



Rosalind Franklin: su vida y su legado científico con especial referencia a su papel en el descubrimiento de la estructura molecular del ADN

Rosalind Franklin: her life and scientific legacy with special reference to her role in the discovery of the molecular structure of DNA

Juan Schnack

Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria

jschnack2@gmail.com

Resumen:

Se analizan los principales acontecimientos relacionados con la vida y la trayectoria científica de la destacada físico-química británica Rosalind Elsie Franklin. Se describen su entorno familiar y su etapa de estudiante en los niveles secundario y universitario. Se analizan tres períodos relevantes en su carrera científica. 1. Sus investigaciones en la *British Coal Utilization Research Association (BCURA)* de Londres (1942-1946) y su paso como investigadora post-doctoral en el *Laboratoire Central des Services Chimiques de l'État* de París (1947-1950), 2. Su decisivo papel en el descubrimiento de la estructura molecular del ADN, que desempeñó durante su estancia como becaria Turner & Newal en el *King's College* (1951-1953), 3. Sus estudios sobre el virus del mosaico del tabaco (*Tobacco Mosaic Virus-TMV*), el virus de la polio y el ARN en el *Birbeck College* (Universidad de Londres) (1953-1958). También se hace hincapié en sus vínculos personales y científicos con sus colegas Francis Crick y James Watson y en los medios a los que estos últimos recurrieron para acceder a datos experimentales relevantes que ella y su estudiante de doctorado Raymond Gosling registraran mediante técnicas de difracción de rayos-X. Asimismo, se considera la incómoda relación personal y de trabajo que se suscitó entre Rosalind Franklin y Maurice Wilkins, Director Adjunto de la Unidad de Biofísica del *King's College* y en qué medida esta relación conflictiva derivó en su decisión de dejar de trabajar en el *King's* para continuar con sus investigaciones en el *Birbeck College*. La brillante carrera científica de Rosalind Franklin es analizada por su relevancia relativa en sus importantes hallazgos científicos, así como en la formación de científicos, teniendo en cuenta sus ocho años dedicados al estudio de materiales de carbono, sus dos años concentrados en el ADN y sus últimos cinco años de vida dirigidos al estudio de virus y ARN, así como a la formación de quienes fueron sus últimos herederos científicos. El mayor detalle con el cual se analiza el descubrimiento de la estructura molecular del ADN, obedece a la mayor relevancia científica de este hito en la historia de la biología, en comparación con los estudios que realizó Franklin sobre materiales de carbono y virus. Finalmente, se destaca el amplio reconocimiento mundial de sus excepcionales logros científicos.

Palabras clave: ADN, estructura molecular, difracción de rayos X, modelos teóricos, Fotografía 51, virus del mosaico del tabaco, poliovirus, materiales de carbono, competencia, cooperación.

Abstract: This work deals with the most important events experienced during her life by the outstanding British chemist-physicist Rosalind Elsie Franklin. It comprises references on her closest relatives, formal education and her notable scientific achievements. Special reference is given to Franklin's decisive role played as one of the four co-discoverers of the molecular structure of DNA while working at King's College of London University as Turner & Newal Fellowship from 1951 to 1953. It is also analyzed Rosalind Franklin's personal and scientific relationship with her colleagues who dealt with DNA research and the way the "James Watson-Francis Crick duo" had access to relevant experimental data that she and her doctoral student Raymond Gosling recorded by means of X-rays diffraction techniques. It is also referred the complicated relationship between Franklin and Maurice Wilkins, Deputy Director of the Biophysical Unit at King's, and how it pushed Franklin to move to the Birbeck College of London University where the admirable performance she had coincided with her last five years of life (1953 -1958). In this last stage of her life she brilliantly dealt with the field of virology, mainly tobacco mosaic virus and poliovirus. Due to its more scientific relative impact, this work includes more details related to Franklin's performance as co-discoverer of the molecular structure of DNA, than those dealing with carbon and virus. The worldwide recognition, partly posthumous, for Franklin's brilliant career is finally detailed.

Key words: DNA molecular structure, X-rays diffraction, theoretical models, photograph 51, competence, cooperation.

Introducción

Una gran proporción de las referencias que aporta la literatura especializada en tópicos de la biología molecular, alude a la físicoquímica y cristalógrafa inglesa Rosalind Franklin (1920-1958) como un ícono ineludible de la lucha por los derechos de las mujeres en el campo de las ciencias y su reivindicación, con el objetivo de contrarrestar el escaso reconocimiento relativo de sus logros en comparación con aquellos atesorados por sus colegas del sexo opuesto. Es pertinente aclarar que este comentario describe brevemente un rasgo de la sociedad que, en este caso, circunscribimos, aunque no de modo excluyente, al Reino Unido. Su vigencia, afortunadamente, expiró hace algunas décadas, aunque aún persistía con fuerte efecto cuando promediaba el siglo pasado, cuando nuestra protagonista desarrollaba sus notables descubrimientos científicos relativos a la estructura molecular del ADN, a los materiales de carbono, al virus del mosaico del tabaco (TMV) y al ARN.

Sin desmedro de lo expresado en el párrafo anterior, a pesar de que fue considerada por muchos como una figura ejemplar del feminismo, Rosalind Franklin nunca adhirió a ningún movimiento o causa feminista. Pese a los perjuicios que padeció en sus relaciones personales y al escaso reconocimiento que incomprensiblemente le adjudicaron algunos científicos varones coetáneos hubo, cabe reconocer, un número importante de hombres que reconocieron enfáticamente sus méritos. Sus relaciones personales, como científicas con los hombres más destacados con los cuales tuvo vínculos de cooperación y de competencia se apreciarán sucesivamente en los capítulos referidos a sus actividades científicas desarrolladas en Londres y París.

Sin dejar de reconocer que Rosalind Franklin tuvo que afrontar situaciones traumáticas, éstas sólo se suscitaron en su breve, pero decisiva estancia en el *King's College* de la Universidad de Londres, institución que, junto con los Laboratorios *Cavendish* de la Universidad de *Cambridge* lideraba las investigaciones referidas a la estructura molecular del ADN. En el mencionado ámbito londinense, nunca perdió el equilibrio ni la concentración para llevar a cabo sus valiosos experimentos para indagar en la estructura del ADN mediante el método de difracción de rayos X.

Rosalind Franklin no redujo su *leitmotiv* a la ciencia como tampoco a la competencia con otros científicos para lograr el mayor reconocimiento entre sus pares. En las circunstancias en las cuales gozaba de días libres de los disciplinados y sacrificados experimentos que acometía con marcado interés y extrema responsabilidad, disfrutaba de fascinantes actividades extra-científicas. Especialmente felices y excitantes transcurrieron sus irresistibles aventuras en su práctica del montañismo, donde su disfrute de emprender largas caminatas y escalar en elevados picos montañosos europeos, puso más de una vez su vida bajo riesgo. Sus viajes a atractivas ciudades de Italia, España y Francia fueron parte de los momentos más felices de su vida.

Desde pequeña, la brillante química-física y cristalógrafa Rosalind Franklin mostraba un marcado interés por la matemática y la química que presagiaba un futuro de logros científicos. Su tía paterna, Helen Bentwich (1892-1972) (Franklin de soltera), apodada “Mamie”, hermana de su padre, Ellis Arthur Franklin (1884-1964), dijo en una oportunidad que Rosalind era “alarmantemente” inteligente, que completaba con placer sus ejercicios de aritmética sin cometer errores. Alarmantemente, término utilizado en lugar de algún otro que fuera de referencia más común, como podrían haber sido entre otros “asombrosamente” o “sorprendentemente”, no era sólo un elogio, sino también, probablemente, una advertencia (Maddox, 2002). La inteligencia de su sobrina pudo haber alarmado a su tía, de quien se especula que presagiaba que, ser inteligente y mujer en un mundo donde los hombres imponían su autoridad, podría ser una desventaja.

Los temores de Mamie no eran infundados. Rosalind Franklin tuvo que enfrentar situaciones conflictivas que su identidad de género le deparó, aunque es oportuno reconocer que tales circunstancias se desencadenaron en un breve período de su derrotero científico, en coincidencia con su etapa dedicada a desentrañar la estructura del ADN.

En cuanto a las investigaciones sobre el ADN, con inusitada frecuencia, aparecen en textos, periódicos, ficciones históricas y sitios web de diferentes países, contenidos que, con tono crítico, expresan el inmerecido escaso reconocimiento que ha tenido Rosalind Franklin, a quien reconocen por el decisivo protagonismo que le cupo para desentrañar la estructura molecular de la molécula de la vida, muchas veces ignorado por sus propios colegas. Por otra parte, se observa que algunos textos de, genética, evolución y biología general de hace unos cuarenta años, o anteriores sólo mencionan, al referirse al ADN, a la dupla que, por ahora, presentamos como “Watson-Crick (e.g. Lerner & Libby, 1976, Dobzhansky et al. 1977, Ayala & Valentine, 1979).

Una revisión histórica rigurosa y justa exige ampliar el número de actores que fueron fundamentales para descubrir la estructura molecular del ADN. Afortunadamente, textos y publicaciones periódicas más recientes, sobre todo a partir de las últimas décadas y, muy especialmente, desde comienzos de este siglo, han revalorado la decisiva importancia de la eximia cristalógrafa en el aludido descubrimiento.

En cualquier caso, es estimulante observar que, al menos en universidades nacionales argentinas, los textos generales de biología publicados en este siglo, que son de mayor demanda por parte de los estudiantes principiantes, dedican un buen espacio a la obra fundamental de Franklin en el campo de la biología molecular (e.g. Curtis, et al., 2008).

Actualmente, hay amplia coincidencia en atribuir el descubrimiento de la estructura molecular del ADN al esfuerzo y al talento de un conjunto de cuatro eminentes científicos. Se trata de la mencionada dupla que integraron el físico -biofísico inglés Francis Crick (1916-2004), el biólogo estadounidense James Watson (1928-) (Laboratorios *Cavendish*, Universidad de *Cambridge*), la físico-química y cristalógrafa inglesa Rosalind Franklin (Fig. 1) y el biofísico neozelandés-británico Maurice Wilkins (1916-2004) (*King's College*, Universidad de Londres). Puede ser injusto, probablemente, no añadir a esta nómina al biofísico británico Raymond Gosling (1926-2015) quien tuvo especial protagonismo en el *King's College* trabajando inicialmente en colaboración con Maurice Wilkins y, posteriormente, en los momentos decisivos del descubrimiento de la estructura del ADN, cuando avanzaba hacia la finalización de su *PhD*, bajo la supervisión de Rosalind Franklin. Cada uno de ellos aportó información exclusiva e imprescindible para que se pudiera develar la estructura del ADN.



Fig. 1. Rosalind Franklin, la célebre química y cristalógrafa que en vida no tuvo el justo reconocimiento a su relevante papel en el descubrimiento de la estructura molecular del ADN.

Ha sido falaz afirmar en algunos ámbitos académicos británicos que el protagonismo de Franklin en la dilucidación de la estructura molecular del ADN fue menos trascendente que el que exhibieran Watson y Crick, los más referenciados entre los aludidos descubridores. El dúo de *Cambridge* admitió, aunque un poco tardíamente, que sin los decisivos aportes de Franklin no habrían podido desentrañar la estructura molecular del ADN (Crick & Watson, 1954).

Asimismo, una versión ampliamente difundida por científicos, biógrafos y aún por la cultura popular da por hecho de que la dupla de *Cambridge* utilizó, sin autorización, información de los ya mencionados científicos del *King's College*, necesaria para completar su modelo final de la molécula de ADN.

Como se apreciará más adelante, Watson y Crick accedieron de un modo subrepticio a informes inéditos que Franklin y Wilkins habían entregado al *Medical Research Council (MRC)*, incluyendo datos sobre sus investigaciones relativas al ADN. Asimismo, sin el consentimiento y conocimiento de Franklin, Wilkins le mostró a Watson la icónica Fotografía 51 que mostraba la forma B del ADN que había sido tomada por Gosling con la técnica de difracción de rayos-X. Estos dos hechos que podrían interpretarse como apropiación de información para concretar el modelo final de la macromolécula de ADN asignarían a Watson y Crick el papel “villanos” en la puja científica que se suscitó entre los Laboratorios *Cavendish* y el *King's College*.

Según Gallardo (2011), el descubrimiento trascendental para la biología de la estructura del ADN es atribuible, en el caso de Watson y Crick, a diagramas en una pizarra, apropiación de información de trabajos experimentales, publicaciones realizados por otros científicos y la manipulación d modelos, sin haber tocado una fibra de ADN ni haber realizado un solo experimento. Considera, además, que el

trabajo experimental ya había sido realizado por Avery, Chargaff, Wilkins y Franklin. Los dos primeros autores que menciona merecen una aclaración.

Estudios bacteriológicos demostraban, de un modo explícito, que las moléculas biológicas portadoras de información hereditaria no eran de naturaleza proteica. A mediados de la cuarta década del siglo XX el médico e investigador canadiense Oswald Theodore Avery (1877-1955) y colaboradores del Instituto Rockefeller de Nueva York comprobaron que el ADN era el portador de la información genética (Avery et al., 1944).

Seis años después, Erwin Chargaff (1905-2002), químico austríaco de la Universidad de *Columbia*, realizó estudios experimentales que le permitieron establecer que, el número de nucleótidos que contiene la base nitrogenada A (Adenina) es igual al de nucleótidos que contienen la base T (Timina); del mismo modo, el número de nucleótidos conteniendo la base G (Guanina) es igual al que contiene la base C (Citosina). Por lo tanto, las bases nitrogenadas del ADN siempre se presentan con sus proporciones bien definibles, existiendo, necesariamente, complementariedad entre bases púricas y pirimídicas, de modo que por puentes de hidrógeno necesariamente la Adenina (A) se une a la Timina (T) y la Guanina (G) a la Citosina (C)¹ (Ley de Chargaff) (Chargaff, 1950).

En cuanto a la percepción de Franklin como víctima de Watson y Crick, ésta es la impresión que se aprecia en *“La Doble Hélice”*, que contiene las memorias de Watson, escritas con un estilo atractivo, aunque mezclando ficción con realidad de una manera que en algunos párrafos no aparentan describir una experiencia personal compatible con hechos creíbles (Watson, 1978). Paradójicamente, fue a partir de esta obra que, en varios de sus tramos la agravia y desacredita que Rosalind Franklin concitó mayor empatía personal y reconocimiento a su trayectoria científica.

En un trabajo reciente, el británico Mathew Cobb (1957-), Profesor de Zoología de la Universidad de *Manchester* y el historiador estadounidense Nathaniel Comfort (1962-), Profesor de Historia de la Medicina de la *Johns Hopkins University de Baltimore, Maryland*, aportaron información que se contrapone a la idea generalizada de que Franklin fue una víctima de Crick y Watson en el descubrimiento de la estructura molecular del ADN (Cobb & Comfort, 2023).

Uno de los varios propósitos de este trabajo será analizar la consistencia de los argumentos de Cobb y Comfort que, a diferencia de la idea que sostienen muchos científicos, afirman que Franklin no fue “víctima” de Watson y Crick quienes, según estos autores, no identificaron a la joven cristalógrafa como principal competidora. Cabe reconocer de todos modos, que la brillante trayectoria científica de Rosalind Franklin en sus investigaciones sobre el ADN, ha estado decisivamente ligada a sus relaciones personales, algunas caracterizadas por las desventajas de ser mujer y científica a mediados del siglo XX. No obstante, su fuerte personalidad, su espíritu

¹ La Adenina (A) se une a la Timina (T) por dos puentes de hidrógeno; la Guanina (G) se une a la Citosina (C) por tres puentes de hidrógeno.

independiente y su propensión a debatir con sus colegas varones en un plano de igualdad, la erigió en una de las más respetadas científicas en los campos de la química, de la cristalografía y de la biología molecular.

En cuanto a las relaciones conflictivas que afectaron la actividad de Rosalind Franklin en el *King's College* de la Universidad de Londres, en el período enero de 1951-enero de 1952, hubo, como veremos más adelante, otros actores que ocupaban espacios de liderazgo en esta institución.

Sin desmedro de las consideraciones precedentes, la percepción de la mayoría de los científicos, así como de los lectores curiosos, es que la trascendente trayectoria científica de Franklin se circunscribe a sus investigaciones sobre el ADN. Como se podrá apreciar en algunas secciones de este trabajo, la excelencia que exhiben sus investigaciones va mucho más allá del ADN, en virtud de haber alcanzado gran prestigio internacional por sus aportaciones al conocimiento de materiales de carbono, al campo de la virología, especialmente referido al virus del mosaico del tabaco (TMV, por su sigla en inglés) y al virus de la poliomielitis, así como por sus estudios sobre el ARN.

Genealogía Mínima y Entorno Familiar

Rosalind Franklin perteneció a una familia anglo-judía de muy sólida posición económica y de un fuerte sentimiento religioso, del cual ella fue una excepción.

Puede rastrearse en los próximos párrafos, una breve genealogía de los Franklin, así como el entorno familiar de Rosalind.

Ellis Abraham Franklin (1822-1909), bisabuelo de Rosalind fue un banquero mercantil británico de *Liverpool*, quien era hijo de Jaim Abraham Frankin (1784-

Podrá apreciarse, al analizar los nombres de los integrantes de la familia Franklin ligados por parentesco a Rosalind, la frecuencia con que se repiten algunos nombres. Tales son los casos de Ellis y Arthur, los que recorren varias generaciones londinenses. También se ha observado como una decisión relativamente frecuente, el cambio de nombres y apellidos. En algún momento de la historia familiar de los Franklins, Ellis pasó a reemplazar como nombre a Israel, así como Arthur hizo lo propio con Abraham. Así también se observará con los apellidos, especialmente, en esta revisión, el cambio de Fraenkel a Franklin (familia paterna de Rosalind) y el de Levi a Waley (familia materna de Rosalind).

1854), tatarabuelo de Rosalind, un platero y agente naval nacido en Londres, que inició su actividad laboral en *Portsmouth* y la continuó en *Liverpool* y finalmente en *Manchester*. El padre de Jaim Abraham, fue Benjamin (Wolf) Fraenkel (1740-1785) que vivía en Breslavia (Polonia) y emigró a Inglaterra estableciéndose en Londres, aproximadamente en 1763, donde su apellido anglicizado que pasó a ser Franklin. En 1765, Benjamín se casó con una judía inglesa llamada Sarah Joseph (1745-1785).

Ambos murieron prematuramente en la misma época, por una de las epidemias que azolaba Londres (A.E. Franklin, 1915).²

El *Keiser's Bank* era un prestigioso banco comercial londinense fundado en 1868. Arthur Ellis Franklin (1857-1938), hijo de Ellis Abraham y abuelo de Rosalind Franklin fue uno de sus socios principales. Filántropo y liberal, su hijo, Ellis Arthur Franklin (1884-1964), tuvo que optar, siendo muy joven, entre dos alternativas: estudiar ciencias en la Universidad de *Oxford* o ser banquero. Eligió la última y, en poco tiempo logró posicionarse como destacado banquero de *Keyser & Co*. La esposa de Ellis Arthur fue Muriel Frances Waley (1894-1976).

Los Waleys, ancestros de Muriel Frances Waley, fueron registrados en Londres antes que los Franklin (o Fraenkel), habiendo arribado a *Portsmouth* en 1740 como Levi.

De los cinco hijos de Ellis y Muriel (tres varones y dos mujeres), el de Rosalind fue el segundo nacimiento [David Ellis(1919-1986) , Rosalind Elsie (1920-1958), Colin Ellis (1923-2020), Roland Arthur Ellis (1926-2024) y Jennifer Frankin (1929-?)] (Fig. 2).

Muriel y Ellis eran propietarios de una vivienda de dos frentes y cuatro plantas que ocupaban con sus cinco hijos en el sector oeste de *Bayswater*, que se hizo más conocido como área residencial de *Notting Hill* (Maddox, 2002). Con destino en Francia, Ellis Arthur participó activamente en la Primera Guerra Mundial (1914-1918). Una vez finalizada esta guerra fue el momento en que decidió sacrificar sus aspiraciones vocacionales y asegurarse un futuro estable y promisorio de logros, con la oportunidad que se le presentaba en el ya referido *Keiser's Bank*.

Fue en el transcurso de la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) que el padre de Rosalind colaboró con extrema dedicación en la misión de proteger a refugiados judíos.

Se ha afirmado con frecuencia que los padres de Rosalind la presionaron para que se dedicara a actividades de ayuda social y renunciara a la intención de iniciar estudios universitarios. La hermana de Rosalind, Jenifer, ha desmentido taxativamente esta versión. En un libro dedicado a su hermana, destaca que tanto Ellis como Muriel disfrutaban ser padres de hijos inteligentes, independientemente del sexo y aspiraban que lograran acceder a los niveles de escuelas de jerarquía académica como paso previo del ingreso a *colleges* (Glynn, 2012a)³.

Rosalind nació en *Notting Hill* y murió prematuramente en *Chelsea*, dos referencias que bien podrían aludir a una fuerte ligazón con la ciudad de Londres. Sin embargo,

² No hay información precisa sobre cuál fue la epidemia que terminó con las vidas de Benjamín y Sarah en 1785. En esos tiempos hubo varias epidemias en Londres. La peor fue la fiebre tifoidea. La viruela, cólera y tuberculosis eran comunes. Este tipo de problemas se observaba en Londres debido a la elevada densidad poblacional y a la escasa higiene (J .Errecalde, com.pers.).

³ Glynn es el apellido de casada de Jenifer, la hermana menor de Rosalind.

es probable que los momentos más felices de su vida científica, afectiva y social transcurrieran durante su estadía postdoctoral en París.

Educación



Fig. 2. Parte del *Newman College*, *Cambridge*. Foto de usuario de Wikipedia Azeira/Azeira, julio de 2004.

Rosalind fue educada en escuelas particulares en *Norland Place*, Avenida *Holland Park*, en el oeste de Londres. Cuando tenía 9 años fue admitida en el internado de la Escuela *Lindores* para señoritas, que se encontraba en *Sussex*. A los 11 años sus padres decidieron que continuara su educación primaria en la Escuela *St. Paul's School* para niñas, en *Hammersmith*, donde tuvo la oportunidad de estudiar física y química, disciplinas que se enseñaban en muy pocas escuelas londinenses. En esta etapa temprana de su vida ya se insinuaba su interés por la matemática y la física. También era notable su facilidad para aprender idiomas, siendo el francés su lengua predilecta, a la que se le sumaba una marcada aptitud para el aprendizaje del alemán, y el italiano. Descartó la posibilidad de cursar un último año extra en el *St. Paul's School*, opción que se consideraba necesaria para ingresar con una formación más sólida al *College*. De este modo, pudo adelantar su ingreso al *Newnham College* de la Universidad de *Cambridge* (Fig.2) en 1938, graduándose en 1941. En ese período se consolidó su pasión por la química y la física. Era (y es) un *College* para mujeres que fue fundado en 1871 por el filósofo y economista inglés Henry Sidgwick (1838-1900), activo defensor de la educación superior de las mujeres.

Los años que antecederan a la primera graduación universitaria de Rosalind se correspondían con las etapas más cruentas de la Segunda Guerra Mundial. En esos tiempos, una cantidad importante de profesores se vieron forzados a atender cuestiones concernientes a la guerra. Otros emigraron o intentaron emigrar. Fue en esa dramática situación que refugiados de guerra fueron reclutados por la Universidad de *Cambridge*. Rosalind eligió como mentora a Adrienne Weill (1903-1979), destacada física e ingeniera francesa. Weill se instaló en *Cambridge* en su condición de refugiada de guerra. Ambas cultivaron una fructífera amistad.

En 1941 Rosalind obtuvo su *Bachelor Degree in Physic-Chemistry* en la Universidad de *Cambridge*, donde el Departamento de Investigación Científica e Industrial la premió con una beca para desarrollar sus investigaciones pre-doctorales. En 1942 debió optar por una de dos alternativas: colaborar con tareas que demandaba la guerra o iniciar su carrera doctoral. Eligió la segunda.

Ideología, religión en y relación con su padre

“La ciencia y la vida diaria no pueden y no deberían transcurrir por vías separadas. A mi juicio, la ciencia ofrece una explicación parcial de la vida. Hasta ahora y cómo transcurre, se basa en hechos, experiencias y experimentos... Coincido en el hecho de que la fe es esencial en la vida, pero no acepto tu definición de la fe, e.g., la creencia de que hay vida después de la muerte. Desde mi punto de vista, todo lo que impone la fe, es la creencia de que, si hacemos lo mejor que nos permite nuestra capacidad, estaremos cerca del éxito para cumplir con nuestros objetivos (el mejoramiento de la humanidad, en el presente y en el futuro) y, en tal sentido, merece la pena lograrlo”.

(Fragmento de carta de Rosalind Franklin a su padre Ellis Franklin en el verano de 1940. Escrita a la edad de 20 años)

Ellis Arthur Franklin, el padre de Rosalind era considerado un patriota; había combatido en la I Guerra Mundial y antes y durante la II Guerra Mundial había sido un activo protector de refugios judíos, llegando a alojar a algunos de ellos en su propia casa. Siguiendo la fuerte religiosidad de la mayoría de sus ancestros judíos de Europa, así como de las más recientes generaciones anglo-judías, fue un ferviente hombre de fe que quiso inculcar su fuerte adhesión al judaísmo en el sentido religioso a sus descendientes. Fue en su etapa inicial en *Cambridge* cuando su hija Rosalind le hizo saber que no creía en un ser superior, providente, un Dios creador. Una de las preguntas que se hacía Rosalind con referencia a una posible deidad era: ¿Por qué él no es ella? (Glynn, 2012b).

Ambos, padre e hija, tampoco coincidían en sus respectivas posiciones políticas. Mientras que Ellis Arthur era un convencido defensor de las ideas liberales, Rosalind se inclinaba, aunque moderadamente, por las ideas de izquierda.

No quedan dudas de que padre e hija discutían con frecuencia y sin ponerse de acuerdo. Pero lo hacían de modo racional, sin ningún atisbo de violencia verbal y subestimación mutua.

Las diferentes cosmovisiones de Rosalind y Ellis Arthur nunca empañaron su relación de afecto y amor paternal filial. Erróneamente, hubo quienes opinaron que Ellis Arthur se oponía a la aspiración de Rosalind de estudiar en *Cambridge*, aduciendo que su deseo era que su hija mayor se dedicara al cuidado de su futuro hogar, se casara y formara una familia. Por el contrario, su deseo era que a sus dos hijas mujeres, Rosalind y Jenifer, les aguardara un futuro académico exitoso, como lo tuvieron su madre, Caroline Jacob (1863-1935), graduada en el *Bedford College*, en *Bedfordshire*, que fuera referida como una educacionista, miembro del Comité de Educación del condado de *Bucks*, destacándose sus esfuerzos en beneficio de los derechos de las mujeres.

Podría considerarse que, de algún modo, Jenifer siguió los pasos de su hermana mayor Rosalind, aunque en un contexto ajeno al estrictamente científico. De hecho,

Ellis Arthur y Muriel le impusieron completar sus estudios escolares en el *St. Paul's School* para niñas *St. Paul's School* para niñas y de ningún modo se opusieron a que ingresara al *Newnham College* para estudiar historia. Jenifer, más conocida por su apellido de casada Lynn, no sólo se destacó como historiadora; fue una exitosa escritora.

Primeros pasos como investigadora científica

Cuando obtuvo su primer graduación como física-química, la demanda de compromiso de hombres y mujeres para colaborar con los requerimientos que exigía la situación que imperaba en plena II Guerra Mundial, puso a Rosalind Franklin en una difícil disyuntiva. Las convocatorias demandaban colaborar en el Ministerio de Energía o el Ministerio de Abastecimiento, o enrolarse en el Servicio Militar. No era una imposición, pero muchos profesores y estudiantes universitarios abandonaban sus actividades habituales para servir a su país.

Cuando la abrumaron las dudas para tomar una decisión acertada, Rosalind encontró la oportunidad de aceptar un ofrecimiento de trabajo en una institución que, de manera indirecta podía ser de importancia estratégica en la II Guerra Mundial.

A los 22 años, Rosalind Franklin inició su actividad laboral en calidad de Investigadora Asistente en la Asociación Británica de Investigación Para la Utilización del Carbón (*The British Coal Utilization Research Association-BCURA*) (Fig.3), organismo dedicado a la producción, distribución y utilización del carbón y sus derivados. Pese a constituir una entidad de carácter industrial, *BCURA* exhibía un buen nivel académico, rápidamente consolidado desde su creación en 1938. Los jóvenes fundadores de esta asociación eran rigurosamente seleccionados. En su mayoría eran físicos o físico-químicos que habían completado sus estudios en universidades de reconocido prestigio.

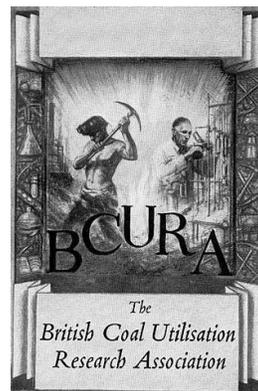


Fig. 3. Logo de *BCURA*

En el período que Rosalind Franklin permaneció en *BCURA* (1942- 1946), sus logros fueron notables, teniendo en cuenta su reciente graduación y su dedicación dirigida a completar su *PhD*. Concluyó seis trabajos, cinco de ellos publicados en importantes revistas científicas (tres como autora individual). El restante fue su trabajo de tesis doctoral que presentó en la Universidad de *Cambridge* en 1945, pero defendida en el año siguiente (Franklin, 1946). El tema de su tesis trataba sobre la física-química de coloides orgánicos sólidos con especial referencia a la estructura del carbón y materiales relacionados. Desarrolló y completó su trabajo con escasa dedicación de su supervisor, el químico británico Ronald George Norrish (1987-1978), Premio Nobel de Química en 1967. Su carácter autoritario desanimó rápidamente a

Franklin y su incorporación a la *BCURA* en 1942 alivió su escasa motivación para vincularse con Norrish.

Los conocimientos de Rosalind Franklin sobre los “agujeros” del carbón ya eran excepcionales, aún antes de consolidar su excelente dominio de la cristalografía. En *BCURA* desarrolló la hipótesis de los “tamices moleculares” que postulaba que los diferentes tipos de carbón exhibían propiedades únicas en sus poros, determinadas mediante rigurosos cálculos matemáticos que relacionaban la porosidad y el contenido de carbono en determinados carbones específicos, complementados con mediciones en condiciones específicas de trituración en diferentes condiciones de temperatura y humedad. Determinó que las propiedades físicas cambiaban mediante el gradual sometimiento a presión

Podría afirmarse que en *BCURA*, concluyó investigaciones pioneras referidas a microestructuras de carbonos que fueron ampliamente reconocidas por sus colegas. Estos trabajos ilustran el inicio exitoso de una prolífica carrera científica que en su etapa postdoctoral se entregó de lleno a la cristalografía.

En este campo de investigación referida al carbón, logró notoriedad internacional con apenas 26 años. El carbón mineral, vegetal y otros materiales carbonosos tenían un valor estratégico importante en el Reino Unido en la II Guerra Mundial, tanto por su uso como combustible como para la confección de máscaras antigás.

En aquella etapa juvenil se preguntaba, con respecto al carbón cuál era la explicación adecuada para entender por qué algunas clases de carbón eran más impermeables que otras para ser penetradas por agua o por gases. Para aproximarse a la resolución de este interrogante diseñó sus experimentos. Decidió trabajar con el carbón con mayor contenido de carbono, la antracita, a partir de muestras de *Kent*, noreste de Inglaterra, Gales del Sur e Irlanda. Usó Helio (He) para poder visualizar cuánto podía pasar a través de las imperceptibles aperturas o poros en varias estructuras celulares y observó los cambios en porosidad hasta temperaturas de 1000° C.

Al aumentar la temperatura lo hacía la porosidad, pero disminuía el tamaño de los poros. Sus observaciones le sugirieron que las sustancias más grandes no llenaban completamente mínimos agujeros del carbón debido a su porosidad fina y a constricciones de los poros. Cuando usaba He se obtenían valores de densidad más precisos, al llenarse los huecos más pequeños. Su conclusión fue que el carbón contenía numerosas constricciones y que la variación en la permeabilidad del carbón estaba relacionada con la variación de la anchura de las constricciones (Valdés-Solís, 2015).

Disminuyendo y aumentando la temperatura estimaba el encogimiento o constricción de carbonos, mediante técnicas que tuvieron repercusión internacional. Los resultados de estos experimentos se incluyeron en su primer trabajo publicado, como segunda de dos autores, siendo el primer autor, el director de la *BCURA* (Bengham & Franklin, 1946) (Maddox, 2002).

En 1945, hubo dos acontecimientos auspiciosos en la vida de Rosalind que coincidieron con la conclusión de su trabajo de tesis doctoral, el fin de la Segunda Guerra Mundial, y el hecho de que su mentora Adrienne Weill dejó de ser refugiada y pudo retornar a París.

Investigación Post-doctoral en París

La experiencia parisina de Franklin fue una bisagra entre un período previo de investigación reconocida por lo meritoria en Londres, con innovadores hallazgos desde la visión microscópica de estructuras de materiales de carbono, y, ya en París, con su incursión definitiva y exitosa en el campo de la cristalografía de rayos-X, cuyo dominio de la técnica y creatividad en la interpretación de sus mediciones en las imágenes obtenidas la erigieron como una de las más destacadas cristalógrafas a nivel mundial. Así lo entendió muy bien el excepcional cristalógrafo John Desmond Bernal, como quedó documentado el 19 de abril de 1958, después de la muerte de Franklin en *TheTimes*:

“She discovered in a series of beautifully executed researches the fundamental distinction between carbons that turned on heating into graphite and those that did not. Further she related this difference to the chemical constitution of the molecules from which carbon was made. She was already a recognized authority in industrial Physico-chemistry when she chose to abandon this work in favour of the more difficult and more exciting fields of biophysics”

(“Ella descubrió en una serie de investigaciones brillantemente ejecutadas la diferencia fundamental entre carbones por exposición a elevadas temperaturas se transforman en grafito y aquellos que no lo hacen. Además, relacionó esta diferencia a la composición química de las moléculas a partir de las cuales se forma el carbón. Ella ya era una reconocida autoridad en Físico-química industrial cuando eligió abandonar este trabajo para abordar los campos más difíciles y estimulantes de la biofísica”).⁴

Antes de recorrer el excitante paso de Franklin por nuevos métodos operativos y analíticos, fundamentales y, en casos, imprescindibles, para indagar en la intimidad de las moléculas, se procurará describir, del modo más simple posible, la compleja técnica de difracción de rayos-X y parte de su desarrollo histórico.

Entre los primeros estudios relevantes en cristalografía de rayos-X ocupan un lugar destacado aquellos que, en la misma época llevaron a cabo dos eminentes físicos, los cuales eran un padre y su hijo. El primero, nativo de Inglaterra fue William Henry Bragg (1862-1942) .); su hijo, William Lawrence Bragg (1890-1971) nació en Australia, pero adoptó la ciudadanía británica.

En 1915, cuando tenía apenas 25 años, William Lawrence Bragg recibió el Premio Nobel de Física junto con su padre, por sus investigaciones en materiales cristalinos

⁴ Traducción no literal del autor.

con rayos-X. En este premio concurren dos acontecimientos únicos: la edad del hijo, que lo erige como el menor registro de edad para este reconocimiento y haberlo compartido con su padre.

Los científicos que adoptaron el enfoque metodológico analítico de William Lawrence Bragg, lo referían como la *Ley de Bragg*. Ella permite estudiar las direcciones en que la difracción rayos-X -sobre la superficie de un cristal permite predecir los ángulos en los cuales los rayos son difractados por este material cristalino con estructura atómica periódica. La ecuación que surge de esta ley relaciona las posiciones y la distancia entre los átomos y, en consecuencia, la estructura de las moléculas que conforman los cristales.

Los rayos-X difractados, luego de impactar en la muestra cristalina, dejan marcas o manchas ("*spots*") en una placa fotográfica. Estos puntos no son los átomos en sí mismos dentro del cristal, sino los puntos que dejan los rayos-X cuando se dispersan al impactar a los átomos. A partir de la posición e intensidad de los puntos se deduce la estructura atómica de la muestra de cristal. Para que la difracción de rayos-X sea lo más eficiente posible, es importante apuntar los rayos desde varios diferentes ángulos y rotar el cristal para poder tomar el mayor número de fotografías desde dichos ángulos.

William Lawrence Bragg, desde 1937 hasta 1953 fue director de los laboratorios *Cavendish* donde, dentro de ese período, brevemente se desempeñaron Crick y Watson (1951-1953) cuando desarrollaran sus modelos sobre la estructura molecular del ADN.

Se retoma en los siguientes párrafos, la apasionante aventura científica parisina de Rosalind Franklin.

Por iniciativa de Weill, Rosalind fue contratada como investigadora postdoctoral en una reconocida institución parisina, el Laboratorio Central de Servicios Químicos del Estado (*Laboratoire Central des Services Chimiques de l'État*). Su estadía en París se extendió desde febrero de 1947 hasta diciembre de 1950. El ingeniero electrónico ruso, naturalizado francés, Jacques Mering (1904-1973), supervisó su trabajo y la preparó con dedicación y responsabilidad para que incursionara en el campo de la cristalografía y en el análisis de la estructura del carbón mineral con el uso de la técnica de difracción de rayos-X. Tanto Mering, como sus otros colegas estaban muy impresionados por las habilidades que mostraba Franklin en el uso de técnicas y la creatividad para elaborar sus hipótesis de trabajo.

En París realizó investigaciones sobre la composición química, la densidad y la estructura de carbones y aspectos relacionados con sus difusas imágenes obtenidas por difracción de rayos-X (Franklin, 1948, 1949 a,b, 1950 a,b,c). En esta institución, Jacques Mering la instruyó para observar, mediante la técnica de difracción de rayos-X, la organización interna de carbón y arcilla. Franklin rápidamente fue capaz de detectar y clasificar la diferencia fundamental entre carbonos, según su capacidad o no de transformarse en grafito.

Mering no tenía dudas de que la investigadora británica era la mejor de todos los científicos que tuvo oportunidad de asesorar; para él era brillante, ansiosa por adquirir nuevos conocimientos y excepcionalmente hábil para el uso de técnicas de investigación y para el diseño de los experimentos. Ambos debatían sobre diferentes temas de la química y la física durante extensos intercambios de ideas

En 1949, Franklin, ya se sentía decididamente más identificada y feliz en Francia, que en Inglaterra. Su proyecto ideal hubiera sido quedarse definitivamente en París. Desafortunadamente, en 1950 expiraba su contrato en el laboratorio parisino. No tenía otra alternativa que comenzar a buscar posibilidades laborales en Inglaterra. Antes de concretar su incorporación al *King's College*, en 1949, presentó sus antecedentes al *Birbeck College* pero su solicitud fue rechazada. Precisamente ese año el *Birbeck College* había convocado a John Desmond Bernal (1901-1971) matemático y naturalista irlandés reconocido como uno de los máximos exponentes mundiales de la cristalografía. Él y su equipo se iban a ocupar de complementar las investigaciones de cristalografía de rayos-X relacionadas con la física y química, con estudios en el campo de la biología molecular. Ese mismo año, Francis Crick también fue rechazado. Como hemos visto y recordaremos en un par de párrafos, transcurrieron cuatro años para que Rosalind Franklin se erigiera en una celebridad en el *Birbeck College*, donde en sus últimos años de vida continuó escribiendo artículos, sobre carbón y grafito, algunos de ellos convertidos en clásicos, hasta su muerte en 1958 (Harris & Suárez Martínez, 2021).

Sus estudios de grafitización alcanzaron su mayor notoriedad en un trabajo que publicó después de su estadía en París (Franklin, 1951b). En 1957 dedicó parte de sus investigaciones a materiales de carbono diferentes del carbón. Sus trabajos cambiaron paradigmas que aún predominaban sobre la microestructura de los carbones y sustancias relacionadas.

Los casi ocho años que Rosalind Franklin dedicó al estudio de materiales de carbono, en Londres y París, permanecieron vívidos en su sabia memoria. Entre 1950 y 1957, cuando su trabajo estaba dirigido a desentrañar la estructura del ADN y de los virus del mosaico del tabaco (*TMV*) y de la polio, como veremos en epígrafes posteriores, publicó 11 trabajos sobre diferentes aspectos de la estructura de carbones y grafitos (Franklin, 1950 a,b,c,d; 1951 a,b,c; 1953 a,b; 1956; Franklin & Bacon, 1951; Watt & Franklin, 1957).

Como lo destacó Annie Sayre, su amiga y biógrafa, los trabajos de Franklin sobre carbones o materiales relacionados merecen ser comentados, tanto por su importancia científica, como por sus potenciales aplicaciones. Según Sayre (1975), el excepcional talento que exhibiera Franklin, especialmente demostrado durante su estadía en París, pueden desagregarse en los siguientes logros entonces alcanzados:

- Rápido reconocimiento de similitudes entre materiales aparentemente no relacionados, al percibir (descubrir) que carbones y algunos químicos

orgánicos, entre los cuales incluyera plásticos frecuentemente exhiben características comunes,

- Capacidad para dividir carbones, plásticos y algunos otros materiales orgánicos sólidos en dos categorías principales: a) aquellos que al calentarse transforman en carbones no grafitizables (substancias ricas en oxígeno y pobres en hidrógeno; estos carbones tienen baja densidad, fina estructura porosa y elevada dureza) y aquellos que con el aumento de la temperatura se convierten en grafito (carbones de cocina, ricos en hidrógeno, con menor dureza, ricos en hidrógeno y con elevada densidad),
- Determinación de las diferencias en la composición química de las moléculas entre carbones grafitizables y no grafitizables.
- En pocos años, el descubrimiento de carbones no grafitizables tuvo importantes derivaciones. Alrededor de 1950, los *Bell Laboratories Telephone* se interesaron en el polímero de carbones sobre los que Franklin había sido pionera en su investigación. El desarrollo industrial de formas sólidas del polímero de carbones fue adoptado al menos por Japón e Inglaterra. Estos productos fueron conocidos por su denominación de carbones vidriosos y vítreos y manufacturados en la forma de crisoles, tubos y otros artículos para aplicaciones especiales.

De los interesantes hallazgos precedentemente citados, resulta particularmente interesante indagar en la mente creativa de Franklin en sus experimentos como cristalógrafa de rayos-X, que le permitió describir el comportamiento de los carbones no grafitizables, así como de aquellos grafitizables. La característica distintiva de los carbones no grafitizables – habría razonado Franklin- se debe a la formación de un fuerte sistema de reticulado entre los cristalitas de carbón, los cuales junto con la fina porosa naturaleza de la estructura previene la reorganización del material para transformarse en grafito. A elevadas temperaturas, los poros del carbono no grafitizable se encogen hasta un tamaño tan pequeño que ni siquiera los átomos de helio son capaces de penetrarlos.

Incorporación al *King's College*



Fig. 4. *King's College*, Universidad de Londres, fecha: 14 de julio de 2012. Autor: Antoine Traveneaux.

En los primeros meses de 1950, consciente de que comenzaba a transcurrir el año final de su estancia parisina, Rosalind comenzó a plantearse qué hacer en su futuro que, inexorablemente, tenía que enfocarse en su Londres natal. Afortunadamente, había ofertas de trabajo y más aún para una joven, pero experimentada cristalógrafa. Durante unos días alternaba su trabajo y vida social en París, con la búsqueda de ofertas de becas de investigación,

la mayoría de ellas consultada en *Nature*. Paralelamente, hizo conocer su inquietud por medio de una carta al famoso matemático y químico teórico inglés Charles Alfred Coulson (1910-1974), profesor de física teórica del *King's College* de la Universidad de Londres. La joven cristalógrafa le solicitó su valiosa opinión para decidir entre la variedad de ofertas. Rápidamente recibió respuesta. En febrero de 1950, Coulson opinaba que la mejor opción posible consistía en postularse para trabajar en una unidad o departamento donde pudiera aplicar su experiencia como cristalógrafa de rayos-X en estudios biológicos. Para cumplir con este objetivo, le sugirió que se postulara para una beca en el *King's College* de la Universidad de Londres (Fig. 4).

Rosalind reconocía que sus conocimientos de biología eran muy rudimentarios, pero también sabía que la mayoría de los especialistas en rayos-X que llevaron a cabo estudios biológicos de muy buen nivel también exhibían, en sus comienzos, limitaciones similares a las de ella.

En marzo viajó a Londres donde Coulson la acompañó al *King's College* y le presentó al director de las unidades de Física y Biofísica, el físico y biofísico inglés Sir John Turton Randall (1905-1984) (Fig.5), quien le dio el aval para que se presentara a en junio de 1950 una beca del *Imperial College London ("ICL"- Fellowship)*. En junio de 1950, se presentó a la beca y fue entrevistada por los *Committees* de la *ICL*, así como por las *Newal Research Fellowships*. A mediados del citado mes se le otorgó una beca de tres años de la *Turner and Newal Research* en el *King's College*, bajo la dirección de Randall. En esa misma época, Rosalind publicaba su primer trabajo en la prestigiosa *Acta Crystallographica*, donde expuso su descubrimiento que destacaba que algunos carbonos no pueden transformarse en grafito, independientemente de la temperatura a la cual se exponen los primeros (Franklin, 1950).



Fig. 5. Sir John Turton Randall con el microscopio electrónico de la Unidad de Biofísica del *King's College*.

Desde 1946, el físico y biofísico neozelandés-británico Maurice Wilkins (Fig.6) se desempeñaba como director adjunto de la Unidad de Biofísica del *King's College* donde parecía consolidarse como líder indiscutido de las investigaciones relativas al ADN mediante técnica de difracción de rayos-X. En 1947 comenzó a realizar investigaciones sobre el ADN de esperma de arenques (*Clupea arenngus*), aunque sus fotografías de la macromolécula eran algo difusas.



Fig. 6. Maurice Wilkins, Director Adjunto de la Unidad de Biofísica del *King's College*, donde inició sus investigaciones sobre la molécula de ADN mediante la técnica de difracción de rayos-X

Como resultado de una circunstancia azarosa el bioquímico suizo Rudolf Signer (1903-1990) pudo extraer de células del timo de cabra una muestra de ADN, cuya calidad era superior a la de otras muestras hasta entonces obtenidas de esta molécula. En las instituciones dedicadas a la biología celular y molecular se la refería como "Signer DNA".

Un mes antes de que Rosalind Franklin se postulara para la beca en el *King's College*, Signer dio una conferencia en la *Faraday Society* de Londres para describir el método que había adoptado para separar completamente el ADN de la proteína del núcleo celular y disponer así de una forma pura con elevado peso molecular.

Al finalizar su exposición, Signer quiso saber si algunos de los asistentes tenían interés en recibir una parte de la muestra de ADN que conservaba desecada y congelada en un tubo de ensayo. Solo dos aceptaron el generoso ofrecimiento; uno de ellos fue Maurice Wilkins.

Como se apreciará más adelante, el ADN de Signer fue decisivo en la difusión masiva de la conformación helicoidal de la molécula de ADN, así como de algunos pormenores de las crónicas que se publicaban acerca de las relaciones personales entre Franklin y Watson.

Pocos después de la conferencia de Signer en la *Faraday Society*, en el verano de 1950, Rosalind Franklin era bienvenida para ocupar una posición en el *King's College* como integrante del equipo de trabajo dirigido por John Randall. Rosalind aceptó, pero recién se incorporó al grupo el 5 de enero de 1951 cuando, fuera de Londres, Maurice Wilkins estaba disfrutando de sus vacaciones en Gales e Italia. Rosalind Franklin no se había hecho cargo aún de la beca pues necesitaba completar las investigaciones inconclusas que había desarrollado durante su estadía en París.

John Randall decidió inicialmente que Rosalind Franklin se ocupara de estudiar soluciones de proteínas, pero rápidamente cambió de opinión en virtud de que en el *King's College* ya se avanzaba con resultados promisorios en las investigaciones que sobre el ADN lideraba Wilkins y Franklin aparentaba ser la candidata ideal para adherirse al equipo de trabajo de este biofísico quien, conceptualmente, coincidía con esta postura y vislumbraba la posibilidad de contar, mediante esta incorporación, con una excelente asistente. Pero Franklin ya era una consagrada cristalógrafa cuyas investigaciones pioneras sobre materiales de carbono ya tenían un amplio reconocimiento. No parecía estar destinada a cumplir el papel de asistente de Wilkins.

Antes de la incorporación de Franklin, en el Departamento de Biofísica, los experimentos se venían realizando con fibras de sal sódica de ADN (NaADN) y se lo hacía en una forma cristalina de la molécula, poco hidratada (75 % de humedad relativa). En esa etapa de la investigación experimental, Wilkins ya había tomado la decisión de dedicarse exclusivamente al uso de técnicas de difracción de rayos-X y

abandonar por completo sus investigaciones microscópicas, para indagar en la intimidad de los genes y el ADN.

Wilkins y Franklin comenzaron su relación laboral en el Departamento de Biofísica del *King's College* a principios de 1951.

Desafortunadamente, Wilkins y Franklin nunca llegaron a tener una relación personal armónica. Wilkins era un hombre tímido al que le costaba involucrarse en una discusión o debate científico. En general, cuando se generaba algún intercambio de opiniones con marcados disensos, se callaba o se retiraba del lugar. Franklin, por el contrario, discutía con insistencia y determinación cuando el tema así lo impusiera. Este comienzo nada auspicioso tuvo, además, algunos tropiezos o malentendidos que nada tenían que ver con esta mutua incompatibilidad y no hicieron más que exacerbar la incómoda coexistencia laboral entre ambos científicos.

En julio de 1951, el biólogo molecular vienés Max Perutz (1914-2002), entonces supervisor de la aún inconclusa tesis doctoral de Francis Crick, organizó en los Laboratorios *Cavendish* de la Universidad de *Cambridge*, una reunión con la participación de científicos que se especializaban en el estudio de proteínas con la técnica de difracción de rayos-X. Como excepción y dado el interés que demandaba el tema, que no concernía a proteínas, se invitó a Wilkins para que presentara los resultados de las investigaciones que había concluido un año antes con el ADN de Signer. Entre los asistentes se encontraba Crick. En su autobiografía, Wilkins incluye un detallado relato de la experiencia que tuvo en esa reunión (Wilkins, 2003). Al iniciar la exposición, Wilkins sugirió que todo ADN tiene la misma y única estructura universal, enrollada regularmente dentro de una hélice. El ángulo de la X sobre el modelo es de aproximadamente 45° , del mismo valor que el ángulo de ascenso sobre la hélice (como la pendiente de una escalera caracol). La nitidez de la imagen que provee el ADN de Signer permite calcular que el diámetro de la hélice es de 20 Angstroms y la distancia ascendida en una vuelta de 27 Angstroms (100 millones de Angstroms = 1 milímetro).

Algo sucedió cuando Wilkins abandonaba el edificio una vez concluida su disertación. Rosalind Franklin lo interceptó y, con gesto severo le hizo saber que ella era quien lideraba las investigaciones sobre el ADN. Ante la muda sorpresa de Wilkins, lo conminó para que dejara de trabajar con rayos-X y retomara sus estudios microscópicos (Maddox, 2002). Fue un golpe muy duro para quien parecía ser el candidato más sólido para desentrañar la intimidad del ADN; era el único del cuarteto (o quinteto) de descubridores que, en 1951, cuando sus colegas comenzaban a investigar el ADN ya había publicado un trabajo sobre este polímero como primer autor (Wilkins *et al.* 1951).

En ausencia de Wilkins, que se encontraba disfrutando de las ya referidas vacaciones en Gales e Italia, Randall reunió en su oficina al físico británico Alexander ("Alec") Stokes (1919-2003) y a Gosling y les presentó a Rosalind Franklin. Allí le hizo saber a Gosling que inmediatamente se pusiera a su disposición para que lo supervisara y

orientara en su trabajo de tesis. Franklin ya había recibido una nota donde se le encomendaba la dirección del trabajo cristalográfico con el valioso material de ADN de Signer, que tiempo antes había recibido Wilkins del propio Rudolf Signer. En los tiempos que siguieron a esta reunión, Wilkins, ante la imposibilidad de trabajar con la mejor muestra de ADN se tuvo que resignar a hacerlo con una muestra de timo de cerdo de muy inferior calidad que le había cedido el químico austríaco de la Universidad de Columbia, Erwin Chargaff . La muestra no cristalizaba, probablemente dado su bajo peso molecular que para pesar de Wilkins no ofrecía la posibilidad de transformar la forma A en la forma B del ADN.

Cuando Wilkins retomó sus actividades en el *King's College* se sintió injustamente desplazado y traicionado. Cabe aclarar que Rosalind Franklin aceptó liderar los estudios cristalográficos del ADN ignorando el desaire que Randall le habría hecho a Wilkins, pues no sabía que estaba reemplazando a Wilkins. Tampoco Wilkins supo hasta después de la muerte de Rosalind Franklin que Randall le había encomendado reemplazarlo.

El fiasco de Watson y Crick

En septiembre de 1951, Franklin observó interesantes patrones de difracción estudiando muestras de ADN expuestas a una humedad relativa de 92% al obtener una forma de ADN que difería de la forma cristalina, a la que denominó forma B. Además, descubrió que ambas formas eran reversiblemente convertibles una en otra cambiando las condiciones de humedad (Franklin & Gosling, 1953b). Estos hallazgos mejoraron sustancialmente la información que entonces existía sobre la estructura del ADN, habida cuenta de que, antes del ingreso de Franklin al *King's College*, Wilkins y Gosling utilizaban mezclas de las formas A y B.

El 21 de noviembre se celebró un coloquio sobre la estructura de los ácidos nucleicos con tres exposiciones. La primera, a cargo de Wilkins, fue casi una réplica de la que había expuesto en la reunión que organizó Perutz en julio, ya comentada en párrafos anteriores. Luego, Alec Stokes expuso su teoría sobre la configuración helicoidal del ADN. Finalmente, Franklin se refirió a su experiencia de transición de la forma A a la forma B del ADN con el aumento de la humedad al valor de 92% dentro de la cámara experimental: en ningún momento mencionó la palabra hélice o helicoidal. Las estructuras helicoidales en moléculas orgánicas fueron descritas por primera vez por Stokes, aunque no publicadas. La primera publicación, referida a estructuras helicoidales en polipéptidos tuvo la autoría de Cochran, Crick y Vand (1952).

Uno de los asistentes que componía el reducido auditorio de unas quince participantes era Watson. Franklin había señalado enfáticamente que los grupos fosfatos se encontraban en la parte externa de la molécula, en tanto que las bases ocupaban una posición central. Watson no advirtió este detalle; se había distraído en varios pasajes de la presentación de Franklin y ni siquiera tomó apuntes. Como él mismo lo admitió en sus memorias, su atención estuvo dirigida a la expositora, a

quien despectivamente sólo él refería como “Rosy”. Como el mismo narró, en un momento de la exposición no tuvo mejor idea que preguntarse qué aspecto tendría sin gafas y con un peinado distinto (Watson, 1978). Esta absurda especulación conspiró contra su principal motivación para asistir a la presentación, que era entender el método de difracción cristalina de los rayos-X. Crick le pidió que le contara los puntos más salientes que había mostrado Franklin. Sólo obtuvo vagas respuestas. Ignorando que no disponían de información suficiente, decidieron concluir en diciembre su modelo sobre la estructura molecular del ADN.

Uno de los logros de Franklin y Gosling, escapa, por su complejidad, a los alcances de esta revisión. Sin embargo, repetiremos brevemente una apreciación de Piro (2014 que trataremos que sea acorde con su explicación: empleando un ingenioso procedimiento que le sugirió a Franklin en París su amigo, el cristalógrafo italiano Vittorio Luzzati (1923-2016), ella y Gosling determinaron la red de Bravais (monoclínico centrado C) y los correspondientes cristales de la celda NaADN. Franklin y Gosling realizaron la laboriosa síntesis de los mapas de Patterson (Franklin y Gosling, 1953c).

En el resumen de su modelo, el dúo de *Cambridge*, admitía que se había sentido estimulado por los resultados que habían presentado los colegas del *King's College* en el coloquio del 21 de noviembre para presentar los principios fundamentales necesarios en que se basaba la estructura del ADN. El modelo era de tres cadenas y la hélice con los fosfatos en la parte interna y las bases nitrogenadas ubicadas externamente. Científicos del *King's College* fueron invitados a *Cambridge* para conocer los detalles del modelo de Watson y Crick, entre ellos, Franklin, Wilkins y Gosling. El modelo mostraba serios errores conceptuales.

Las críticas más directas y severas provinieron de Franklin, quien les preguntó dónde estaba el agua en esta molécula sedienta que, según el modelo capturaba 10 veces menos agua que lo esperable. Para hidratarse adecuadamente, sostenía Franklin, los fosfatos tenían que localizarse en el exterior y, para desmejorar aún más la propuesta estructura, los iones de sodio estaban erróneamente localizados externamente, aislados por el agua. En síntesis, una estructura que nunca podría mantenerse unida (Maddox, 2002).

Las reacciones de Wilkins y Rosalind fueron marcadamente diferentes. A Wilkins el modelo le había parecido decepcionante, pero evitó comentarlo. Gosling irónicamente recordó a la distancia que Rosalind, puso de manifiesto su mejor estilo pedagógico: “están equivocados por las siguientes razones”... que enumeró punto por punto, dando definitivamente por tierra la propuesta. Sólo le faltó patear el modelo (Mukherjee, 2017).

Piro (2014) incluye con claro detalle los argumentos que expresan los errores conceptuales del primer modelo de Watson y Crick, tal como se consigna seguidamente:

1. El ion Mg^{++} no puede jugar el rol de neutralizar la repulsión electrostática entre los fosfatos negativos vecinos pues estaría rodeado de una coraza de moléculas de agua,
2. El ADN está fuertemente hidratado contrariamente al modelo propuesto que contiene 10 veces menos agua que el valor experimental,
3. La gran afinidad del ADN por el agua sugiere que los fosfatos (hidrófilos) estén en el exterior, no en el interior de la molécula.

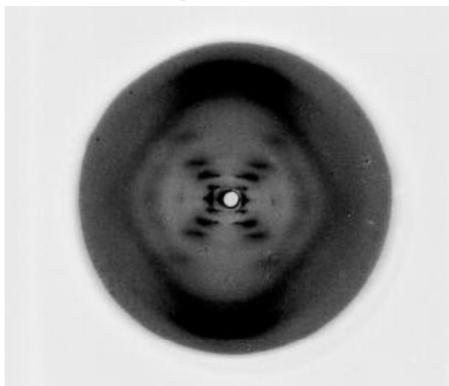
La Fotografía 51

En febrero de 1952, Franklin se encontró en Oxford con la la eminente cristalógrafa Dorothy Crowfoot Hodgkin (1910-1994), cuya tesis doctoral había sido supervisada por John Desmond Bernal, ampliamente conocida por sus sustantivos logros en el desarrollo de la cristalografía de proteínas, por los que se le otorgó el Premio Nobel de Química en 1964. La científica de Oxford le precisó a Franklin que C2 era el grupo espacial de la molécula de ADN.

Tras varias jornadas extenuantes de trabajo compartidas por Franklin y Gosling, en la noche del 2 de mayo de 1952, supervisora y discípulo registraron, por difracción de rayos-X, una imagen de la molécula de ADN que ocho meses después, adquirió una importancia que los talentosos y sacrificados científicos del *King's College* lejos estaban de imaginar.

La imagen fue catalogada como Fotografía 51 y representaba la forma que adoptaba la macromolécula cuando el contenido de humedad de la cámara experimental era muy elevado (92%) (Fig.7). La muestra fotografiada se había hidratado la noche anterior y la imagen que exhibía fue denominada forma B. Aunque era algo difusa, por lo que se la denominó paracristalina, presentaba una conformación que la erigió en la más famosa de las fotografías del ADN. En un principio, Franklin no demostró mucho interés por la forma B; pensó que acaso era una distorsión de la estructura molecular provocada por la excesiva humedad.

Cabe aclarar que la existencia de las formas A y B del ADN en solución ya había sido descubierta anteriormente por Wilkins. Con las ventajas que le aportaba el ADN de Signer, Franklin pudo convertir la forma A en la forma B simplemente elevando la humedad relativa en la cámara específica. Haciendo lo opuesto, es decir, disminuyendo la humedad relativa, la forma B volvía a constituir la forma A.



Por un tiempo, Franklin dejó de lado la Fotografía 51 y se dedicó a estudiar la forma

Fig. 7. Imagen de la molécula de ADN, forma B (92% de humedad), obtenida por Raymond Gosling, con la supervisión de Rosalind Franklin, durante la noche del 2 de mayo de 1952 con la técnica de difracción de rayos-X (Fotografía 51). *King's College Archive*. Dominio Público.

A del ADN, la menos hidratada, que correspondía a la Fotografía 52. Fue un error desde el punto de vista biológico, pues el medio intracelular es definitivamente húmedo o líquido. En un principio, ella consideró que ambas formas eran de naturaleza helicoidal y, en noviembre de 1951 las describió

conjuntamente como provistas de una gran hélice con varias cadenas con los fosfatos ubicados externamente, con enlaces fosfato-fosfato entre las hélices (Franklin, R. *Notes for Colloquium on Molecular Structure, November 1951. Franklin Papers FRKN 3/2, Churchill College Cambridge, UK*). Al no poder resolver la estructura de la forma A decidió, a mediados de 1952, que no era helicoidal. Con respecto a la forma B, finalmente reconoció que era helicoidal, pero consideró a esta última forma como una distorsión de la verdadera forma de la molécula producida por la elevada humedad. Mantuvo esta opinión hasta principios de 1953.

De las numerosas fotografías de la imagen difractada del ADN, Gosling fue quien tomó la imagen de la Fotografía 51.

El hecho de que la célebre fotografía aluda en casi todas las menciones a Franklin no es un capricho de los científicos, ni de los biógrafos e historiadores. Franklin y Gosling conformaban una especie de unidad de acción y pensamiento científico, con la formal supervisión de Franklin. Cada logro o avance era de ambos. El azar concedió a Gosling la oportunidad única de preparar la muestra y obtener la fotografía. Tal como ha quedado documentado en la literatura científica, todos los trabajos relativos al ADN que publicara Franklin tuvieron la coautoría de Gosling (Franklin & Gosling, 1953 a,b,c, 1955). El único trabajo individual de Gosling fue su *PhD* (Gosling, 1954), finalizado, por decisión de Randall, bajo la supervisión de Wilkins. Gosling fue segundo autor, de un trabajo sobre el ADN, realizado bajo la supervisión de Wilkins, antes del inicio del contrato de Franklin en el *King's College* (Wilkins et al., 1951).

En esos tiempos, Wilkins fue taxativo al definir al ADN como una parte sensible de la vida y en absoluto como un componente inerte. Fue el primero en demostrar que, las fibras del ADN se ensanchaban cuando se exponían a condiciones de elevada humedad.

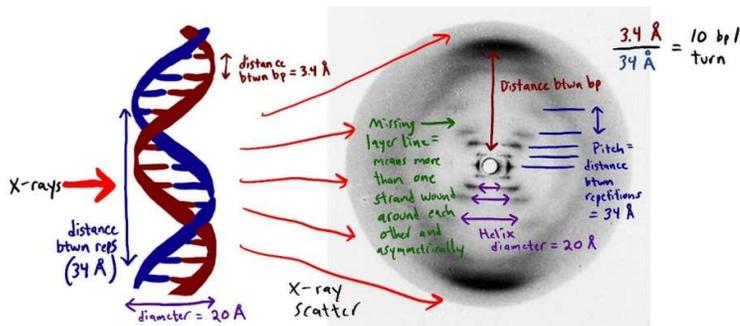


Fig. 8. Explicación en caricature de cómo la Foto 51 capturó la estructura de doble hélice del ADN. Fecha: 27 de abril de 2023. Fuente: comunicación personal de EmilyWilloughby. Dominio Público. Universal. EmilyWilloughby (1986-) es una destacada pintora estadounidense. La caricatura conjuga ciencia con arte y procura destacar la importancia de la imagen obtenida por Gosling en mayo de 1952 mediante la técnica de difracción de

En lo que concierne al contexto de las relaciones personales que se describen en los epígrafes precedentes sólo se destacan los conflictos que se

suscitaron entre Franklin y Wilkins y, puntualmente, la intervención de Randall para que la brillante química y cristalógrafa tuviera que emigrar al *Birbeck College*.

Pero la mayor parte de las biografías de Rosalind Franklin (e.g. Sayre, 1975, Maddox, 2202), así como la impresión de un importante número de biólogos, no necesariamente moleculares, han dirigido su repudio hacia los más famosos descubridores de la estructura molecular del ADN, Watson y Crick, a quienes se les achaca haber robado información inédita sobre el ADN, obtenida por Franklin, Gosling y Wilkins en el *King's College*.

Dos acontecimientos muy cercanos en el tiempo han estimulado a historiadores, biógrafos, biólogos moleculares y aún novelistas a afirmar que la célebre dupla de *Cambridge*, sin haber hecho un solo experimento, se apropió de información obtenida con la técnica de difracción de rayos-X por Franklin y Gosling y, en menor medida, Wilkins. Un repaso de estos acontecimientos puede brindar al lector una primera impresión para juzgar el accionar de Watson y Crick.

En enero de 1953, la Fotografía 51, que ya había sido entregada a Wilkins, fue exhibida por este último a James Watson, a quien le bastó observarla brevemente para afirmar que la imagen mostraba nítidamente que la molécula de ADN era de conformación helicoidal. Irónicamente expresaba que si él siendo un novato como cristalógrafo, había entendido de un vistazo que la molécula de ADN era doblemente helicoidal, Franklin, prestigiosa cristalógrafa no había entendido lo que ella misma había logrado (Watson, 1978). Cobb & Comfort (2003) consideran que con este comentario Watson actuó con cierta malicia, habida cuenta, de que tanto Watson como sus colegas sabían que la icónica Fotografía 51 con su "X" en el centro no era, necesariamente, una pretendida demostración de sus autores, de que la imagen exponía un rasgo exclusivo de la molécula de ADN como, por ejemplo, insinuaría la "caricatura" de la artista estadounidense Emily Willoughby (1986-) (Fig. 8) Según Cobb y Comfort, esta configuración bien podría manifestarse en otras moléculas. Sin embargo, en varias notas y textos se considera que la Fotografía 51 fue clave para descubrir la estructura del ADN (e.g. *Nature*, 2013, Dotto, 2014).

La importancia de la Fotografía 51 no fue soslayada por Franklin y Gosling (1953) en su trabajo en el que describen la estructura del ADN. Si bien, la imagen no

resolvía totalmente la estructura de la molécula, ellos consideran que el diagrama de rayos-X de la forma B del ADN muestra de un modo notable sus características helicoidales, inicialmente demostradas en laboratorio por Alec Stokes (información no publicada) y por Cochran, Crick y Vans (1952) para polipéptidos.

En tiempos recientes de esta larga historia, Watson recordaba que cuando observó la fotografía 51 que le mostrara Wilkins, él ignoraba que existiera una forma B del ADN y que el patrón de rayos-X de la forma B era una nítida cruz y, puesto que, según Crick, este patrón de reflexiones estaría producido por una hélice, la imagen dejaba en claro que el ADN tenía que ser helicoidal. La propia geometría indicaba, además, que una hélice era la disposición más lógica para una fila de unidades periódicas: los nucleótidos, pero no se podía aún determinar el aspecto de la hélice, ni el número de cadenas (Watson, 2018). Décadas atrás, el mismo Watson expresaba, con su estilo narrativo algo efectista, cómo reaccionó al ver la Fotografía 51: “Me quedé boquiabierto y mi corazón comenzó a acelerarse” (Watson, 1978).

Franklin y Gosling (1953) consideraban que, si bien ellos no ofrecían una interpretación completa y definitiva del diagrama, podían al menos sugerir, a partir de la imagen, que la estructura, además de ser probablemente helicoidal, demostraba que los grupos fosfato estaban localizados externamente y que el diámetro de la hélice era, como ya lo había anticipado Wilkins, de 20 Angstroms.

La indiscreción de Max Perutz

El modelo final de Watson y Crick, así como la interpretación definitiva de Franklin, Gosling y Wilkins, les permitieron develar la estructura del ADN una vez que pudieron acomodar las piezas de cada nucleótido con la identificación y ubicación de sus componentes: azúcar, fosfatos y bases nitrogenadas y la complementariedad de estas últimas, entre otros hallazgos. Sin embargo, la Fotografía 51 sigue siendo para muchos el emblema inspirador de la estructura molecular del ADN.

Repasemos un hecho que pudo haber sido más significativo que la rápida y subrepticia observación que hizo Watson de la Fotografía 51 que le mostrara Wilkins.

En diciembre de 1952, Max Perutz realizaba una visita al *Medical Research Council* donde tuvo acceso a un informe preliminar que incluía datos relevantes de las actividades de Franklin y Wilkins relativas al ADN. Compartió la lectura del informe con Francis Crick.

El informe del *Medical Research Council* que, sin la debida autorización de sus autores, pudo ser consultado por Crick, confirmaba que la longitud de una hélice de ADN era de 34 Angstroms por lo que, si englobara 10 nucleótidos o bases nitrogenadas, la distancia entre un par de dichas bases de 3,4 Angstroms. Además, reportó que la célula unitaria (las unidades repetidas del cristal) era de gran tamaño, incluyendo mayor número de átomos que cualquier otra estructura molecular.

Según Cobb & Comfort (2023), Rosalind Franklin no fue una víctima en el descubrimiento de la estructura del ADN. En 2022, ambos autores consultaron archivos el *Churchill College* en *Cambridge*. Allí identificaron una carta “dejada al descuido” y un artículo inédito de 1953 que demostrarían que Franklin, Watson y Crick se ponían mutuamente al tanto respecto de los avances en sus investigaciones sobre el ADN. En su defensa del honor de Watson y Crick mencionan una conferencia de Crick sobre la historia de la doble hélice, expuesta en la Universidad de *Oxford* en mayo de 1961, donde el codescubridor de la estructura molecular del ADN afirmaba que en contraste con el grado de información que brindaba la Fotografía 51, el informe del *Medical Research Council* fue mucho más valioso pues confirmaba la estructura que él y Watson ya habían obtenido. En todo caso, afirmaba que, ni la Fotografía 51, ni el informe leído (ambos observados o leídos sin conocimiento de sus autores) condujeron a Watson y Crick hacia la doble hélice.

La resolución de la estructura molecular del ADN implicó, de acuerdo con la interpretación de Cobb y Comfort, seis semanas de cálculos químicos de prueba y error, con los modelos de Watson y Crick de cartulina. Según ellos, los datos de Franklin y las asiduas y afables reuniones de Watson y Crick con Wilkins proveyeron las piezas clave de información sobre la macromolécula de ADN (las repeticiones cada 34 Angstroms, la probable existencia de 10 bases por repetición, y un número equivalente de hebras corriendo en direcciones opuestas (la denominada simetría C2). Esta información sería compartida por el cuarteto Watson, Crick, Franklin, Wilkins. De coincidirse con estos autores, la lectura del informe del *King's College* que Perutz entregó a Crick, le habría permitido a a la dupla *de Cambridge* chequear sus propias conclusiones.

El aporte de Franklin fue fundamental en la dilucidación de detalles de la estructura del ADN que superan los alcances de este trabajo. Sólo se mencionarán algunos de ellos que sólo podrían interpretar cabalmente químicos experimentados: la Simetría C2 de cada unidad celular, que es uno de los 230 tipos de grupos espaciales cristalográficos 3D, cómo el ADN puede especificar proteínas y la no afectación del orden de las bases de una hebra en la estructura molecular (cualquier secuencia es posible).

Algunos detalles que se consignan en el informe de Franklin que Perutz hizo conocer a Crick, parecen aportar datos, que se adicionan a los ya referidos, que pudieron orientar a Crick y Watson durante las últimas fases de su modelo de estructura molecular del ADN. Con claridad y de modo detallado, Piro (2014), enumera una serie de precisiones de Franklin, que pudieron ser claves para que la dupla *de Cambridge* pudiera modelar la forma B del ADN, parte de los cuales se incluyen seguidamente:

- a) El ángulo de la X del diagrama de difracción con el ecuador es igual a ángulo que forma la hélice con la misma,
- b) El polímero ADN se encuentra organizado formando hélices,

- c) Los fosfatos se encuentran en el exterior de la hélice, a unos 10 angstroms de su eje,
- d) Las bases se disponen hacia el interior de la hélice, son paralelas y uniformemente separadas entre sí, como una pila de platos, a 3,4 angstroms de distancia,
- e) El paso de hélice es de unos 34 angstroms y, en consecuencia, comprende unos 10 nucleótidos por vuelta,
- f) El grupo espacial C2 determinado por Franklin sugirió claramente a Crick una característica estructural fundamental para el ADN: debe tratarse de dos hélices enrolladas alrededor de un eje común con sus marcos de fosfato-ribosa polimerizados, aproximadamente por un eje doble perpendicular al eje de la molécula. Consecuentemente, el par de hélices tienen esqueletos moleculares corriendo en direcciones opuestas, una en dirección 3'→5 de los carbonos de azúcar, la otra en la orientación 5→3.

Según Franklin, una infinita variedad de secuencias de nucleótidos podía ser posible para explicar la especificidad biológica del ADN (Maddox, 2002).

La carta hallada por Cobb y Comfort en el *Churchill College* en *Cambridge* fue escrita en enero de 1953 y dirigida a Francis Crick por la entonces joven investigadora británica del *King's College*, Pauline Cowan (1926-2024). Era la invitación a una presentación que iban a ofrecer Franklin y Gosling que le informaba a Crick que estaba destinada básicamente a una audiencia “no cristalográfica”, cuyo contenido era muy bien conocido por Max Perutz por lo que probablemente no se justificaría su esfuerzo por asistir. La carta aparentaba dar por sentado que Perutz compartiría con Crick toda información sobre la exposición de Franklin y Gosling, como parte del usual intercambio científico informal⁵.

Crick y Watson (1954), parecen contradecir parte de su propia narrativa, así como la interpretación de Cobb y Comfort al haber reconocido, al menos en una ocasión, que sin los datos de Franklin su formulación de la estructura del ADN hubiera sido poco probable o imposible. Se referían al informe que les había mostrado Max Perutz, que sugería la naturaleza helicoidal de la molécula de dos cadenas entrelazadas, con el grupo fosfato localizado externamente y que cada cadena se repetía a sí mismo cada 34 Angstroms. Este reconocimiento podría sugerir que el informe leído por Crick, a instancias de Perutz, no era una confirmación de los resultados ya obtenidos en los Laboratorios *Cavendish*, sino, por el contrario, el aporte de información aún no registrada en los modelos de la estructura del ADN de Watson y Crick.

Habían corrido unos 20 días desde la publicación de los tres trabajos de *Nature* de abril de 1953 que describían la estructura molecular del ADN cuando Lawrence Bragg, el director de los Laboratorios *Cavendish* freció una conferencia sobre el

⁵ Cowan, P. Letter to Crick, January 1953. Crick Papers Box 2, Folder 11, University of California, San Diego.

extraordinario descubrimiento en el *Guy's Hospital Medical School* de Londres, que fue publicado en la primera página del periódico británico *News Chronicle*. La lectura del artículo despertó notable interés en una periodista londinense de *Time*, Joan Bruce, quien escribió una nota, que nunca fue publicada, aunque definía con detalle el vínculo existente entre los descubridores de la estructura molecular del ADN y las instituciones involucradas. Según la periodista, la investigación sobre el ADN había sido realizada por dos equipos. Uno de ellos conformado por Wilkins y Franklin, que lograron resultados basados en experimentos con rayos-X; el otro, por Watson y Crick, cuyas conclusiones fueron obtenidas por medio de un enfoque teórico. Según Bruce, los equipos trabajaban independientemente, pero estaban conectados, confirmando sus respectivos avances a través de intercambios sucesivos de información. En ese sentido, Watson y Crick comenzaron a trabajar en la teoría de la doble hélice a partir de los experimentos de Wilkins sobre rayos-X. Por su parte, Franklin confrontaba los modelos de Watson y Crick con sus observaciones logradas con la técnica de difracción de rayos-X.

Cualquiera haya sido el accionar de Watson y Crick, la mención en el párrafo precedente, del artículo inédito de *Time* parece ser un argumento débil para demostrar la cooperación e integración que eventualmente existía entre los actores científicos principales del estudio de ácidos nucleicos del *King's* y de los Laboratorios *Cavendish*. Un detalle, que parece pequeño, pondría en duda que la integración de los científicos de ambas instituciones fuera total. La mención de Randall, Crick, Stokes y Wilkins (en ese orden) en los agradecimientos de la parte final del trabajo más crucial de Franklin y Gosling (1953) destaca la ausencia del apellido Watson. Es probable que no haya ninguna interacción científica que amerite destacarse entre Watson y Franklin. En varios tramos de sus memorias, Watson se refiere a Franklin de un modo despectivo (Watson, 1978), probablemente estimulado por su misoginia.

El modelo final de Watson y Crick

Vale reconocer que Franklin no interpretó la complementariedad de los pares de bases nitrogenadas que, como es sabido, sólo es posible la unión de Adenina con Timina (A-T) y de Guanina con Citosina (G-C). Tampoco entendió que sus datos indicaban que las dos hélices estaban orientadas en diferentes direcciones, ni que la forma B del ADN era la única biológicamente funcional, desconociendo que la forma A era sólo posible en condiciones de laboratorio.

La correspondencia de las bases nitrogenadas, así como los enlaces de puentes de hidrógeno entre ellas fueron interpretados por Watson y Crick muy tardíamente, días antes de concluir su trabajo. El 26 de febrero, el físico químico estadounidense Jerry Donohue (1920-1985), que trabajaba en el Instituto de Tecnología de California (*Caltech*) y se encontraba circunstancialmente en los Laboratorios *Cavendish* gozando de una beca *Guggenheim*, le advirtió a Watson que los enlaces de hidrógeno entre las bases nitrogenadas eran del tipo *enol*, no *keto*, como creían Watson y Crick. Además, hasta la mencionada fecha, Watson creía que el apareamiento se producía entre bases similares (A-A, G-G, T-T y C-C). Luego de varios ensayos comprobó que hay un único modo de apareamiento de bases ((A-T, T-A, G-C y C-G). La ley de complementariedad de las bases ya había sido formulada por el químico austríaco Erwin Chargaff, como Watson recordó en esos decisivos días.

Watson y Crick pudieron resolver su modelo del ADN cuando en los tramos finales de su investigación aplicaron adecuadamente las reglas de Chargaff cuyo repaso puede ser útil para comprender rasgos fundamentales de la estructura de la molécula de ADN, así como su esencial importancia en su replicación.

En principio, sólo es posible la unión de un tipo de base de mayor tamaño (purina) con otra de menor tamaño (pirimidina) para que la doble hélice mantenga un diámetro uniforme (Piro, 2014)

Según Chargaff, el número de nucleótidos que contiene la base nitrogenada A (Adenina) es igual al de nucleótidos que contiene la base T (Timina); del mismo modo, el número de nucleótidos conteniendo la base G (Guanina) es igual al que contiene la base C (Citosina). Las bases nitrogenadas del ADN siempre se presentan

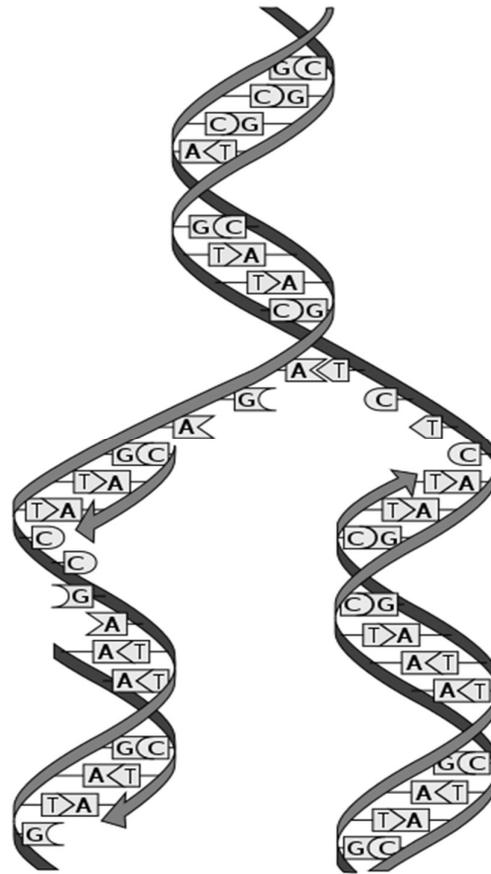


Fig. 9. Replicación del ADN. Las bases complementarias se separan por ruptura de los puentes de hidrógeno que las unen. Cada cadena resultante tiene una sola base nitrogenada, que se une a una base complementaria para formar una nueva doble cadena.

con sus proporciones bien definibles, existiendo, además, complementariedad entre bases púricas y pirimídicas, de modo que por puentes de hidrógeno necesariamente la Adenina (A) se une a la Timina (T) y la Guanina (G) a la Citosina (C).

La cantidad de Adenina es igual a la de Timina ($A = T$) y la de Guanina es igual a la de Citosina ($G = C$), de modo que $A/T = G/C = 1$.

Por otro lado, la proporción de bases púricas (A y G) es igual a la de bases pirimídicas (T y C), de modo que $(A + G) = (T + C)$, siendo, en consecuencia, $(A + G) / (T + C) = 1$

Sin embargo, $(A + T)$ no es igual a $(G + C)$ y, en la mayoría de los casos $(A + T)$ es mayor que $(G + C)$.

Las diferencias $(A + T) / (G + C)$ son características de cada organismo o especie.

Datos inéditos de Chargaff recopilados del año 1952 (Basal, 2003), son presentados en la Tabla 1. Los mismos pueden dar una noción más aproximada de las implicancias de la Ley de Chargaff:

Especie	% A	% G	% C	% T	A/T	G/C	%G + C	% A+T
Ratón	26,8	22,8	23,2	27,2	0,99	0,98	46,1	53,9
Pulpo	33,2	17,6	17,6	31,6	1,05	1,00	35,2	64,8
Gallina	28,0	22,0	21,6	28,4	0,99	1,02	43,7	56,3
Rata	28,6	21,4	20,5	28,4	1,01	1,00	42,9	57,1
Humano	29,3	20,7	20,0	30,0	0,98	1,04	40,7	59,3

Tabla 1 . Representación porcentual y relaciones en frecuencia y porcentajes de las bases nitrogenadas de la molécula de ADN.

Esta especificidad en el apareamiento de las bases permite entender el mecanismo de replicación de la molécula de ADN (Fig. 9).

En justo reconocer que el manuscrito final de Wtson y Crick del 25 de abril de 1953 es el que expone con mayor claridad la función biológica del ADN como responsable de la transmisión hereditaria, con un epílogo que expresa: “ *It has not escaped our notice that the specific pairing we have postulated immediately suggests a possible copying mechanism for the genetic material*” (“*No ha escapado a nuestra consideración que el apareamiento específico postulado sugiere inmediatamente un posible mecanismo de copiado de la información genética*”) (Watson & Crick, 1953).

El modelo de la estructura molecular del ADN fue concluido el por W atson y Crick, el 28 de febrero de 1953.

Por todo lo expuesto, vale insistir que, Crick y Watson admitieron que sin los aportes de Franklin su modelo muy probablemente, o seguramente, no hubiera arribado a buen puerto, así como al hecho de que Crick le restó relevancia a la Fotografía 51, pero admitió que, por el contrario, el informe inédito de Franklin y Wilkins que

compartió con Perutz fue fundamental para que él y su socio científico Watson pudieran confirmar que su modelo era correcto.

Si se tomase en cuenta que el contenido del informe del *King's College*, que Crick leyó sin conocimiento de sus autores, le permitió a la dupla de *Cambridge* concluir que sus resultados podían difundirse sin el riesgo de contener algún error, cabe el siguiente interrogante: ¿Qué hubieran decidido hacer Watson y Crick en caso de que el informe del *King's* hubiera mostrado datos diferentes a los que supuestamente esperaban?

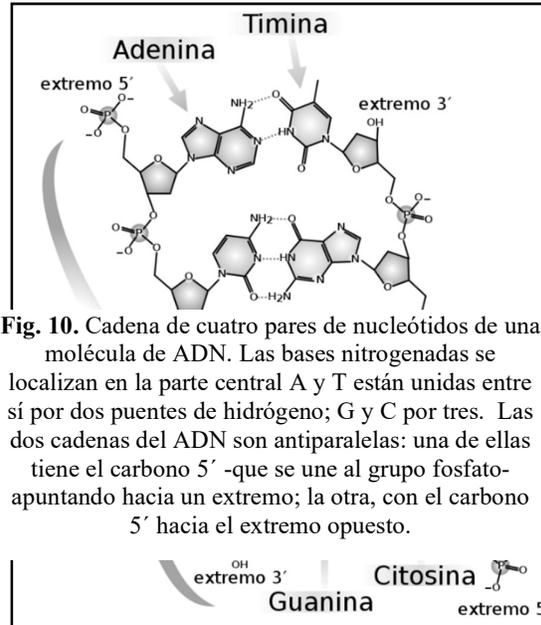
Cabe reconocer, que la defensa que Comfort y Cobb ejercen sobre el honor y la buena fe de Watson y Crick muestra también un reconocimiento a Franklin a quien califican a la misma altura que los mencionados co-descubridores, así como de Wilkins.

Aún con las dudas que puedan persistir respecto a la posible apropiación de información por parte de Watson y Crick, todo parece indicar que los cuatro autores co-descubridores de la estructura molecular de ADN fueron imprescindibles para este monumental logro que documenta la historia de la biología.

Aunque parezca excesivo, es necesario insistir que la Fotografía 51, esencial para reconocer la configuración helicoidal y otros rasgos de la molécula del ADN, requirió de la determinación de otras propiedades inherentes a su composición y localización espacial de cada componente y de mediciones de distancias interatómicas. Además, había que reconocer el sentido del movimiento de cada una de sus cadenas, así como la complementariedad de las bases nitrogenadas, cuya ubicación, así como la de los grupos fosfato, fue una característica fundamental para su funcionamiento y estabilidad. En síntesis, la dilucidación de la estructura del ADN, representada de modo esquemático y simplificado en la Figura 10, pudo lograrse mediante la complementación de experimentos con la técnica de rayos-X en el *King's College* y modelos teóricos complejos en los Laboratorios *Cavendish*.

Rosalind Franklin nunca dijo sentirse perjudicada al revisar el modelo final de Watson y Crick. Raymond Gosling hizo referencia a una expresión de Franklin sobre los protagonistas principales del descubrimiento de la estructura del ADN: “*We all stands on each other's shoulders*” (*Nature*, 2013). Más contundente aún fue la excelente relación de amistad que tuvieron Franklin y Crick, poco tiempo después del descubrimiento de la estructura del ADN.

Hay un aspecto que es menester aclarar. A pesar de la falta de empatía entre Watson y Franklin, la física-química nunca fue considerada por Watson y Crick como su



principal competidora. El competidor más temido fue el célebre químico estadounidense Linus Pauling (1901-1994) quien también procuraba desentrañar la estructura molecular del ADN. Linus Pauling no tuvo la suerte de observar la Fotografía 51 ni otras excelentes imágenes de la molécula de ADN obtenidas por Franklin y Gosling. Desafortunadamente para él, y su socio científico, el bioquímico estadounidense Robert B. Corey (1897-1971), los diagramas que observaron del físico y biólogo molecular inglés William Astbury (1898-1961) (Astbury, 1947), si bien novedosos, eran difusos y difíciles de interpretar. Además, el modelo que construyeron contenía errores conceptuales notables.

Si bien Wilkins no parecía calificar a Pauling como su principal competidor, debe haber sentido algún resquemor cuando el renombrado químico le solicitó que le prestara por un tiempo algunas de sus fotografías del ADN obtenidas por difracción de rayos-X. Wilkins no accedió a su requerimiento valiéndose del argumento de que aún las necesitaba tener en su poder para mejorarlas, por lo que debía continuar revisándolas.

La suerte de Pauling pudo haber cambiado si la persecución política que sufriera en la década de 1950 no le hubiera jugado una mala pasada. En mayo de 1952 la *Royal Society* organizó una conferencia internacional en Londres sobre la estructura de las proteínas. Pauling era el invitado de honor y de mayor prestigio y su presencia había concitado muchísimo interés. Desafortunadamente, no pudo asistir el evento. El Departamento de Estado de Estados Unidos le rechazó su solicitud de un pasaporte. La negativa se debió a la fuerte influencia del *macartismo* que diseminó la sospecha de que Pauling tenía ideas políticas de izquierda, por lo que no pudo volar desde Estados Unidos a Inglaterra. Se especula que de haber viajado a Londres hubiera podido reunirse con Rosalind Franklin y quizás observar sus excelentes fotografías del ADN y utilizarlas para los modelos moleculares que estaba realizando en *Pasadena*, logrando así la elaboración del modelo adecuado antes de que lo hicieran Watson, Crick, Wilkins y Franklin.

Pese a su fracasado modelo (Pauling & Corey, 1953), muy similar al fiasco del primer modelo de Watson y Crick, su enorme capacidad de trabajo y espíritu competitivo infundía temor, no sólo en la mencionada dupla, sino también en el *King's College*, cuyo director de la unidad de biofísica Randall ejerció su influencia para la rápida publicación en *Nature* de los trabajos de Watson y Crick y de Wilkinsen abril de 1953. Había que hacer todos los esfuerzos para que el trabajo consagratorio no apareciera antes en los Estados Unidos. Es elocuente del aludido temor al eminente químico del Instituto de Tecnología de *Pasadena (California) (Caltech)*, esta breve frase escrita por Watson en *La Doble Hélice "Pocos días después de mi llegada⁶ comprendimos⁷ lo que debíamos hacer: imitar a Linus Pauling y derrotarle en su propio terreno"* (Watson, 1978). No es extraño entonces que cuando Watson le contó a Crick el contenido del manuscrito de Pauling, a la espera de su publicación en *Proceedings*

⁶ Hace referencia a la llegada de James Watson a los Laboratorios *Cavendish* de la Universidad de *Cambridge*, donde iniciara su relación de trabajo con Francis Crick.

⁷ Se refiere a él y a su socio científico Francis Crick.

of the National Academy of Sciences, ambos se dirigieron al *Eagle*, su *pub* favorito, a celebrar el fracaso del químico de California, con unos tragos de whisky (Mukherjee, 2017).

El 23 de enero de 1953, Watson viajó a Londres para visitar a Wilkins y Franklin y compartir con ellos la derrota del más temido competidor: Linus Pauling. Su intención era reunirse primero con Wilkins, pero no lo encontró de inmediato. Entonces, decidió ingresar sin permiso previo alguno al laboratorio de Franklin, donde la encontró muy ocupada haciendo mediciones de una de sus imágenes de ADN obtenidas por difracción de rayos-X. Ella se sintió molesta por la sorpresiva irrupción de Watson. No obstante, aun percibiendo el escaso interés de Franklin por atenderlo, la quiso poner al tanto del fallido trabajo de Pauling y Corey. Por un rato estuvieron discutiendo acerca de la probable naturaleza helicoidal de la molécula de ADN, que Franklin aún no la percibía y Watson consideraba como lo más esperable para un polímero. En un momento, la discusión se tornó algo áspera, en especial porque Franklin elevaba el tono de su voz y se aproximaba amenazante hacia Watson, quien retrocedió y, para su suerte, encontró a Wilkins que recién llegaba a su laboratorio, ambos se reunieron y compartieron un té. En ese encuentro, Wilkins le mostró la Fotografía 51, que lícitamente estaba en su poder desde que Franklin ya dejaría de pertenecer al staff del *King's College* y a su rol de supervisora de Gosling, que volvía a ponerse a disposición de Wilkins.

En su búsqueda incesante de información, Watson logró que Wilkins le explicara algunos detalles de la fotografía, entre ellos, por ejemplo, que una repetición completa de la hélice demandaba unos 34 angstroms. Tratando de ser lo más memorioso posible ya en el tren, de regreso a Cambridge, se ocupó de dibujar el patrón de difracción en un margen del periódico *The Times*. Ya tenía algo concreto para que la lúcida mente de Crick infiriera de que se trataba de una hélice y la información proporcionada por Wilkins sobre las dimensiones críticas podían utilizarse para la construcción de un modelo helicoidal de la forma B del ADN (Piro, 2014).

A la mañana siguiente de su regreso a *Cambridge*, se dirigió a los Laboratorios Cavendish y fue a ver a su director, *Sir Lawrence Bragg* para mostrarle, con indisimulado entusiasmo, los avances que había logrado a partir de la observación e interpretación de la Fotografía 51. Vale consignar, que Bragg les había ordenado tanto a él como a Crick, una vez conocido su primer modelo erróneo de la estructura del ADN, que abandonaran su proyecto de desentrañar su estructura y se dedicaran a los temas por los que habían sido reclutados en los esos laboratorios: Watson, al estudio de la mioglobina y Crick a concluir su tesis. Pero la excitación de Watson lo persuadió de la conveniencia de levantar esa medida, pues todo parecía encaminarse para que los Laboratorios *Cavendish* adquirieran un enorme prestigio ante la aparentemente inminente dilucidación de la estructura molecular del ADN por parte de dos de sus científicos.

En virtud de lo acontecido después del encuentro entre Watson y Bragg, en el caso de que la Fotografía 51 no hubiese sido mostrada al primero de ellos por parte de

Wilkins, la orden del director de los Laboratorios *Cavendish*, que imponía a Watson y Crick discontinuar con la construcción de maquetas de la molécula de ADN podría haberse mantenido.

En cuanto a la Fotografía 51 parecía evidente que Franklin tenía razón: las cadenas que conformaban el esqueleto de la estructura tenían que localizarse en el exterior y no en el núcleo de la molécula. Pero se equivocaba al no aceptar que no era una hélice (Isaacson, 2021).

Raymond Gosling, el héroe olvidado

Desde 1944 hasta 1947, Raymond Gosling (Fig.11) estudió y se graduó como físico en la *University College* de Londres y trabajó como médico en el período 1947-1948 en el Hospital *King's Funds and Middlesex*. A partir de 1949 se incorporó al *King's College* donde Randall le asignó la función de trabajar, junto con Wilkins sobre la estructura de la molécula del ADN mediante la técnica de difracción de rayos-X. Allí inició su doctorado (*PHD*) bajo la supervisión de Wilkins haciéndolo, desde 1951, con la supervisión de Rosalind Franklin. Cuando, en 1953 Franklin tuvo que abandonar su lugar de trabajo en el *King's College*. Randall impuso a Franklin, no solo que dejara de pensar en el ADN sino que también dejara de supervisar el trabajo



Fig.11. Raymond Gosling a sus 80 años

de Gosling quien, ante esta circunstancia se vió forzado a ser nuevamente dirigido por Wilkins, obteniendo su *PHD* en 1954. Su vínculo con Franklin continuó en 1953, a pesar de las advertencias de Randall. Precisamente ese año publicaron juntos un trabajo sobre el ADN (Franklin & Gosling, 1953 b).

Los reveladores experimentos desarrollados por Franklin, Gosling y Wilkins, mediante la aplicación de la dura y extenuante práctica que demandaba la técnica de difracción de rayos-X, proporcionaron valiosa información sobre la estructura molecular del ADN. Fundamental para que Watson y Crick completaran su modelo molecular o, al menos, confirmaran que sus resultados y conclusiones eran correctos.

En los primeros experimentos que conjuntamente desarrollaron Wilkins y Gosling, ellos analizaban muestras de ADN que hidrataban y extraían finos filamentos que fotografiaban en una atmósfera de hidrógeno.

Gosling obtuvo una imagen de ADN cristalizado obtenida mediante la técnica de difracción de rayos-X. Sin embargo, no fue el primero en cristalizar genes como se creyó en esa época. Mucho antes lo había hecho la cristalógrafa, bioquímica y biofísica británica Florence Bell (1913-2000).

Wilkins y Gosling conformaban una dupla exitosa; en poco tiempo produjeron patrones de difracción del ADN de una nitidez jamás lograda. Además, comprobaron que el ADN era cristalino.

Gosling y Stokes fueron los primeros en sugerir que las moléculas de ADN tenían un patrón cristalino monoclinico.

Durante los dos años que trabajaron juntos Franklin y Gosling, ambos lograron importantes avances en el mejoramiento de la técnica de difracción de rayos-X con obtención de imágenes fotografiadas cada vez más nítidas. Fue en esos tiempos de prolongados y extenuantes experimentos que produjeron la fotografía de la forma B del ADN (B-DNA). El 2 de mayo de 1952 Gosling obtuvo la mejor imagen por difracción de rayos-X del ADN ampliamente conocida como Foto 51.

No es excesivo reiterar que Gosling fue el coauthor con Franklin de uno de los tres trabajos que describieron la estructura del ADN publicado el 25 de abril de 1953 en el volumen 171 de *Nature*. Gosling, pese a su enorme contribución para desentrañar la estructura molecular del ADN, ni siquiera fue incluido en los agradecimientos de Watson y Crick. Más aún, tampoco fue tenido en cuenta por la Academia Sueca para ser candidato al Premio Nobel.

La animadversión de Franklin hacia Wilkins y *viceversa*, contrastaba notablemente con la relación que la cristalógrafa mantenía con Raymond Gosling, quien fue uno de los precursores, en la Unidad de Biofísica, para que se adoptara el uso de técnicas de difracción de rayos-X. Supervisora y doctorando compartieron duras y prolongadas sesiones de experimentos dedicadas a dilucidar la estructura del ADN.

Un breve editorial (*Nature*, 2013) se refiere al escaso reconocimiento que se le concedió al fundamental aporte de Raymond Gosling para el descubrimiento de la estructura del ADN: *“Even the greatest scientific discoveries came with an element of the mundane. A humble paperclip was biophysicist Raymond Gosling’s choice. Late one night in May 1952 in a chemistry lab in London, the PhD student wrapped DNA around a paperclip to keep the molecule’s fibers stretched taut in front of an X-Ray source so that he could analyse their structure. The result was the celebrated photograph 51—the image that told James Watson that DNA strands curl around each other like a twisted ladder, and that the specific pairings in the rungs are key to the mechanism of inheritance”*.

(Aún los mayores descubrimientos científicos surgen con el recurso de algún elemento inesperado. Un pequeño y poco apreciado clip fue la elección del biofísico Raymond Gosling. Avanzada la noche, en mayo de 1952, en un laboratorio de química en Londres, el estudiante de PhD envolvió ADN alrededor de un clip para mantener las fibras extendidas frente a una fuente de rayos-X para poder así analizar su estructura. El resultado fue la celebrada fotografía 51, la imagen que le transmitió a James Watson que las hebras se enrollaban unas sobre otras como una escalera caracol y que los apareamientos específicos de cada peldaño eran clave para el mecanismo de la herencia)⁸

Gosling continuó trabajando en el *King’s College* por un breve período, hasta completar su trabajo de tesis. Posteriormente, se dedicó a dictar clases de física en el *Queen’s College* de Nueva York, en la Universidad de *St Andrews* en Escocia y en la Universidad de las Indias Occidentales.

En 1967 retornó a Inglaterra y dictó clases en la Escuela de Medicina del *Guy’s Hospital* de Londres y fue designado Profesor Emérito en Física Aplicada a la

⁸ Traducción no literal del autor

Medicina desde 1984. En este hospital universitario complementó la investigación básica con la tecnología aplicadas al campo de la cardiología.

Sir John Turton Randall: sus luces y sus sombras

A comienzos de la década de 1950, el *King's College* corría con una ventaja de unos dos años con respecto a otras instituciones para avanzar en el estudio de la estructura molecular del ADN. Ese año, John Randall decidió que en el *King's College* se adoptara la técnica de difracción de rayos-X para la resolución de aspectos relevantes de la biología, fundamentalmente, la profundización en el estudio de la estructura de la molécula del ADN.

Eran muy notables, el interés y la influencia de Randall para que en el *King's College* se desarrollaran investigaciones biológicas a nivel molecular. Randall ejerció una influencia poderosa en los físicos y biofísicos que se desempeñaban en la Unidad de Biofísica, para que se dedicaran a profundizar en el estudio de moléculas biológicas, incluyendo el ADN. Su trayectoria académica en las universidades de *Birmingham*, *St. Andrews* y Londres fue muy destacada; sin embargo, especialmente si se tiene en cuenta la última de ellas, no tuvo un reconocimiento acorde con sus logros.

Esta determinación incomodó a una gran parte de los físicos y genetistas coetáneos, quienes consideraban que dedicar tanto tiempo al ADN era costoso y poco beneficioso al tratarse, según aquéllos, de una molécula demasiado simple. Para ellos, las grandes incógnitas de las macromoléculas biológicas sólo podían resolverse con el estudio de las proteínas.

Antes de dedicarse a actividades estrictamente académicas, John Randall se desempeñaba en la *General Electric Company*, donde comenzó a interesarse en la técnica de difracción de rayos-X. En 1950 ya estaba convencido de que una difracción leve podía mejorar la imagen difractada cuando el aire de la cámara en la cual se dispersaban los rayos-X era un gas liviano.

Los primeros hallazgos de la Unidad de Biofísica fueron fruto de la decidida iniciativa de Randall y de las investigaciones que realizaba el equipo dirigido por Wilkins.

Como director de la Unidad de Biofísica del *King's College*, Randall había tomado la inteligente decisión de contratar a Franklin. Empero, fue un error de consecuencias entonces imprevisibles concederle el papel principal en las investigaciones sobre ADN, que hasta esta inoportuna decisión le correspondía a Wilkins, nada menos que su Director Adjunto.

Sin desmedro de lo expresado precedentemente, el desempeño de Randall tuvo sus claros y oscuros. La elogiosa referencia que antecede no impide aludir a algunos aspectos poco transparentes de su actuación durante el período 1951-1953. De ellos se destaca el ya referido desplazamiento de Wilkins y su reemplazo por Franklin, determinación que tomó Randall sin que quien hasta ese momento era líder de las

investigaciones sobre el ADN en la Unidad de Biofísica fuera informado o consultado. Otra circunstancia que conspiró contra su imagen positiva fue la carta que envió en abril de 1953 a Rosalind Franklin donde le imponía no sólo dejar de trabajar en el *King's College*; también le ordenaba **dejar de pensar en el ADN**. También ordenó a Gosling que discontinuara su vínculo con Franklin y completara su *PHD* con la supervisión de Wilkins.

Pero hay un acontecimiento, quizás el más sorprendente, en el andar algo sinuoso de Randall. Tanto John Randall como el botánico británico Lionel Brimble (1904-1965), coeditor de *Nature*, eran miembros del prestigioso *London's Gentleman's Club (The Athenaeum)* y mantenían un trato de reverencial respeto mutuo. En *The Athenaeum*, Randall informó a Brimble acerca de la importancia científica e histórica de los trabajos que sobre el ADN habían concluido Wilkins, Stokes y Wilson en el *King's College*, y Watson y Crick en los Laboratorios *Cavendish*. Brimble fue fácilmente convencido por Randall del prestigio que ambos trabajos le aportarían a *Nature* y decidió apurar su publicación (Balaran, 2013). Así como Randall elogió convincentemente los dos trabajos recomendados, ignoró un tercer trabajo que también desentrañaba la estructura del ADN: el de Franklin y Gosling. Franklin actuó por su cuenta y exigió que su trabajo con Gosling tuviera el mismo trato preferencial. Finalmente, aunque parezca increíble e inaceptable, más aún en el caso de la prestigiosa *Nature*, los tres trabajos no tuvieron ninguna revisión y se publicaron rápidamente en el mismo número de *Nature* (171) el 25 de abril de 1953.

Un lustro virtuoso y final

Cuando había logrado importantes avances en el conocimiento de la estructura del ADN, imprevistamente, en abril de 1953, Rosalind Franklin se vio forzada a renunciar como investigadora de la Unidad de Biofísica del *King's College*. En una carta del 17 de abril, Randall la conminó a dejar de trabajar sobre el ADN y dejar de supervisar a Gosling.

La incompatibilidad de caracteres entre Franklin y Wilkins fue uno de los argumentos que forzó la injusta decisión de Randall. Wilkins admitió que su relación con Franklin siempre había sido conflictiva; sin embargo, Gosling, que cultivó en todo momento un excelente vínculo con ambos, contó en una entrevista que Wilkins una vez le confió que sentía que no había sido justo con ella (Attar, 2013).

A mediados del siglo XX parecía normal, según el sesgo sexista de la mayoría de los británicos que ostentaban alguna autoridad, en general hombres, que, si el rendimiento de una institución se veía alterado por un conflicto personal entre un hombre y una mujer, lo más adecuado era



Fig 12. Birbeck College, Universidad de Londres

brindar mayor protección al hombre y, en tal caso, prescindir de las actividades de la mujer. Si bien Franklin decidió abandonar el *King's College*, el motivo de su decisión también respondía a un firme deseo del director de su Unidad de Biofísica. La renuncia de Franklin no impidió que concluyera con Gosling su trabajo consagradorio sobre el ADN, publicado pocos días después en *Nature* (Franklin & Gosling, 1953).

En ausencia de Franklin, Wilkins concluía su trabajo sobre el ADN con la participación del físico galés Herbert Wilson (1929-2008) que se centró sólo en el ADN dejando de lado sus estudios sobre nucleoproteínas y el ya mencionado Alec Stokes que aportó sus conocimientos matemáticos (Wilkins, Stokes & Wilson, 1953).

Franklin continuó con su virtuoso derrotero científico en el Laboratorio de Cristalografía del *Birbeck College* de la Universidad de Londres (Fig. 12), a cargo de John Desmond Bernal. Bernal instruyó a Franklin para que estudiara la estructura de diferentes virus de especies vegetales, con énfasis en el virus del mosaico del tabaco.

Con el uso de la técnica de difracción de rayos-X, Franklin logró excelentes fotografías de diferentes virus. Mediante el análisis de patrones de difracción pudo develar que el ARN viral se incrustaba en las paredes interiores de su capa proteica protectora. Este descubrimiento fue determinante para que en los Estados Unidos se la considerara como una brillante científica. Allí, su prestigio se había acentuado durante dos extensas estadias de investigación que la entonces becaria del *Birbeck College* realizó en 1954 y 1955.

En 1953 se trasladó al *Birbeck College*, donde entre 1953 y 1958 se dedicó a la virología, con énfasis en el *TMV*), iniciando, además, estudios sobre el virus de la polio. Sus investigaciones en el campo de la virología incluyeron estudios sobre ribonucleoproteínas, que comprendieron importantes hallazgos relativos al ARN.

John Desmond Bernal el eminente cristalógrafo y Profesor de Física del *Birbeck College*, tomó la inteligente determinación de designar a Franklin como Investigadora *Senior* y le encomendó dirigir su propio grupo de trabajo. Bernal tenía plena seguridad de que la cristalógrafa que había dejado atrás al *King's* era una científica consagrada que ameritaba desempeñarse con total independencia. La confianza depositada en ella le permitió disponer de instalaciones aisladas para trabajar con el virus de la polio vivo, de forma segura, e iniciar su estudio mediante la técnica de difracción de rayos-X.

En el *Birbeck College*, Rosalind Franklin se sintió libre, independiente y segura para la toma de decisiones y para organizar sus actividades.

En sus últimos cinco años de vida fue la iniciadora de un reclutamiento de jóvenes investigadores que consolidaron su formación científica bajo su supervisión.

En base a sus logros científicos y a la conformación de un grupo de trabajo armónico y de reconocida excelencia científica, Franklin volvió a sentirse feliz como

lo había sido en París. Allí mostró autoridad y generosidad con los integrantes del equipo que dirigía, quienes la respetaban y sentían hacia ella gran afecto.

A comienzos de 1954 reclutó en su equipo a un químico y bioquímico lituano, Aaron Klug (1926-2018) (Fig. 13), quien entonces había obtenido su doctorado en el *Trinity College* de la Universidad de *Cambridge*. Ambos lograron una fructífera relación de trabajo y cultivado una sincera amistad.

Klug completó investigaciones que habían iniciado juntos, cuando el estado avanzado de su enfermedad le impidió a Franklin continuar en actividad. En 1982, Klug fue galardonado con el Premio Nobel de Química por haber desarrollado técnicas cristalográficas para reconocer los complejos proteínicos de los ácidos nucleicos. Desde 1969 era miembro de la *Royal Society*. En 1985 obtuvo la *Copley Medal*, el premio de mayor prestigio que otorga la *Royal Society*. Desde 1986 hasta 1996 fue director del *Laboratory of Molecular Biology (LMB)* en *Cambridge*. En el período 1995 -2000 fue Presidente de la *Royal Society*. Su excepcional carrera científica lo hizo acreedor de muchas otras distinciones que sería excesivo enumerar. Sin duda, fue el más importante continuador de la obra iniciada por Franklin. Entre su prolífica y calificada actividad en el campo de la biología molecular, puede mencionarse, por ejemplo, que en 1970 complementó el uso de la técnica de difracción de rayos-X con la microscopía electrónica y descubrió propiedades fundamentales de ribonucleoproteínas y reconstrucciones tridimensionales de algunas proteínas.

Franklin también incorporó a su equipo de trabajo a los estudiantes británicos de doctorado Kenneth Holmes (1934-2021), y John Finch (1930-2017) para continuar con ellos y Klug, investigaciones de gran impacto en su época sobre la molécula del *TMV* y otros virus similares (Franklin & Holmes, 1956, Franklin & Klug, 1956, Franklin et al., 1958).

En 1955, Franklin había publicado su primer trabajo importante sobre el *TMV*. En él descubrió que todas las partículas del virus tenían la misma longitud (Franklin, 1955). Ese mismo año, su equipo de trabajo recibió un nuevo integrante, Donald Caspar (1927-2021) un investigador estadounidense que aspiraba desarrollar investigaciones postdoctorales en el *Birbeck College*, destinadas a localizar la ubicación del ARN en el *TMV*. Él y Franklin se dedicaron un tiempo a develar la ubicación del ARN en el *TMV*. Caspar (1956) y Franklin (1956) demostraron, en trabajos separados, que el *TMV* era una varilla hueca y no una estructura sólida y que el ARN se localizaba en la superficie interna del virus hueco.

Kenneth Holmes, después de su paso por el *LMB* de *Cambridge*, fue Jefe de la Estación Remota del Laboratorio de radiación *Sincrotrón* del Laboratorio Europeo de Biología Molecular (*European Molecular Biology Laboratory-EMBL*) en Hamburgo entre 1975 y 1976. En esa época fue también Miembro Científico Emérito del Instituto *Max Planck*. Desde 1981 fue miembro de la *Royal Society* que, posteriormente le otorgó la *Medalla Gabor* en reconocimiento a sus logros en el campo de la biología molecular y por sus estudios pioneros en virus, en el uso de radiación *sincrotrón* y

por sus aportes científicos mediante la técnica de difracción de rayos-X. Recibió el Premio Europeo *Latsis* de la Fundación Europea para la Ciencia y otros premios y distinciones. Sólo cerraremos esta semblanza con la mención de su obra biográfica sobre Aaron Klug (Holmes, 2017).

Donald Caspar fue Profesor Emérito de Ciencias Biológicas en el Instituto de Biofísica Molecular de la Universidad Estatal de Florida y Profesor Emérito de Biología en el Centro de Investigaciones de Ciencias Médicas *Rosenstiel* de la Universidad *Brandeis*. Sus principales aportes comprendieron estudios biológicos de virus, difracción de protones y electrones y plasticidad de proteínas. Hizo trabajos de investigación en el Instituto de Tecnología de *Pasadena (Caltech)*, California y en el *King's College*. La Teoría de Caspar-Klug ha sido fundamental para el estudio de virus. En 1994 recibió la Beca Guggenheim. Fue miembro de la Academia Estadounidense de Artes y Ciencias. Recibió el Premio *Fellow* de la *Biophysical Society*.

John Finch se destacó, no sólo como cristalógrafo, sino también por su lugar relevante en la microscopía electrónica. Después de su etapa exitosa en el *Birbeck College*, se incorporó junto con Klug y Holmes en el *LMB* de *Cambridge*, donde continuó sus investigaciones sobre el *MTV* y emprendió innovadores estudios relativos a nucleosomas. En *Cambridge* se dedicó enteramente a la microscopía electrónica (*EM*). Fue el primero en determinar la subestructura del *MTV* en base a la *EM*. Sólo, o en colaboración con Klug resolvió la estructura general de muchos virus esféricos. Hizo trabajos que concitaron amplio reconocimiento sobre la estructura de la cromatina y otras contribuciones sobre la estructura del ADN, combinando difracción de rayos-X y *EM*. Fue designado miembro de la *EMBO* en 1978 y de la *Royal Society* en 1982.

Los trabajos del equipo que coordinó Franklin en el *Birbeck College*, como se aprecia en algunos de los mencionados precedentemente, describen aspectos novedosos de la estructura molecular del virus con utilización de técnicas de difracción de rayos X con exámenes de su ARN monocatenario. Sobre este ácido nucleico, el último trabajo de Franklin recién se publicó un año después de su muerte (Franklin & Klug, 1959).

Rosalind Franklin completó investigaciones sobre el *TMV* en el Instituto de Virología de la Universidad de *Berkeley*, donde lo hizo con su director, el químico y bioquímico Wendell Stanley (1904-1971), Premio Nobel de Química en 1946.

En 1957, cuando expiraba su beca de investigación (*ARC Fellowship*), Franklin aplicó a una nueva beca del Instituto Nacional de Salud de Estados Unidos que no sólo aprobó su solicitud, sino que puso a su disposición 300.000 libras esterlinas para



Fig. 13. Aaron Klug recibe el Premio H. Heineken de la Fundación Prince Claus, Holanda, 1979.

tres años, el monto más grande recibido por el *Birbeck College* en toda su historia previa (Glynn, 2012a).

Uno de sus últimos aportes como investigadora del *Birbeck College*, cuando su salud empeoraba significativamente fue una combinación virtuosa de ciencia y arte. La Feria Internacional de Bruselas (*Brussels World's Science Exhibition*) (*Expo 58*), solicitó a Rosalind Franklin, en 1957, realizar la ardua y creativa tarea de construir un modelo del *TMV* de 1,5 m de altura. La obra fue realizada con pelotas de ping-pong y estructuras de plástico para ser exhibidas en el Pabellón Internacional de Ciencia. Se inauguró el 17 de abril, un día después de su muerte (Maddox, 2002).

Rosalind Franklin siempre fue recordada por los hombres que reclutó en el *Birbeck College*. Klug y Caspar le dedican un trabajo a su memoria que se publicó en 1961 (Klug & Caspar, 1961).

De acuerdo a las consideraciones previas, los herederos científicos de Rosalind Franklin, además de Raymond Gosling, fueron Aaron Klug, John Finch, Keneth Holmes y Caspar. El primero de ellos, que quedó a cargo del grupo recibió una invitación para que el grupo se uniera a Max Perutz y John Kendrew, que, financiados por el *Medical Research Council* crearon el *LMB*, que se inauguró en 1962. Allí se insaló el Grupo de *Birbeck*, integrado por Aaron Klug, Keneth Holmes y John Finch, que pasó a ser conocido como el "Grupo Virus". Si la vida de Rosalind Franklin no se hubiera apagado prematuramente, seguramente se hubiera mudado al *LMB* con sus colegas Klug, Finch y Holmes en 1962 (Olby, 2009).

Rosalind Franklin: inspiradora de obras no científicas

Watson, Crick, Wilkins y Franklin, los cuatro codescubridores de la estructura molecular del ADN gozan de un elevado y merecido reconocimiento, en virtud de sus excepcionales trayectorias científicas, en especial por haber sido los principales protagonistas de un hito histórico que, en el campo de la biología, sólo es comparable con la teoría que, casi un siglo antes postulaba el célebre naturalista británico Charles Robert Darwin (1809-1882). Así lo había reconocido el propio Watson cuando le pidió a su hermana que le tipeara el manuscrito del trabajo consagratorio de *Nature*, donde junto a Crick describían la estructura del ADN. Cuando requirió tal asistencia, por ausencia de la dactilógrafa de su laboratorio, le dijo a su hermana que lo que iba a escribir era, después del volumen de Darwin sobre el origen de las especies, el trabajo más importante de la biología.

El mencionado cuarteto ganó merecidamente un prestigio distintivo que, salvo en un caso lo disfrutó en vida y aún lo sigue haciendo a sus 96 años el único sobreviviente de esta intensa historia, el biólogo molecular James Watson. Rosalind Franklin no tuvo en vida el merecido reconocimiento a su aporte sustancial para desentrañar "el secreto de la vida". Por un lado, probablemente debido al rol secundario que se les asignaba a las mujeres en los grandes temas de la ciencia. Por

otro lado, a su prematura muerte, cuando, pese a su corta edad ya era una científica consagrada y ampliamente reconocida como brillante química y cristalógrafa.

El detrato que sufrió en el *King's College* por parte de Wilkins y Randall y los comentarios de mal gusto que sobre ella profirió Watson en *The Double Helix*, editado 10 años después de la muerte de Franklin, con un intento tardío de reivindicarla en su epílogo influyeron para que muchos de sus lectores se pudieran del lado de Franklin, a quien concibieron como injustamente agraviada por el autor de dicha obra.

Rosalind Franklin fue, después de su muerte, un personaje que despertó cada vez mayor interés y empatía, especialmente en aquellos grupos que se oponían a la discriminación que, en la sociedad británica y sus medios académicos, se observaba hacia las mujeres (e.g. comedores sólo para hombres en algunas universidades).

Por su gran honestidad, su fuerte personalidad, sus firmes convicciones y su genuino interés por lograr nuevos conocimientos, sin otro fin que el descubrimiento en sí, despojada de toda prisa competitiva, por el valioso legado que trascendió su propia vida y, por muchas otras virtudes que exhibía, esta gran científica inspiró a muchos creativos, más allá de la ciencia.

Entre las diferentes manifestaciones del arte, guionistas de cine televisión y teatro, así como escritores que han producido importantes obras con referencia excluyente o tangencial a Rosalind Franklin es notorio que, en la mayoría de los casos, esta notable científica, es considerada como una víctima de tres hombres que perseguían el mismo objetivo científico (Watson, Crick y Wilkins). Si bien, en general, se trata de ficciones históricas, la ficción se basa en hechos reales y, en relación con estos últimos, los autores adoptan una posición firme y categórica en defensa del enorme talento de una científica a quien consideran menospreciada por su condición de mujer.

Las ficciones históricas, lejos están de ser representativas, pero son al menos sugestivas de la adopción de una postura que coloca a Franklin en una situación de desventaja por ser mujer, más aún por desempeñarse en un ámbito donde la misoginia era un rasgo frecuente entre los científicos de las instituciones involucradas en la dilucidación de la estructura molecular del ADN.

La trascendencia de la vida y obra de Rosalind Franklin, que se ha expresado más allá de las referencias estrictamente científicas se destaca principalmente en los medios audiovisuales y en la literatura ficcional o novelada.

a) Cine, televisión y teatro

Life Story, es una película para televisión, estrenada el 14 de septiembre de 1987, dirigida por el cineasta británico Mick Jackson (1943-) también conocida como *The Race for the Double Helix* que destaca el rol de Rosalind Franklin en el descubrimiento de la estructura del ADN. Los protagonistas principales son, además de Franklin, James Watson, Francis Crick y Maurice Wilkins.

Secret of Photo 51, El programa de televisión de divulgación científica *PBS NOVA* exhibió en 2013 un documental de 56 minutos sobre la vida y el legado de Rosalind Franklin que incluye entrevistas, realizadas en diferentes épocas, a Maurice Wilkind, Raymond Gosling, Aaron Klug, Brenda Maddox y Vittorio Luzzati, colegas y/o amigos o biógrafos de la célebre cristalógrafa.

Rosalind: a Question of Life, obra de teatro, escrita por la prestigiosa dramaturga británica Deborah Gearing, estrenada el 1 de noviembre de 2005 en el *Birmingham Repertory Theatre* y publicada en 2006 por *Oberon Books, London*. A la presentación en teatro siguió una gira por diferentes escuelas. A modo de ficción histórica, describe las duras experiencias que atravesó Rosalind Franklin en su investigación sobre el ADN, con referencia especial a la falta de reconocimiento y a los obstáculos que le imponían la ambición y competencia de sus pares y al elevado precio del éxito científico. Dos personajes de ficción aparecen en la obra; una mujer y su hermano, quienes imprevistamente se encuentran en un escenario donde Rosalind Franklin se observa concentrada con sus experimentos científicos.

Photograph 51, es una obra de la neoyorkina Anna Ziegler (1979-), escrita para ser presentada como obra teatral. Su estreno tuvo lugar en el *West End* de Londres. El argumento procura demostrar el injustamente escaso reconocimiento que tuvo Rosalind Franklin durante su permanencia en el *King's College*, con acentuado énfasis en sus investigaciones con la técnica de difracción de rayos-X, asignando especial protagonismo a la icónica Fotografía 51. En 2008, año de su estreno, recibió el premio de *STAGE (Scientists, Technologists and Artists Generating Exploration)* (*American Theater Web News*). Durante siete años consecutivos (2008-2015), diferentes grupos teatrales la representaron con éxito, aunque la obra alcanzó mayor notoriedad en 2015, cuando la famosa actriz y productora australiana Nicole Kidman (1967-) interpretó a Rosalind Franklin de un modo tan logrado que fue receptora de elogiosas críticas por parte de los más destacados especialistas en espectáculos y por el público en general.

False Assumptions, es una obra del dramaturgo canadiense Lawrence Aronovitch (1974-) (actualmente residente en el GCTC), que se produjo en el *Gladstone Theatre* de *Ottawa* en marzo de 2013 y contó con la participación de estudiantes de teatro de esa ciudad. Rosalind franklin no es la principal protagonista, dado que la obra está centrada en la vida y obra de Marie Curie. Se incluyen en esta ficción, científicas reconocidas por su talento y personalidad. Además de Rosalind Franklin, aparecen interpretadas la maestra y filósofa egipcia Hipatia de Alejandría, nacida en el siglo IV que vivió, según estimaciones no demasiado confiables entre 355 y 416 y Augusta Ada King (815-1852), condesa de *Lovelace*, matemática y escritora británica nacida en Londres. En alguno de los actos, las actrices que protagonizan a estas tres científicas, recorren, a través de sus cuadernos, irradiados y brillantes, la vida y obra de Marie Curie. La obra destaca, entre otras cosas, las dificultades que han atravesado las mujeres es diferentes épocas, para demostrar su talento e influencia en la historia de las ciencias.

b) *Novelas y biografías noveladas*

La Ridícula Idea de no Volver a Verte es una novela de la escritora española Rosa Montero (1951-), que tiene como protagonista a la famosa físico-química polaca, nacionalizada francesa, Marie Curie (1867-1934). En ella, Montero (213) le dedica un sentido espacio a Rosalind Franklin. Se refiere a Watson y Crick y Wilkins un modo acusatorio, como partícipes de actos de espionaje, de apropiación indebida de información y de parasitismo. También expresa su desagrado por el accionar de Wilkins, básicamente por no haber reconocido, como tampoco lo hicieran Watson y Crick, en sus respectivos discursos al recibir el Premio Nobel el enorme valor del aporte de Franklin (Montero, 2013).



Fig. 14. Portada de la biografía novelada *Her Hidden Genius* de Marie Benedict

Her Hidden Genius (Sourcebooks, USA) es una biografía novelada de la autora estadounidense Marie Benedict (1968-) (Benedict, 2022) (Fig.14), donde destaca los brillantes experimentos de Rosalind Franklin, los cuales, según esta novelista, constituyeron un hito en la historia de las ciencias. Entre otras consideraciones, sostiene que el universo perfecto de sus observaciones de átomos y moléculas se ensombrece con las actitudes desleales de sus colegas Watson, Crick y Wilkins. Un año después de la primera edición de *The Hidden Genius*, esta biografía fue traducida al español bajo el título *El Secreto de su Mente* (Planeta, Mexico) (Benedict, w2023).

Salud quebrantada

Cuando promediaba 1956, Rosalind Franklin se encontraba transitoriamente trabajando en Nueva York. Fue entonces que percibió que su región abdominal estaba notoriamente inflamada. Unos meses después regresó a Londres y rápidamente decidió realizar una consulta médica. El médico que la atendió advirtió que la paciente presentaba síntomas que requerían una serie de estudios de modo urgente. Los estudios evidenciaban la necesidad de una intervención quirúrgica mayor, que se practicó el 4 de septiembre de ese año. El resultado fue preocupante: se le había detectado un tumor en un ovario.

Su período postoperatorio no la detuvo en la prosecución de sus actividades de investigación, que fueron sorprendentemente productivas: entre 1956 y 1957 publicó trece artículos, en su mayoría referidos a virus, pues la virología era la especialidad que se le había encomendado desde que iniciara su labor científica en el *Birbeck College*. En 1957, iniciaba promisorios estudios sobre el virus de la poliomielitis.

Su entusiasmo y dedicación no disminuían significativamente, a pesar de su deteriorada salud.

A fines de 1957 se sometió a una segunda operación. Con la breve expectativa de vida que pronunció esta última intervención quirúrgica decidió permanecer durante sus últimos meses en la casa donde habitaban Francis Crick y su esposa Odile Crick (1907-2007)⁹. Los tres llegaron a cultivar una estrecha amistad. Rosalind Franklin había viajado con ellos a España en la primavera de 1956 (Sayre, 1975).

En el verano de 1953 la relación entre Franklin y Crick había comenzado a fluir de modo cordial, a través de intercambio de correspondencia y un mutuo reconocimiento de uno hacia el otro. Rosalind Franklin ya había visitado a Crick y su esposa Odile cuando vivían en *Brooklyn*, desde el otoño de 1954. Estos encuentros se habían hecho cada vez más frecuentes y placenteros. En ellos, Rosalind disfrutaba de las largas charlas con Francis acerca de los temas científicos que ambos cultivaban (Olby, 2009).

Se ha especulado que la enfermedad de Franklin pudo haberse debido a su exposición a los rayos-X, sin haber adoptado los recaudos establecidos para evitar o mitigar los eventuales riesgos de la radiación. Esta aparente escasa precaución ya parecía ser evidente en su estadía postdoctoral en París.

Hay una hipótesis alternativa que ha pretendido cobrar cierto sustento por el hecho evidente de que muchos de los colegas de Franklin que utilizaron la técnica de difracción de rayos-X, sin atender estrictamente los protocolos precautorios, no sufrieron los efectos carcinógenos eventualmente esperables. Según Maddox (2002), puede ser relevante el hecho de que algunos integrantes de la familia Franklin padecieron cáncer, probablemente víctimas de los genes *asquenazíes*, en realidad, dos genes: BRCA₁ y BRCA₂, (BRCA 1/2), que podrían ser responsables de una desproporcionada cantidad de muertes por cáncer entre judíos con ancestros de Europa Oriental o Central. Recuérdese que, en la breve genealogía de Rosalind Franklin, se hizo mención a Benjamin (Wolf) Franklin, su lejano antecesor, que residía en Europa Central, más precisamente en *Breslavia*, en el sudoeste de Polonia, antes de su arribo a Inglaterra en 1763.

Según algunas investigaciones realizadas por prestigiosos científicos especialistas en temas oncológicos, sería arriesgado atribuir una mayor predisposición a padecer cáncer de ovario a los judíos asquenazíes, al no haber estadísticas rigurosas que apoyen esta hipótesis (Feldman, 2001, Lynch, et al., 2004). No obstante, las mutaciones de los genes BRCA₁ y BRCA₂, (BRCA 1/2) podrían tener un mayor riesgo de cáncer, incluido el de ovario. Entre los judíos asquenazíes, 1 de cada 40 individuos tendría una mutación BRCA 1/2, en tanto que en la población general la proporción sería de 1 de cada 400 individuos (Courtney Misher, MPH, BS RT(T), *Oncolink*, 26 de agosto de 2022).

⁹ Odile Crick fue la artista británica que fue autora del famoso dibujo de la molécula de ADN del trabajo consagratorio de Watson y Crick (1953a) donde describen la estructura de la molécula del ADN.

En diciembre de 1957 Rosalind Franklin escribió su testamento, designando a Aaron Klug como principal heredero. El 16 de abril de 1958 moría en *Chelsea* a los 37 años.

Premios Nobel

En octubre de 1962, trascendió la noticia de la obtención del Premio Nobel de Física o Medicina concedido a Francis Crick, James Watson y Maurice Wilkins por su descubrimiento de la estructura molecular del ADN.

En relación con los vínculos personales, como es sabido, no había ninguna manifestación de empatía entre Franklin y dos de los receptores del Premio Nobel: Wilkins y Watson. Como se expusiera en el epígrafe precedente, su amistad con Crick fue evidente después del descubrimiento de la estructura del ADN.

No llama la atención que, en sus respectivos discursos de recepción del Premio Nobel, Watson no alude en ningún momento a Rosalind Franklin, en tanto que Wilkins lo hace casi al pasar. Lo que sí llama la atención es que Crick ni siquiera la menciona, más aún, teniendo en cuenta la estrecha amistad que cultivaron él y su esposa Odile con Franklin. Esta falta de reconocimiento sorprende por el hecho de que tanto Crick como Watson y Wilkins destacaron la importancia de los aportes de otros científicos para concluir con éxito sus respectivas investigaciones sobre el ADN.

Según Watson (2018) si Rosalind Franklin no hubiera padecido cáncer y hubiese sobrevivido con buena salud durante el tiempo prolongado, esperable para una joven de 37 años, se hubieran planteado dos posibilidades para ser discernida con el Premio Nobel:

- Obtener del Premio Nobel de Medicina o Fisiología en lugar de Maurice Wilkins,
- Compartir el Premio Nobel de Química con Maurice Wilkins.¹⁰

En síntesis, ante cualquiera de estas posibilidades, el Comité del Nobel se habría visto en una situación engorrosa dado que el Premio Nobel no puede concederse a más de tres personas a la vez (Isaacson, 2021).

¹⁰ Max Perutz y John Kendrew obtuvieron sendos Premios Nobel de Química en 1962. John Kendrew (1917-1997) fue un químico inglés, Director Adjunto de Max Parutz, que se dedicó al estudio de la mioglobina. Perutz fue el supervisor del trabajo doctoral de Francis Crick; Kendrew debía supervisar las investigaciones postdoctorales del joven James Watson sobre la mioglobina. Tanto Watson, como Crick, dejaron a un lado los temas que debían abordar en los Laboratorios *Cavendish* y se dedicaron de lleno al ADN.

Reconocimientos

As a scientist, Miss Franklin was distinguished by extreme clarity and perfection in everything she undertook. Her photographs are among the most beautiful photographs of any substance ever taken”.

John Desmond Bernal (1958)

“La historia de Rosalind Franklin es, en parte, la historia de cómo una científica desconocida se convirtió en un ícono, al menos en algunos círculos - su nombre es grabado en centros médicos, universidades, un rover ExoMars e incluso un doodle de Google -. Por supuesto, su narrativa también es muchas otras cosas, según lo planteo en esta novela; la fábula de una científica brillante y rigurosa que pudo sacar de las sombras los secretos del ADN, un recuento de cómo tuvo que combatir los estereotipos sobre mujeres y científicas que hacen su trabajo y el precio que le cobró esa lucha; una crónica de la forma en la que otros se apropiaron de sus detalladas contribuciones sin su conocimiento o permiso, y una exploración del vasto y crucial legado de Rosalind. Sin embargo, el camino de Rosalind del anonimato hasta su relativa fama posterior, mucho más conmovedor debido a su muerte prematura, es tanto la consecuencia del trabajo de su vida como un relato en sí mismo, en particular porque la manera en la que surgió es bastante inusual. Indagar en la cuestión de cómo a su legado le crecieron alas después de décadas de haber estado amarrado en la oscuridad- como el de muchas de las mujeres de quienes escribo- es fundamental cuando pensamos cómo los legados de las mujeres, tanto de la historia como las modernas, deberían ser conocidos y celebrados”.

Marie Beenedict (2023)

“Rosalind era una persona fascinante que triunfó contra todo pronóstico. En la década de 1950 era difícil ser mujer y ser una científica de alto nivel. Ella desempeñó un papel importante en lo que podría decirse que es el mayor descubrimiento del siglo XX, pero ese papel nunca fue suficientemente reconocido”

Anna Ziegler

Las referencias al mayúsculo legado de Rosalind Franklin son tan abrumadoras, que resultan poco probables de abordar en su totalidad.

Descollante científica y dignísima mujer, su efímero paso terrenal superó el dominio de las ciencias y trascendió en el arte y en la cultura popular. Desafortunadamente, pese al enorme prestigio que atesoró en su breve vida, parte del reconocimiento a su genio y figura es póstumo.

Desde la muerte de Rosalind Franklin hasta la publicación de la primera edición de *"The Double Helix"* (Watson, 1968), según Olby (2009) la comunidad científica no advertía la decisiva influencia de los aportes de la célebre cristalógrafa para que Watson y Crick pudieran completar exitosamente su modelo de estructura molecular del ADN. Las referencias peyorativas de Watson sobre Franklin parecen haber estimulado este demorado reconocimiento.

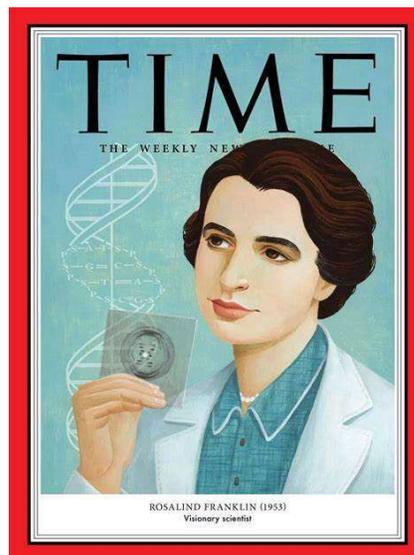


Fig. 15. Rosalind Franklin, 100 Women of the Year- 1953. Revista Time

A continuación, se hará referencia a los principales reconocimientos y distinciones que recibió Rosalind Franklin.

1953. Rosalind Franklin es seleccionada por la revista *Time* para compartir el grupo de las 100 mujeres del año (Fig. 15)..

1992. *English Heritage* colocó una placa azul en el muro de entrada de SW10 *Dayton Gardens* 107, *Donovan Court*, donde Rosalind Franklin vivió desde 1951 hasta su muerte en 1958 (Fig.16).

1993. El *King's College* renombró la Residencia *Orchard* como *Rosalind Franklin Hall* en su campus de *Hampstead* en la Avenida *Kidderpore*.

1993. El *King's College* colocó una placa azul en su muro exterior con la inscripción: "R.E. Franklin, R.G. Gosling, A.R. Stokes, M.H.F. Wilkins, H.R. Wilson *King's College London* que aludía a "Estudios de ADN con difracción de rayos X 1953".

1995. El *Newnham College* abrió su residencia para estudiantes de posgrado, llamado: "*Rosalind Franklin Building*". Colocó un busto de ella en su jardín.

1997. La Escuela de Cristalografía del *Birkbeck College* de la Universidad de Londres inauguró el *Laboratorio Rosalind Franklin*.

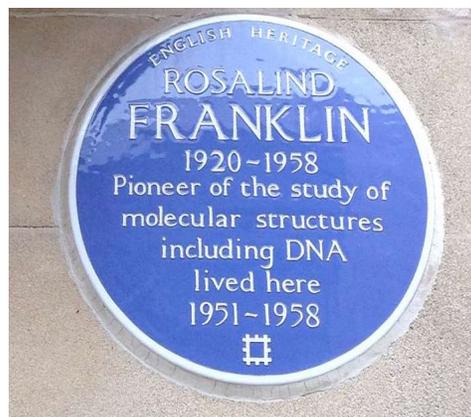


Fig. 16. Placa del muro del edificio donde vivió Rosalind Franklin



Fig. 17. La Universidad de Groningen, Países Bajos, otorga las becas “Rosalind Franklin”, para investigadoras destacadas en investigación e industria que hayan completado su carrera de post-grado a nivel doctoral.

1997. Asteroide descubierto en 1997 recibió el nombre Rosfranklin.

1998. La Galería Nacional de Retratos en Londres incorporó a su colección el retrato de Rosalind Franklin, junto a los de Francis Crick, James Watson y Maurice Wilkins.

1999. El Instituto de Física de *Portland Place*, Londres, renombró a su teatro como *Teatro de Cátedras Franklin*.

2.000. El *King’s College* creó el *Edificio Franklin-Wilkins* en honor al trabajo de ambos en la Universidad de Londres.

2001. El Instituto Nacional de Cáncer estadounidense creó el *Premio Rosalind Franklin* para mujeres que investigan esta enfermedad.

2003. La Real Sociedad de Londres creó el *Premio Rosalind Franklin* para contribuciones sobresalientes en áreas de las ciencias naturales, la ingeniería o la tecnología.

2003. La Real Sociedad de Química declaró al *King’s College* como “*Sitio Histórico Nacional de la Química*” y colocó una placa en el muro cerca de la entrada del edificio con el epitafio: “*Cerca de este sitio, Rosalind Franklin, Maurice Wilkins, Raymond Gosling, Alexander Stokes y Herbert Wilson llevaron a cabo experimentos que condujeron al descubrimiento de la estructura del ADN. Estos estudios revolucionaron nuestro conocimiento de la química detrás de la vida misma*”.

2004. La Universidad de Ciencias de la Salud de *Finch, New York* y la Escuela Médica de Chicago del Norte, *Illinois*, cambiaron su nombre por el de “*Universidad de Medicina y Ciencias “Rosalind Franklin*”. Comenzó a usar como su logo la Fotografía 51.

2006. Se lanzó en Nueva York la “*Sociedad Rosalind Franklin*”, cuyo propósito es impulsar contribuciones de mujeres destacadas en las ciencias de la vida y disciplinas relacionadas.

2006. La Escuela *St. Paul’s* para niños fundó el “*Centro de Tecnología Rosalind Franklin*”.

2007. La Universidad de *Groningen* de los Países Bajos(Fig.17), fue apoyada por la Unión Europea para el lanzamiento del *Programa de Becas Rosalind Franklin* para alentar a investigadoras a convertirse en profesoras tiempo completo. Sólo se otorga a investigadoras destacadas. Fue creado por la Facultas de Ciencias e Ingeniería en 2002, pero ejecutado desde 2007.

2008. La universidad de Columbia otorgó póstumamente el *Premio Honorario Louisa Gross Horwitz en Biología y Bioquímica* a Rosalind Franklin por su papel decisivo en

el descubrimiento de la estructura del ADN De los 93 beneficiarios del premio hasta 2011, 43 ganaron el Premio Nobel. En 1967 se les otorgó a Luis Leloir (1906-1987) y en 1980 a César Milstein (1927-2002).

2012. El Profesor Lord Robert Wilson inauguró en la Universidad de *Nottingham* el “Edificio de Investigación Rosalind Franklin”.

2014. En la Universidad de Medicina y Ciencias Rosalind Franklin (Chicago del Norte, *Illinois*) (Fig. 18) se inauguró una



Fig. 18. Universidad de Medicina y Ciencias “Rosalind Franklin”. Logo (parte superior) y vista general (parte inferior)

estatua de la célebre cristalógrafa, ubicada cerca de su entrada. Es obra de la escultora y pintora estadounidense Julie Rotblatt Amrany (1958-)2014. El *Premio Bio Rosalind Franklin* fue establecido por La Organización de la Industria Biotecnológica en colaboración con la *Sociedad Rosalind Franklin*, para mujeres sobresalientes en el campo de la biotecnología e industria.

2014. El 29 de mayo, la *Universidad de Medicina y Ciencias Rosalind Franklin* inauguró una estatua de bronce de Franklin, creada por la escultora y pintora estadounidense Julie Rotblatt-Amrany

cerca de su entrada delantera. Asistieron su sobrino Martin Franklin y su sobrina Rosalind Franklin Jekowsky.

2018-2021. La creación del *Rosalind Franklin Institute* se estableció en 2018 y se inauguró el 29 de septiembre de 2021 en el Campus de Ciencia e Innovación de *Harwell, Oxfordshire*, Inglaterra.

2019. Se le asigna el nombre Rosalind Franklin al rover de la misión ruso-europea a *Marte ExoMars*.

Esta mención del año 2019 destaca el hecho de que Rosalind Franklin no sólo trasciende en el planeta tierra. A ella nos referiremos en los siguientes párrafos.

El rover inicialmente conocido como *ExoMars* (Fig. 19), formaba parte del programa internacional [homónimo](#), originalmente dirigido por la [Agencia Espacial Europea](#) (ESA) y la [Corporación Estatal Rusa \(Roscosmos\)](#). La misión estaba programada para lanzarse en julio de 2020. Después de varias postergaciones, en 2022 la ESA puso fin al programa de cooperación con *Roscosmos* y se asoció a la NASA. Actualmente, su lanzamiento se estima para 2028. El objetivo de este proyecto es científico y, fundamentalmente biológico. El rover, que tendrá capacidad de perforar el suelo marciano hasta dos metros de profundidad, tomará muestras que podrán ser analizadas *in situ* con el fin de explorar rastros de vida en Marte. Entre sus características principales se destaca la posibilidad de utilizar técnicas novedosas de desplazamientos sobre terrenos irregulares y disponibilidad de un software de navegación autónomo.

El 7 de febrero de 2019 se había anunciado el nombre seleccionado para el rover. Tras una elección entre más de 36.000 propuestas, enviadas por ciudadanos de todos los estados miembros de la ESA, se le impuso el nombre de Rosalind Franklin (*Newsroom*, Infobae, 14 de diciembre de 2023).

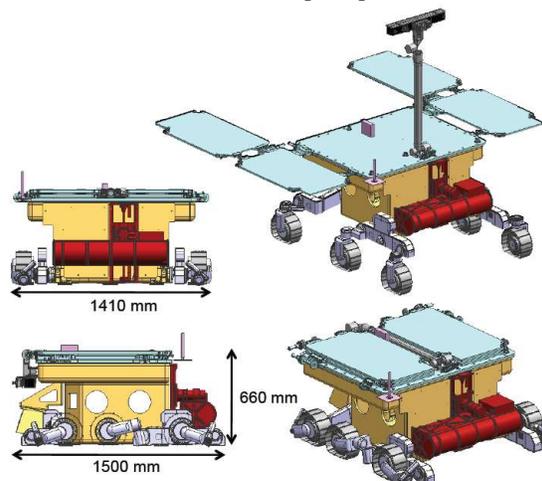


Fig.19. Vehículo Explorador Tipo Rover. Versión original de ESA/Roscosmos del rover “Rosalind Franklin”.

2020. En 2020, en coincidencia con el centenario del nacimiento de Rosalind Franklin (25 de julio de 1920), la *Royal Mint* emitió la segunda moneda de la serie Innovación en la Ciencia, de 50 peniques, con la referencia a la célebre química y cristalógrafa. La moneda, que fue diseñada por David Knapton, muestra el nombre de la homenajeada en forma vertical a la derecha de la representación esquemática de la Fotografía 51. En el reverso se ve la tradicional imagen de la Reina Isabel II.

Conclusión

Resumir la brillante trayectoria científica de Rosalind Franklin, a su decisivo aporte al descubrimiento de la estructura del ADN, así como identificar su mayor logro a la Fotografía 51 de la forma B del ADN es una mezquina forma de caracterizarla como personalidad sobresaliente de la historia de la ciencia.

En su derrotero científico, el papel más destacado por la literatura científica es, con justa razón, el haber formado parte del cuarteto (o quinteto, si se incluyese a Raymond Gosling) que desentrañó la estructura de la molécula del ADN. Pero es indudable que una semblanza completa del significativo alcance de las investigaciones y formación de científicos trasciende sus hallazgos experimentales relacionados con la molécula de la vida.

Vale reiterar que los dos años que transcurrieron en el *King's College*, entre 1951 y 1952; fueron, sin duda, fundamentales para valorar su excepcional talento. Sin embargo, Rosalind Franklin no iniciaba su virtuoso derrotero científico en enero de 1951 cuando se concretaba su ingreso al Departamento de Biofísica liderado por John Randall para incursionar en el campo de la biología molecular, nada menos que en la ardua tarea de desentrañar la estructura del ADN. Ya era una científica reconocida internacionalmente por sus innovadoras investigaciones sobre materiales del carbono, especialmente carbón, primero en la *British Coal Utilization Research Association (BCURA)* (1942-1946) en Londres y posteriormente, cuando ya se consolidara como excepcional cristalógrafa, en el *Laboratoire Central des Services Chimiques de l'Etat* (1947-1950), en París.

Luego de enfrentar experiencias conflictivas en el *King's College* fue en busca de un nuevo destino londinense. Así recaló en el *Birbeck College* donde volvió a saborear el incomparable sabor de la libertad, que ya había sentido en su amada París.

En el *Birbeck College* mostró plenamente su madurez, objetividad y capacidad de coordinar complejas investigaciones sobre virus y ARN, liderando un equipo de trabajo donde la armonía y amistad entre sus integrantes no conspiró contra la exigencia que imponían los trabajos de laboratorio. En su Laboratorio de Cristalografía, Rosalind fue el faro que iluminó a cuatro jóvenes entusiastas que devinieron científicos de renombre internacional y que brillaron en el campo de la biología molecular. En el *Birbeck* supervisó a cuatro talentos, de los cuales Aaron Klug fue su más admirable heredero científico.

Rosalind Franklin tuvo una relación conflictiva con Maurice Wilkins, probablemente debido a una espontánea incompatibilidad de caracteres, seguramente exacerbada por el desacierto de John Randall de asignarle a la cristalógrafa las mismas funciones que aquél biofísico venía cumpliendo en el *King's* donde, además, era nada menos que el Director Adjunto de la Unidad de Biofísica desde 1946. Cabe insistir, que Franklin nunca supo que estaba cumpliendo las funciones que le correspondían a Wilkins quien, corresponde dejar en claro, no estuvo acertado en el momento de pretender que la nueva integrante del staff del *King's*, integrara su equipo de trabajo en calidad de asistente. Franklin ya era una consagrada cristalógrafa de rayos-X que había ganado, merecidamente, un amplio reconocimiento por sus investigaciones pioneras sobre materiales de carbono, especialmente durante su desempeño brillante en París, donde concitó la admiración, no sólo de sus pares, sino de Jacques Mering, máxima autoridad del sector de cristalografía del *Laboratoire Central des Services Chimiques de l'Etat*.

Todo parece indicar que el vínculo entre Franklin y Watson nunca fue armónico. El joven estadounidense, ocho años menor que Franklin, exhibía ciertas actitudes que podían llegar a exasperarla, como, por ejemplo, cuando visitó el *King's* con la intención de mostrarle, con indisimulada alegría, el fallido modelo de Pauling y Corey. No obstante, antes de su muerte, Franklin nunca se sintió agredida verbalmente o por escrito por Watson, pero lo más malicioso del único biólogo del

cuarteto descubridor de la estructura del ADN es haber tratado de modo ofensivo a su colega diez años después de su muerte en su famoso libro *La Doble Hélice*.

La relación de Franklin con Crick devino rápidamente amistosa poco tiempo después de la publicación en el volumen 171 de *Nature* de los cuatro trabajos sobre el ADN del 25 de abril de 1953. No obstante, hay dos cuestiones que ameritan destacarse.

En el trabajo donde Watson y Crick describen su descubrimiento de la estructura molecular del ADN, sólo mencionan a Rosalind Franklin agradeciéndole, de un modo muy poco expresivo, sus trabajos inéditos. Poco después, cabe recordar, ambos autores admitirían que, sin los aportes de Franklin hubiera sido poco probable o imposible que hubieran llegado a concluir con éxito su descubrimiento (Crick & Watson, 1954).

Pero hay algo más sorprendente. Cuatro años después de la muerte de Franklin, cuando Watson, Crick y Wilkins recibían el Premio Nobel de Fisiología o Medicina, en 1962, los dos primeros no mencionan a Franklin en sus discursos y sí lo hace, al pasar, Wilkins.

Rosalind Franklin representó el brillo de lo efímero. Murió a los 37 años y su obra es comparable a la de eximios investigadores que tuvieron unos treinta años más de oportunidades futuras para alcanzar el máximo prestigio.

Es tentador especular que hubiera sido de la trayectoria científica de Rosalind Franklin si hubiera gozado de buena salud.

El 17 de febrero de 1953, Rosalind Franklin había escrito en sus cuadernos que la estructura del ADN tenía dos cadenas, así como otros aspectos que mostraban su versión final, compartida con Gosling, su estudiante doctoral (Maddox, 2003).

El 26 de febrero, Watson y Crick aún no habían resuelto la complementariedad de las bases nitrogenadas y su descripción del tipo de enlace entre las bases por puentes de hidrógeno era errónea. Afortunadamente para la dupla de *Cambridge*, estas dudas se aclararon y el 28 de febrero pudieron celebrar el descubrimiento del "Secreto de la Vida" en el *Eagle*, su pub preferido.

Qué cerca estuvo Rosalind Franklin de ocupar el primer lugar en la fila del cuarteto que sumó sus talentos para la descripción de la estructura molecular del ADN.

Si de algo no quedan dudas del paso terrenal de Rosalind Franklin, es que sus descubrimientos fueron imprescindibles, no sólo para Watson y Crick, sino para la biología toda (Klug, 1968, 1974).

Bibliografía

Astbury, W. (1947). X-Ray Studies of Nucleic Acids. Symposium of the Society for Experimental Biology 1. Cambridge University Press, 66-76.

- Attar, N. (2013). Raymond Gosling, the man who crystallized genes. *Genome Biology* 14(1): 402.
- Avery, O.T., C.M. MacLeod y M. McCarthy. (1944). Studies of the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types. Induction of transformation by a deoxyribonucleic acid fraction isolated from pneumococcus type III. *Journal of Experimental Medicine*, **79**: 137-158.
- Ayala, F.J. & Valentine, W. (1979). *Evolving: The Theory and Processes of Organic Evolution*. The Benjamin /Cummings Publishing Company, Menlo Park, California.
- Balaram, P. (2013). The Double Helix: Sixty Years On. *Current Science* 104 (9): 127-128.
- Benedict, M. (2022). *Her Hidden Genius*. Sourcebooks, USA. (version en español: El Secreto de su Mente, Planeta, Mexico).
- Bengham, D.H. & Franklin, R. (1946). Thermal expansion of coal and carbonized coal. *Transaction of the Faraday Society* 42: 289-294.
- Bernal, J.D. (1958). Obituary notice of Rosalind Franklin. *Nature* 182: 154, 19 July 1958.
- Caspar, D.L.D. (1956). Structure of Mosaic Tobacco Virus. *Nature* 177: 928-930.
- Chargaff, E. (1950). Chemical specificity of nucleic acids and mechanism of their enzymatic degradation. *Experientia* **6**: 201-209.
- Cobb, M. & Comfort, N. (2023). What Watson and Crick really took from Franklin? *Nature* 616, 27 April 2023: 657-660.
- Cochran, W., Crick, F. & Vand, V. (1952). The structure of synthetic polypeptides. I. The transform of atoms in a helix. *Acta Crystallographica* 5: 581-586.
- Crick, F.H. & Watson, J.D. (1954). The complementary structure of the deoxyribonucleic acid. *Proceedings of the Royal Society A* 223: 80-96.
- Curtis, H., Barnes, N.S., Schnek, A. & Massarini, A. (2008). *Biología*. Editorial Médica Panamericana, 7ª Edición en Español.
- Dobzhansky, Th., Ayala, F.J., Stebbins, C.L. & Valentine, W. (1977). *Evolution*. W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Dotto, J. (2014). *Genética. Cómo Puede Cambiar Nuestras Vidas*. Paidós, Buenos Aires.
- Feldman, G.E. (2001). Do Ashkenazi Jews have a higher than expected cancer burden? Implications for cancer control prioritization efforts. *Israel Medical Association Journal* 3(5): 341-346.
- Franklin, A.E. (1915). Records of the Franklin Family and Colaterals. George Roudledge and Sons, Limited, London.

- Franklin, R.E. (1946). *The Physical Chemistry of Solid Organic Solids, with Special Reference to the Structure of Coal and Related Materials. University of Cambridge.*
- Franklin, R.E. (1948). A note on the true density, chemical composition and structure of coals and carbonized coals. *Fuel* 28(2): 46-49.
- Franklin, R.E. (1949a). A study of the fine structure of carbonaceous solids by measurements of true and apparent densities. Part I: coals. *Transactions of the Faraday Society* 45: 274-286.
- Franklin, R.E. (1949b). A study of the fine structure of carbonaceous solids by measurements of true and apparent densities. Part II: carbonized coals. *Transactions of the Faraday Society* 45: 668-682.
- Franklin, R.E. (1950a). On the influence of bombing electrons on the scattering of X-ray by carbon. *Nature* 14: 71-72.
- Franklin, R.E. (1950b). The interpretation of Diffuse X-ray diagrams of carbon. *Acta Crystallographica* 3: 107-121.
- Franklin, R.E. (1950c). A rapid approximate method for correcting low-angle scattering measurements for the influence of finite height of the X-ray beam. *Acta Crystallographica* 3: 158-159.
- Franklin, R.E. (1950d). The structure of carbon. *Journal de Chimie Physique* 47: 573-575.
- Franklin, R.E. (1951a). Graphitizable and nongraphitizable carbons. *Comptes Rendus Chimie* 232: 232-234.
- Franklin, R.E. (1951b). Crystallite growth in graphitizing and non-graphitizing carbons. *Proceedings of the Royal Society A*. 209: 196-218.
- Franklin, R.E. (1951c). The structure of graphitic carbons. *Acta Crystallographica* 4 253-261.
- Franklin, R.E. (1953a). Graphitizing and nongraphitizing carbon compounds. Formation, structure and characteristics. *Brenstoff Chemie* 34: 359-361
- Franklin, R.E. (1953b). The role of water in the structure of acid. *Journal de Chimie Physique* 50C: 26.
- Franklin, R.E. (1956). Homogeneous and heterogeneous graphitization in carbon. *Nature* 177: 239.
- Franklin, R.E. (1955). Structure of c Tobacco Mosaic Virus. *Nature* 175 (4452): 379-381.
- Franklin, R.E. (1956). The structure of Tobacco Mosaic Virus: location of the Ribonucleic Acid in the Tobacco Mosaic Virus. *Nature* 177 (4416): 928-930.

- Franklin, R.E & Bacon, G.E. (1951). The alpha dimension of graphite. *Acta Crystallographica* 4: 561-562.
- Franklin, R. & Gosling, R. (1953a). Molecular configuration in sodium thymonucleate. *Nature* 171: 740-741.
- Franklin, R. & Gosling, R. (1953b). Evidence of 2-Chain Helix in Crystalline Structure of Sodium Deoxyribonucleate. *Nature*: 172: 156-157.
- Franklin, R. & Gosling, R. (1953c). The Structure of Sodium Thymonucleate Fibres. I. The Influence of Water Content. The Structure of Sodium Thymonucleate Fibres. II. The Cylindrically Symmetrical Patterson Function. *Acta Crystallographica* 6: 673-677, and 678-685.
- Franklin, R. & Gosling, R. (1955). The Structure of Sodium Thymonucleate Fibres. The Three Dimensional Patterson Function. *Acta Crystallographica* 8: [5].
- Franklin, R.E. & Holmes, K.C (1956). The helical arrangement of the protein subunit in the tobacco mosaic virus. *Biochimica et Biophysica* 21: 105.
- Franklin, R.E. & Klug, A. (1956). The nature of the helical groove of the tomato mosaic virus particle X ray diffraction studies. *Biochimica et Biophysica* 19 (3): 403-416.
- Franklin, R.E. & Klug, A. (1959). The structure of RNA in Tomatto Mosaic Virus and ither Ribonucleoproteins. Transactions of the Farady Society 55(3): 494-495.
- Francis, R. E., Klug, A., Finch, J.T., & Holmes, K.C. (1958). On the structure of some ribonucleoprotein particles. Discussions of the Faraday Society No 25: 197-198.
- Gallardo, S. (2011). *Historia de los Genes. De los Factores Hereditarios a la Secuencia Completa del Genoma Humano*. Estación Ciencia, Buenos Aires.
- Glynn, J. (2012a). My Sister Rosalind. *Oxford University Press*.
- Glynn, J. (2012b). Remembering my sister Rosalind Franklin. *The Lancet* 379 (9821): 1094-1095.
- Gosling, R.G. (1954). *X-ray Diffraction Studies on Desoxyribose Nucleic Acid*. Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy. University of London, February 1954.
- Harris, P.J. & Suárez Martínez, I. (2021). Rosalind Franklin, carbon scientist. *Carbon* 171: 289-293.
- Holmes, K. (2017). *Aaron Klug – A Long Way From Durban*. A Biography. Cambridge University Press.
- Isaacson, W. (2021). *El Código de la Vida. Jenifer Doudna, la Edición Genética y el Futuro de la Especie Humana*. Debate, Biografías. Penguin Random House, Grupo Editorial Buenos Aires.

- Klug, A. & Caspar, D.L.D. (1961). The structure of small viruses (dedicated to the memory of Rosalind Franklin). *Advances in Virus Research*, 7: 225-325.
- Klug, A. (1968). Rosalind Franklin and the discovery of the structure of DNA. *Nature* 219: 808-844.
- Klug, A. (1974). Rosalind Franklin and the Double Helix. *Nature* 278: 48.
- Laboratory of Molecular Biology, MRC. (2017). John Finch (1930-2017). *LMB News*.
- Lynn, J. (2012). *My Sister Rosalind*. Oxford University Press, Inc., New York.
- Lerner, L.M. & Libby, W.L. (1979). *Heredity, Evolution and Society*. W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Lynch, H.T., Rubinstein, W.S. & Locker, G.Y. (2004). Cancer in Jews. Introduction and overview. *Familial Cancer* 3(3-4): 177-192.
- Maddox, B. (2002). *Rosalind Franklin. The Dark Lady of DNA*. Harper-Collins Publishers, New York, 380 pp.
- Maddox, B. (2003). The double helix and the wronged heroine. *Nature* 421: 407-408.
- Montero, R. (2013). *La Ridícula Idea de no Volver a Verte*. Seix Barral, Buenos Aires.
- Mukherjee, S. (2017). *El Gen. Una Historia Personal*. Debate. Barcelona.
- Nature* (2013). Due credit. *This Week Editorials* 496: 270, 18 April 2013.
- Olby, R.C. (2009). *Francis Crick: Hunter of Life's Secrets*. Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York.
- Pauling, L. & Corey, R.B. (1953). A proposed structure for the nucleic acids. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 39 (2): 84-97.
- Piro, O.E. (2014). Breve historia del ADN, su estructura y función. *Ciencia e Investigación* 4(3): 25-50.
- Sayre, A. (1975). *Rosalind Franklin & DNA*. Norton, New York.
- Valdés-Solpís, T. (2015). Rosalind Franklin antes del ADN. *Blogs NAUKAS, Ciencia, Escepticismo y Humor*, Bilbao, España, 11 p.
- Watson, J.D. (2018). *ADN. El Secreto de la Vida*. Taurus, CIENCIA, Sabadell, España.
- Watson, J. (1978). *La Doble Hélice*. El Arca de Papel. Plaza & Janés Editores, Barcelona (Edición original: Watson, J. (1968). *The Double Helix. A Personal Account of the Discovery of DNA*, Atheneum, New York).
- Watson, J.D. & Crick, F. (1953). Molecular structure of nucleic acid. A structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature* 171: 737-738.
- Watt, J.D. & Franklin, R.E. (1957). Changes in the structure of carbon during oxidation. *Nature* 180: 1190.
- Wilkins, M. (2003). Maurice Wilkins. *The Third Man of the Double Helix*. Oxford University Press.

Wilkins, M., Gosling, R.G. & Seeds, W.E. (1951). Physics studies on nucleic acids.
Nature 167 (4254): 759-760.

Wilkins, M., Stokes, A. & Wilson, H. (1953). Molecular structure of Deoxyribose
Nucleic Acids. *Nature* 171: 738-740.