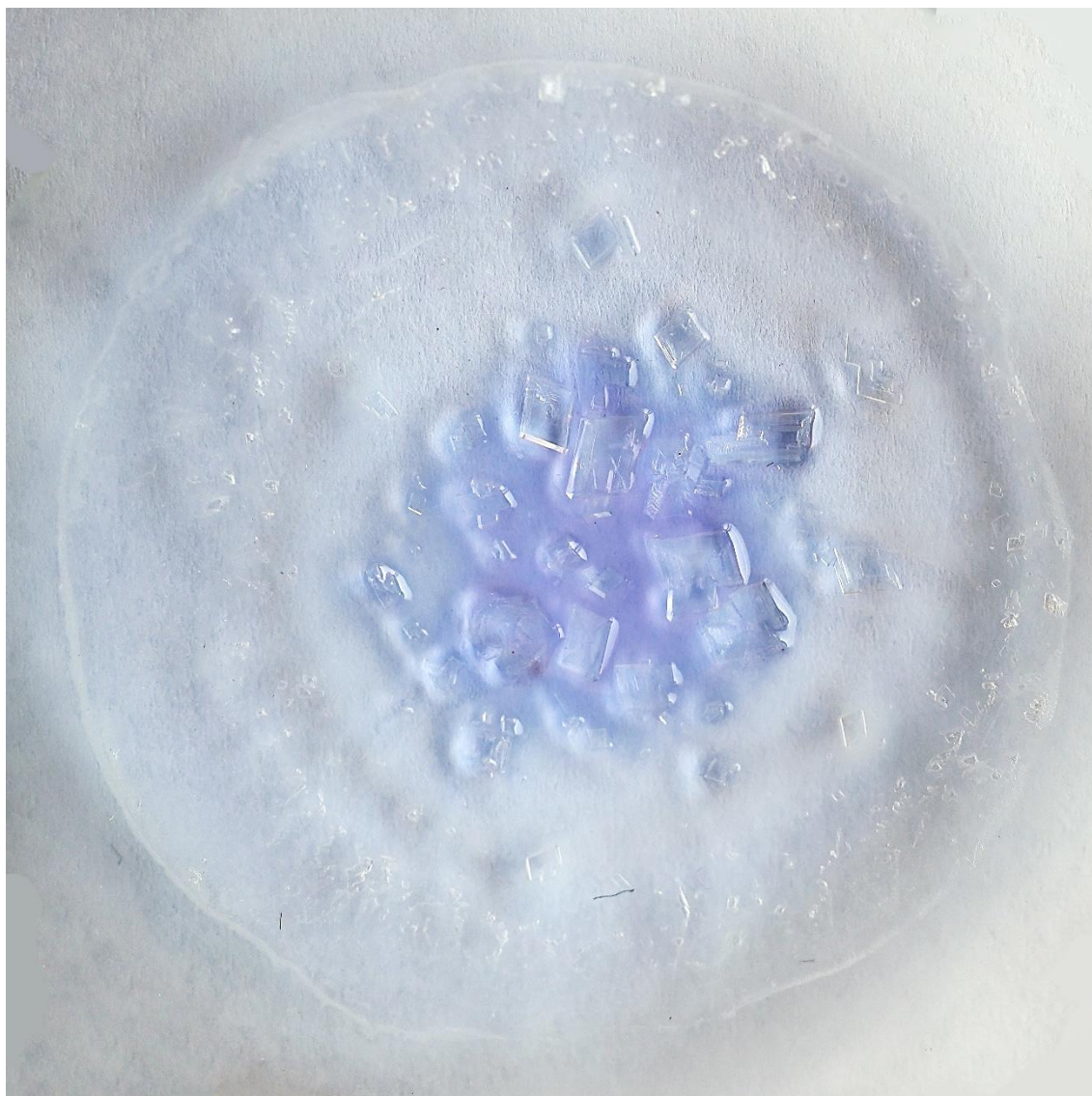
⁹⁹ Gysi, A., Harlov, D. (2021). Hydrothermal solubility of TbPO_4 , HoPO_4 , TmPO_4 , and LuPO_4 xenotime endmembers at pH of 2 and temperatures between 100 and 250 °C. *Chemical Geology*, 567, 120072.



Es evidente que en ninguna de las disoluciones anteriores estamos en condiciones de equilibrio y que la precipitación de los fosfatos e hidrogenofosfatos se basa en que la insolubilidad de estas sales es muy grande. En este caso, el pH de la disolución comenzó siendo básico (al ser una disolución de Na_3PO_4 en agua) pero fue disminuyendo a medida que añadía las gotas de ácido con el metal disuelto. Las especies estables del ácido fosfórico en equilibrio¹⁰⁰ son las especies parcialmente protonadas $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$ y HPO_4^{-2} , formadas a partir del PO_4^{-3} , por lo que se espera que el precipitado del ensayo del NdPO_4 contenga también una cierta cantidad de $\text{Nd}_2(\text{HPO}_4)_3$ y de $\text{Nd}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$.

Desde el principio, el color del fosfato de neodimio se percibe bien incluso aunque el fondo sobre el que se encuentra el vidrio de reloj sea oscuro. El tono violeta de los cristales se va extendiendo sobre la disolución del fosfato de sodio, que es incolora, hasta crear un retículo de puntos violáceos como se ve en la imagen de más arriba. Al dejar evaporar, los cristales van creciendo, con caras brillantes y bien formadas.

¹⁰⁰ Han, K. Op.cit. p. 2.



Ñ) LUMINISCENCIA DEL NEODIMIO (III)

En este apartado, al igual que en gran parte del resto del artículo, mantengo el contenido del artículo correspondiente al erbio por ser perfectamente válido. Casi todos los lantánidos en su estado de oxidación +3, con excepción¹⁰¹ 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 esperar¹⁰², al ver que sólo está ausente en los cationes con f^0 y f^{14} . En el caso particular del $[\text{Nd}(\text{H}_2\text{O})_9]^{+3}$ no parece observarse ninguna fluorescencia, y el agua atenúa cualquier emisión de luminiscencia¹⁰³. Sin embargo, en el resto de compuestos

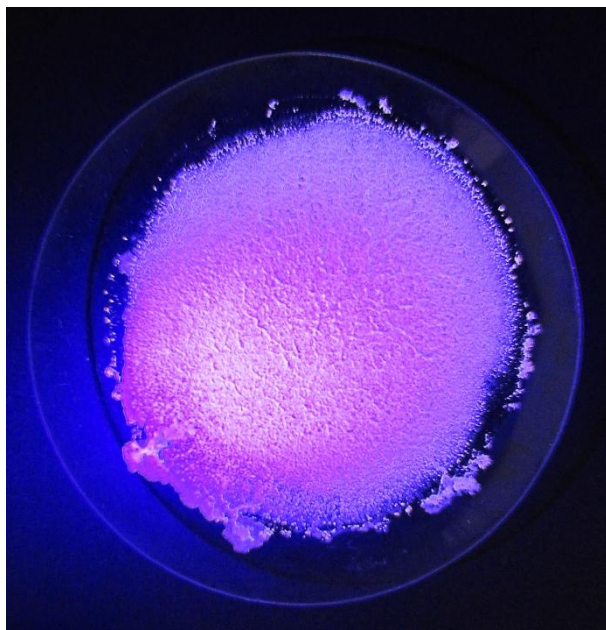
¹⁰¹ Shriver, D.F., Atkins, P. (2006). Inorganic Chemistry. Oxford, UK: Oxford University press, p.578.

¹⁰² Housecroft, C.E., Sharpe, A.G. op.cit. p. 746.

¹⁰³ Hasegawa, M., Ohmagari, H., Tanaka, H., Machida, K. (2022). Luminescence of lanthanide complexes: From fundamental to prospective approaches related to water- and molecular-stimuli. Journal of Photochemistry & Photobiology, C, 50, 100484.

tampoco tenemos emisión en el rango del visible, salvo en el rojo¹⁰⁴, en condiciones de baja temperatura, pero sí presenta emisión en la franja del infrarrojo, como ya he indicado anteriormente¹⁰⁵.

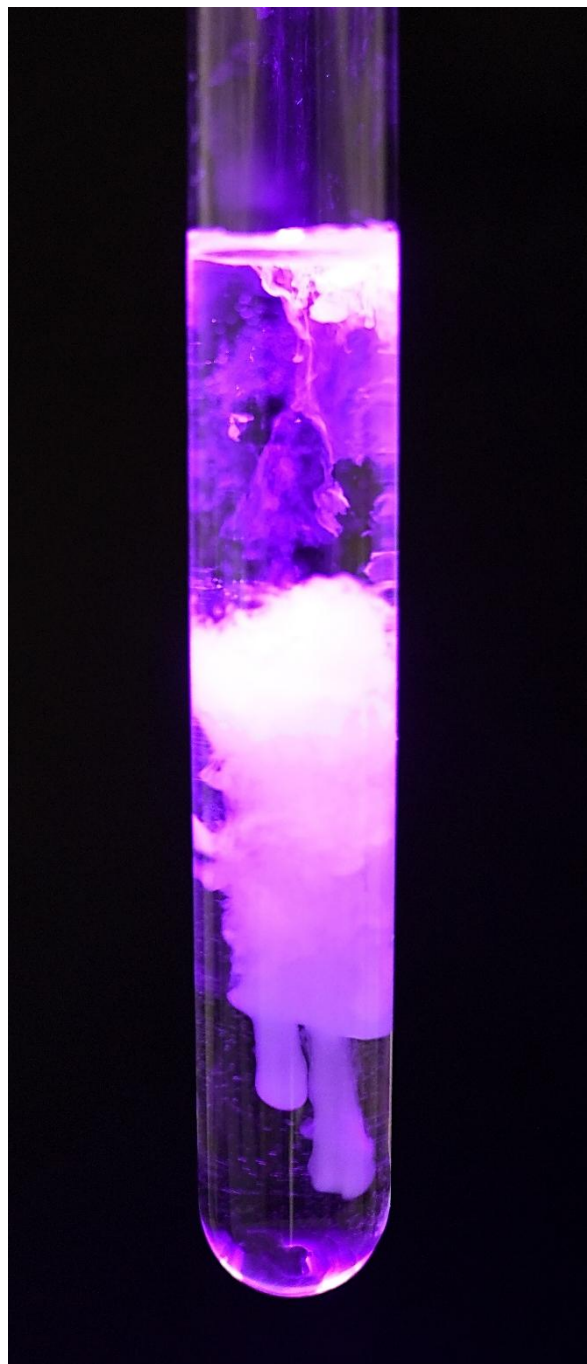
En estos compuestos se lo que se ve realmente es la reflexión rosácea de la luz proveniente de la lámpara de ultravioleta, es decir, no tienen fluorescencia en el visible:



Carbonato de neodimio (III)



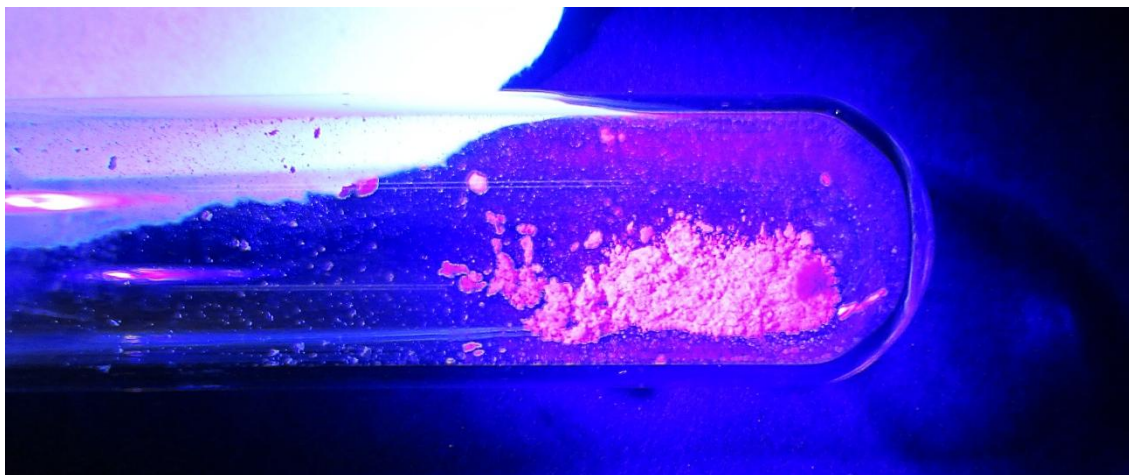
Sulfuro de neodimio (III)



Hidróxido de neodimio (III)

¹⁰⁴ Es el caso del óxido de neodimio (III), según Perry, D.L. Op.cit. p. 285.

¹⁰⁵ Goel, P., Arora, M. Op.cit.



Óxido de neodimio (III)

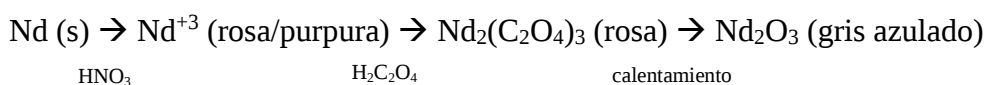
CONCLUSIONES

El neodimio, al igual que su gemelo, el praseodimio, es uno de los lantánidos más apropiados para ser usado en las prácticas de laboratorio de las Enseñanzas Medias y Bachillerato. La razón principal es su color rosa, bastante intenso en relación con el color de otros lantánidos. No obstante, resulta obvio que esa persistencia de color en sus diferentes compuestos hace que no tenga mucho sentido dedicar una serie larga de ensayos al elemento.

El metal en sí sólo presenta la curiosidad de que se recubre rápidamente de una capa de Nd_2O_3 de tono rosado, pero su aspecto es el mismo que el del resto de metales. Su reacción con el agua es lenta, por lo que tampoco representa un atractivo de interés para el alumnado, sobre todo habiendo otros lantánidos mucho más reactivos (al menos desde mi experiencia). La oxidación y solubilización del neodimio en una disolución de HNO_3 sí es espectacular, y tiene un alto potencial pedagógico, al poder estudiar las reacciones rédox y en enmascaramiento temporal de los colores. El nitrato de neodimio (III) que se forma, y que cristaliza al evaporar la disolución, tiene un bonito color rosa, y al descomponerlo térmicamente rinde Nd_2O_3 de una tonalidad gris azulada (o glauco), dejándonos una cadena de prácticas muy interesante:



Paralelamente, la reacción de precipitación con el ácido oxálico, a través de la que se obtiene el $\text{Nd}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ de color rosado, constituye otra cadena semejante:



A partir de ahí, el resto de reacciones no resultan tan atractivas. La disolución con ácido sulfúrico no puede competir con la gama de tonos que produce la emisión de gas NO_2 . Tampoco la precipitación del fosfato de neodimio (III) aporta nada nuevo, salvo la belleza de los cristales violetas del compuesto. La precipitación del carbonato de neodimio (III) tiene la ventaja de la efusividad de la reacción ácido-base, dado que añadimos una disolución ácida sobre la disolución del Na_2CO_3 , con la consecuente emisión masiva de CO_2 gaseoso. Visualmente permite explicar los cambios químicos que se derivan de la reacción ácido-base subyacente, con la posterior reacción de precipitación.

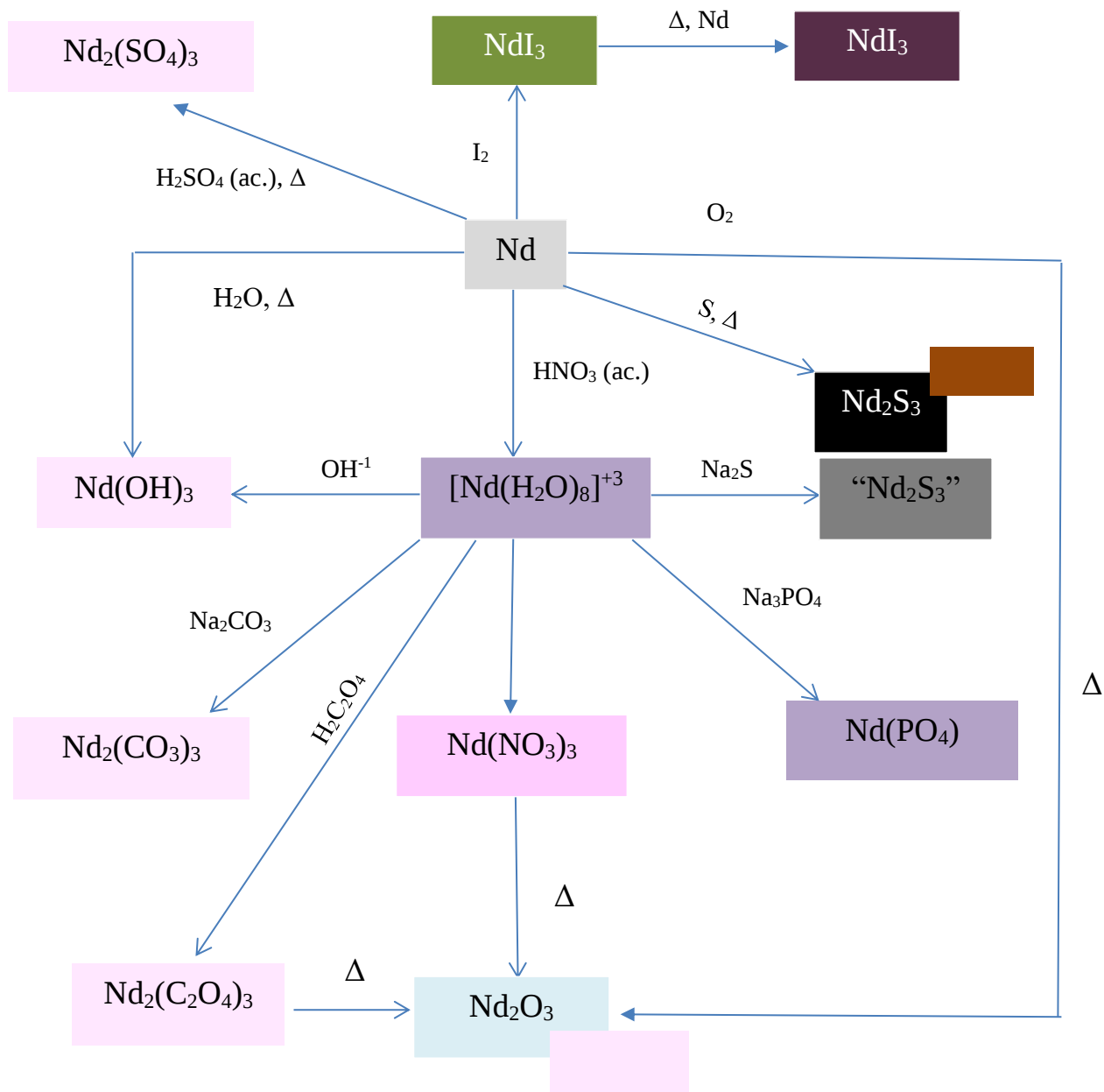
La reacción entre el yodo y el neodimio es muy vigorosa, y su espectacularidad radica precisamente en la emisión de luz que se produce dentro del tubo, al reaccionar ambos elementos. Sin embargo, el resultado entre los dos yoduros posibles del metal no tiene el contraste que he observado en otros lantánidos, y quizás por ello no sea del todo aconsejable. Sin embargo, de controlar mejor la reacción y buscar proporciones de yodo y metal apropiadas, podrían obtenerse un NdI_3 de color verde más puro y un NdI_2 de un tono violeta, cuyos contrastes serían bonitos de ver y tendrían un gran atractivo pedagógico, a la hora de explicar qué ha sucedido.

La reacción de síntesis del Nd_2S_3 por calentamiento de azufre y neodimio en un crisol de porcelana me ha gustado bastante por el buen resultado (aparentemente) de la misma. Es cierto que los colores que ofrece (negro y marrón para el Nd_2S_3) no son muy atractivos, pero el procedimiento en sí es muy educativo, aunque es indispensable que la campana donde se lleve a cabo el experimento absorba por completo los gases que se liberan, ya que los óxidos de azufre que se producen de forma paralela pueden convertir el laboratorio en una sala con aire irrespirable.

Por otra parte, y según los estudios llevados a cabo hasta el momento, una ventaja que presenta el neodimio como lantánido, es su baja toxicidad, lo que le hace ser apropiado para ser utilizado en los laboratorios de Secundaria y Bachillerato.

Es posible que, de entre todos los lantánidos, el neodimio sea el metal más conocido por el alumnado en general, y no precisamente como metal, sino por el imán de neodimio, como aleación con fórmula $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Por tanto, es interesante presentar al neodimio formando otros compuestos, como hemos visto en este trabajo, de manera que comprendan que el neodimio es un metal más, con gran diversidad de compuestos que nada tienen que ver con el imán. Es más, resultaría interesante comprobar que un imán de neodimio no atrae al neodimio (no ferromagnético), y sí en cambio atrae al gadolinio, al disprosio, al erbio y a otros lantánidos.

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



Los cuadros de color vacíos y superpuestos sobre otros representan colores alternativos que he encontrado al sintetizar el compuesto a través de otra vía, o incluso, que presenta esos dos colores dependiendo de la zona del producto donde miremos.

BIBLIOGRAFÍA

- Alemayehu, A., Zakharanka, A., Tyrpekl, V. (2022). Homogeneous Precipitation of Lanthanide Oxalates. *ACS Omega*, 7, 14, pp:12288-12295.
- Balboul, B. A.A., Myhoub, A.Y.Z. The characterization of the formation course of neodymium oxide from different precursors: A study of thermal decomposition and combustion processes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89, 1, pp. 95-101.
- Barbarossa, V., Brutti, S., Diamanti, M., Sau, S., De Maria, G. (2006). Catalytic thermal decomposition of sulphuric acid in sulphur–iodine cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 7, pp: 883-890.
- Bulgakov, R. (2007). Chemiluminescence in the reaction of LnI₂ (Ln = Dy, Nd) with water. *Russian Chemical Bulletin*, 56, 10, pp: 1956-1959.
- 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.
- 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.
- Enghag, P. (2004). *Encyclopedia of the Elements*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Goel, P., Arora, M. (2015). Mechanism of photoluminescence enhancement and quenching in Nd₂O₃ nanoparticles– ferroelectric liquid crystal nanocomposites. *Royal Society of Chemistry*, 5, 14974.
- Greenwood, N.N., Earnshaw, A. (1990). *Chemistry of the Elements*. Oxford, Gran Bretaña: Pergamon Press.
- Gupta, C.K., Krishnamurthy, N. (2004). *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. CRC Press. Libro electrónico.
- Gysi, A., Harlov, D. (2021). Hydrothermal solubility of TbPO₄, HoPO₄, TmPO₄, and LuPO₄ xenotime endmembers at pH of 2 and temperatures between 100 and 250 °C. *Chemical Geology*, 567, 120072.
- Haley, T. J. (1965). *Pharmacology and Toxicology of the Rare Earth Elements*. J. Pharm. Sc, 54.
- Han, K. (2020). Characteristics of Precipitation of Rare Earth Elements with Various Precipitants. *Minerals*, 10, 178.
- Hasegawa, M., Ohmagari, H., Tanaka, H., Machida, K. (2022). Luminiscence of lanthanides complexes: From fundamental to prospective approaches related to water- and molecular-stimuli. *Journal of Photochemistry & Photobiology, C: Photochemistry Reviews*, 50.

- Haynes, W.M. (2016–2017). CRC Handbook of Chemistry and Physics, 97th edition. BocaRaton, EEUU: CRC Press.
- Housecroft, C.E., Sharpe, A.G. (2005). Inorganic Chemistry. Harlow, Gran Bretaña: Pearson.
- Kyung Taek Rim, Kwon Ho Koo, Jung Sun Park. (2013). Toxicological Evaluations of Rare Earths and Their Health Impacts to Workers: A Literature Review. Safety and Health at Work, 4, 1, pp: 12-26.
- Marin, C. (2016). Synthesis and Applications of Lanthanide Sulfides and Oxides. Student Research Projects, Dissertations, and Theses - Chemistry Department. 71.
- Martínez-Troya, D. (2024). Uso del óxido y del hidróxido de samario, así como de otros compuestos de este metal, en las enseñanzas medias. Revista Bórax, 5, 1, pp: 110-169.
- Melnikov, P., Arkhangelsky, I.V., Nascimento, V.A. et al. (2018). Thermal decomposition of praseodymium nitrate hexahydrate $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. J Therm Anal Calorim 133, 929–934.
- Meyer, G. (1989). “The Ammonium Chloride Route to Anhydrous Rare Earth Chlorides—The Example of YCl_3 ”. En Harry R. Allcock Inorganic Synthesis, volume 25. Nueva York, EEUU: John Wiley & Sons.
- Moeller, T. (1975). The Chemistry of the Lanthanides. Oxford, UK: Pergamon Press.
- Patnaik, P. (2003). Handbook of Inorganic Chemicals, McGraw-Hill, edición PDF.
- Perry, D.L. (2011). Handbook of Inorganic Compounds. Boca Raton, EEUU: CRC Press.
- Pyles, K.C. (1970). Studies of Rares Earth Acid Oxalates. Masters Theses. 4022 <https://thekeep.eiu.edu/theses/4022>.
- Samsonov, G.V., Radzikovskaya, S.V. (1961). The Chemistry of Rare-Earth and Actinide sulphides. Russian Chemical Reviews, 30,1,pp: 28-41.
- Sharov, V.A., Bezdenezhnykh, G.V. (1981). Thermal Decomposition of Lanthanide, Yttrium, and Scandium Oxalates and Carbonates. Russian Chemical Reviews, 50, 7. pp: 630-635.
- 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.
- Spahiu, K., Bruno, J. (1995). A selected thermodynamic database for REE to be used in HLNW performance assessment exercises. SKB-TR--95-35. Suecia.
- Spellman, F.R. (2023). The Science of Rare Earth Elements. Concepts and Applications. Boca Raton, EEUU: CRC Press.
- Stern, K.H., Weise, E.L. (1966). High Temperature Properties and Decomposition of Inorganic Salts. Part 1. Sulfates. Washington, EEUU: National Standard Reference Data System.
- Strydom, C.A., van Vuuren, C.P.J. (1987) Thermal decomposition of Cerium (III) nitrate. Journal of Thermal Analysis, 32, pp. 157-160.
- Suponitskii, Yu.L., Kuz'micheva, G.M., Eliseev, A.A. (1988). Lanthanide Oxide sulphides. Russian Chemical Reviews, 57, 3, pp: 367-384.
- Tran, N.B. (2020). Synthesis of rare-earth monosulfide RES_x (RE = Gd, Ho) compacts by reaction sintering. Tesis, Instituto Muroran de Tecnología, Japón.
- Van Vuuren, C.P.J., Strydom, C. A. (1986). The thermal decomposition of neodymium nitrate, Thermochimica Acta., 1986, 104 293298.

- Werner, D., Badea, D., Schönzart, J., Eimermacher, S., Bätz, P.; Wickleder, M.S., Zegke, M. (2022). Facile Solvent-Free Mechanochemical Synthesis of UI₃ and Lanthanoid Iodides. MDPI Chemistry, 4, pp: 1672–1678. <https://doi.org/10.3390/chemistry4040108>.
- 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.
- Zhi, Y. et al. (2020). Emerging lanthanum (III)-containing materials for phosphate removal from water: A review towards future developments. Environment International, 145, 106115.

OTROS RECURSOS EMPLEADOS

Fichas de compuestos químicos:

Sobre el metal:

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

Para el Nd(OH)₃:

<https://cymitquimica.com/cas/16469-17-3?items=100>

<https://easchem.en.made-in-china.com/product/qZTAboPKEUcM/China-Neodymium-Hydroxide-Powder-with-CAS-No-16469-17-3-and-ND-OH-3-3n-4n-5n.html>

Para el Nd(NO₃)₃:

<https://www.aemree.com/neodymium-nitrate-hexahydrate.html>

<https://heegermaterials.com/neodymium/830-neodymium-nitrate.html>

Para el Nd₂O₃:

<https://wanfengtech.en.made-in-china.com/product/SjqQBgtPaAWE/China-Brown-Gray-Powder-Praseodymium-Neodymium-Oxide.html>

<https://www.smart-elements.com/shop/neodymiumiii-oxide-9999-nd2o3-powder-bulk/>

<https://www.srlchem.com/product/details/7584/37499/Neodymium-III-Oxide-extrapure-AR-999>

<https://www.nanoshel.com/product/neodymium-oxide-powder>

Para Nd₂S₃:

<https://easchem.en.made-in-china.com/product/VdaGohMPEUkZ/China-Neodymium-Sulfide-Powder-CAS-No-12035-32-4-ND2s3-2n5-3n-3n5.html>

<https://cymitquimica.com/cas/12035-32-4/>

Para el NdI₂:

https://winter.group.shef.ac.uk/webelements/compounds/neodymium/neodymium_diiodide.html

Para el NdPO_4 :

<https://easchem.en.made-in-china.com/product/oOUGqNeZrRcx/China-Neodymium-Phosphate-Crystal-Powder-CAS-No-14298-32-9-Ndpo4-3n-4n-5n.html>

Para el H_2SO_4 :

https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_version=2&p_card_id=0362&p_lang=en

Para el vidrio de borosilicato:

<https://valleydesign.com/Datasheets/Corning-Pyrex-7740.pdf>