

COMPUESTOS COLOREADOS DE LA PLATA

Autor: Martínez-Troya, D.¹

RESUMEN

En este artículo analizo los compuestos coloreados de la química básica de la plata, estudiando sus características para sacar partido de ellos a la hora de ampliar el abanico de prácticas de laboratorio para las enseñanzas medias.

Palabras clave: Cloruro de plata (I); Bromuro de plata (I); Yoduro de plata (I); Sulfuro de plata (I); Carbonato de plata (I); Fosfato de plata (I); Permanganato de Plata (I); Dicromato y Cromato de Plata (I); Ferricianuro de plata (I); Arseniato de plata (I).

ABSTRACT

In this article, I analyze the colored compounds of basic silver chemistry, studying their characteristics and exploring how to make use of them to expand the options of laboratory experiments for High School.

Key words: Silver (I) chloride; Silver (I) bromide; Silver (I) iodide; Silver (I) sulfide; Silver (I) carbonate; Silver (I) phosphate; Silver (I) permanganate; Silver (I) dichromate and chromate; Silver (I) ferricyanide; Silver (I) arsenate.

INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Este artículo completa el estudio de la plata que realicé en aquel donde trabajaba con el hidróxido y los óxidos de plata. La idea de ampliar el estudio y explorar algunos de los compuestos coloreados de la plata para usarlos en las prácticas de laboratorio del instituto, surge a raíz de conocer la fotosensibilidad de algunos de ellos. Esta particularidad los hace ser muy atractivos para explicar determinados conceptos químicos a través de una práctica de laboratorio. Aunque aquí se trabaje con ellos de una forma muy somera, simplemente se obtienen por precipitación y se observan sus cambios de coloración con el transcurso de las horas, siempre se puede ir más allá y tratar de emular un proceso primitivo de fotografía. Los procesos químicos relacionados con la fotografía captan rápidamente la atención del alumnado cuando son muy básicos, es decir, cuando ponemos una capa de pigmento fotosensible sobre un papel y lo exponemos a la luz, al estilo del procedimiento de fotografía alternativa de la llamada goma bicromatada.

Además de ello, hay compuestos de gran interés, como el sulfuro de plata, que nuestro alumnado conoce de forma directa o indirecta, dado que muchas veces pendientes o cadenas de plata les han dejado alguna mancha en la piel. Por otra parte, hay compuestos realmente bellos, como el dicromato de plata (I) e incluso el cromato, que merecen la pena por sí mismos. De esta manera, ampliar la visión que nuestro alumnado tiene sobre la plata, como metal cotidiano, es de gran importancia para ampliar la concepción que

¹ Daniel Martínez Troya vaergael@gmail.com

tienen de los metales. Así, ver que la plata puede formar parte de compuestos químicos que no tienen un aspecto metálico, ayuda a comprender la realidad de una forma integral.

He preferido dejar a un lado la obtención de compuestos blancos o incoloros, que sí me gusta obtener en la línea de trabajo asociada a los lantánidos. La razón no es meramente una cuestión de tiempo, también soy consciente que trabajar con compuestos coloreados resulta más satisfactorio desde el punto de vista pedagógico, sobre todo cuando hay cambios de color como consecuencia de una reacción química. De este modo no voy a obtener compuestos sin color, salvo el AgNO_3 , porque sólo tenía que cristalizar la disolución de partida y lo voy a emplear para obtener el dicromato y el cromato.

DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

Debido a que este estudio se realiza paralelamente a la exploración pedagógica del hidróxido y de los óxidos de la plata, uso el mismo material de partida. Es decir que voy a disolver 0.78g gramos de plata, con una riqueza del 99.9%, en 40mL de ácido nítrico concentrado, obteniendo una disolución de nitrato de plata (I) con una concentración de 0.2M. Esta disolución será la fuente de plata que emplearé para todos los ensayos de este artículo.

Lo primero que hago es cristalizar AgNO_3 a partir de la disolución de partida y por evaporación. Los cristales que se producen de esta manera se retiran mecánicamente de manera que pierdan la acidez de las aguas madre. Después se pasa a precipitar directamente los haluros de plata (I) para el cloro, el bromo y el yodo, todos de color amarillo, empleando para ello las sales solubles correspondientes. Además de los haluros he precipitado el carbonato y fosfato de plata (I), igualmente de colores amarillo pálido y fotosensibles, como los anteriores. En todos los casos realizo las precipitaciones tanto en tubos de ensayo, siempre es llamativo ver cómo se forman los precipitados y cómo trazan formas más o menos nebulosas hasta llegar al fondo, como en vidrio de reloj. En este caso, la ventaja de hacer la reacción en vidrio de reloj, consiste en poder seguir los cambios de color causados por la sensibilidad fotoquímica de estos compuestos. Es cómodo cambiar el fondo de blanco a negro y ver cómo se oscurecen con el paso de los minutos. Después se lleva a cabo en vidrio de reloj y en la vitrina la reacción entre el H_2S y la Ag^{+1} . Es una reacción en la que se forma un precipitado negro, el sulfuro de plata (I) que tiene gran impacto visual, además de ser un compuesto con cierta vinculación con la química cotidiana (recordemos que, a determinadas personas, la plata les deja manchas negruzcas en la piel). Merece la pena cristalizar un dicromato de plata (I) en vidrio de reloj, y paralelamente el cromato de plata (I). Es todo un regalo para la vista ver cómo se forman los cristales rojo rubí de dicromato. El contraste entre el color del cromato de plata y el dicromato de plata, da pie a una distinción entre el cromato y el dicromato, así como su relación con el pH. En este sentido, el ensayo permite profundizar todo lo que se quiera en la química de equilibrios, aunque podemos quedarnos simplemente con la estética de la reacción. Finalmente obtengo el hexacianoferrato (III) de plata, o ferricianuro de plata (I), el permanganato de plata (I) y el arseniato de plata (I), todos de colores vistosos.

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD

A) CRISTALIZACIÓN DEL NITRATO DE PLATA (I)

Como ya he indicado en la introducción, parto de una disolución 0.2M de plata, obtenida tras disolver el metal en ácido nítrico concentrado. La disolución de la plata no es fácil, en el sentido que tenemos que emplear ácido nítrico concentrado (yo he utilizado directamente el de la botella al 65%) y dar un golpe de llama para que arranque la reacción de oxidación, tras lo cual se mantiene. Hay que tener en cuenta el valor alto del potencial² del par Ag^{+1}/Ag con $\varepsilon = 0.8\text{V}$ respecto al del hidrógeno, por lo que tenderá a reducirse con facilidad, de ahí la relativa estabilidad de la plata metálica.

El nitrato de plata es un compuesto³ caracterizado por cristales incoloros y transparentes que, en estado puro, no es fotosensible. Es un compuesto soluble, como es esperable de un nitrato, con una solubilidad creciente con el aumento de temperatura, de manera que a los 0°C tiene una solubilidad de 54.8g/100g de agua, a los 25°C de 70.7g/100g de agua y a los 100°C de 88g/100g de agua. Curiosamente estos valores del texto de Dale L. Perry no se compadecen con los del texto de W. M. Haynes (y suelen coincidir siempre) que indica una solubilidad⁴ mucho mayor para el nitrato de plata de 234g/100g de agua a los 25°C. El agua es muy lábil al complejar la plata y de hecho no se conocen compuestos hidratados, que es lo habitual con otros metales⁵

Para obtenerlo dejé un poco de la disolución en un vidrio de reloj, esperando que se evaporase parte del agua. Por lo general, en estos casos, acaba formándose un residuo denso semejante a la melaza, que ni cristaliza ni se evapora por completo por mucho que se deje expuesto al aire, debido al ácido concentrado, sin embargo y para mi sorpresa, esta vez, probablemente debido a las altas temperaturas que se han mantenido durante días enteros, ha cristalizado llevando a sequedad el producto, lo cual no es ningún problema en este caso (en lo que a la pureza del nitrato obtenido se refiere) ya que la disolución se había hecho utilizando plata 999, es decir, con una riqueza del 99.9%. Cuando no cristaliza de esta manera, lo más cómodo es calentar la mezcla del nitrato disuelto en ácido sobre una rejilla de asbesto, de manera que con un golpe de calor se evapore lentamente el HNO_3 sin llevarlo a ebullición (aunque controlar eso es difícil debido a la baja temperatura de ebullición⁶ que tiene, unos 83°). El nitrato de plata (I) tiene una temperatura de fusión⁷ de 210°C y una de ebullición de 440°C, por lo que calentando con cuidado no deberíamos tener problemas para eliminar el ácido sin que se nos escape al mismo tiempo el nitrato de plata.

² Burriel, F., Lucena F., Arribas, S., Hernández, J. (1992). Química Analítica Cualitativa, 14ª Edición, Madrid, España: Editorial Paraninfo, p. 1010.

³ Perry, D.L. (2011). Handbook of Inorganic Compounds. Boca Raton, EEUU: CRC Press. p. 268.

⁴ Haynes, W.M. (2016–2017). CRC Handbook of Chemistry and Physics, 97th edition. BocaRaton, EEUU: CRC Press. p: 4-85.

⁵ Cotton, F.A., Wilkinson, G. (1990). Química Orgánica Avanzada. Méjico D.F., Méjico: Limusa, p. 1164.

⁶ Haynes, W.M. Op.cit. p: 4-76.

⁷ Ibidem, p: 4-85.

Vemos aquí el resultado de la evaporación, que es AgNO_3 puro:



B) EL COLOR EN LOS COMPUESTOS DE PLATA (I)

La plata tiene una configuración electrónica que es $[\text{Kr}]4d^{10}5s^1$ de manera que la plata (I) presenta una configuración d^{10} por lo que no hay transiciones electrónicas d-d, responsables de algunos de los colores de los metales de transición (suponiendo la relajación de las reglas de Laporte), de ahí que los compuestos en los que se presenta el catión Ag^{+1} sean incoloros, salvo que el contraión sea coloreado o que haya bandas de transferencia de carga. Esta es la razón por la que el nitrato de plata (I) es incoloro, o blanco, como hemos visto en las fotografías, de la misma manera que el AgCl es blanco inmediatamente después de precipitar en el tubo de ensayo, antes de descomponerse a causa de la luz. Sin embargo, el bromuro y el yoduro sí presentan un color amarillo que, si bien es pálido, es muy reconocible, por lo que tenemos bandas de transferencia⁸ responsables del color entre el halógeno y el metal. Esto nos muestra cómo, a medida que descendemos en el grupo, disminuye el carácter iónico del compuesto, de ahí que también aumente la insolubilidad. Al ser los orbitales del halógeno más extensos, solapan mejor con los orbitales libres de la plata (de tipo s y p), aumentando el grado de covalencia y permitiendo transferencias electrónicas que colorean los compuestos.

Otra cuestión interesante se produce cuando, a causa de la fotosensibilidad del compuesto de partida, cambia de color paulatinamente al quedar expuesto a la luz. La formación de plata metálica va oscureciendo el compuesto, por lo que el color va variando de blanco o amarillo pálido a gris o violeta. En este caso la coloración nueva se produce por una diferente interacción de la luz respecto a la anterior, causada por la presencia de átomos de plata neutra y es un proceso bastante complejo que analizo en el siguiente apartado.

Por último, tenemos otros compuestos de plata vivamente coloreados, como el dicromato de plata (I) de color rojo rubí en los que la plata no participa directamente en el color. En estos casos, el responsable del color es el anión y, en particular, transferencias de carga de los ligandos al cromo en el anión⁹, que cursan sin participación de los orbitales d. La presencia de la plata provoca alteraciones en el campo del cristal que hacen que el color sea rojo en vez del característico naranja de los dicromatos alcalinos.

C) FOTOSENSIBILIDAD DE LOS COMPUESTOS DE PLATA (I)

Fotoquímica en clústeres

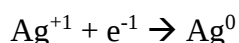
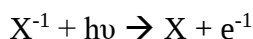
Al margen de lo anterior, que puede generalizarse a otros metales, los haluros de plata son fotosensibles. Es un fenómeno digno de ver en el laboratorio, pues en cuestión de segundos, un material blanco comienza a oscurecerse, poniéndose primero gris para acabar con un bonito tono violeta. La química que subyace a estos procesos es más

⁸ Greenwood, N.N., Earnshaw, A. (1990). Chemistry of the Elements. Oxford, Gran Bretaña: Pergamon Press. p. 1376.

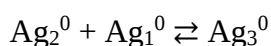
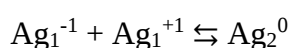
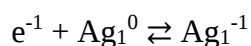
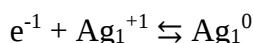
⁹ George, P.P. (2022). Sonochemical Synthesis and Characterization of Ag_2CrO_4 Nanoparticles, a Green Chemistry Approach. Asian Basic and Applied Research Journal, 4, 1. pp: 254-262. p. 259.

compleja de lo que en un principio parece, aunque la base consiste en la reducción del catión plata vehiculada por la llegada de un fotón.

Al llegar un fotón con energía suficiente, en general perteneciente al visible o al ultravioleta, el halógeno pierde un electrón, que puede saltar el hueco desde la banda de valencia y moverse a través de la banda de conducción del haluro de plata (dado que al descender en el grupo los orbitales 5s y 5p de la plata, vacíos, solapan de forma más eficiente, creando bandas de conducción). Formalmente el electrón podría asociarse a un catión, reduciendo a la plata. De manera global tenemos la reacción¹⁰:



No obstante, el proceso completo es más complejo, pues un átomo de plata neutro, Ag^0 , no es estable en esta situación y los átomos neutros de X tampoco, debiendo formar la molécula X_2 . Los electrones se pueden mover usando la banda de conducción, pero pueden quedar atrapados en regiones con un defecto estructural. Los cationes plata de estas zonas con defectos tienen gran movilidad a través del retículo de haluros de la región, de manera que pueden encontrar con mayor probabilidad a estos electrones y reducirse a Ag^0 . Sin embargo, para que ese átomo neutro sea estable, debe ir creando un clúster de átomos de plata con nuevos átomos neutros o iones que lleguen, gracias a esa movilidad particular facilitada por los defectos reticulares¹¹. De esta forma van creciendo los clústeres, siguiendo el modelo de Gurney-Mott:



La estabilidad del clúster determinará la creación de una “imagen latente” que no es más que un gránulo o clúster estable de plata. La determinación del número mínimo de átomos que constituyen el clúster es difícil, porque depende del tipo de defecto del retículo que ha servido de trampa para el electrón, pero parece que está entre 6 y 5. Otro problema adicional consiste en el número de átomos de plata necesarios para que absorban luz (visible o ultravioleta) de manera que esos gránulos de plata se vean como puntos oscuros. La formación de clústeres metálicos¹² absorben la luz con gran eficacia gracias a plasmones de superficie, que requieren de un número superior de átomos de

¹⁰ Greenwood, N.N., Earnshaw, A. Op.cit. pp. 1377-8.

¹¹ Tan, Y.T. (1989). Silver Halides in Photography. MRS Bulletin, 14, pp:13–16.

¹² Belloni, J. (2002). The role of silver clusters in photography. Comptes Rendus. Physique, 3, pp: 381-390.

plata para formarse. Hay numerosas investigaciones que estudian la energía de estos plasmones y su interacción con la luz (su eficiencia a la hora de absorber cuántos de radiación). Algunos han analizado clústeres que van desde un número de átomos de $n=9$ hasta $n=55$, con plasmones identificables, y es a medida que aumenta el número de átomos de plata en estos clústeres, cuando podemos considerar que los plasmones son los responsables mayoritarios de la absorción de la luz en estos compuestos degradados¹³. A más átomos de plata por clúster mayor eficiencia a la hora de absorber y mayor comportamiento metálico, claro, aunque a partir de los 150 átomos la metalicidad comienza a dotar a los gránulos de un brillo metálico y por tanto no hay una absorción total de la luz, sino que surge una reflexión coherente de parte de la luz que le llega gracias respuesta colectiva de los electrones libres del clúster (un tipo de plasmón que no absorbe radiación)¹⁴.

Oscurecimiento provocado por la plata metálica en grumos

Estos átomos de plata que quedan diseminados en el seno de un material de color blanco o amarillo pálido (en el caso del bromuro o del yoduro) oscurecen la matriz en la que se encuentran. Hay varias formas por las que la aparición de átomos neutros, aislados o en clústeres, en el seno de un material provocan un oscurecimiento del mismo. Si el material está formando parte de clústeres de un tamaño adecuado para la absorción de la luz a través de los plasmones, entonces esta vía es la prioritaria, lo que provoca oscurecimiento o colores muy definidos por absorción de grandes franjas del espectro visible. Sin embargo, en la fotoquímica no dirigida, los grumos superan con creces el tamaño de los clústeres, de manera que el comportamiento es metálico y la absorción deja de ser plasmónica y pasa a depender de fenómenos ópticos, como la dispersión (particularmente la dispersión de Mie), la reflexión, la absorción por defectos estructurales..., entonces al aumentar el tamaño de los grumos y su irregularidad superficial, la posibilidad de que estas reflexiones y dispersiones provoquen interferencias destructivas aumenta, de manera que las partículas se convierten en puntos que reemiten escasa luz¹⁵. Por otra parte, hay una relación inversa, dentro de este rango de tamaños de partícula, entre la negrura de un pigmento y el tamaño de la partícula, de manera que mientras menor tamaño presenta el grumo, mayor es el efecto de dispersión y más negro se percibe su color¹⁶, con independencia de los fenómenos de absorción de luz específicos de los derivados del carbono, que cito brevemente más adelante.

¹³ Lünskens T, Heister P, Thämer M, Walenta CA, Kartouzian A, Heiz U. (2015). Plasmons in supported size-selected silver nanoclusters. *Phys Chem Chem Phys.*, 17, 27. pp:17541-4.

¹⁴ Chakraborty I, Erusappan J, Govindarajan A, Sugi KS, Udayabhaskararao T, Ghosh A, Pradeep T. (2014). Emergence of metallicity in silver clusters in the 150 atom regime: a study of differently sized silver clusters. *Nanoscale*, 6, 14. pp: 8024-31. DOI: 10.1039/c4nr00679h.

¹⁵ Bohren, C. F., Huffman, D. R. (2004). *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. pp. 7 y ss.

¹⁶ Orion Engineered Carbons. (2023). Coloristic properties of specialty carbon blacks in full tone and tinting applications for coatings. Technical Information 1464. https://orioncarbons.com/wp-content/uploads/2024/02/21_03_23_ti_1464_coloristic_properties_emea_web.pdf

Dentro de este apartado tendríamos el ennegrecimiento que se produce en las superficies de los metales cuando son atacadas por un ácido. La formación de agujeros y poros en dicha superficie imposibilita la reflexión coherente de la luz, y externamente se ve de color negro mate¹⁷.

Oscurecimiento de materiales por carbono

Aprovecho para comentar brevemente un tipo de oscurecimiento diferente, con el que los químicos estamos muy familiarizados, que es el que se produce cuando se descompone térmicamente un material orgánico en su matriz. Un ejemplo de ello es el oscurecimiento de los oxalatos durante su descomposición térmica, que se produce por la aparición de residuos de carbono dispersos, del llamado inquemado, y que absorbe luz de manera muy activa. En estos casos, al margen de los fenómenos ópticos como la dispersión, la reflexión no coherente y los defectos reticulares y superficiales, prepondera la formación de pseudobandas de conducción¹⁸ en los gránulos de carbono que se van formando. Estas pseudobandas se forman por el solapamiento parcial de orbitales π (y en menor medida $\pi-\sigma^*$) de fragmentos de estructuras tipo grafeno (sp^2), distribuidos de forma desordenada y con defectos. El resultado es una alta densidad de estados electrónicos en un intervalo de energía amplio que permite transiciones ópticas continuas en el espectro visible, por lo que son las responsables de que el carbón sea de color negro.

Como vemos, los tres tipos de oscurecimientos que he comentado brevemente son radicalmente diferentes: por plasmones en clústeres pequeños de metales (en nuestro caso plata), por fenómenos ópticos en estructuras de mayor tamaño (válido para cualquier tipo de elemento) y por absorción por pseudobandas a causa de solapamientos orbitales de fragmentos con dobles enlaces (para carbono e inquemados); y la física y química que subyace a cada uno de ellos es muy diferente. En el caso de los haluros de plata y del oscurecimiento que se produce en su matriz por exposición a la luz del sol recurriremos a los fenómenos ópticos para explicar dicho oscurecimiento, debido a que la plata aparece en grumos irregulares de un tamaño superior al de los clústeres. La química es fascinante.

D) HALUROS DE PLATA (I)

A modo de recordatorio, es interesante remarcar que, al descender en el grupo, los orbitales p de los halógenos implicados en el enlace, tienen una mayor extensión, solapando más efectivamente con los orbitales s y p del átomo de plata, lo que se traducen en una disminución del carácter iónico de los compuestos, por las reglas de Fajans, y por tanto una mayor insolubilidad, menores puntos de fusión y ebullición, disminución de la energía reticular del haluro. De la misma manera, la disminución de la electronegatividad de los halógenos, explica la razón por la que el color se va intensificando, pasando de ser blanco para el fluoruro y el cloruro de plata (I), a ser amarillo pálido para el bromuro de

¹⁷ Explicación dada por el Dr. Michael Gallagher: <https://www.madsci.org/posts/archives/2000-03/953740232.Ch.r.html>

(Revisitado el 12/07/2025)

¹⁸ Hauser, J. J. (1977). Electrical, structural and optical properties of amorphous carbon. Journal of Non-Crystalline Solids, 23, 1, p. 21-41.

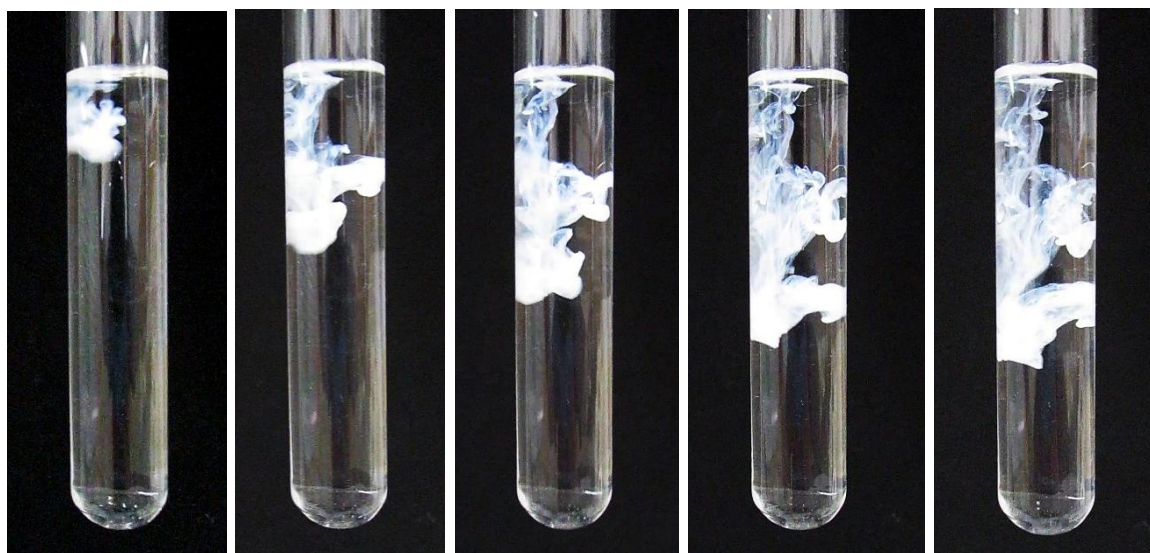
plata (I) y amarillo para el yoduro de plata (I), como veremos. Al disminuir la electronegatividad del halógeno, sus orbitales p llenos que forman la banda de valencia tienen mayor extensión y por tanto mayor energía, de forma que el *gap* que forman con los orbitales vacíos 5s y 5p de la Ag^{+1} , que construyen la banda de conducción, disminuye lo suficiente como para que pueda haber tránsitos electrónicos por absorción de luz en la franja de mayor energía, de ahí que el color que se vea sea amarillo, que es la parte de la radiación reflejada. En los estudios que he consultado sobre el valor energético de este *gap*, la gradación no está tan clara como teóricamente debería ser¹⁹.

Cloruro de plata (I)

El cloruro de plata se describe como un compuesto en polvo de color blanco²⁰, sensible a la luz, de manera que se oscurece, y que presenta baja solubilidad en agua, creciente con la temperatura, con 0.0007 g/L a 0°C, 0.00193 g/L a 25°C y 0.021 g/L a los 100°C. El pK_s del AgCl es de 9.7²¹.

Para obtener el cloruro de plata voy a añadir unas gotas de la disolución ácida de Ag^{+1} sobre una disolución concentrada de NaCl en agua destilada. La precipitación se produce de forma instantánea, formando un precipitado denso, de color blanco, que tarda bastante en irse al fondo del tubo. Al lavar con agua del grifo los tubos empleados en estas experiencias (aunque después se recoja el agua en bidones para residuos), se forma una niebla blanca rápidamente a causa de los cloruros presentes en el agua. Para el alumnado, tras hacer las experiencias de precipitación con la plata, resulta muy llamativo y significativo.

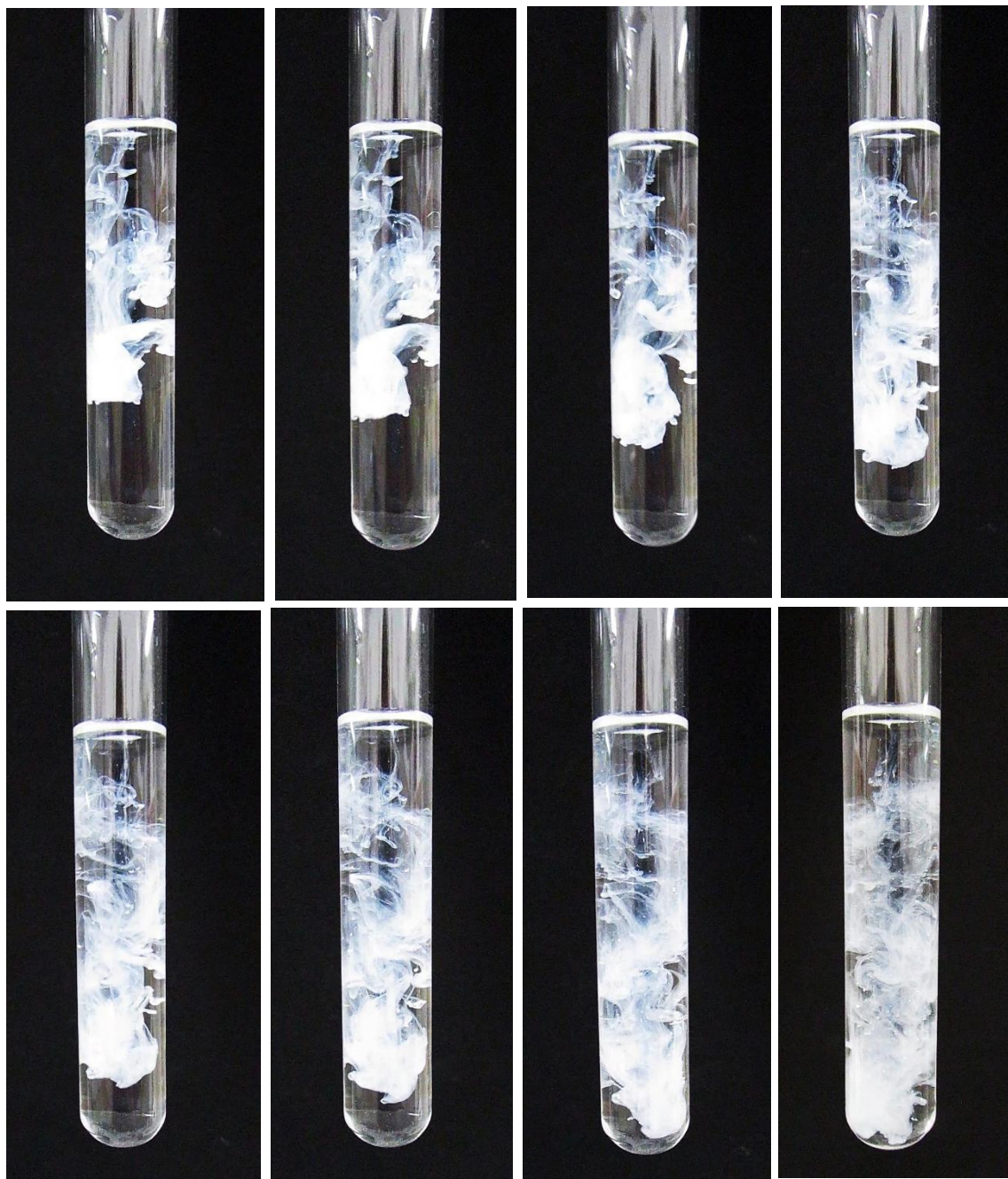
Vemos aquí algunas de las imágenes del proceso de precipitación en el tubo.



¹⁹ Glaus, S., Calzaferri, G. (2003). The band structures of the silver halides AgF , AgCl , and AgBr : A comparative study. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2, pp: 398–401. DOI: 10.1039/B211678B.
Babasaheb Sankapal, Prashant Baviskar, Dipak Salunkhe. (2010). Synthesis and characterization of AgI thin films at low temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 506, 1, pp:268-270.

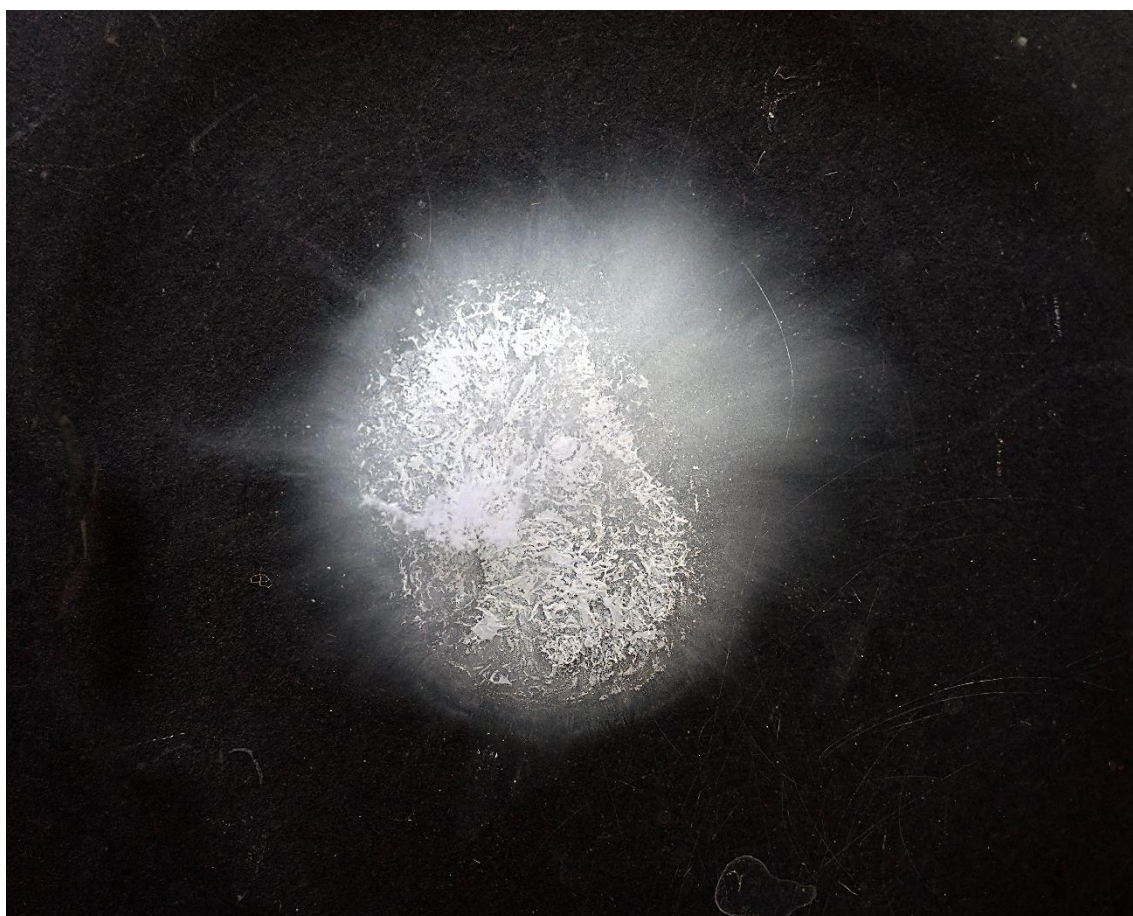
²⁰ Perry, D.L. Op.cit. p. 366.

²¹ Burriel, F., Lucena F., Arribas, S., Hernández, J. Op. cit. p. 1014.



Para ver cómo el cloruro de plata (I) cambia de color con el paso de las horas, pasando de un color blanco bastante luminoso a un color gris violeta, conviene hacer la experiencia en un vidrio de reloj. Para ello, sobre una disolución concentrada de cloruro de sodio dejaré caer una gota de Ag^{+1} en medio ácido. La precipitación se produce de forma instantánea y el aspecto del precipitado es purulento, permaneciendo más o menos en el mismo lugar en el que se genera, por lo que presenta un escaso despliegue sobre el vidrio de reloj, habitual en otro tipo de precipitados.

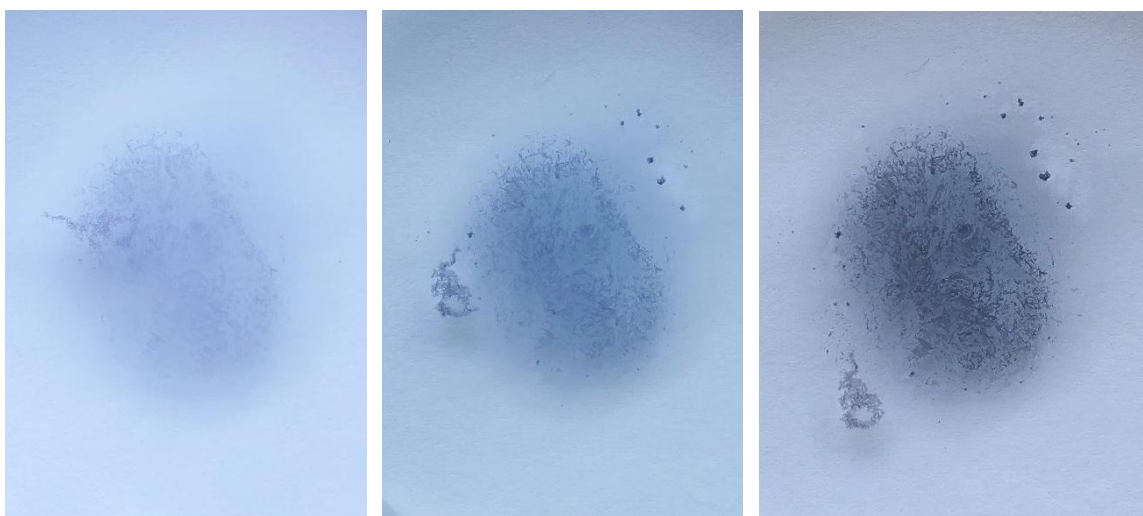
Aquí pongo una serie de imágenes al respecto. He cambiado el fondo y el tipo de luz dominante (cerca de la ventana, con sol, o los fluorescentes del laboratorio), para tratar de captar mejor las diferencias de color, pero es difícil.



AgCl recién formado, con un color blanco



AgCl de color gris violáceo, varias horas más tarde



Tras adquirir una coloración violeta, a lo largo de las horas se oscurece aún más hasta quedar gris oscuro

Bromuro de plata (I)

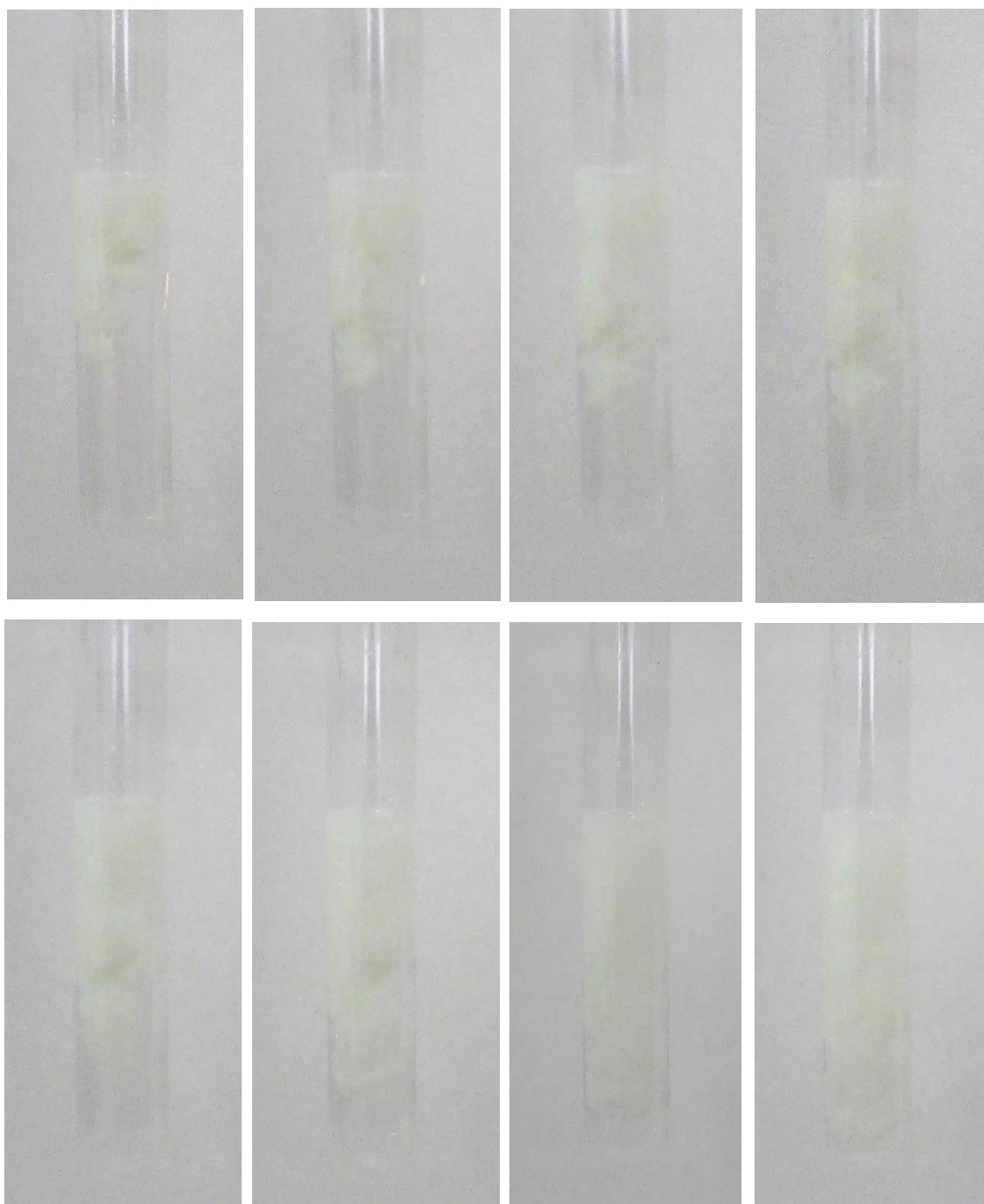
El bromuro de plata es el pigmento habitual empleado históricamente en fotografía, por lo que es muy sensible a la luz y se oscurece con el paso de los minutos. Se describe como polvo de color amarillento²², con una solubilidad baja en agua de 0.135mg/L a 25°C y un pK_s de 12.3²³, por lo que es unas mil veces menos soluble que el cloruro de plata.

²² Perry, D.L. Op.cit. p. 365.

²³ Burriel, F., Lucena F., Arribas, S., Hernández, J. Op. cit. p. 1014.

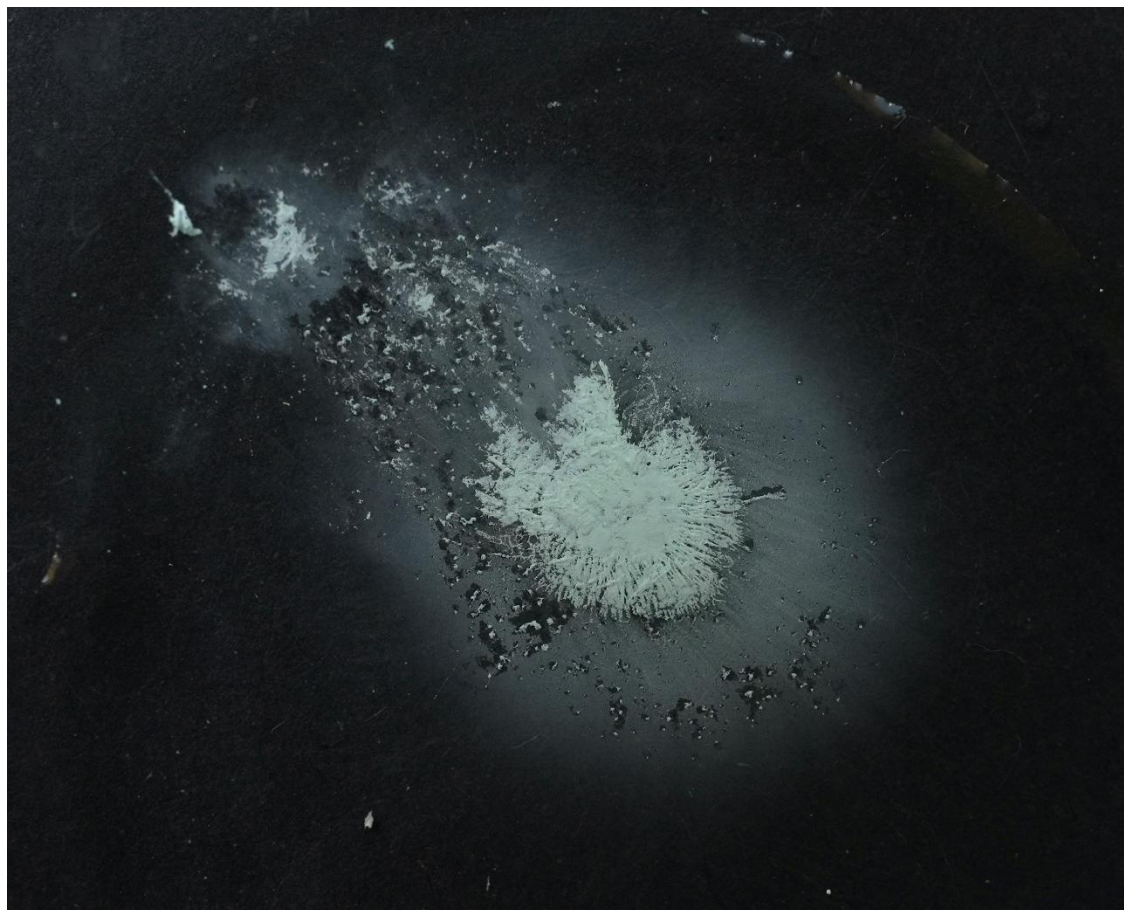
Al igual que hice para la obtención del cloruro, voy a echar unas gotas de la disolución ácida de Ag^{+1} en una disolución concentrada de bromuro de potasio, de forma que precipite el AgBr en el tubo de ensayo. Un problema a la hora de fotografiar el precipitado es su color amarillo pálido, pues para ser captado bien requiere que utilicemos un fondo blanco, dado que si ponemos un fondo negro se ve de color blanco, pero eso hace que sea prácticamente imperceptible, aunque veamos un tono amarillo verdoso.

Vemos unas imágenes del proceso de obtención del precipitado:



Afortunadamente, para ver bien el precipitado, disponemos de las imágenes en el vidrio de reloj. Al igual que antes, he echado una gota de Ag^{+1} sobre una disolución de KBr en el vidrio de reloj.





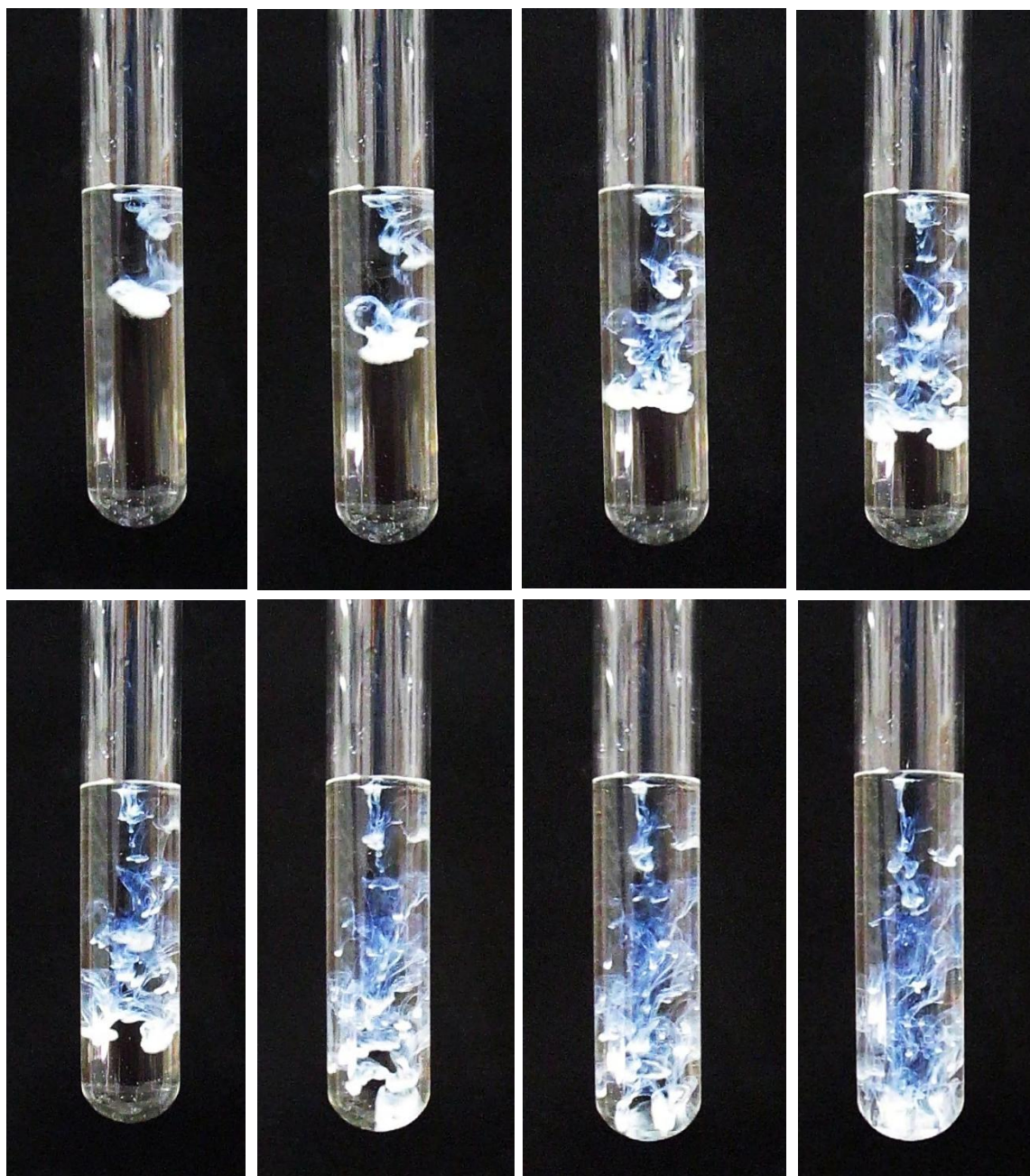
Al pasar las horas de vuelve cada vez más gris con tintes verdosos

Yoduro de plata (I)

El yoduro de plata es otro compuesto sensible a la radiación electromagnética y que se oscurece como consecuencia de estar expuesto a la luz. Es el compuesto con mayor carácter covalente de la serie de haluros de plata, por lo que las características de los haluros se acucian, aunque respeta la periodicidad en las magnitudes que estamos considerando.

Se define como polvo amarillo pálido²⁴, aunque bastante más intenso que en el caso del bromuro y sin esa tonalidad verdosa perceptible en el bromuro. Su solubilidad es la más baja, con 0.03 mg/L a los 25°C y con un $pK_s = 16.1$ ²⁵. Repito las dos experiencias tal y como he hecho con los otros dos halógenos.

Vemos las imágenes de formación del precipitado en el tubo.



Para ver el color del precipitado debemos observarlo con un fondo blanco, porque el color azul que se ve, a causa de fenómenos de reflexión, es completamente engañoso.

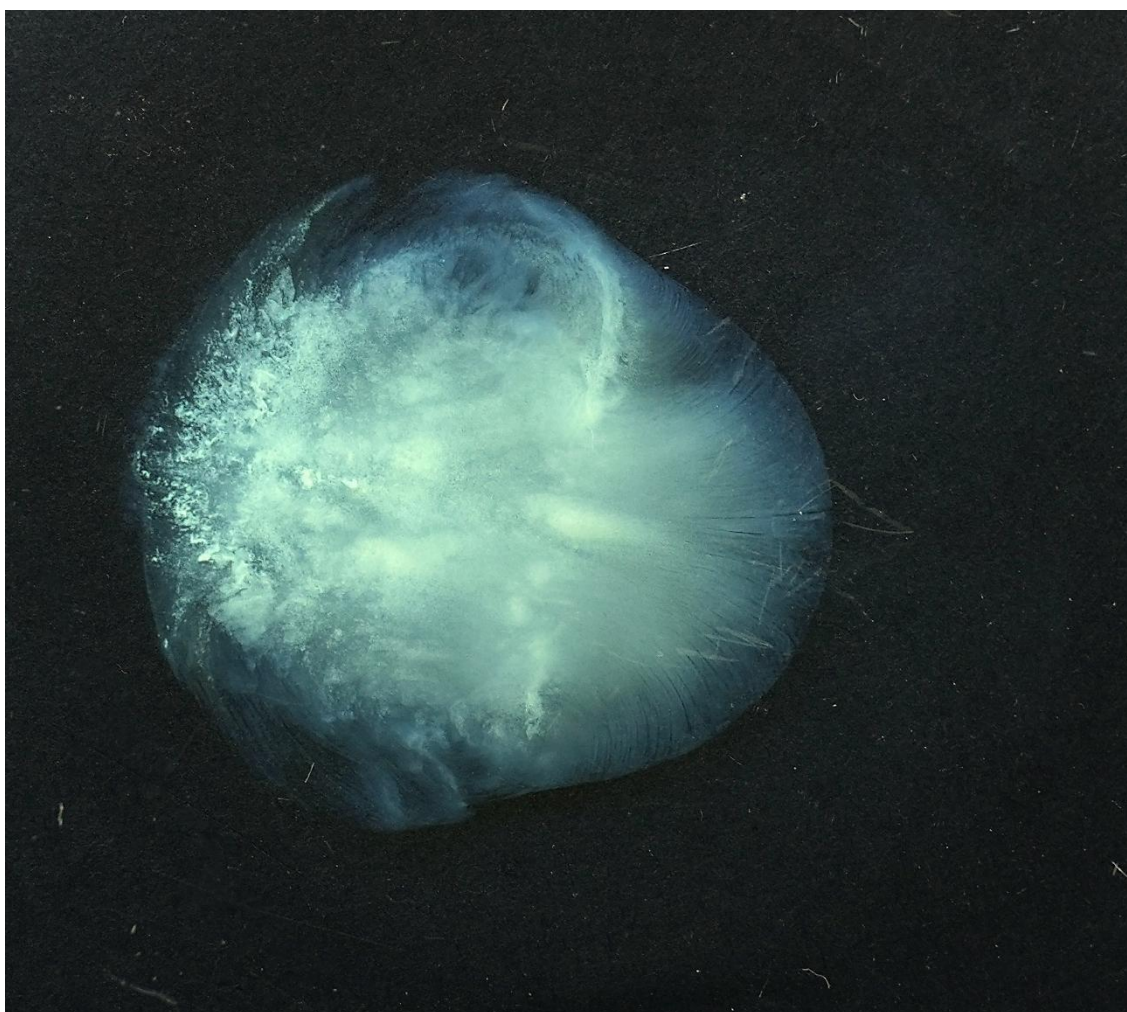
²⁴ Perry, D.L. Op.cit. p. 368.

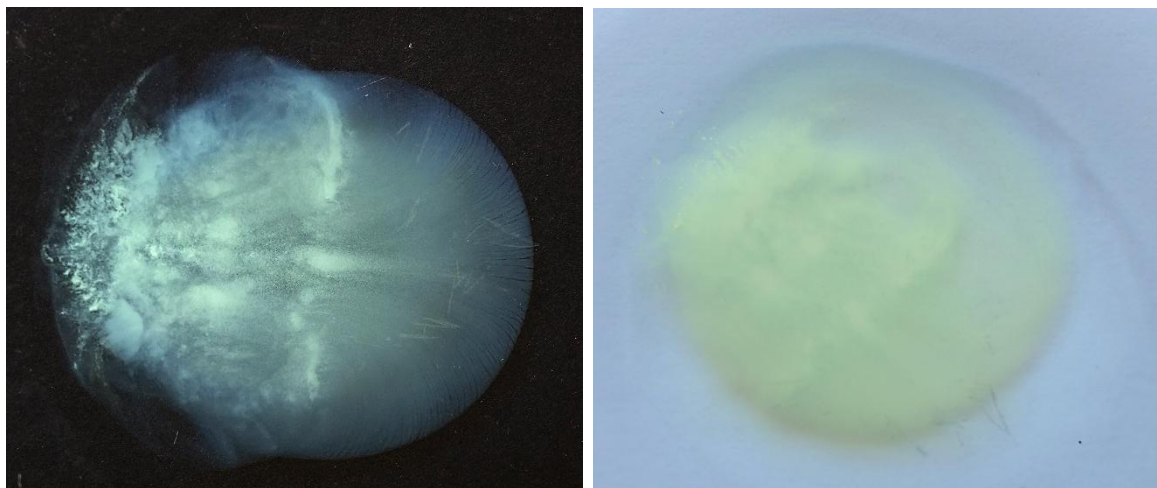
²⁵ Burriel, F., Lucena F., Arribas, S., Hernández, J. Op. cit. p. 1014.

Este es el aspecto del precipitado y de la disolución del AgI cuando todavía no ha sedimentado por completo el yoduro de plata en el fondo del tubo. El color es amarillo, más intenso que en el caso del bromuro de plata (I), y es algo que se aprecia bien en el vidrio de reloj. He hecho dos pruebas sobre vidrio de reloj: la primera empleando una disolución de yoduro de potasio en agua destilada sobre la que he añadido una gota de la disolución ácida de Ag^{+1} ; la segunda, añadiendo directamente unas gotas de Ag^{+1} sobre el KI sólido. En ambos casos se obtiene como resultado un precipitado amarillo, pero su evolución en el tiempo es bastante diferente. En el primer caso, el precipitado de AgI obtenido es bastante estable y hay menos cambios de color, mientras que en el segundo caso, los cambios de color y de textura son mucho más radicales, como veremos a continuación.

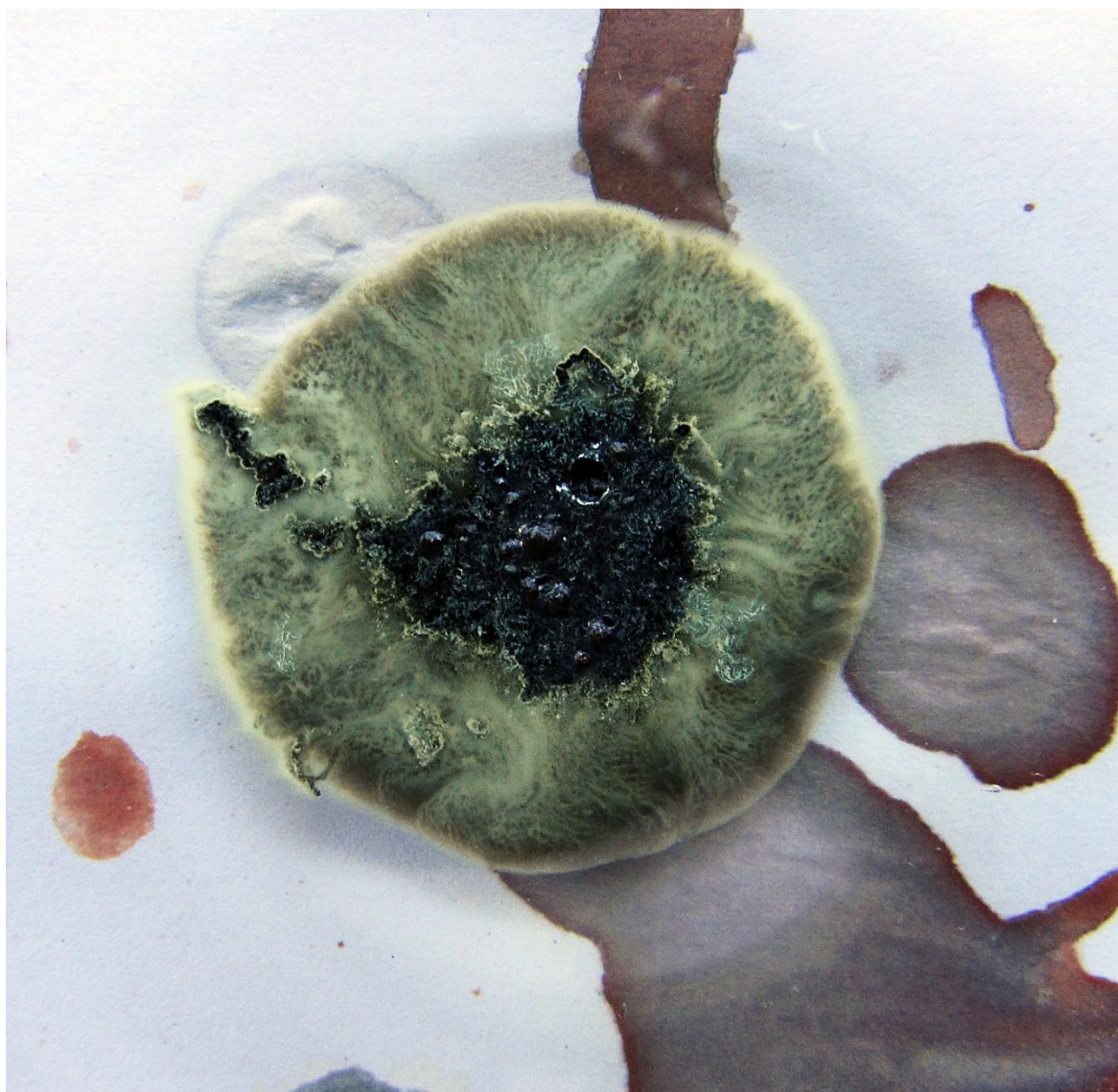


Aquí tenemos las imágenes del AgI en el vidrio de reloj:

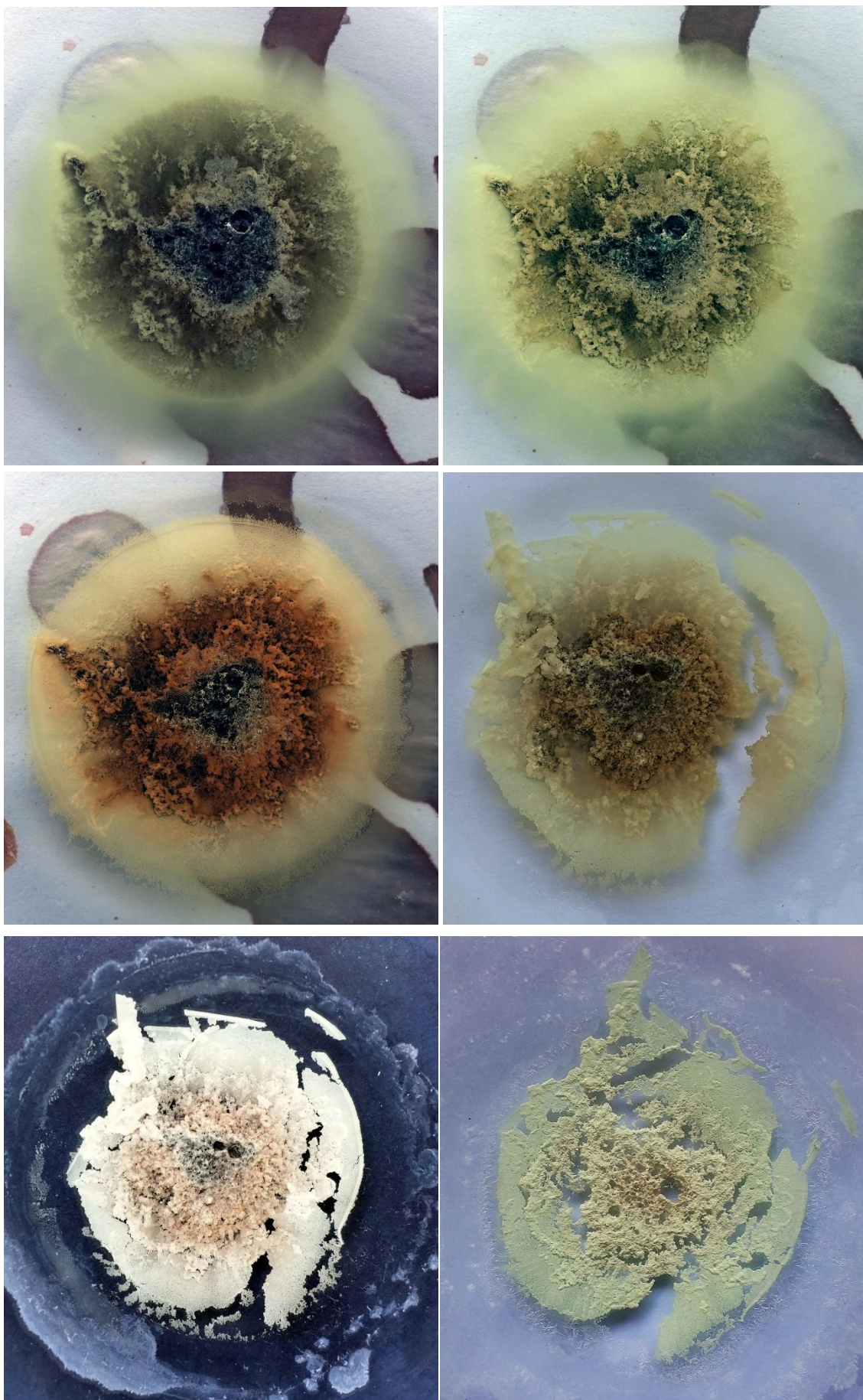




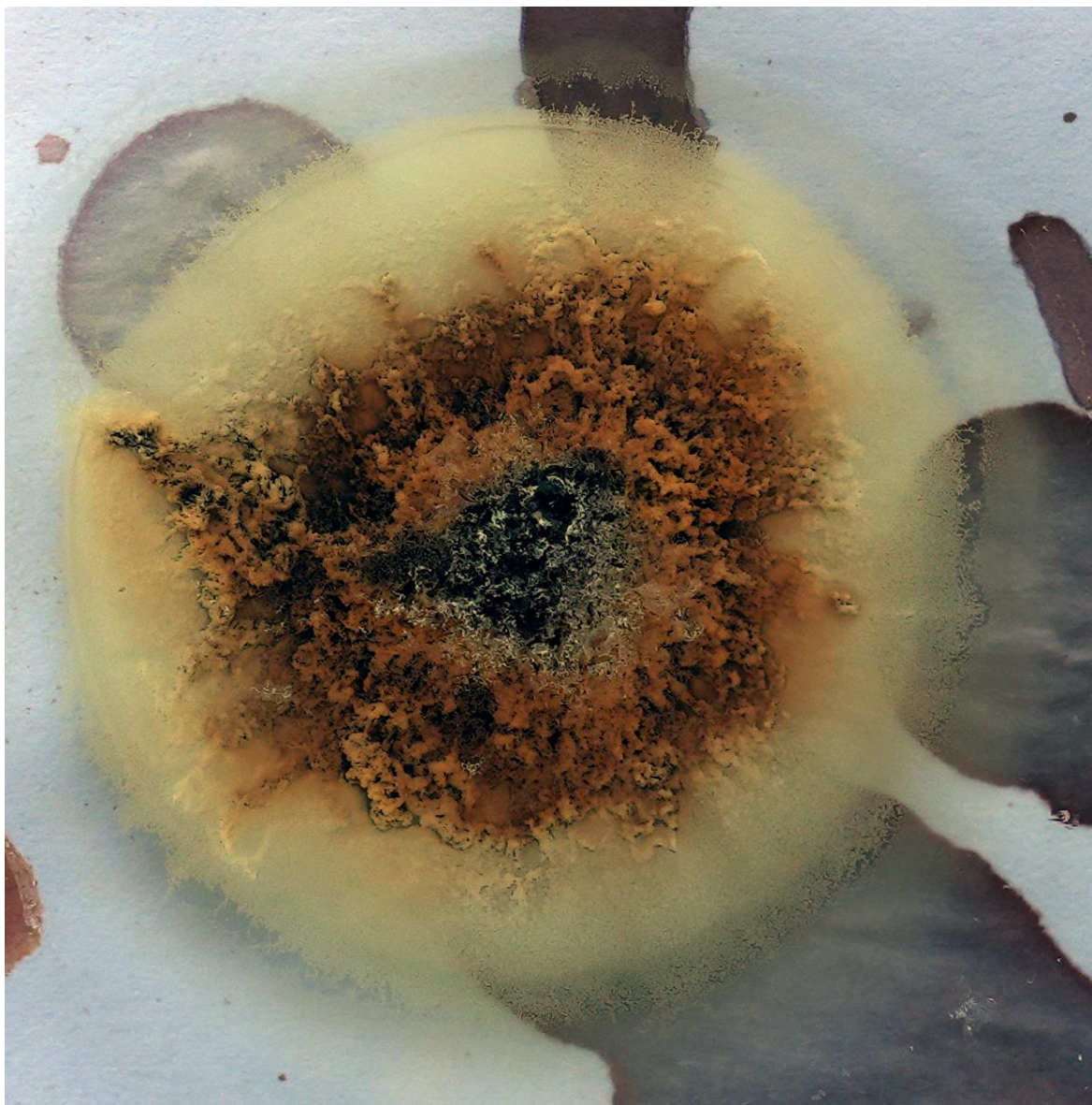
AgI precipitado sobre disolución de KI, el color permanece durante horas sin cambios aparentes



He echado unas gotas de Ag^{+1} sobre KI sólido (es la estructura negra en el centro)



Con el paso del tiempo vemos que el color amarillo inicial se va volviendo poco a poco amarillo verdoso, por la presencia creciente de plata metálica gris oscura. Estas fotografías ganan mucho cuando se ven con mayor tamaño.



Los tres haluros de plata que hemos precipitado tienen uso como pigmentos de fotografía. El bromuro de plata (I) se emplea usualmente en las películas, donde el haluro está en emulsión dentro de una gelatina que hace de sostén. El yoduro de plata se emplea preferentemente en películas de impresión rápida, combinado con el cloruro de plata y con pigmentos orgánicos²⁶. Además, hay muchos otros compuestos fotosensibles, aunque no se emplean en fotografía, como son el permanganato, el acetato, el carbonato, el bromato, el clorato, el citrato, el cianuro o el sulfato, entre otros compuestos de plata (I), y algunos de plata (II)²⁷.

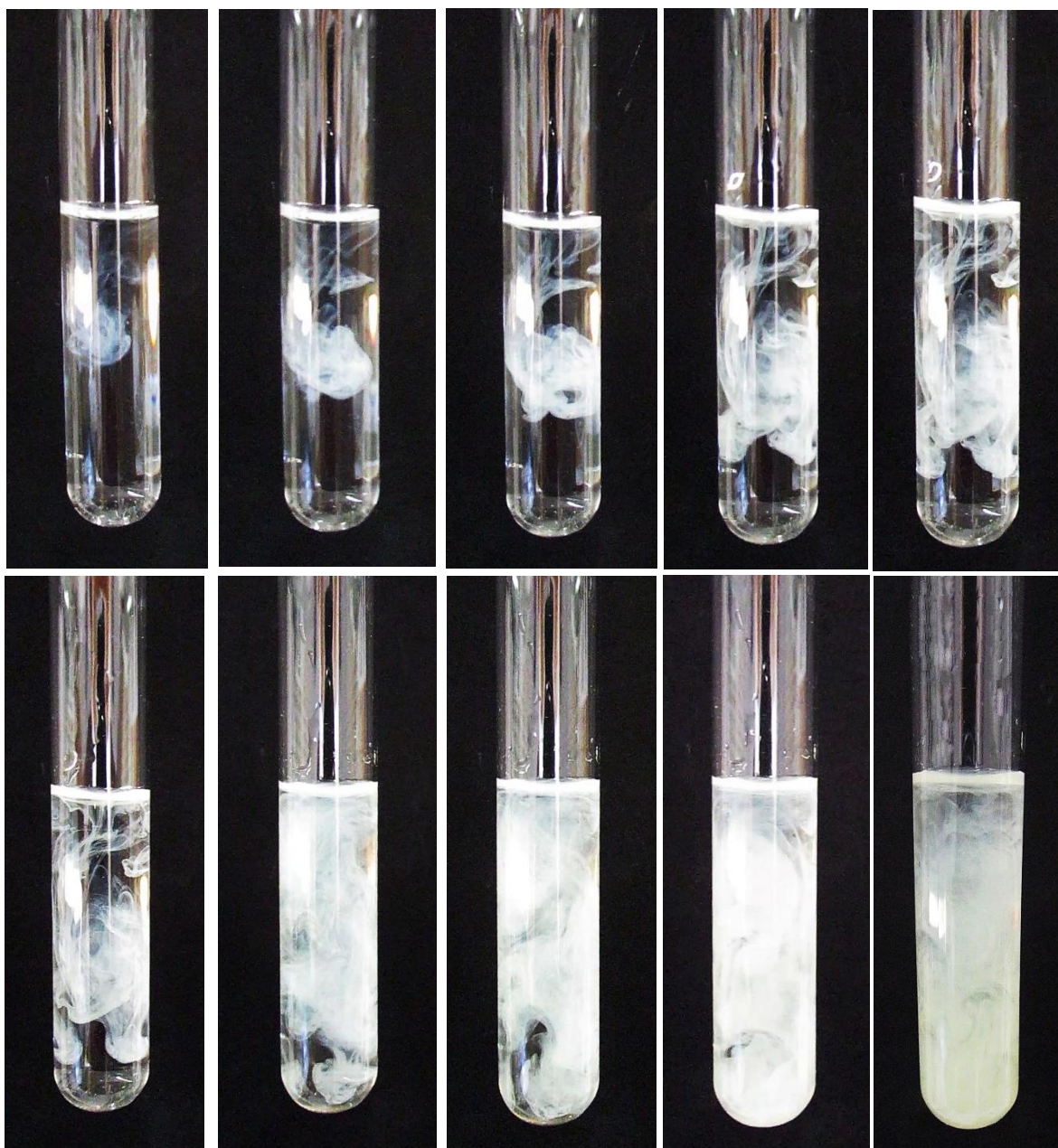
²⁶ Greenwood, N.N., Earnshaw, A. Op.cit. p. 1378.

²⁷ Perry, D.L. Op.cit. pp. 364 y ss.

E) FOSFATO DE PLATA (I)

El fosfato de plata (I) se describe²⁸ como polvo de color amarillo, que se oscurece bajo la luz y que se emplea, al igual que los haluros, en emulsiones para fotografía. Es más insoluble en agua que los haluros, de manera que su $pK_s = 17.6$, que es un valor considerable²⁹. Para precipitarlo, he echado unas gotas de la disolución ácida de Ag^{+1} sobre una disolución de $NaPO_4$ en agua destilada, tanto en tubo como en vidrio de reloj. El precipitado es denso y tan cohesionado que le cuesta caer al fondo del tubo.

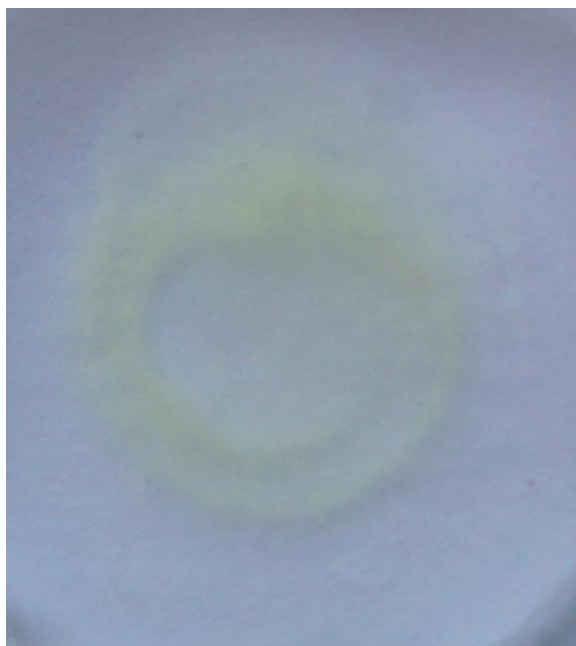
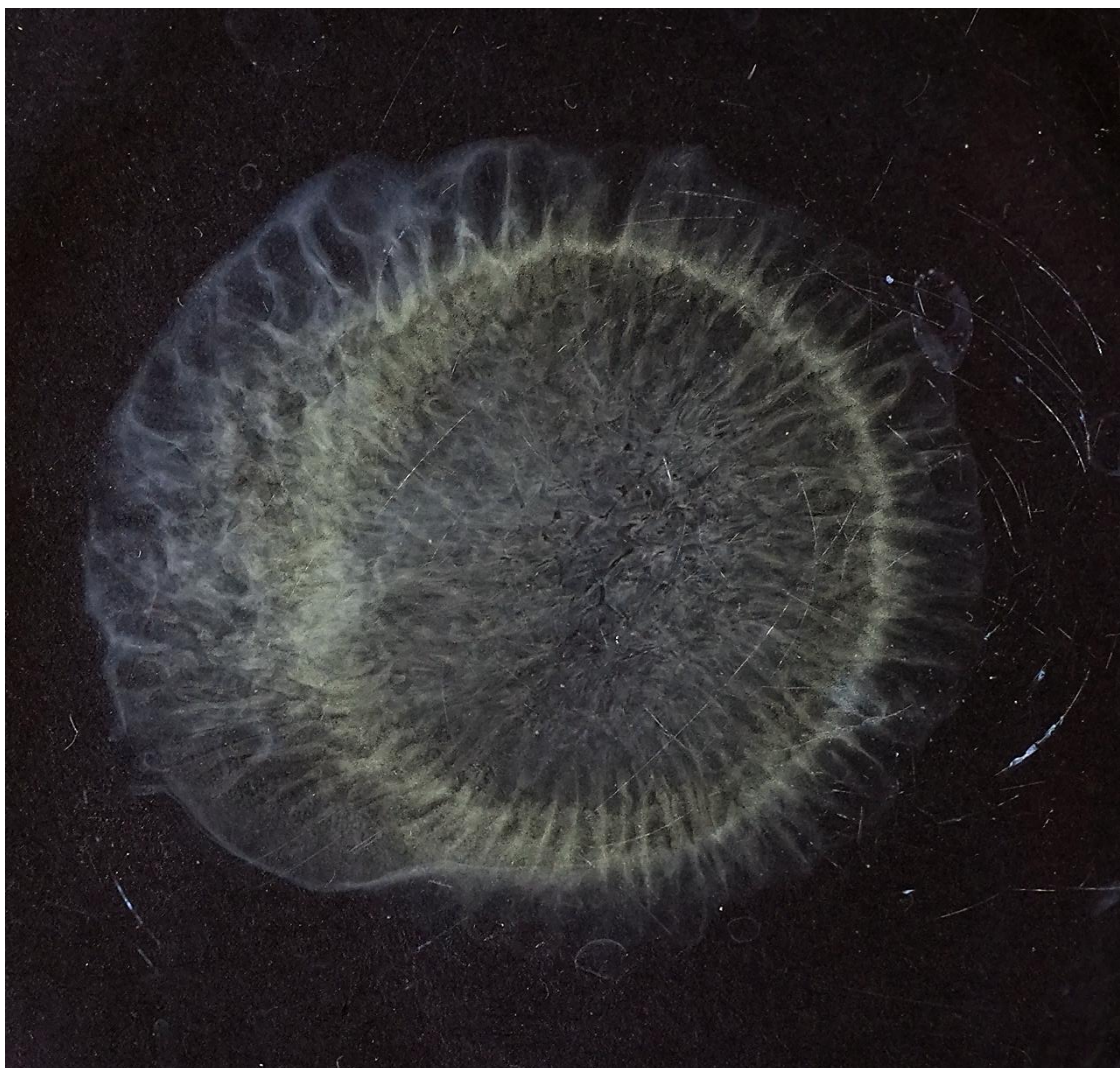
Vemos unas imágenes de la precipitación del fosfato de plata (I):



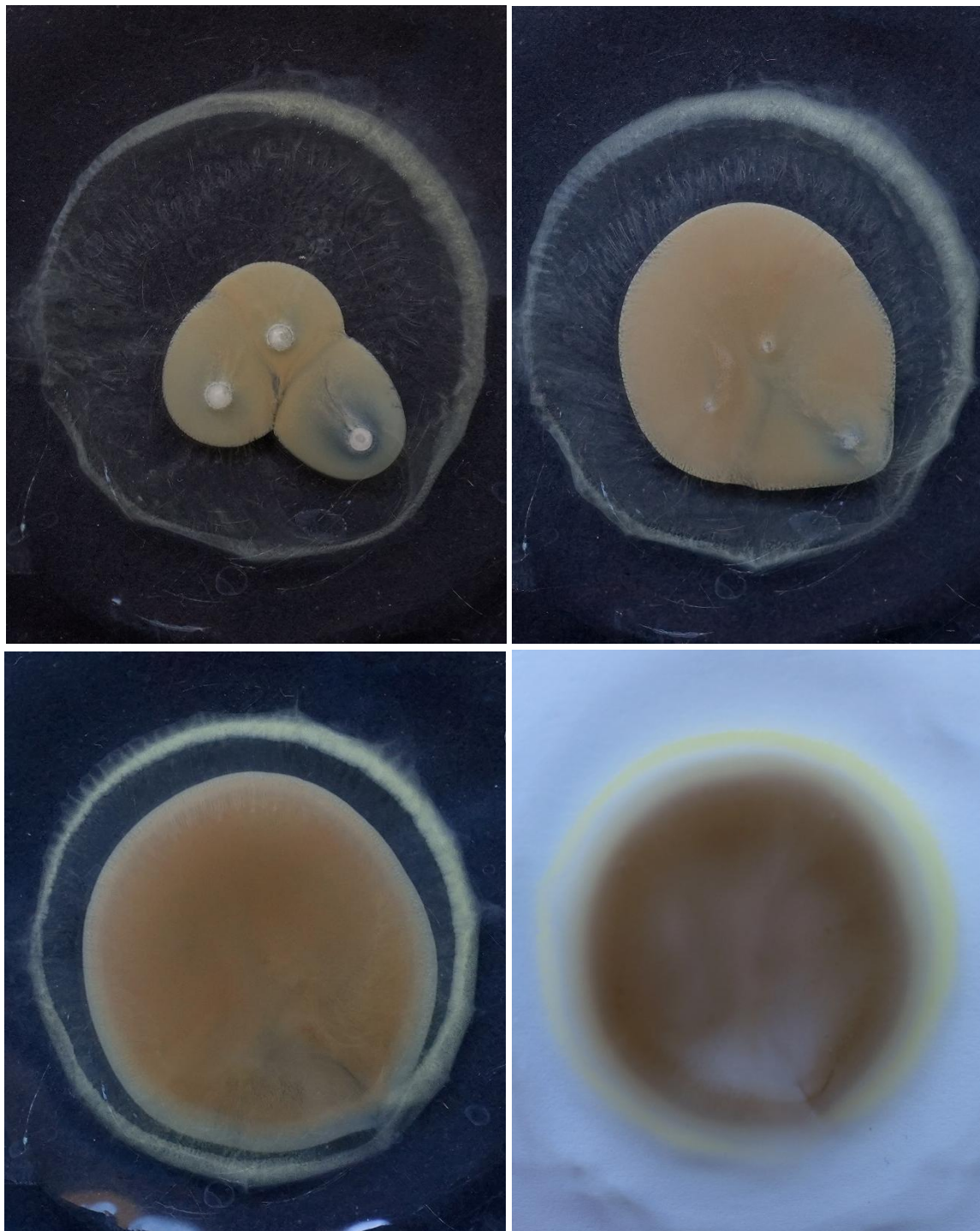
²⁸ Ibidem, p. 369.

²⁹ Burriel, F., Lucena F., Arribas, S., Hernández, J. Op. cit. p. 1014.

En vidrio de reloj encontramos las formas típicas de los fosfatos:



Por error puse tres bolitas de sosa en el centro del vidrio de reloj que ya contenía la disolución de fosfato, y a pesar de que no aporte nada, las imágenes son tan hermosas que voy a añadirlas. Alrededor de cada bolita de NaOH comienza a crecer una extensión de Ag_2O que alcanza hasta el anillo exterior de Ag_3PO_4 cuyo color amarillo no es muy intenso y me había hecho creer que era una disolución diluida de Ag^{+1} que estaba al lado. El contraste entre el color amarillo del fosfato y el color marrón del óxido de plata (I) resulta muy interesante y ayuda a interpretar lo que sucede. El óxido, al crecer, empuja al fosfato intermedio, por lo que la torta del óxido tiene el borde amarillento.

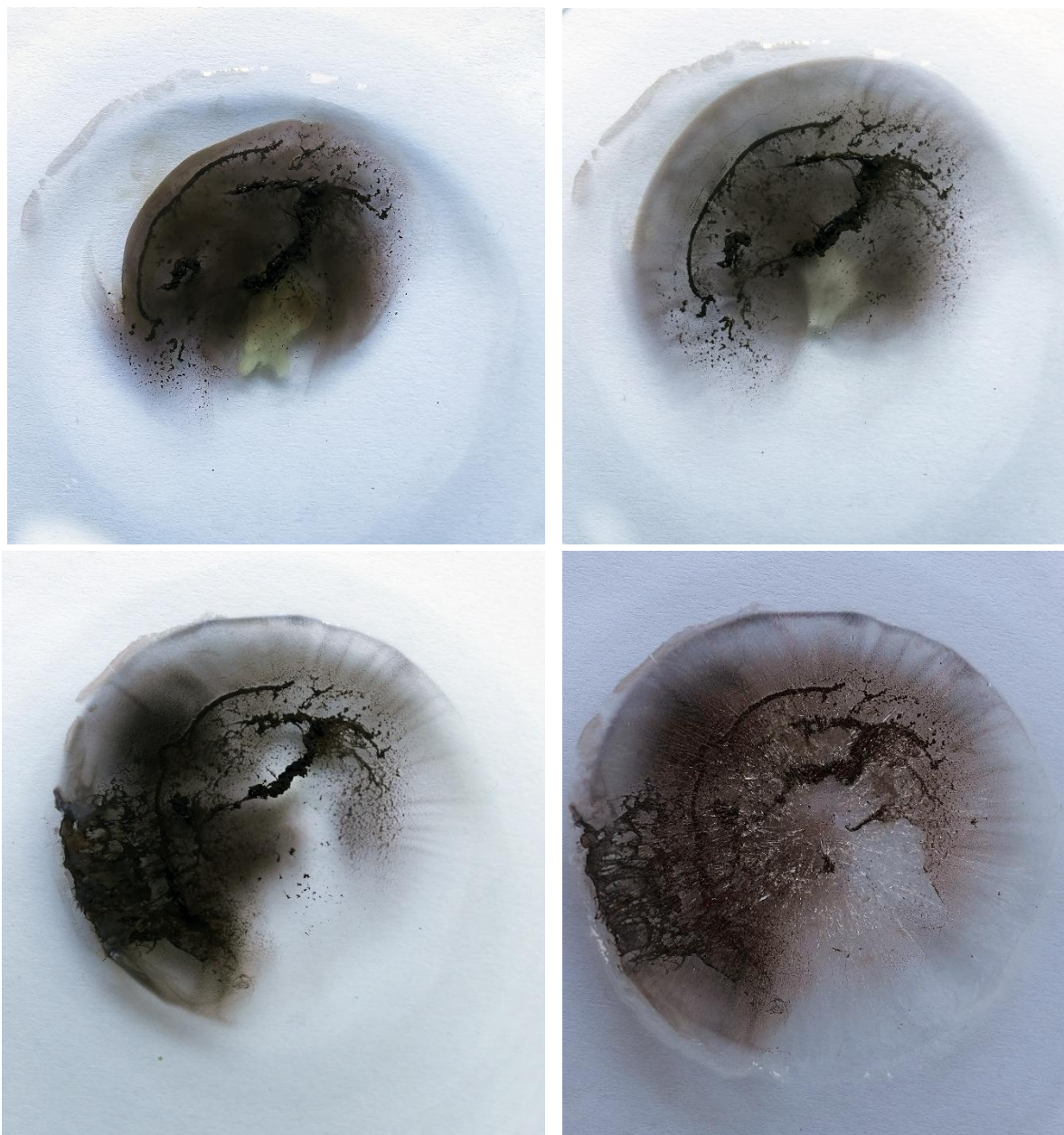


F) SULFURO DE PLATA (I)

El Ag_2S es un compuesto de color negro o gris oscuro³⁰ que es muy insoluble en agua, de modo que con un pK_s de 50.1 es el más insoluble de todos los compuestos habituales de la plata³¹.

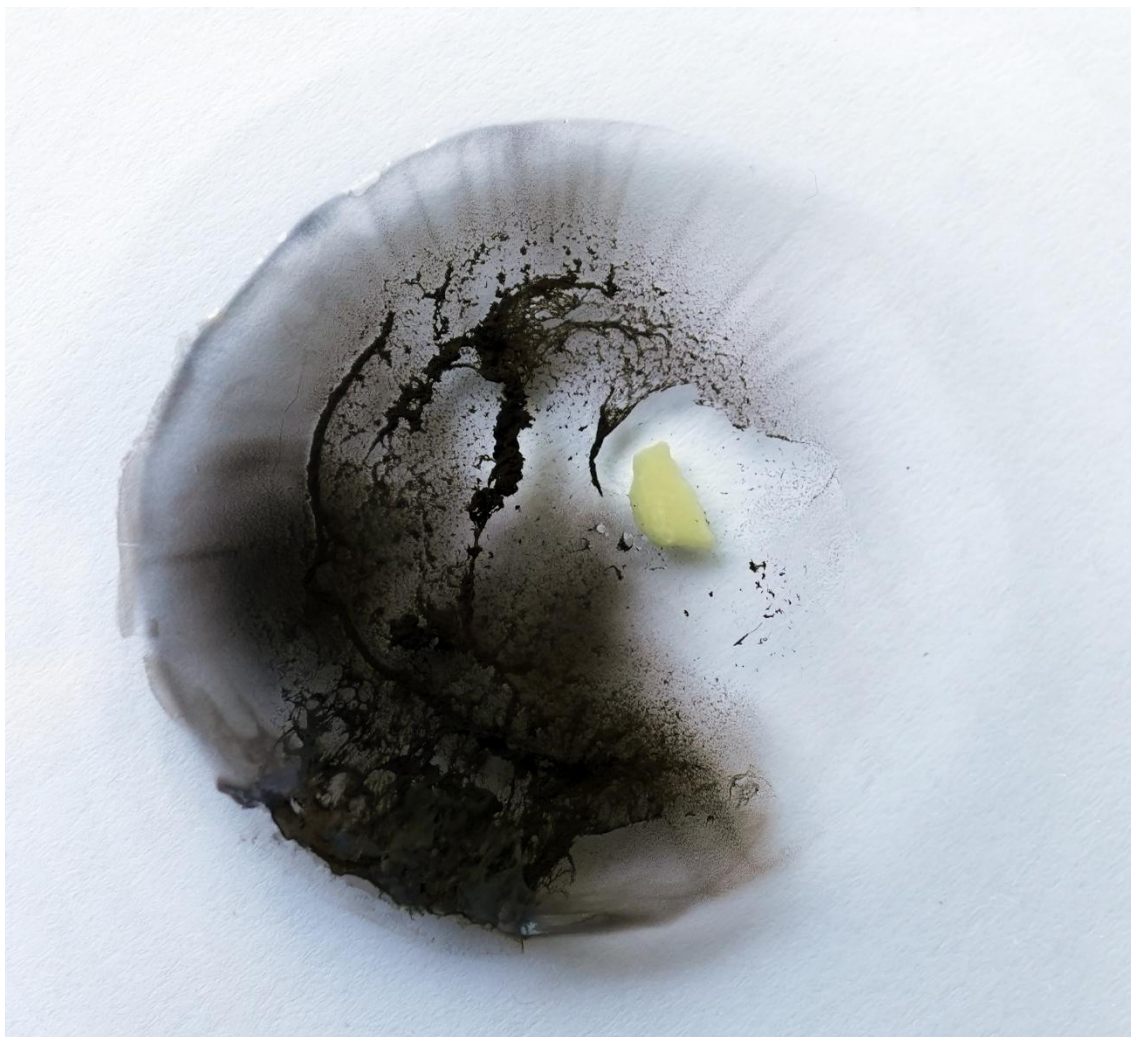
En este caso he preferido obtener el sulfuro poniendo sobre una disolución ácida pero diluida de Ag^{+1} una escama de Na_2S . Aunque el medio es ácido, la cantidad libre de S^{2-} es suficiente como para precipitar Ag_2S , que al ser tan insoluble tira de la reacción y acaba precipitando a toda la plata que hay en el medio.

Vemos algunas imágenes:



³⁰ Perry, D.L. Op.cit. p. 370.

³¹ Burriel, F., Lucena F., Arribas, S., Hernández, J. Op. cit. p. 1014.



G) CARBONATO DE PLATA (I)

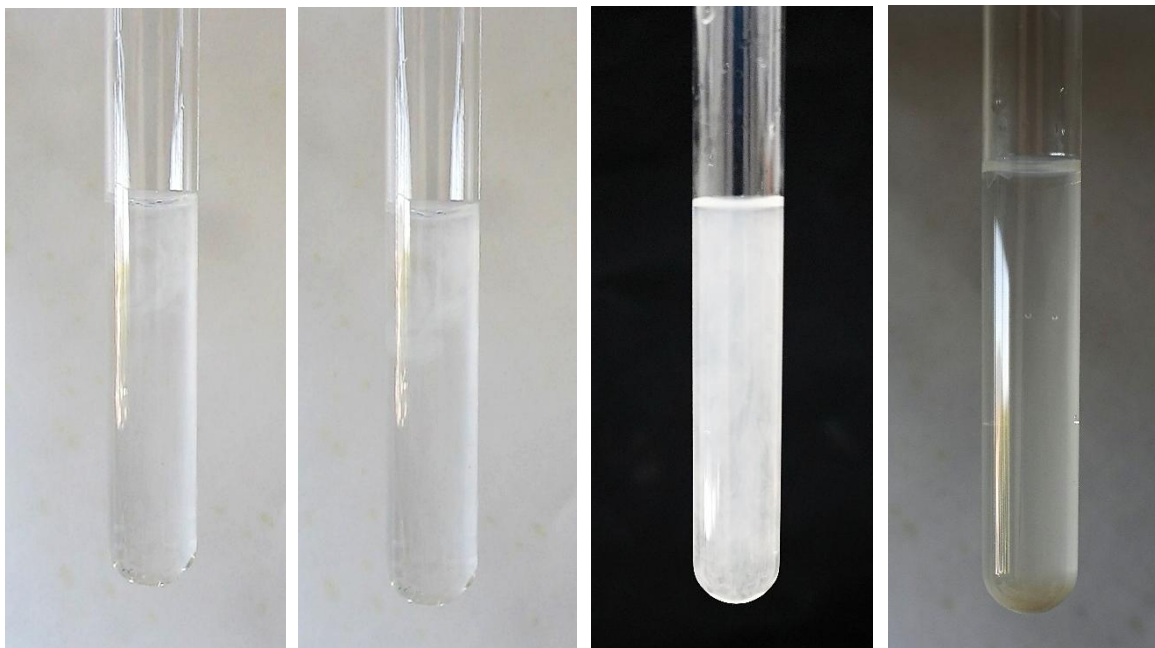
El carbonato de plata (I) presenta un color amarillo pálido recién formado, que se va oscureciendo paulatinamente a medida que la luz descompone el compuesto³², tal y como sucede con buena parte de estos precipitados. El color que he obtenido, me ha parecido más bien blanco roto o beige muy claro, pero su oscurecimiento con el paso del tiempo es muy obvio. El Ag_2CO_3 presenta una solubilidad³³ en agua de 0.0036g en 100g de agua a 20°C, por lo que precipita de forma visible, aunque retenga parte del compuesto en disolución.

Para obtener el precipitado, he añadido unas gotas de la disolución ácida de Ag^{+1} sobre una disolución concentrada de Na_2CO_3 en un tubo de ensayo. El burbujeo habitual se produce de forma moderada, debido al carácter ácido de la disolución de la plata, lo que provoca el desprendimiento de CO_2 .

En las siguientes imágenes se puede ver el proceso.

³² Perry, D.L. Op.cit. p. 365.

³³ Haynes, W.M. Op.cit. 4-84.



Sólo cuando precipita por completo y se adensa el compuesto, se aprecia el color beige del mismo. Ni siquiera cuando cambio el color del fondo, puedo ver a simple vista color alguno, y el precipitado parece blanco.

Cuando repito el experimento añadiendo unas gotas de la disolución ácida de plata, sobre la disolución del carbonato de sodio, en un vidrio de reloj, se aprecia perfectamente. He añadido después un poco de Na_2CO_3 sólido para aumentar el efecto.



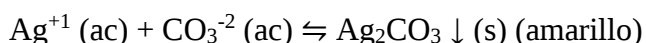
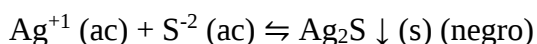
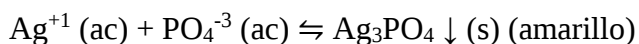
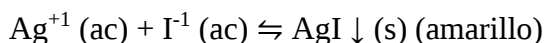
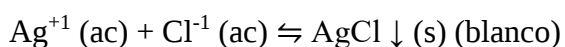




El carbonato de plata (I) se ve en la parte central, así como en las cristalizaciones radiales que rodean el disco, mientras que el carbonato de sodio en exceso, de un color blanco, cristaliza en la periferia por evaporación de las aguas madres en el vidrio de reloj. Como mi intención no es obtener el precipitado puro, vale como ejemplo del carbonato de plata, aunque si hubiera deseado una cosecha pura, hubiera bastado con filtrar.

H) REACCIONES DE PRECIPITACIÓN ANTERIORES

Todas las reacciones las he tomado del magnífico libro de F. Burriel que las escribe a modo de equilibrios³⁴:



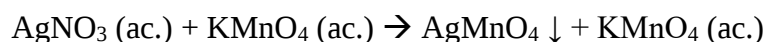
³⁴ Burriel, F., Lucena F., Arribas, S., Hernández, J. Op. cit. p. 1014.

I) PERMANGANATO DE PLATA (I)

La obtención del AgMnO_4 es un poco más laboriosa que en los casos anteriores, al ser inestable a medida que aumenta la temperatura, de la misma forma que es menos soluble a baja temperatura. El permanganato de plata (I) tiene un aspecto cristalino, con cristales de color violeta que son sensibles a la luz³⁵, aunque algunos suministradores indican que el color es gris va del púrpura al gris³⁶, o del púrpura al negro³⁷. La solubilidad es de 0.91g en 100g de agua a 18°C³⁸, mientras que a la temperatura de 0°C es de 0.55g en 100g de agua³⁹. En esta misma referencia se indica que el compuesto es inestable en el agua, por lo que la reacción debe llevarse a cabo a baja temperatura para favorecer la formación del AgMnO_4 .

Para ello he empleado una disolución de KMnO_4 en agua destilada en una concentración de 0.01M, para que el color violeta sea lo suficientemente tenue como para que no invisibilice la formación del permanganato de plata, que tiene el mismo color que la disolución concentrada. En cambio, he utilizado una concentración de AgNO_3 en torno a 0.1M. Ambas disoluciones las he dejado en el frigorífico durante varias horas en tubos de ensayo (sólo tengo intención de hacer una cantidad minúscula del permanganato). Después he echado la disolución de KMnO_4 en un vidrio de reloj y he añadido unas gotas de la disolución de Ag^+ , junto con un poco de AgNO_3 sólido, con un contacto periférico, para establecer un gradiente de concentraciones. Como la solubilidad del AgMnO_4 es considerable, a pesar de la baja temperatura, la cosecha de cristales es necesariamente pequeña a pesar de que la temperatura de reacción estaba en torno a los 4°C y se ha dejado en el frigorífico días para que se evapore lentamente.

La reacción es la siguiente⁴⁰:



Aquí vemos las imágenes de la misma, donde en el seno de la disolución de permanganato, aparecen puntos negros correspondientes al AgMnO_4 que se disuelven a medida que sube la temperatura. Al principio la disolución es completamente transparente y en su interior no se aprecia precipitado alguno, sin embargo, a medida que pasan las horas comienza a aparecer una constelación de puntitos oscuros en el interior de la misma que han de corresponderse con el AgMnO_4 . Al sacar del frigorífico el vidrio de reloj, se observa la desaparición paulatina de los puntos negros, de manera que la disolución queda completamente transparente, aunque en la periferia sí se formen cercos donde se forman cristales alargados del AgMnO_4 , aunque para visualizarlos mejor haya necesitado repetir el experimento con una concentración de KMnO_4 ligeramente mayor.

³⁵ Perry, D.L. Op.cit. p. 369.

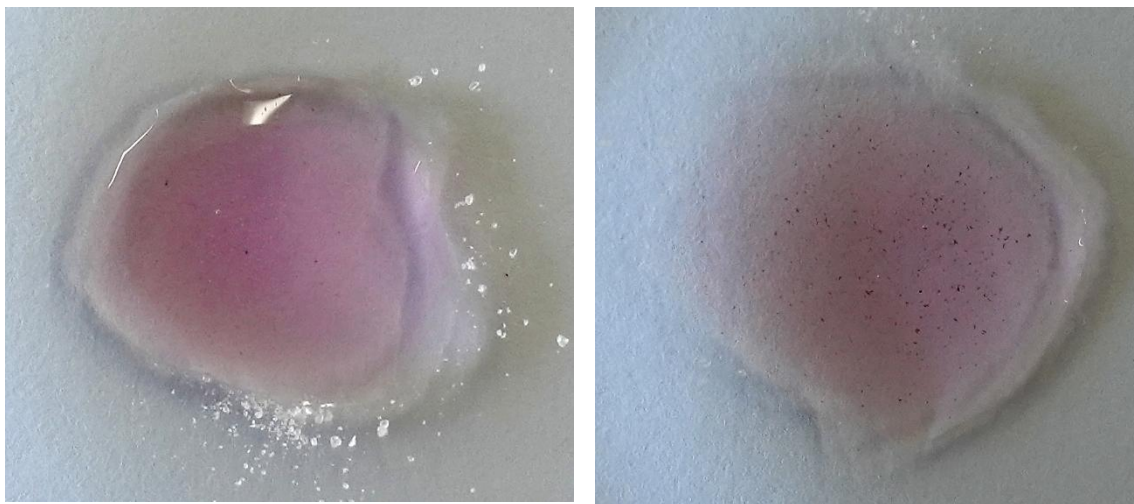
³⁶ <https://www.smolecule.com/products/s1900465> (Visitado el 04/09/2025)

³⁷ <https://www.benchchem.com/product/b1589443> (Visitado el 04/09/2025).

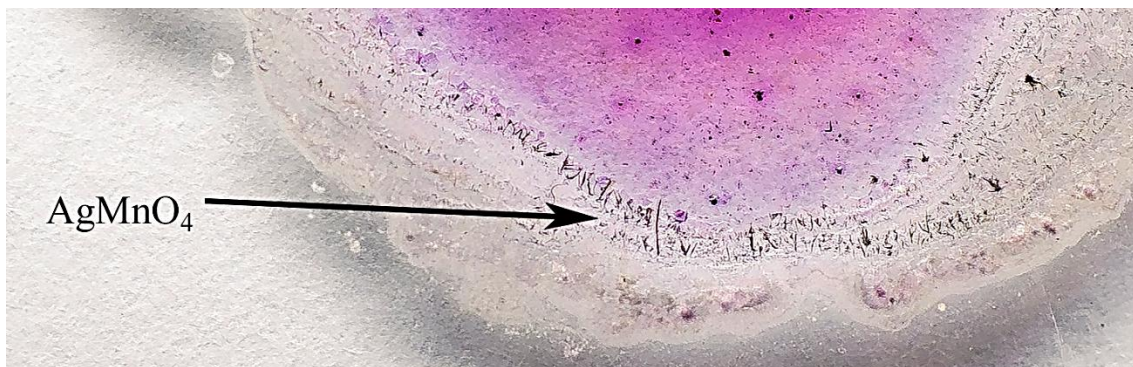
³⁸ Haynes, W.M. Op.cit. 4-84.

³⁹ <https://www.smolecule.com/products/s1900465> (Visitado el 04/09/2025)

⁴⁰ Ídem.



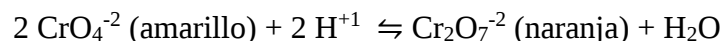
Primer experimento con una concentración de KMnO_4 de 0.01M



Segundo experimento con una concentración de KMnO_4 de unos 0.08M

I) DICROMATO Y CROMATO DE PLATA (I)

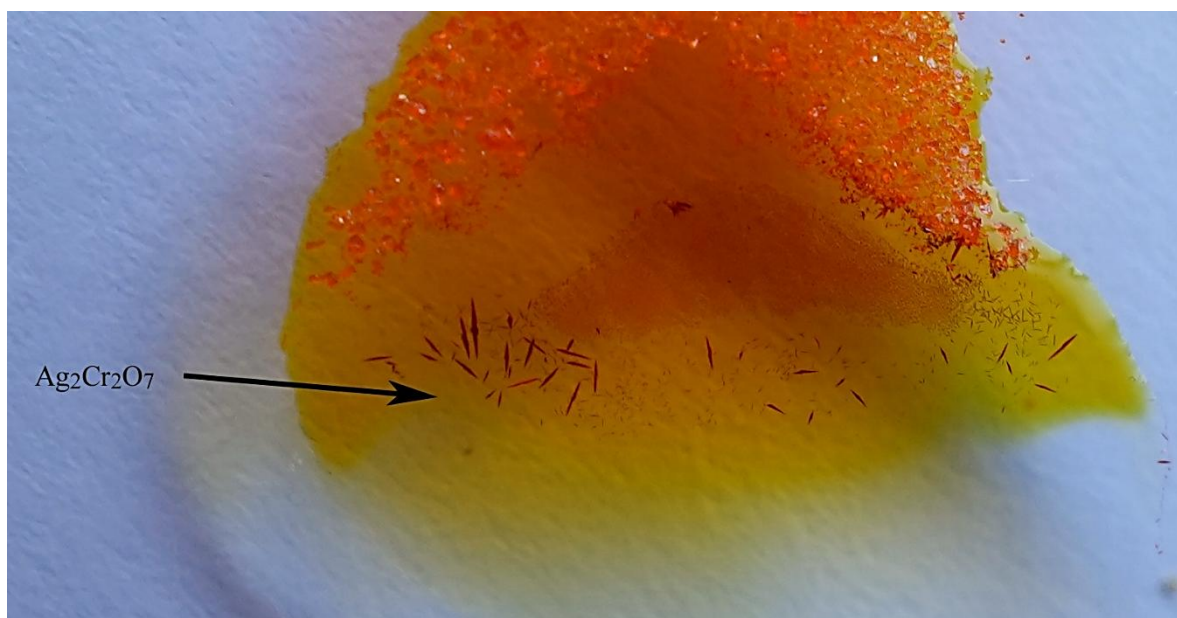
El equilibrio entre el anión cromato y el dicromato viene mediado por el pH, de manera que a pH ácido el anión dicromato (de color naranja) es el más estable, mientras que a pH básico el cromato (de color amarillo) es el dominante⁴¹.



Dicromato de plata (I)

El $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ es un compuesto cristalino de un precioso color rojo oscuro, que en muchos textos se describe como rojo rubí. Presenta una solubilidad en agua de 0.0083g/100mL de agua a 15°C, por lo que a nivel práctico podemos considerarlo insoluble⁴².

Para obtener el dicromato de plata (I) he utilizado un poco dicromato de potasio sólido, en un vidrio de reloj, sobre el que he añadido unas gotas de disolución ácida de Ag^{+1} con una concentración de 0.2M. En unos cuantos minutos comienzan a verse los cristales de color rojo vivo que se diferencia perfectamente de los cristales naranjas del dicromato de potasio. A medida que transcurre el tiempo. Los cristales rojos son alargados van adquiriendo un brillo y una tonalidad oscura que recuerda al color del rubí. Cuando pasan unas horas, los cristales crecen y se oscurecen, manteniendo un llamativo brillo. El proceso es lento, y lo mejor es añadir directamente sobre el dicromato de potasio la gota de Ag^{+1} y dejar el vidrio de reloj sin tocar durante horas, echando un vistazo de vez en cuando.



⁴¹ Martínez-Troya, D. (2017). Análisis de las reacciones de los cromatos y dicromatos con interés en las Enseñanzas Medias. Bórax, 2, 2. p. 134.

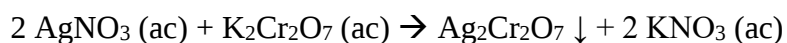
⁴² Perry, D.L. Op.cit. p. 366.





En un segundo experimento, añadí una gota de Ag^{+1} disuelto en medio ácido sobre una disolución saturada de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Al principio tardó en reaccionar, pero en el lugar en el que había caído la gota se formó una mancha oscura que con el paso del tiempo se fue extendiendo. Aunque aparentemente era de color negro, al ir expandiéndose se veía un color verde oscuro, producto de la mezcla entre el color anaranjado del dicromato de potasio y el color rojo oscuro del dicromato de plata (I). La sucesión de imágenes nos permite hacernos una idea de cómo evolucionó en el tiempo. Sobre la mancha negra dejé caer unos granos de dicromato, para ver si cambiaba de color, pero simplemente acabaron disolviéndose. Al final, cuando se evaporó el agua de las disoluciones, quedó un producto de color verde aceituna (mezcla de los dos dicromatos) y una corona roja de dicromato de plata (I) en polvo.

La reacción de precipitación es:

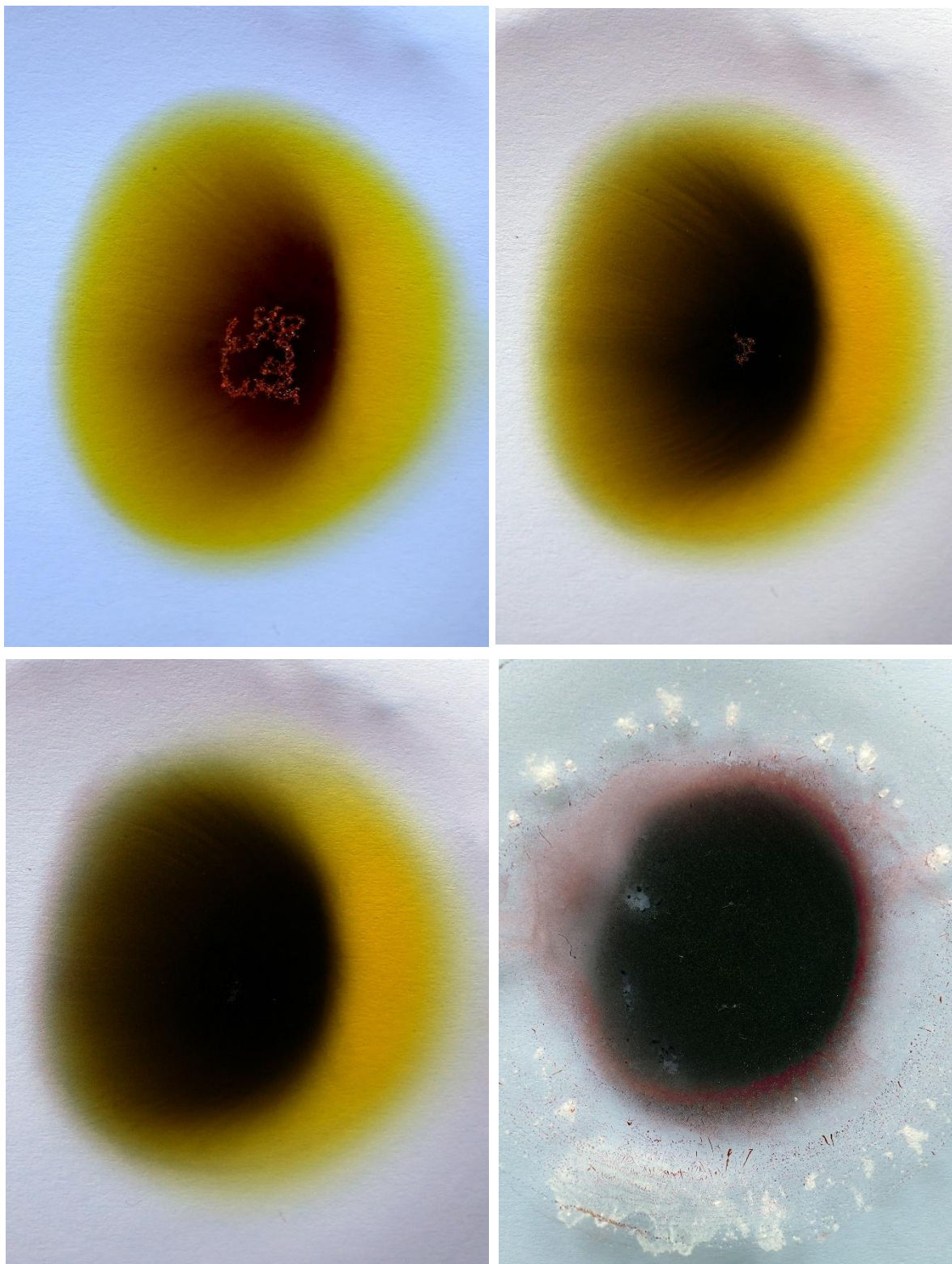


Además de ello, cuando se observa el precipitado sobre un fondo blanco, se aprecian una serie de circunferencias concéntricas de precipitación muy llamativas, los llamados anillos de Liesegang⁴³. Eche la gota de Ag^{+1} en el centro y no toqué el vidrio de

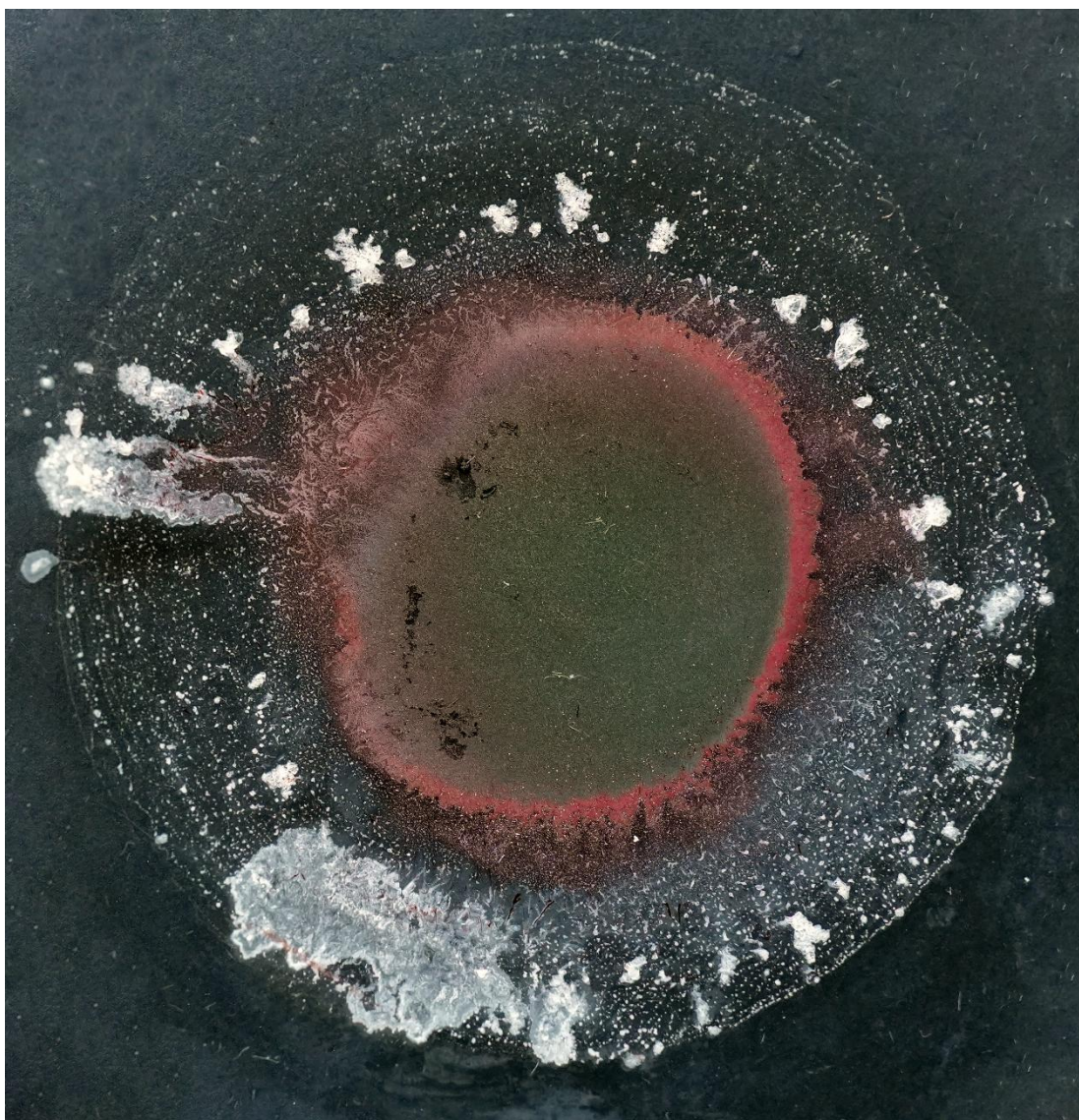
⁴³ https://www.mindat.org/glossary/liesegang_banding (Consultado el 13/07/2025)

reloj durante más de un día, reducido a sequedad por el calor de julio, de ahí que se pueda observar el fenómeno⁴⁴. En la última fotografía se ve el KNO_3 alrededor del precipitado.

Vemos las imágenes del proceso:



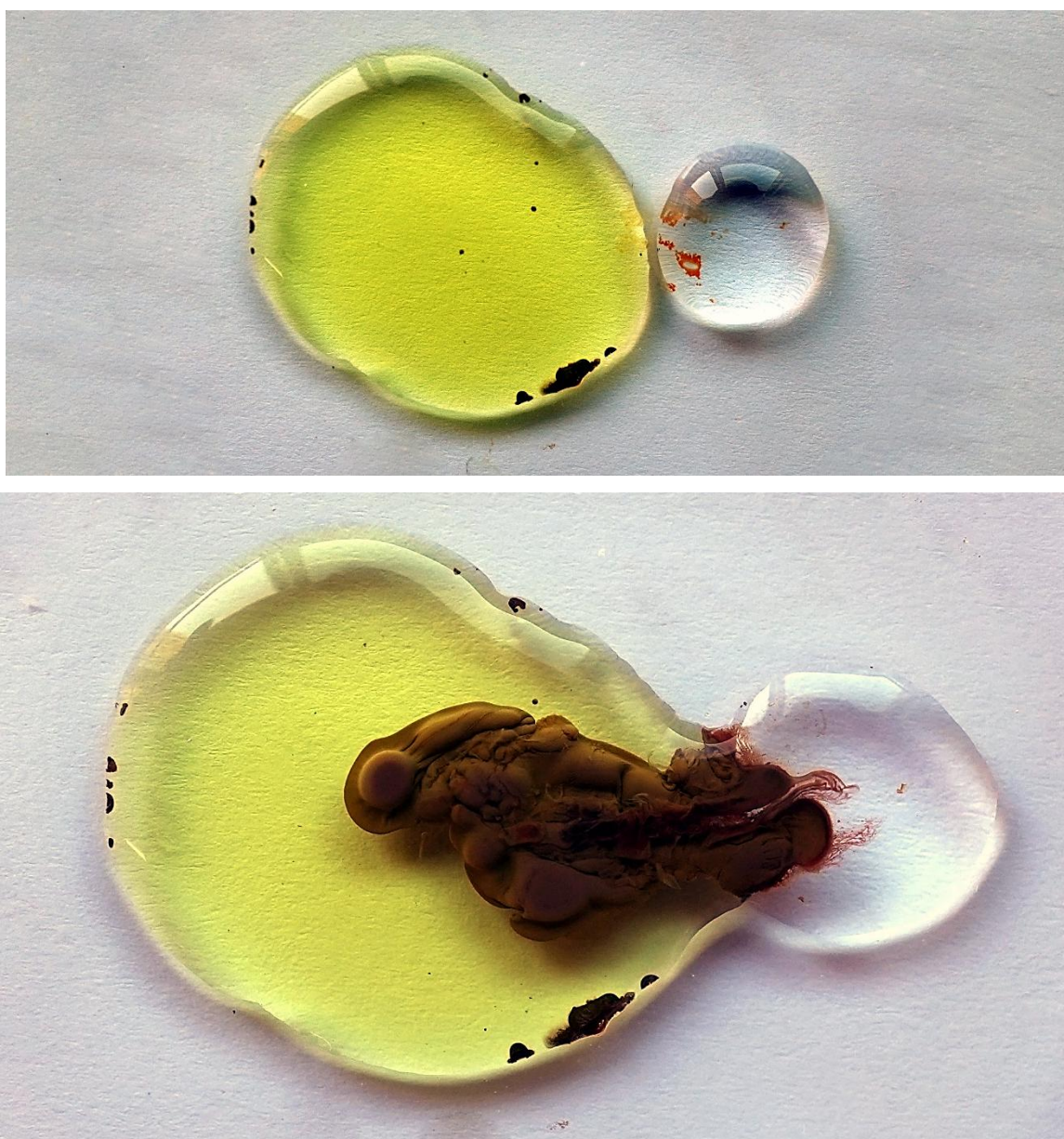
⁴⁴ Carvalho, D., Müller, S., Rahne, T., Tsuji, K., Polezhaev, A. (2023). Zig-zag structures in silver dichromate precipitate. Chaos 33, 083148. DOI: 10.1063/5.0153619



Cromato de plata (I)

El Ag_2CrO_4 es un compuesto cristalino cuyo color va de marrón rojizo a marrón⁴⁵ y tiene una solubilidad de 0.000014g/100g de agua a 0°C⁴⁶. Para obtenerlo he yuxtapuesto dos gotas, una con AgNO_3 disuelto en agua destilada (por tanto a pH = 7) y la otra con el cromato de potasio disuelto en agua destilada con un poco de NaOH para que el pH sea básico y que el cromato sea más estable que el dicromato. Al conectar ambas gotas se produce el precipitado de color marrón rojizo. Tengo dudas acerca de si el precipitado que se forma en la gota de cromato de potasio es Ag_2CrO_4 o es Ag_2O porque el color recuerda al del óxido, sin embargo, en la gota de AgNO_3 el compuesto es evidentemente el cromato de plata.

Vemos la secuencia de imágenes de esta llamativa reacción:



⁴⁵ Perry, D.L. Op.cit. p. 366.

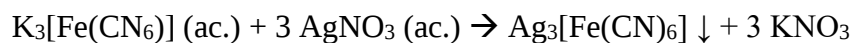
⁴⁶ Haynes, W.M. Op.cit. p. 4-84.



J) FERRICIANURO DE PLATA (I)

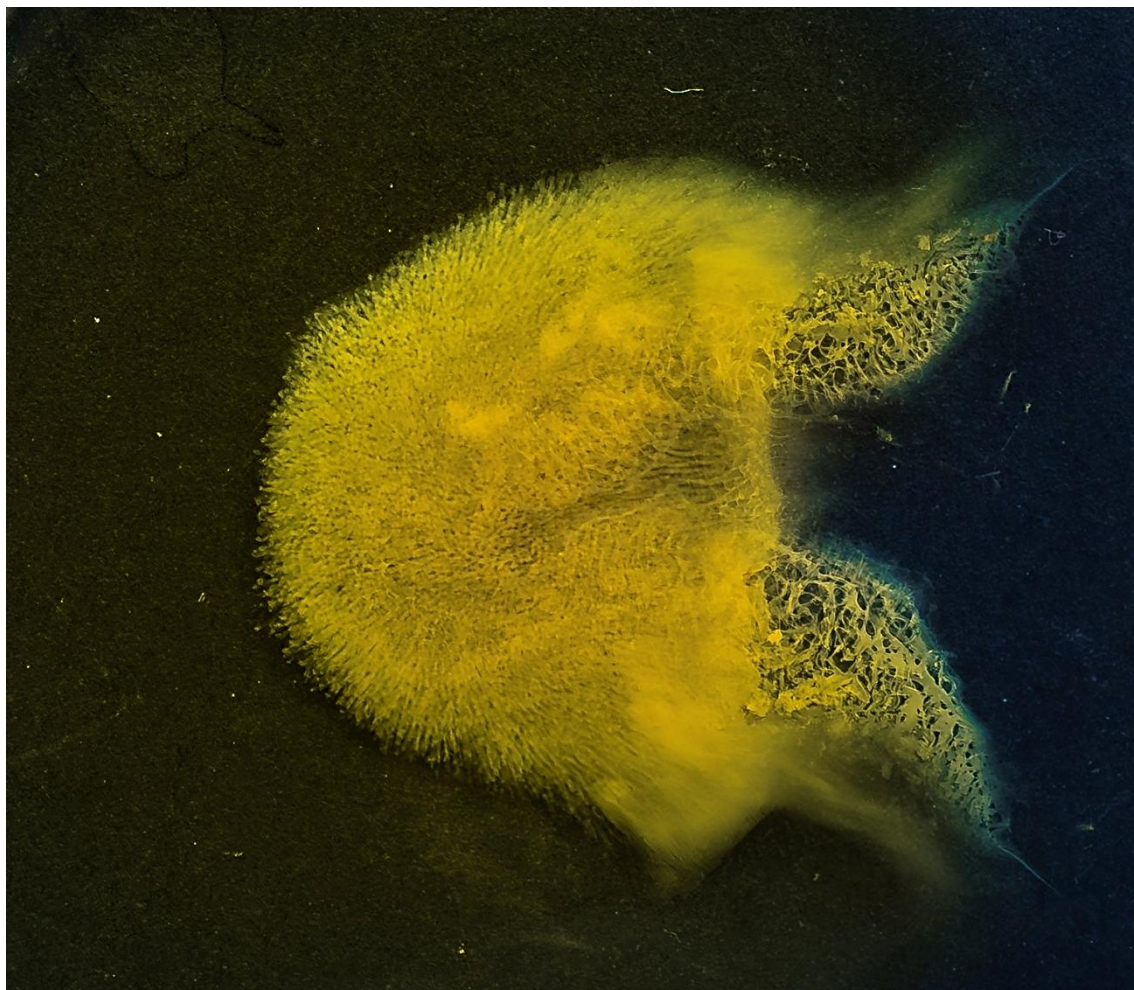
El $\text{Ag}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ es un compuesto insoluble de color rojo anaranjado, que se forma por contacto directo entre una disolución neutra de Ag^{+1} y otra de ferricianuro de potasio. El compuesto es insoluble y puede lavarse con agua tras precipitar, si se desea emplear la bomba de succión con el Büchner y el Kitasato⁴⁷.

La reacción química que se produce es la siguiente:

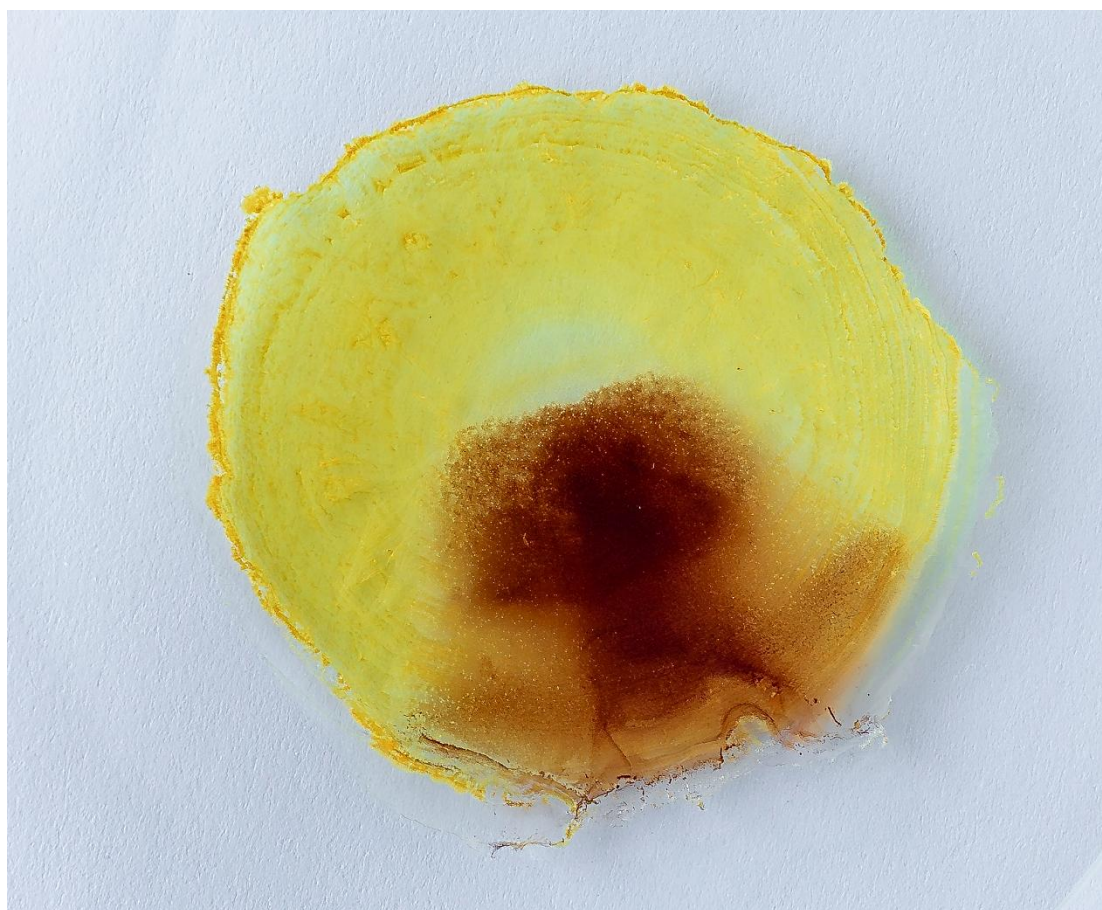
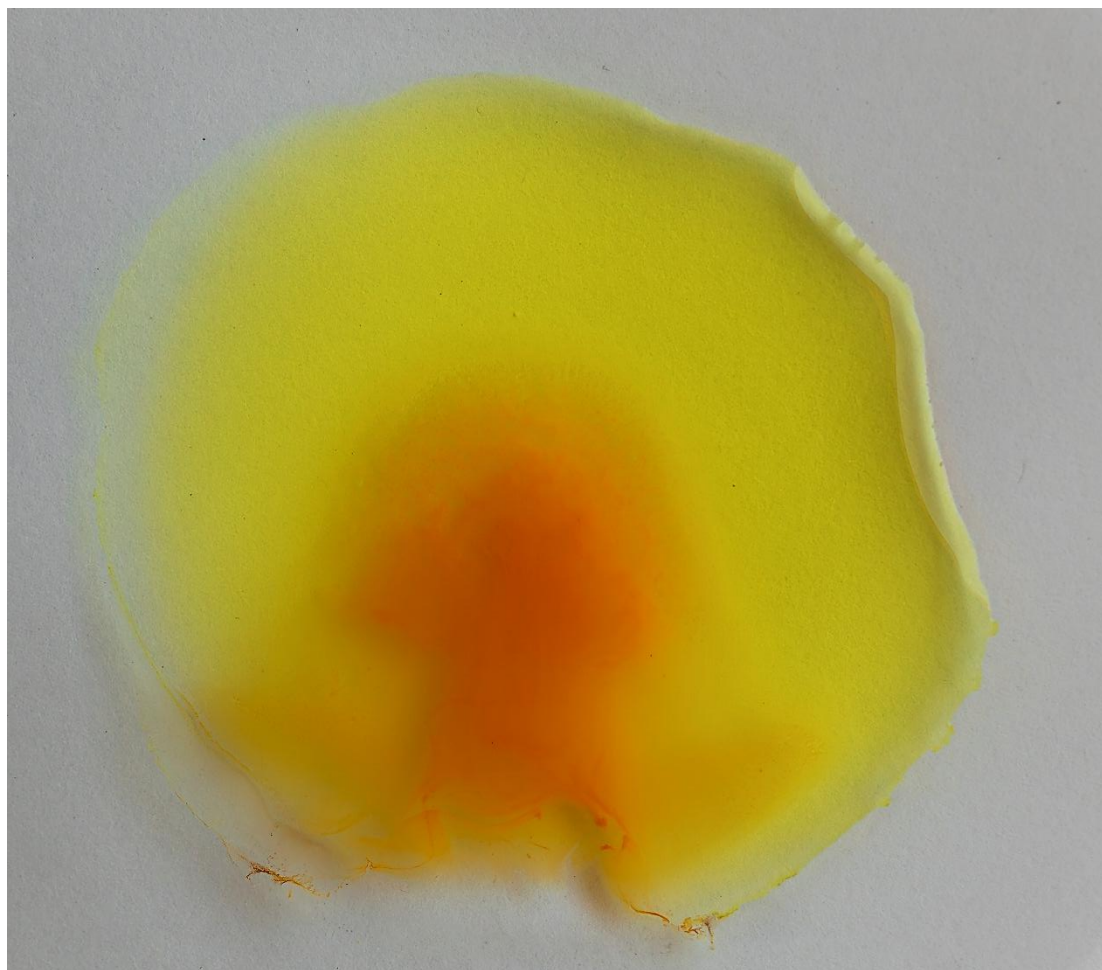


Para llevar a cabo la reacción he hecho una disolución diluida de ferricianuro de potasio, que presenta su característico color amarillo, y le he añadido unas gotas de una disolución de AgNO_3 en agua destilada al 0.1M.

Vemos el resultado en las imágenes:



⁴⁷ Blanco, O.P. (1956). Solubilidad de algunas sales de plomo en soluciones de acetatos alcalinos: Tiocianato y ferricianuro, obtención de ferricianuros de plomo. Tesis de Postgrado. Biblioteca Digital FCEN-UBA. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. p. 55.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_0899_Blanco.pdf



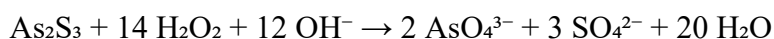
K) ARSENIATO DE PLATA (I)

El arseniato de plata (I) es un compuesto cristalino de color rojo que presenta una solubilidad⁴⁸ de 0.00085g en 100g de agua a la temperatura de 20°C. En la producción del Ag_3AsO_4 hay que tener cuidado con la toxicidad del arsénico, por lo que las cantidades que voy a obtener serán mínimas.

Para obtener el compuesto he partido de unas limaduras del mineral oropimente, As_2S_3 , que he disuelto en medio básico y oxidado a arseniato a través de agua oxigenada. Aunque la imagen de la derecha se corresponde con otro artículo, el molturado que he empleado para obtener el arseniato, procede de esa misma fuente. Entonces, se disuelve empleando una disolución de NaOH en agua destilada, utilizando el agua oxigenada para favorecer el proceso, a través de la oxidación del As^{+3} a As^{+5} , que rinde AsO_4^{3-} tras una cadena de reacciones bastante compleja⁴⁹. Al añadir el As_2S_3 al tubo de ensayo con la disolución alcalina, se aprecia ya una disolución del sulfuro, pero al añadir una cantidad pequeña de H_2O_2 la reacción progresa de forma muy rápida.



La reacción global que se produce es la siguiente:

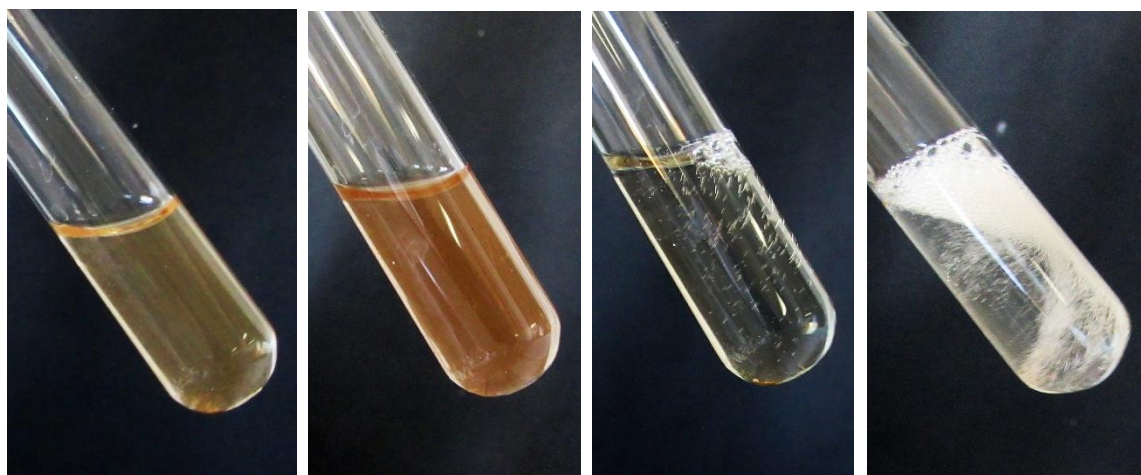


Tras producirse, el resultado es una disolución incolora y perfectamente transparente, con el arseniato que necesitamos. Sin embargo, para poder llevar a cabo la síntesis del Ag_3AsO_4 hay que tener la precaución de eliminar el agua oxigenada que haya quedado en exceso, dado que, si no lo hacemos, o lo hacemos de forma precaria, la plata (I) que añadamos se reducirá a plata metálica, produciendo un precipitado negro que se vuelve gris oscuro con el tiempo. En mi caso, tuve esa incidencia la primera vez que intenté llevar a cabo la experiencia. Mantuve hirviendo el tubo con el arseniato y el exceso de H_2O_2 de manera que el peróxido se eliminara, pero a pesar de que estuve calentando con cuidado unos cinco minutos, aún había un remanente que estropeó la reacción buscada. Lo que hice, al repetir la reacción, fue simplemente dejar el tubo de ensayo abierto durante todo el día, para emplearlo a la mañana siguiente, de manera que a la temperatura ambiente, se degradó el agua oxigenada y el proceso deseado se produjo sin problemas.

⁴⁸ Haynes, W.M. Op.cit. p. 4-84.

⁴⁹ Li Rui-bing, Yao Zhi-xin, Zhang Ting-an, Yu San-san. (2021). Oxidation Treatment of Arsenic Sulfide Slag. Research & Development in Material Science, 15, 4.

Vemos aquí algunas de las fases de esta interesante reacción:

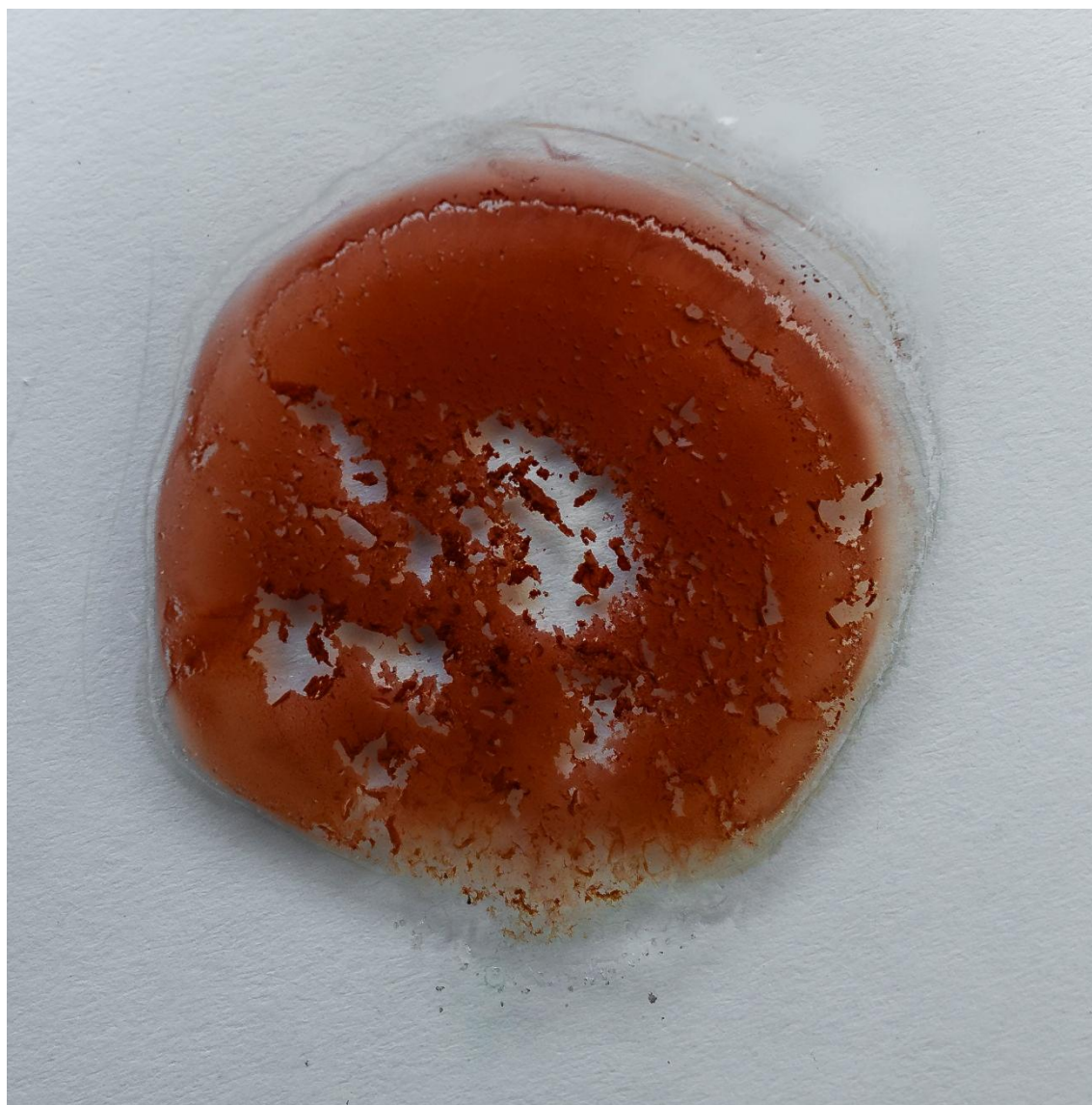


$As_2S_3 + NaOH$

Añado H_2O_2

*Caliento para eliminar el
 H_2O_2 sobrante*

Al añadir unas gotas de la disolución de Ag^{+1} se forma el Ag_3AsO_4 :



CONCLUSIONES

Los haluros de plata forman un grupo de compuestos químicos que facilitan el abordamiento de conceptos químicos complejos de explicar y entender como son todos los relacionados con la fotoquímica. La posibilidad de ver cómo un compuesto, como es el AgCl pasa en minutos de ser blanco inmaculado a gris, o gris violáceo, es muy sorprendente. Este tipo de cambios, tan rápidos, llama la atención del alumnado y en esa circunstancia es más receptivo a la hora de entender qué es lo que está sucediendo en el vidrio de reloj. Entrar en la formación de clústeres no es simple, pero tratar de responder a la pregunta de cuándo podemos hablar de plata metálica, si sabemos que la Ag^{+1} pasa a Ag^0 , es muy interesante, habiendo estudiado el enlace metálico, cuya premisa suponía la existencia de millones de átomos enlazando entre sí.

Al margen de ello, la descripción del proceso fotográfico (que yo no he abordado en su totalidad) comienza por comprender la química de estos haluros de plata y su sensibilidad para con la luz del visible (y del ultravioleta). De esta manera, esta práctica podría ampliarse y hacerse aún más aplicada, replicando el revelado químico que durante años se ha llevado a cabo en algunos institutos a modo de taller. Sin perder de vista el trasfondo químico de las reacciones, la fotografía y los procesos de revelado, son de un enorme interés pedagógico, al margen de que permitiría realizar actividades interdepartamentales en colaboración con Plástica o con otros departamentos afines.

En lo que respecta al resto de reacciones de precipitación, si bien carecen del interés social o tecnológico de las anteriores, merecen la pena sobre todo por la belleza de las imágenes que nos proporcionan. Tanto el cromato como el dicromato de plata son compuestos muy llamativos, de colores vivos, y que en el marco de la química del pH y del equilibrio entre cromato y dicromato regulado por dicho pH, nos pueden ser muy útiles para explicar estas relaciones de equilibrio que siempre son complicadas. La formación de circunferencias concéntricas de cristalización, con los llamados anillos de Liesegang, representan un añadido curioso, pero que requiere una precipitación lenta y una ausencia completa de movimiento para que puedan desarrollarse. De lograrse, merece la pena comparar el resultado con las innumerables imágenes de geología donde estos anillos se pueden ver en algunas rocas sedimentarias (y metamórficas). La reacción de formación del permanganato de plata (I) es interesante, precisamente por el hecho de tener que trabajar a baja temperatura, lo que supone un cambio para lo habitual en las prácticas de laboratorio, pero la cantidad obtenida no es llamativa, y el color se parece demasiado al permanganato de potasio, como para que llame la atención del alumnado. La reacción con el ferricianuro de potasio sí merece la pena por su espectacularidad, sobre todo disminuyendo la concentración del ferricianuro. Mientras que la formación del arseniato es demasiado tóxica para un instituto. De forma general, la plata es un metal que nos brinda la oportunidad de diseñar experiencias fascinantes y diversas, que permiten explicar aspectos generales a la par que otros muy concretos de la química, ofreciendo siempre compuestos de una extraordinaria belleza, con colores vivos, o cambiantes, en su defecto, pero siempre con reacciones químicas fáciles de llevar a cabo y con una toxicidad muy baja.

BIBLIOGRAFÍA

- Babasaheb Sankapal, Prashant Baviskar, Dipak Salunkhe. (2010). Synthesis and characterization of AgI thin films at low temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 506, 1, pp:268-270.
- Belloni, J. (2002). The role of silver clusters in photography. *Comptes Rendus. Physique*, 3, pp: 381-390.
- Blanco, O.P. (1956). Solubilidad de algunas sales de plomo en soluciones de acetatos alcalinos: Tiocianato y ferricianuro, obtención de ferricianuros de plomo. Tesis de Postgrado. Biblioteca Digital FCEN-UBA. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Bohren, C. F., Huffman, D. R. (2004). *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Burriel, F., Lucena F., Arribas, S., Hernández, J. (1992). *Química Analítica Cualitativa*, 14ª Edición, Madrid, España: Editorial Paraninfo.
- Carvalho, D., Müller, S., Rahne, T., Tsuji, K., Polezhaev, A. (2023). Zig-zag structures in silver dichromate precipitate. *Chaos* 33, 083148.
- Chakraborty I, Erusappan J, Govindarajan A, Sugi KS, Udayabhaskararao T, Ghosh A, Pradeep T. (2014). Emergence of metallicity in silver clusters in the 150 atom regime: a study of differently sized silver clusters. *Nanoscale*, 6, 14. pp: 8024-31.
- Cotton, F.A., Wilkinson, G. (1990). *Química Orgánica Avanzada*. Méjico D.F., Méjico: Limusa.
- George, P.P. (2022). Sonochemical Synthesis and Characterization of Ag₂CrO₄ Nanoparticles, a Green Chemistry Approach. *Asian Basic and Applied Research Journal*, 4, 1. pp: 254-262.
- Glaus, S., Calzaferri, G. (2003). The band structures of the silver halides AgF, AgCl, and AgBr: A comparative study. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2, pp: 398–401.
- Greenwood, N.N., Earnshaw, A. (1990). *Chemistry of the Elements*. Oxford, Gran Bretaña: Pergamon Press.
- Hauser, J. J. (1977). Electrical, structural and optical properties of amorphous carbon. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 23, 1, p. 21-41.
- Haynes, W.M. (2016–2017). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 97th edition. BocaRaton, EEUU: CRC Press.
- Li Rui-bing, Yao Zhi-xin, Zhang Ting-an, Yu San-san. (2021). Oxidation Treatment of Arsenic Sulfide Slag. *Research & Development in Material Science*, 15, 4.
- Lünskens T, Heister P, Thämer M, Walenta CA, Kartouzian A, Heiz U. (2015). Plasmons in supported size-selected silver nanoclusters. *Phys Chem Chem Phys.*, 17, 27. pp:17541-4.
- Martínez-Troya, D. (2017). Análisis de las reacciones de los cromatos y dicromatos con interés en las Enseñanzas Medias. *Bórax*, 2, 2.

- Orion Engineered Carbons. (2023). Coloristic properties of specialty carbon blacks in full tone and tinting applications for coatings. Technical Information 1464.
- Perry, D.L. (2011). Handbook of Inorganic Compounds. Boca Raton, EEUU: CRC Press.
- Tan, Y.T. (1989). Silver Halides in Photography. MRS Bulletin, 14, pp:13–16.

OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN

Sobre el color negro de los metales expuestos a ácido:

<https://www.madsci.org/posts/archives/2000-03/953740232.Ch.r.html>

Anillos de Liesegang

https://www.mindat.org/glossary/liesegang_banding

Permanganato de plata (I)

<https://www.smolecule.com/products/s1900465>

<https://www.benchchem.com/product/b1589443>