

EL ESPEJO USTORIO DE BUFFON: ENTRE LA LEYENDA DE SIRACUSA Y LA TRADICIÓN DEL ANÁLISIS QUÍMICO

David Carramolino del Valle

La participación decisiva de un espejo ustorio, diseñado y construido por Arquímedes, en la destrucción de la flota romana del general Marcelo durante el asedio de Siracusa (214-212 a.C.) se convirtió en el núcleo de una leyenda que ha incentivado las investigaciones sobre la posibilidad teórica y técnica de un espejo con tal virtud prácticamente hasta nuestros días. El interés por el mito cobró fuerza a finales del s. XVI, y en el s. XVIII dicho interés se conservó dada la utilidad de las lentes y espejos ustorios como instrumentos científicos en los gabinetes científicos. El objetivo de este artículo es analizar y contextualizar una de las reconstrucciones del espejo de Arquímedes, el espejo compuesto del célebre naturalista Buffon, a la luz de los conocimientos científicos y tecnológicos del momento. Aparte de las variopintas piruetas intelectuales que plantearon la historicidad y las limitaciones de un espejo de tal potencia, las lentes y los espejos ustorios funcionaron como instrumentos científicos al servicio del análisis químico en los gabinetes del s. XVIII. Por ello, creemos que el espejo compuesto de Buffon no debe ser entendido solamente bajo la perspectiva de la tradición apologética del mito de Arquímedes sino también como instrumento científico y técnico.

1. Introducción: el mito del espejo de Siracusa

La plausibilidad del espejo de Arquímedes es aún hoy una cuestión abierta y no pretendemos ser definitivos en el problema, *ni* siquiera aportar algo realmente novedoso. Tan sólo indicar que la construcción de un espejo parabólico —paraboloide de revolución— habría exigido unos conocimientos teóricos, y una cierta pericia técnica. En cuanto a la teoría hubiera bastado conocer la propiedad focal de la parábola (1) —los rayos luminosos que inciden paralelos; entre sí y al eje del espejo, sobre la superficie interior de un paraboloide de revolución convergen, tras reflejarse, en un foco puntual (véase la ilustración 1)— y que se puede obtener una aproximación aceptable a la curvatura parabólica utilizando un número relativamente amplio de espejos planos. Es probable que Arquímedes conociera las propiedades focales de la parábola. Su coetáneo Apolonio de Perga (262-190 a.C) escribió las *Cónicas*, y un tratado *Sobre los espejos ustorios* donde señalaba a qué puntos eran reflejados los rayos que inciden sobre la superficie interior de un espejo semiesférico. La propiedad era conocida, según G.J. Toomer, por Doritheus, correspondiente de Arquímedes, aunque la prioridad en cuanto a su demostración formal correspondería a Diocles que vivió en el siglo II a.C. (2). Si Arquímedes conocía el sistema de exhausciones para inscribir un círculo en un polígono tampoco tiene nada de particular que aproximara la figura parabólica mediante un número considerablemente grande de espejos planos. En lo relativo a la pericia técnica baste decir que los griegos fabricaron espejos cóncavos de bronce cubiertos de plata y plomo, pero no de vidrio colado, y estañado, y no tenemos noticia de la existencia de espejos parabólicos. A esta interrogante hay que añadir los resultados de las investigaciones modernas sobre la combustibilidad de materiales: el flujo de irradiación crítico para poner en ignición la madera de los barcos, y mantener la combustión no puede ser proporcionado por un espejo (3). Arquímedes, por otra parte, no poseía ningún método para determinar la distancia a la que se encontraban las galeras romanas, y éstas se movían sobre la superficie del mar, problema que ya fue señalado por Montucla (4). Para hacer frente a esta dificultad el sabio de Siracusa habría necesitado un sistema dinámico que cambiara la posición del foco del espejo medio grado por cada 30 metros recorridos por las naves. La impredecibilidad meteorológica y el cambio de posición del sol con respecto al espejo hacen aún menos verosímil el mito. En cualquier caso no se puede ser concluyente, todavía hoy existen defensores de la plausibilidad de la leyenda (5).

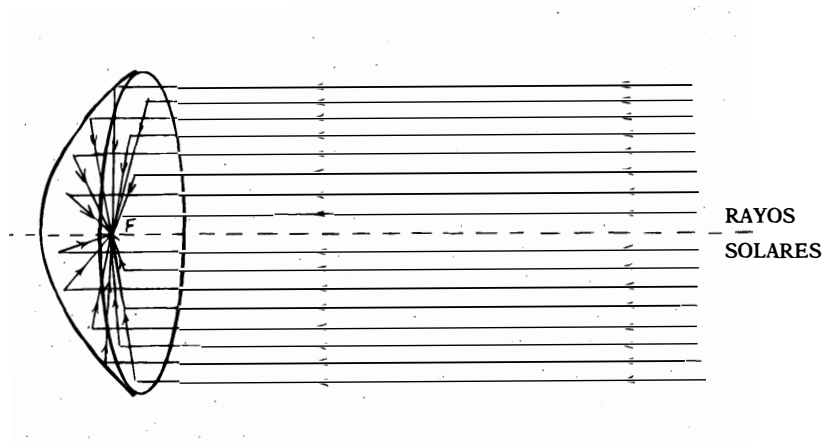


ILUSTRACIÓN 1
Propiedad focal de un paraboloides de revolución

Las primeras fuentes históricas que documentan la existencia del espejo ustorio de Arquímedes son relativamente tardías pues los historiadores romanos (Polibio, Tito Livio o Plutarco) sólo hablan de máquinas balísticas y de elevadores de poleas en la defensa de Siracusa. La fuente más antigua que da noticia de la existencia de un artilugio óptico para quemar la flota romana es el *Hippias* (2,19) de Luciano de Samosata en el s.II, y el primero que menciona la intervención de un espejo en el asedio de Siracusa es Galeno en el *De Temperamentis* (III, I, 23) (6). Según D.L. Simms la conformación de la leyenda procede de Anthemius de Tralles en el s. VI (7), pero J. Baltrusaitis va más lejos datando el origen del mito en fuentes del s. XII (8); en concreto en las *Crónicas* de Zonaras (1118), y en las *Quiliadas* (s. XII) de Tzetzes. Zonaras habla de un espejo bien pulido aunque no da más detalles (9), pero Tzetzes pretende que Arquímedes construyó un espejo hexagonal alrededor del cual montó otros más pequeños y cuadrados, móviles mediante bisagras (10). Baltrusaitis ha ignorado la existencia de una fuente más antigua, y sobre todo más precisa:

los escritos del árabe Ibn Al-Haytam, Alhacén para los cristianos, quien entre finales del s. X y principios del s. XI escribió un breve *Tratado sobre los espejos ustorios* en el que la legendaria herramienta de Arquímedes está constituida por un gran número de espejos planos dispuestos de forma que el rayo luminoso es reflejado por cada uno de ellos hacia un lugar común. La alternativa a este dispositivo que el propio Al-Haytam presenta es disponer un gran número de espejos esféricos con el fin de que reflejen sus rayos hacia un punto único. El científico árabe atribuye a Arquímedes el conocimiento de la propiedad focal de la parábola —los rayos luminosos que inciden paralelamente sobre la superficie interior de un paraboloides de revolución se reflejan convergiendo en un punto único— pero no su demostración formal de la que él mismo pretende ser el descubridor (11). El *Tratado sobre los espejos ustorios* de Ibn Al-Haytam se convierte así en la primera fuente documental conocida que ofrece como posible solución a la construcción de un espejo parabólico, una aproximación mediante un conjunto considerablemente grande de espejos planos elementales que inscribirían la superficie del paraboloides.

A finales del s. XVI resurge con fuerza la leyenda a menudo con instrumentos ópticos fantásticos sin apoyo empírico, y que conceden a los rayos luminosos la virtud de propagarse hasta el infinito sin ser debilitados por las sucesivas reflexiones ni por la acción del aire. En la *Magia Naturalis* (1589), G.B. della Porta pretendió que el espejo de Arquímedes, siendo cóncavo y semiesférico, y aunque pase por una aproximación mediante espejos planos elementales, no quemó más allá de una distancia de 30 pasos ya que sería imposible construir un espejo de un diámetro mayor (12). La historicidad de la leyenda se salva por la existencia de un enigmático y fantástico segmento de paraboloides truncado y abierto por los dos lados, del que Porta no revela detalle, que recoge los rayos convergentes y los reenvía paralelos hasta el infinito prendiendo todo lo que encuentran a su paso. El foco se sitúa en el interior del cono truncado, y constituye la fantástica *línea ustoria* que proyecta los rayos paralelos hasta el infinito. B. Cavalieri en *Lo specchio ustorio* (1632), cuya credibilidad fue defendida en los *Dialoghi* de Galileo (13), introduce una modificación añadiendo al espejo cónico truncado de della Porta un pequeño espejo cónico, compacto y convexo que refleja paralelamente los rayos que han sido concentrados por la primera pieza formando la *verga ustoria* que ya no es un conjunto de rayos paralelos sino un cilindro sólido que se propaga, como la línea ustoria, hasta el infinito (14) (véase la ilustración 2).

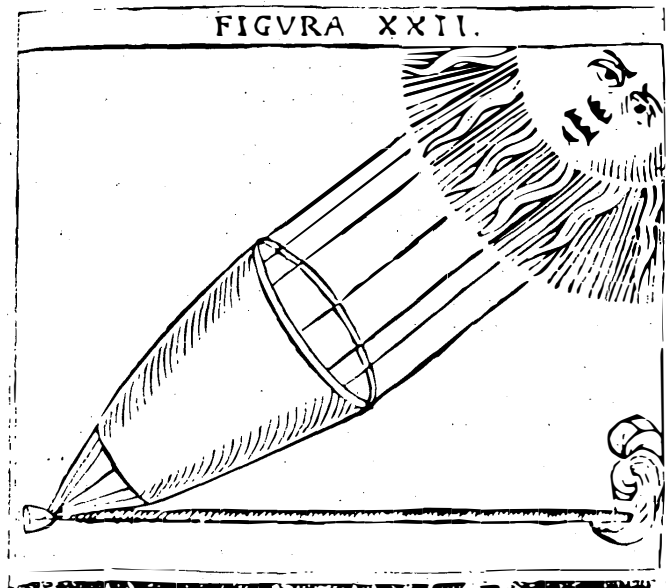


ILUSTRACIÓN 2

La verga ustoria de Cavalieri (*Lo specchio ustorio*, 1632)

Descartes rompió con esta tradición al negar la posibilidad del espejo de Arquímedes. La primera referencia se encuentra en una carta a Mersenne de enero de 1630. Un espejo cóncavo tendría que poseer un diámetro enorme para poder concentrar los rayos en un foco común, ya que los rayos del Sol no son todos paralelos. Si no tuviese al menos seis toesas (unos 12 metros) de diámetro no tendría fuerza para quemar más allá de una legua de distancia (15).

Con más detalle el filósofo francés vuelve sobre el tema en la *Dióptrica* (1637) relacionando el diámetro de la lente con la distancia a la que debe concentrar los rayos. Los rayos no inciden todos paralelos, y la fuerza del calor se mide por la relación entre el tamaño del vidrio o el espejo, y el espacio en el que se reúnen los rayos:

«una lente, cuyo diámetro no tuviese una dimensión aproximada a la equivalente a la centésima parte de la distancia que existiera entre ella y el lugar en que debería concentrar los rayos del sol, es decir, un espejo que no guardase la misma proporción con tal distancia que la que guarda el diámetro del sol con la distancia existente entre él y nosotros, aunque fuese pulido por la mano de un ángel, no puede causar que los rayos que concentra produzcan más calor sobre el punto en el que los reúne que aquellos que provienen directamente del sol. Lo cual debe ser igualmente entendido de los vidrios comburentes. Por tanto, puede afirmarse que los que no entienden de Óptica son fácilmente persuadidos de afirmaciones, que son imposibles. Así, esos vidrios de los que se cuenta sirvieron a Arquímedes para incendiar a distancia los navíos, o bien eran de inmensas proporciones o más bien una fábula» (16).

W.E.K. Middleton y D.L. Simms han indicado que el escepticismo de Descartes motivó la pérdida de credibilidad en el mito (17), pero las investigaciones no se paralizaron. En *Ars magna lucis et umbrae* (1646), A. Kircher afirma haber viajado hasta Siracusa para estudiar el problema. La topografía del lugar, y la capacidad de un espejo cóncavo factible por la industria humana habrían hecho necesario que las galeras romanas no se encontraran situadas más allá de los 30 pasos del espejo (18). Resulta mucho más eficiente utilizar un número elevado de espejos planos. El propio Kircher pretende haber realizado en Roma una experiencia que muestra la bondad, y la eficacia de este dispositivo: sobre un muro curvo, y a intervalos regulares, se dispusieron cinco espejos que produjeron fuego a 100 pies (32,4 m). Incrementando el número de espejos se podría aumentar la distancia de ignición. Esta será precisamente la piedra angular del espejo compuesto de Buffon con la diferencia que las experiencias del sabio francés, fundadas no sólo en razones geométricas sino también físicas, ofrecen mayor credibilidad que la de los Porta, Cavalieri, y Kircher.

2. Lentes y espejos ustorios como instrumentos de análisis químico en la Academia de Ciencias de París durante el s. XVIII

Los aspectos puramente geométricos en el diseño y construcción de espejos y lentes ustorios se mezclan en la ciencia del s. XVIII con investigaciones físicas sobre la naturaleza del flujo luminoso y la estructura de los metales que constituyen el espejo. Así, por ejemplo, Musschenbroek

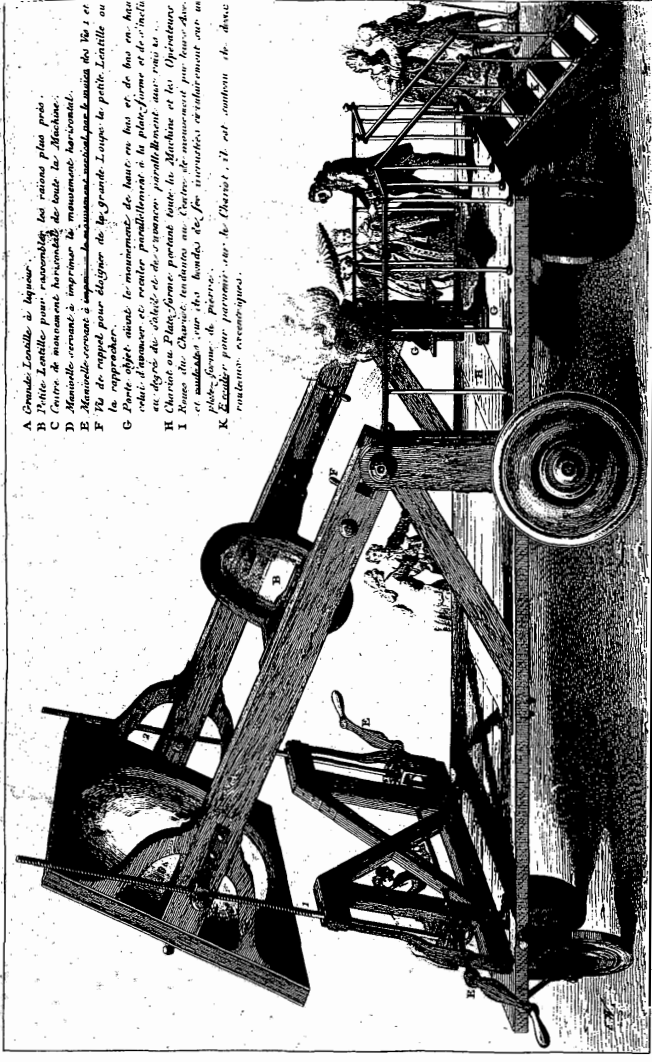
piensa que los espejos metálicos reflejan mejor la luz cuando están fríos que cuando están calientes, y por ello queman mejor en invierno que en verano. La razón reside en que los poros del metal caliente son más grandes que los del metal frío, y la materia del fuego penetra con mayor facilidad los poros cuanto más abiertos están. Además los corpúsculos del metal caliente son menos elásticos, y reflejan peor los corpúsculos luminosos que las partes elementales del metal frío (19).

Este tipo de consideraciones son tenidas en cuenta en las experiencias realizadas con espejos en el s. XVIII y establecen un límite a su poder quemante. Los espejos y las lentes ustorios funcionaron en los gabinetes químicos del s. XVIII como instrumentos científicos claves para el análisis químico de las diversas sustancias, especialmente de los metales y el diamante en la medida en que los hornos no proporcionaban el suficiente calor para fundir, y volatilizar todas las sustancias conocidas. Estas herramientas ópticas permitieron, por ejemplo, demostrar que ningún metal es «fijo», es decir, ninguno resiste la acción del fuego solar sin volatilizarse (20). Los instrumentos utilizados a este fin fueron diseñados conforme al modelo de lente ustoria de Ehrenfried Walther Tschirnhaus, científico autodidacta y miembro de la Academia de Ciencias de París desde 1682. Su diseño llegó a la Academia en 1699, y consiste básicamente en un sistema integrado por dos lentes biconvexas de diferente tamaño dispuestas paralelamente (21). La distancia focal de la primera lente es de 12 pies (3,88 m), y el diámetro del foco es de 1,5 pulgadas (4 cm). El añadido de una segunda lente permite disminuir la distancia focal del conjunto, y el diámetro del foco a 8 líneas (1,8 cm). El fuego solar debe incidir perpendicularmente a ambas lentes, lo cual se conocerá cuando la imagen del Sol proporcionada por el instrumento sea perfectamente redonda. Las lentes deben situarse sobre un pie que permita el giro en todos los sentidos para poder cambiar la orientación de las lentes en función de los cambios en la posición del disco solar. En este sistema óptico la concentración de los rayos en el foco no es ni puntual ni homogénea: aumenta con la proximidad al eje de la lente (22).

Este tipo de lente es el que utilizó Wilhelm Homberg en su análisis químico de los metales, dados los problemas que presentaban los espejos cóncavos. El principal inconveniente de los espejos cóncavos con respecto de las lentes biconvexas en cuanto instrumentos ustorios radica en que, a diferencia de éstas, exigen que la muestra que se desea analizar deba ser suspendida en el aire a una cierta altura sin poder ser sostenida por ningún recipiente. La razón es que los rayos deben incidir paralelos al eje del

espejo lo que obliga a orientarlo según la dirección que conduce hacia el disco solar. Esto dificulta naturalmente su observación. Las lentes son más cómodas pues los rayos refractados se proyectan de arriba hacia abajo, lo que permite situar la muestra analizada sobre un soporte o en un recipiente fácil de observar (23). El oro y la plata emplazados en el foco de la lente se funden hasta vitrificarse. Los metales nobles que en los hornos ordinarios no consiguen ser fundidos, humean y se vitrifican bajo la acción de los rayos solares concentrados por la lente. Homberg no atribuye esta diferencia a las bondades del artilugio de Tschirnhaus sino a las diferencias entre el fuego solar y el fuego ordinario (24): el fuego solar se compone de partículas más sutiles, de menor grosor que penetran con mayor facilidad los poros del oro y de la plata que el fuego de los hornos contaminado por las impurezas del aceite de la madera. Experiencias paralelas serán realizadas con el hierro (25), resultando en todos los casos una sustancia vitrosa y «fija» —no susceptible de análisis ulterior mediante el aire y el fuego— que será identificada como derivada del elemento tierra de la tradición aristotélica. El metal se compone de mercurio, sustancia característica del estado metálico, que se volatiliza durante la exposición de la muestra a la acción de la lente, y de una materia terrosa más ligera (26). Etienne François Geoffroy repetirá en 1709 experiencias similares con los cuatro metales imperfectos —hierro, cobre, estaño y plomo— concluyendo algo parecido: los metales se componen de una sustancia oleosa o mercurial, común a los cuatro metales imperfectos, y causa de su brillo, y maleabilidad. Es la materia vitrificable la que es característica y distintiva de cada metal (27).

El modelo de lente ustoria de Tschirnhaus será también utilizado en las experiencias de volatilización del diamante de Lavoisier en 1772: el diamante se volatiliza, con menor calor que el requerido para volatilizar el carbón, y produciendo un gas similar al de las efervescencias metálicas (28). En 1774 Trudaine introduce una modificación buscando un instrumento de mayor potencia que funda el platino. Corta sendas fracciones de una esfera de cristal hueca de 16 pies (5,2 m) con un cristal de 8 líneas (1,8 cm) de espesor (29) (véase la ilustración 3) con el fin de fabricar una lente biconvexa (A) de 52 pulgadas (1,4 m) de diámetro que se rellena con «espíritu de vino» —alcohol— de mayor índice de refracción que el aire. Las dos fracciones rellenas de «espíritu de vino» son unidas por un bisel, y abrazadas por círculos de cobre. La segunda lente (B) de vidrio sólido posee un diámetro de 8,5 pulgadas (21,6 cm), y se sitúa a 8 pies y 7 pulgadas (278,1 cm) de la primera. El foco formado en el portaobjetos orienta-



- A Grande Lente à l'usage...
- B Petite Lente pour...
- C Manivelle...
- D Manivelle...
- E Manivelle...
- F To de rapet pour...
- G Point d'appui...
- H Charriot...
- I et J...
- K...

DESSEIN en Perspective d'une Grande Pompe formée par 3 Glaces de 53 po de diam. chacune vendus à Mr. de Trudaine par M. de Valenciennes et M. de Valenciennes et M. de Valenciennes et M. de Valenciennes...
 par son fils Louis et son neveu Jean-Baptiste, Charpentier.

ILUSTRACIÓN 3

Lente de Trudaine, 1774 (A. de LAVOISIER, Oeuvres III, 1863, pl. IX)

ble G posee 8 líneas (1,8 cm) de diámetro. El conjunto es montado sobre un carro construido por Mr. Bernières, carpintero y mecánico de la Academia, de forma que es posible orientar la lente para seguir al sol en sus diferentes posiciones. Una manivela (E) permite seguir al sol en su movimiento vertical, y otra (F) hace posible regular la distancia entre las dos lentes. Un conjunto de ruedas (I) permite que el instrumento gire en torno al apoyo C.

También fueron utilizados un espejo y una lente ustorios por J. Priestley en sus trabajos sobre la calcinación del óxido de mercurio para obtener «aire flogisticado» —oxígeno—, en el que se facilitaba la combustión. Al igual que Homberg, Priestley señala que la lente es preferible al espejo en la medida en que no es necesario suspender la muestra en el aire (30). En sus primeras experiencias utilizó un espejo pero luego consiguió una lente de 12 pulgadas de diámetro (32,4 cm) y 20 pulgadas (54 cm) de distancia focal.

3. *El espejo compuesto de Buffon*

El interés instrumental de los espejos ustorios para la ciencia pudo plantear la necesidad de optimizar su uso. En 1726 Charles-François de Cisternai Dufay comunicaba a la Academia los resultados de sus investigaciones al respecto retomándolas donde las habían dejado Cavalieri y otros, pero esta vez consciente de que la Física puede traicionar los razonamientos geométricos (31): la luz pierde fuerza con la reflexión, la refracción o por acción del humo; no se propaga sin debilitarse hasta el infinito como habían supuesto los magos italianos. Inicialmente construyó espejos de yeso parabólicos, dorados y bruñidos pero posteriormente observó que los espejos semiesféricos son más fáciles de construir. La única diferencia, en cuanto a lo que al poder ustorio se refiere, es que mientras que los espejos parabólicos poseen un foco puntual, los semiesféricos poseen como foco una superficie cáustica (32). Esto no resta poder ustorio al foco del espejo semiesférico siempre que el foco cáustico sea menor que la muestra.

El primer ensayo de Dufay intenta dar solución al principal problema que planteaban los espejos cóncavos como herramientas ustorias: si se utiliza luz solar el espejo debe ser orientado hacia el Sol, y por ello, la muestra debe situarse en alto —entre el espejo y el Sol— lo que complica

su observación. Por esta razón, Dufay emplea un dispositivo compuesto por dos espejos semiesféricos que aprovecha el calor del fuego (véase la ilustración 4): coloca dos espejos esféricos de 20 y 17 pulgadas de diámetro respectivamente (54 y 46 cm) frente a frente a una distancia de 50 pies (unos 16 m), y sitúa en el foco de uno de ellos un carbón encendido avivado por un fuelle. Los rayos que, procedentes del fuego, son proyectados sobre uno de los espejos son reflejados paralelamente hacia el segundo incidiendo en su foco donde se encuentra la muestra que entra en combustión. Con espejos parabólicos de dimensiones similares se consigue el mismo efecto a 18 pies (unos 6 m), lo que avala la mayor efectividad de los espejos semiesféricos (33). Dufay estudia el efecto de:

- la interposición de una lámina de cristal: disminuye la acción ustoria de 18 a 8 pies (2,6 m). Esto se debe a que los rayos del fuego ordinario son en extremo groseros.
- el viento no influye sobre la acción ustoria.
- el humo de la paja quemada disminuye también la acción ustoria.

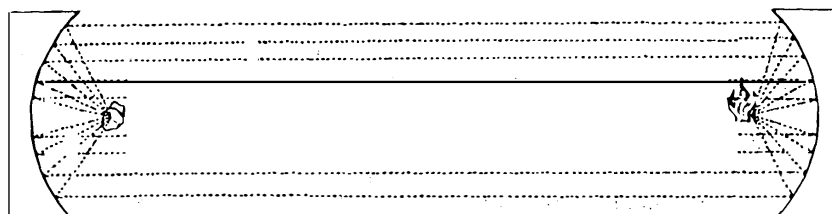


ILUSTRACIÓN 4
Sistema de dos espejos cóncavos (DUFAY, 1726)

Con un cierto escepticismo repite la experiencia de Cavalieri en busca de la *verga ustoria* tanto con un sistema compuesto por un espejo parabólico que refleja sus rayos sobre un espejo convexo y sólido (véase la ilustración 2), como con otro integrado por un espejo parabólico, y otro parabólico truncado. En el primer caso la experiencia fracasa: el pequeño espejo convexo se calienta demasiado, y daña a la vista; con el segundo sistema, este inconveniente se supera en la medida en que los rayos solares que inciden paralelos sobre un espejo cóncavo se concentran en el espacio vacío contenido en el espejo parabólico truncado para ser luego reflejados paralelamente en su superficie interior. No se consigue un calor considerable más allá de los 10 pies (3,2 m). Lo más significativo de estas experiencias es que Dufay no utiliza directamente la luz del sol, sino que previamente la refleja sobre un espejo plano reparando en la gran distancia a la que la imagen del sol puede ser reenviada. La imagen del sol reenviada por un espejo plano a otro cóncavo de 17 pulgadas (46 cm) de diámetro permite que éste quemara incluso cuando la distancia entre ambos espejos sea de 600 pies (194 m). La fuerza de los rayos solares es poco disminuida por la reflexión en un espejo plano. No obstante, la distancia real a la que los espejos cóncavos queman hace fabulosa la leyenda de Arquímedes. Dufay sólo utiliza espejos planos para reflejar la luz sobre un espejo cóncavo pero conocía los trabajos de Kircher quemando con un conjunto de espejos planos (34). El empleo de espejos planos para reflejar la luz solar sobre espejos cóncavos facilita el uso de éstos como herramientas científicas. El siguiente paso será prescindir de los espejos cóncavos para construir un espejo compuesto solamente de espejos planos, mérito del historiador natural Buffon.

No cabe duda que cuando Buffon hizo público en la Academia de Ciencias su modelo de espejo compuesto conocía los trabajos de Kircher, y de Dufay, en contra de lo que pensó Montucla (35). El naturalista francés sabía que no se puede quemar con espejos cóncavos factibles por la industria humana más allá de 15 ó 20 pies (4,8 ó 6,5 m) (36). Comprueba que el cristal estañado refleja mejor la luz solar que el metal por bien pulido que esté, y algo que Dufay ya había constatado: la imagen solar conserva su fuerza a una distancia de hasta 300 pies (97 m) sin perder fuerza por el espesor del aire que atraviesa. Pero el principal argumento de Buffon en contra de la utilidad de los espejos cóncavos es que el disco solar ocupa una apertura angular finita de 32', es decir, los rayos procedentes del borde superior e inferior del sol al reflejarse formaran un ángulo de 32' que provocará que la imagen solar aumente de tamaño con la distancia. El de-

bilitamiento de la luz con la distancia no se debe a la pérdida de fuerza de los rayos al atravesar el aire sino a esta apertura angular. El diámetro del foco de un espejo cóncavo no puede ser menor que la cuerda del arco correspondiente al ángulo de $32'$ y no se gana nada con respecto a un espejo plano, siendo éstos de factura más sencilla. La solución, la que adoptaría Arquímedes, está en la composición de espejos planos. Puesto que los antiguos ignoraban el arte de colar el vidrio, indica Buffon, de ser cierta la leyenda de Arquímedes, éste tuvo que utilizar un conjunto amplio de espejos planos de metal pulido.

La segunda asunción teórica básica en la construcción del espejo es que para una misma intensidad luminosa los focos grandes queman más y mejor que los focos pequeños. Descartes asumió erróneamente que la intensidad del foco es independiente de la talla del espejo (37), es decir, si dos espejos poseen la misma curvatura poseerán un foco del mismo diámetro, pero la intensidad será distinta. Esta asunción es verificada por la experiencia. Eligió para ello sendos espejos: uno de 32 pulgadas (86,4 cm) de diámetro, foco de 8 líneas (1,8 cm), y distancia focal de 6 pies (1,94 m); el otro de 32 líneas (7,2 cm) de diámetro, foco de $2/3$ de línea (0,5 cm), y distancia focal de 6 pulgadas (16,2 cm). La intensidad de los rayos concentrados es la misma con ambos espejos, pero el primero funde el cobre y el segundo no. La razón aducida por Buffon es que el calor se dispersa y se extiende por el volumen del metal. En el caso de un foco pequeño hay menos puntos irradiando, y se pierde más calor que en un foco grande donde hay más puntos difundiendo calor. Este argumento revela que no es del todo cierta la tesis de Middleton de que nadie en el siglo XVIII pensaba en términos de calor radiante (38). El calor no es debilitado por su propagación en el aire, pero sí hay una pérdida cuando se difunde en un metal.

Estos son los supuestos teóricos sobre los cuales Buffon se apoyó en su proyecto de espejo compuesto. El modelo inicial se componía de 168 espejos planos de cristal estañado de 6 por 8 pulgadas (16,2 por 21,6 cm) alejados unos de otros alrededor de 4 líneas (0,9 cm) para que pudieran moverse en todos los sentidos e independientemente, y permitan al operario ver el lugar al que deben ser conducidas las imágenes para poder quemar a diferentes distancias. Es necesaria media hora para disponer todos los espejos unidad haciendo coincidir todas las imágenes en el mismo punto. Las experiencias con este espejo serían realizadas en el Jardin du Roi sobre un terreno horizontal razón por la cual los espejos unidad son rectangulares y no cuadrados, para que al inclinarlos las imágenes del sol reflejadas sean

redondas y no oblongas. En las experiencias realizadas se fue incrementando el número de espejos unidad intervinientes, y sus resultados se recogen en la tabla siguiente:

<i>Hora</i>	<i>N.º de espejos</i>	<i>Distancia focal</i>	<i>Muestra</i>
Mediodía (23-III-1747)	40	66 pies (21,4 m)	plancha de madera embreada
14 h. (23-III-1747)	98	126 pies (40,8 m)	plancha de madera embreada
16 h. (3-IV-1747)	112	138 pies (44,7 m)	plancha cubierta de lana
11 h. (4-IV-1747)	154	150 pies (48,6 m)	plancha de madera embreada
15 h. (5-IV-1747)	154	150 pies (48,6 m)	trozos de abeto azufrados
4 h. (10-IV-1747)	128	150 pies (48,6 m)	plancha de madera embreada
11-IV-1747	45	20 pies (6,5 m)	trozo de estaño
11-IV-1747	117	20 pies (6,5 m)	trozos de plata

Buffon no proporciona demasiados detalles de la forma y evolución de la combustión de las diferentes muestras, lo que no ha sido obstáculo para que alguna de sus experiencias haya intentado ser reconstruida (39). Aunque el número de ensayos no fue demasiado amplio, Buffon creyó poder concluir que la capacidad ustoria del espejo era múltiplo del número de espejos unidad. No obstante, supone un límite establecido por las capacidades de la industria humana. Nunca se podrá quemar más allá de 800 ó

900 pies (260 ó 290 cm), ya que para quemar a una legua (unos 4 Km) sería necesario un espejo 2.000 veces mayor que el de Buffon. Fundándose en el testimonio de Tzetzes, y en sus propias experiencias, Buffon piensa que Arquímedes pudo quemar con un espejo hexagonal combinado con un conjunto de pequeños espejos planos movibles mediante pequeñas charnelas que dirigirían sus imágenes hacia el foco del espejo hexagonal. La distancia alcanzada no podría haber sido superior a 150 ó 200 pies (48,6 ó 64,8 m).

El año siguiente Buffon hizo pública otra memoria en la que daba continuidad a sus investigaciones sobre los espejos. Esta vez amplía el número de los espejos unidad hasta 360 (véase la ilustración 5), pero los hace cuadrados, y no rectangulares, violando la suposición que había avanzado

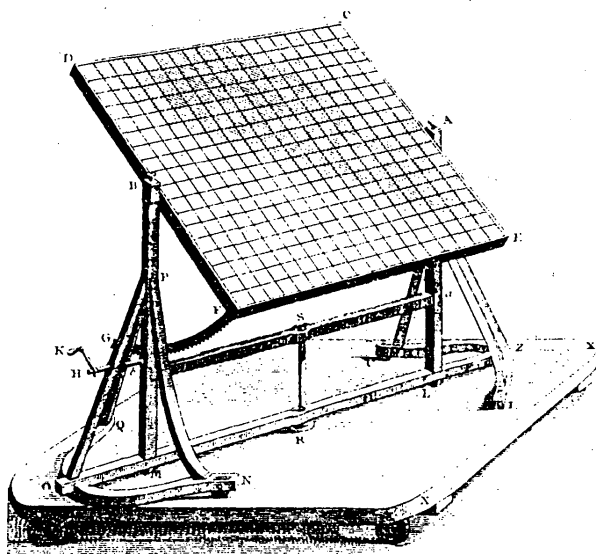


ILUSTRACIÓN 5

Espejo compuesto de Buffon sobre chasis de hierro (BUFFON, *Histoire naturelle. Supplément I*, 1774, plancha VIII)

en las investigaciones del año anterior (40). En esta memoria presenta otros modelos, por ejemplo, una lente hueca rellena de agua, que quizás pudo inspirar a Trudaine (véase la ilustración 3), a partir de dos cristales de 37 pulgadas (1 m) de diámetro, con un orificio en su zenit para que en caso de que el agua se caliente demasiado y se vaporice no provoque el estallido de la lente. También propone la construcción de lentes «à echelons», es decir, lentes talladas rebajando su anchura a modo de escalones, de forma que disminuye su espesor sin disminuir su diámetro ni alargar su foco.

En 1774 Buffon expone sus investigaciones sobre los espejos ustorios de forma sistemática en el primer volumen del *Suplemento a la Historia natural* indicando que tras la comunicación de sus trabajos a la Academia en 1747, Bouguer y otros objetaron contra su espejo remitiéndose a la doctrina cartesiana de la *Dióptrica* (41). Descartes rechazó la posibilidad del espejo de Arquímedes ya que la violencia del calor producido en el foco debe ser estimada por la relación de tamaño entre el cuerpo que reúne los rayos luminosos y el espacio en el que convergen tras su reflexión. Arquímedes tendría que haber construido un espejo de dimensiones fabulosas para quemar la flota romana, y por ello la línea ustoria de Porta y Cavalieri, propagada hasta el infinito, es una quimera. Buffon le contesta defendiendo algo que en 1747 había rechazado: se puede quemar a una distancia indefinida en la práctica, e infinita en la teoría añadiendo un número cada vez mayor de espejos planos. La línea ustoria es posible. Buffon introduce en la polémica un aspecto ausente en las memorias de 1747 y 1748: la perfección de las lentes no sólo depende de su diámetro, y de su curvatura, sino también de los diámetros de los objetos, y de su intensidad luminosa, de forma que deberían ser empleadas lentes diferentes para realizar observaciones en los distintos planetas. Añade sin justificar, y como pretendido resultado experimental, que los espejos y las lentes poseen el mismo efecto ustorio sea cual sea su distancia al Sol. De esta forma un espejo ardiente quemaría madera igual en Saturno que en la Tierra aunque la distancia de ambos planetas al Sol sea diferente, y en Saturno el calor del Sol sea 100 veces menor.

La principal virtud de su espejo no es, como han malinterpretado los cartesianos, inscribir un conjunto de planos en una superficie esférica, sino en que resulta igual, a una cierta distancia, quemar con espejos planos que quemar con espejos cóncavos, ya que en ambos casos la imagen del Sol no puede ser reducida a la cuerda del arco que subtiende el disco solar (32'), y la imagen aumenta de tamaño con la distancia.

4. Las aplicaciones del espejo compuesto de Buffon

El espejo compuesto de Buffon no debe ser contemplado únicamente bajo la óptica de la tradición que investigó y discutió la posibilidad teórica y la factibilidad técnica del espejo de la leyenda del asedio de Siracusa. El naturalista preveía que su invención podría tener gran interés como instrumento científico y útil tecnológico. Sus posibles aplicaciones ya fueron avanzadas en 1747, pero en la *Historia natural* se encuentran recogidas de una forma más detallada (42):

a) El calor del foco podría utilizarse en la evaporación de aguas saladas para obtener sales destinadas bien a la alimentación, bien a la industria. Bastaría para ello disponer un espejo de cuatro pies (1,3 m) de ancho por tres pies (1 m) de largo integrado por 12 espejos planos de un pie cuadrado (32,4 cm x 32,4 cm) con una distancia focal de 16 pies (5 m). Para optimizar la evaporación habría que disminuir el espesor de la capa de agua en la medida de lo posible.

b) Los espejos podrían emplearse para calcinar yesos u otras piedras calcáreas.

c) Los espejos podrían convertirse en arma bélica quemando las velas de los barcos e incluso madera embreada a más de 150 pies (48 m).

d) Pero quizás la aplicación que Buffon considera más prometedora es la de una escala termométrica. El espejo compuesto proporciona una medida exacta y objetiva del calor, pues el calor que se procura en el foco es múltiplo del número de imágenes solares proyectadas, es decir, del número de espejos unidad. Tomando como punto de referencia la temperatura de congelación del agua, la primera graduación se establece colocando el bulbo del termómetro en el foco del espejo. Con el calor que proporciona un solo espejo unidad se marca en el capilar del termómetro la primera división de la escala principal. Proyectando en el foco las imágenes de dos espejos unidad la segunda, y así sucesivamente. Si se emplea como líquido termométrico el mercurio no es conveniente extender las divisiones más allá de 9 ó 12, pues añadiendo más espejos el mercurio se volatiliza. Tampoco es aconsejable llenar el termómetro con espíritu de vino coloreado porque se descompone al cabo de cierto tiempo. Es más adecuado el aceite de lino. Una vez establecidas las divisiones

principales 1, 2, 3, 4... correspondientes a una, dos, tres, cuatro,... imágenes solares se marcarán las partes alícuotas de cada división $1 \frac{1}{4}$, $2 \frac{1}{4}$, $3 \frac{1}{4}$..., $1 \frac{1}{2}$, $2 \frac{1}{2}$, $3 \frac{1}{2}$..., $1 \frac{3}{4}$, $2 \frac{3}{4}$, $3 \frac{3}{4}$..., cubriendo la cuarta parte, la mitad, y las tres cuartas partes de la superficie de los espejos unidad.

Buffon pretende que su método de construcción de termómetros sustituya al de su rival R.F. de Réaumur que hizo público en 1730 (43). Réaumur fabricaba también sus termómetros tomando como punto de referencia un único punto fundamental —el de congelación— y el grado unidad era definido volumétricamente en función de la dilatabilidad del alcohol. Tras determinar como unidad un cierto volumen de alcohol añadía mil unidades volumétricas al bulbo sumergido en un cubo de agua helada. Trazaba entonces la muesca correspondiente a 0° . Al final de esta operación sellaba el tubo. El principal inconveniente de esta escala es que diferentes alcoholes o disoluciones alcohólicas poseen diferentes coeficientes de dilatación, y por lo tanto se hacía necesario definir una disolución estándar. Réaumur sugiere, por ello, que se utilice alcohol que se dilata 80 grados —80 unidades volumétricas— entre la temperatura del hielo, y aquella a la que el alcohol comienza a hervir.

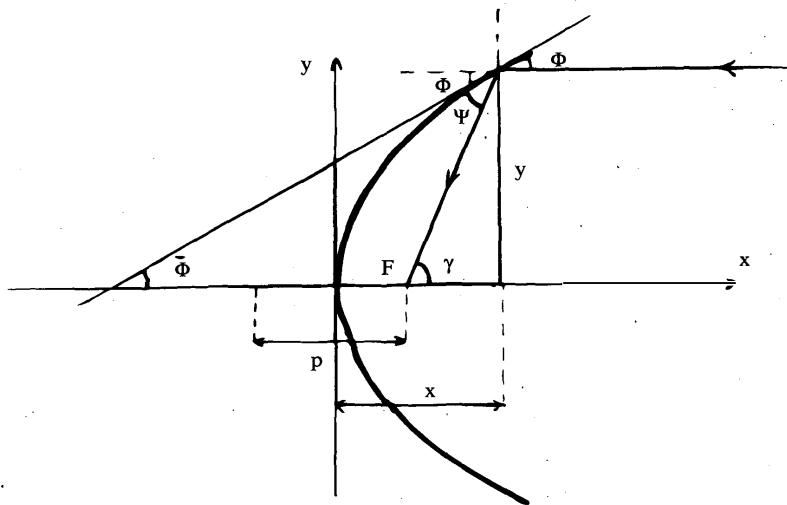
e) El espejo permitirá también volatilizar el oro, la plata y otros metales o minerales, y para recoger las fracciones volátiles a fin de que sean analizadas.

No hay noticia de que el espejo compuesto fuera efectivamente utilizado para estos fines, pero no cabe duda que Buffon, al diseñarlo, no sólo pensó en la leyenda de Siracusa sino también en su virtual potencialidad científica, y tecnológica. El espejo compuesto no es sólo producto de la ubícua curiosidad del célebre naturalista francés, sino también del espíritu empírico, cuantificador y tecnológico de la ciencia de la Ilustración, ausente en las fantasías de los magos italianos del s. XVI. Buffon no sólo construyó su espejo para discutir, fundándose en la experiencia, la plausibilidad de la leyenda de Siracusa sino también previendo las aplicaciones de un nuevo instrumento científico en el análisis químico de los metales, y en calorimetría conectando de esta forma con la tradición instrumental de la Academia de Ciencias francesa del s. XVIII.

NOTAS

(1) Dada la ecuación de una parábola $y^2 = 2px$ el foco es el punto F cuya abcisa es $p/2$ (véase la figura). Es fácilmente deducible que los rayos que incidiendo paralelos al eje de abcisas se reflejan en un elemento de la parábola convergen en su foco. Si diferenciamos la ecuación de la parábola resulta:

$$2y \cdot dy = 2p \cdot dx \quad (1)$$



La pendiente o derivada en un punto dado es entonces:

$$dy/dx = \operatorname{tg}\Phi = p/y \quad (2)$$

La tangente del ángulo γ que forma el rayo reflejado al foco con el eje de abcisas es, según la figura:

$$\operatorname{tg}\gamma = y/(x-p/2) \quad (3)$$

Como la tangente del doble de un ángulo cualquiera es:

$$\operatorname{tg}2a = 2 \operatorname{tga}/(1-\operatorname{tg}^2 a) \quad (4)$$

al aplicar (4) al ángulo Φ y simplificar resulta:

$$\operatorname{tg}2\Phi = \operatorname{tg}\gamma \quad (5)$$

Es decir, $\gamma = 2\Phi$. No resulta difícil ver en la figura que $90-(\Phi + \Psi) = 90-\gamma$, y por tanto, $\Psi = \Phi$. Puesto que la ley de reflexión fundamental enuncia que el ángulo de incidencia es igual al de reflexión se demuestra que todo rayo que incida paralelo al eje de abcisas se reflejará pasando por el foco F. Esta propiedad fue utilizada por Newton en la construcción de telescopios reflectores para concentrar la imagen de los astros, y en la actualidad se emplea en la fabricación de los faros de los automóviles.

- (2) TOOMER, G.J. (1970): «Diocles», en C. C. GILLISPIE (ed.), *Dictionary of Scientific Biography* 15, New York, 1970, p. 116.
- (3) SIMMS, D.L. (1977): «Arquimedes and the Burning Mirrors of Syracuse», *Technology and Culture* 18, 1-24: p. 16.
- (4) MONTUCLA, J.F. (1802): *Histoire des mathématiques III*, París, p. 558.
- (5) SARKAS, I. (1973): *Times*, London, 7 de noviembre. Sarkas dispuso 50 ó 60 marineros a lo largo del Pireo. Cada uno sostenía un espejo pulido de la talla de un escudo griego. Todos dirigieron la luz reflejada hacia un punto común sobre la superficie de un bote de remos. El barco entró en ignición, y continuó ardiendo durante unos minutos.
- (6) DIJKSTERHUIS, E.J. (1938): *Archimedes*, Princeton, 1987, p. 28.
- (7) SIMMS (1977), p. 7.
- (8) BALTRUSAITIS, J. (1988): *El espejo*, Madrid, p. 98.
- (9) ZONARAS (1560): *Croniques II*, Lyon, pp. 88-89.
- (10) TZETZES, J. (1546): *Chiliades II*, Bale.
- (11) AL-HAYTAM I.: «A Treatise on Burning Glasses», en AA.VV. (1969), *Ibn Al-Haytam*, Pakistan, pp. 255-259; p. 255.
- (12) DELLA PORTA, G.B. (1589): *Magiae Naturalis XXI*, Napoles, lib. XVII, caps. 14-17, pp. 271-276
- (13) GALILEI, G. (1638): *Dialogue des sciences nouvelles*, París, 1966, p. 266.
- (14) CAVALIERI, B. (1632): *Lo specchio ustorio o vero trattato della settione coniche*, Bologna, p. 102.
- (15) DESCARTES, R. (1630): *Oeuvres I*, París, 1897-1913, pp. 109-110.
- (16) DESCARTES, R. (1637): *Dióptrica*, Madrid, 1989, pp. 149-150.
- (17) MIDDLETON, W.E.K. (1961): «Archimedes, Kircher, Buffon and the Burning Mirrors», *Isis* 52, 533-543; p. 535. SIMMS (1977), p. 1.
- (18) KIRCHER, A. (1646): *Ars magna lucis et umbrae*, Roma, pp. 874 y ss.
- (19) MUSSCHENBROEK, P. VAN (1769): *Cours de physique expérimentale et mathématique II*, París, p. 399.
- (20) Los químicos entendían por cuerpo fijo aquel que resiste la acción tanto del fuego como del aire sin perder nada de su sustancia. La volatilización es la separación de las partes del cuerpo en forma de vapor [MUSSCHENBROEK (1769), pp. 404-405].
- (21) TSCHIRNHAUS, E.W. (1702): «Effets des Verres Brulans de trois ou quatre pieds de diametre», *Histoire de l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1699*, 90-94.
- (22) El foco de un espejo semiesférico es una cáustica, y origina la conocida aberración de esfericidad, es decir, las zonas del foco más alejadas del eje poseen una distancia focal distinta que las zonas más próximas al mismo. La densidad de los rayos reflejados es mayor en la zona del foco próximo al eje del espejo.
- (23) HOMBERG, W. (1704): «Observations faites par le moyen du verre ardent», *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1702*, 141-149; p. 141.
- (24) HOMBERG, W. (1704), p. 146.
- (25) HOMBERG, W. (1707): «Observations sur le feu au Verre Ardent», *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1706*, 158-165.
- (26) HOMBERG, W. (1708): «Eclaircissement touchant la vitrification de l'or au verre ardent», *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1707*, 40-48; p. 43.

- (27) GEOFFROY, E.W. (1711): «Experiences sur les metaux faites avec le Verre ardent du Palais Royal», *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1709*, 162-176; pp. 175-176.
- (28) LAVOISIER, A. DE (1775): «Second Mémoire sur la Destruction du diamant au grand Verre brûlant de Tschirnhaus, connu sous le nom de Lentille du Palais Royal», *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1772*, 591-616.
- (29) TRUDAINE DE MONTIGNY, MACQUER, CADET, LAVOISIER Y BRISSON (1778): «Premier Essai du Grand Verre Ardent de M. Trudaine, établi au Jardin de l'Infante au commencement du mois d'Octobre de l'année 1774», *Mémoires de l'Académie des Sciences pour l'année 1774*, 62-72; p. 64.
- (30) PRIESTLEY, J. (1790): *Experiments and Observations on Different Kinds of Air II*, Birmingham, pp. 105-106.
- (31) DUFAY, CH.F. (1753): *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1726*, 165-174.
- (32) Véase la nota 22.
- (33) DUFAY (1753), p. 167.
- (34) DUFAY (1752), p. 174.
- (35) MONTUCLA (1802), p. 506.
- (36) BUFFON, CONDE DE (1752): «Invention de miroirs ardents pour bruler à une grande distance», *Mémoires de l'Académie Royale de Sciences pour l'Année 1747*, 82-101; p. 83.
- (37) DESCARTES (1637), p. 133.
- (38) MIDDLETON (1961), p. 541.
- (39) Middleton intentó reproducir una de estas experiencias suponiendo un espejo compuesto de 128 espejos planos para quemar a una distancia de 150 pies (48,6 m) una plancha de madera embreada. Asumiendo que el ensayo fue realizado por Buffon el 10 de abril de 1747, Middleton concluyó que teóricamente el artilugio proporcionaría una irradiancia de 0,43 cal/cm², aunque los estudios modernos sobre la ignición de la madera revelan que es necesaria, como media, una irradiancia de 0,6 cal/cm² para quemar planchas de madera de pino, abeto o similar. El alquitrán que recubría la madera no ayudaría a rebajar este valor. Carecemos de la información suficiente para precisar mejor los resultados de esta experiencia. En cualquier caso, Middleton asume que las conclusiones de Buffon son honestas y no exageradas, y que el espejo de Arquímedes es plausible [MIDDLETON (1961), pp. 541-543].
- (40) BUFFON, CONDE DE (1752): «Nouvelle invention de miroirs ardents», *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1748*, 305-312; p. 305.
- (41) BUFFON, CONDE DE (1774): *Histoire naturelle. Supplément I*, París, p. 426.
- (42) BUFFON (1774), pp. 453-461.
- (43) RÉAMUR, R.F. DE (1732): «Règles pour construire des thermometres dont les degrés soient comparables, et qui donnent une idée d'un chaud ou d'un froid qui puissent être rapportés à des mesures connues», *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1730*, pp. 452-507.