

► Las fulguritas: los rayos a tierra petrificados y tubulares

Introducción: los rayos en la mitología y en la vida cotidiana

Los rayos provocan emociones contradictorias, temor y fascinación. Fascinación por su luminosidad deslumbrante y cegadora y temor por su carácter amedrantador y aleatorio.

Aun cuando no se comprendía, la mente colectiva ha tenido consciencia de su poder. Así, para los griegos, el rayo era el arma destructora que utilizaba Zeus para castigar a los mortales. Los romanos dieron características parecidas a Júpiter, venerado como dios de la lluvia, el rayo y el relámpago. Thor, dios del trueno y creador supremo de la mitología escandinava, blandía un martillo mágico llamado "Mjollnir", que representaba el rayo. De este poder divino de la fuerza del rayo queda como vestigio el jueves dedicado a Júpiter, o en inglés, "Thursday", a Thor.

En la vida cotidiana asumimos su rapidez cuando decimos que algo es "más veloz que el rayo" o su capacidad destructiva cuando indicamos "¡que te parta un rayo!". Sabemos que dejan rastro, calcinan árboles, producen ozono y matan a animales y personas. Tenemos nociones de cómo protegernos: en el coche y el avión no nos afectan porque son una jaula de Faraday. No debemos arrimarnos a un árbol ni a un edificio alto sin pararrayos.

También sabemos que al pararrayos lo diseñó Benjamin Franklin, porque un rayo había matado a su hermano. Incluso sabemos que no solamente se producen en las tormentas. Hemos visto cómo en la erupción del volcán islandés Eyjafjallajökull, que produjo problemas en el trá-

fico aéreo europeo, se producían grandes descargas eléctricas junto al cráter en erupción formando maravillosos rayos. Incluso aparecen en grandes incendios forestales si generan suficiente polvo para crear cargas electrostáticas.

Fue de gran impacto social el experimento de Miller donde la energía de los rayos provocaba la síntesis de moléculas orgánicas simples.

Pero hay aspectos más desconocidos, como el rayo de Catatumbo, cerca del lago venezolano de Maracaibo, donde entre 140 y 180 días al año, se producen relámpagos de forma ininterrumpida, casi todos entre nubes. Este evento meteorológico fue declarado Patrimonio Natural de Zulia en 2005 y propuesto para Patrimonio Mundial. Se han presentado evidencias de descargas eléctricas en el planeta Marte, en tormentas de polvo no asociadas a nubes cargadas de afua (Ruf *et al.*, 2009).

En general, tenemos una cultura alrededor de este fenómeno. Solo hay que navegar por internet para apreciar la cantidad de páginas que tratan el tema desde diversos puntos de vista, aunque de lo menos tratado sea lo que acontece cuando un rayo impacta directamente sobre la superficie sólida terrestre. En este artículo vamos a seguir ese rastro: las fulguritas.

¿Qué son las fulguritas?

El término 'fulgurite' fue acuñado por el francés Dominique François Jean Arago en 1821. En inglés, las fulguritas ya se conocían como "lightning tube" ('tubos de rayos') (Fronde, 1962).

En el diccionario de la Real Academia Española, aparece con una sola acepción y con un contenido casi idéntico al original de Arago: "fulgurita". (Del lat. Fulgur, rayo). f. Tubo vitrificado producido por el rayo al penetrar en la tierra fundiendo las sustancias silíceas con que se tropieza". Esta definición, aun siendo válida, queda anticuada.

Según Lozano *et al.*, 2007: "El término fulgurita designa las rocas formadas por la acción de descargas eléctricas atmosféricas sobre un suelo o roca", o "Tubo mineral que se halla en arenas o rocas y que es el resultado de la caída de rayos atmosféricos".

En la actualidad, el término fulgurita se aplica tanto a las rocas fundidas como a los agujeros producidos por rayos en la corteza terrestre.

Breve historia del estudio de las fulguritas

Según el sistema de detección mundial de meteorología, diariamente en la Tierra se producen unas 44.000 tormentas que generan más de ocho millones de rayos (www.int-sl.ad/pdf/rayosycambioclimatico.pdf).

Es decir que si en toda la Tierra se producen ocho millones de rayos en 44.000 tormentas por día, entonces pueden caer en promedio unos 180 rayos por tormenta eléctrica por día.

Estos datos hacen pensar que se debe originar gran cantidad de fulguritas, aunque las que se conservan son muy pocas.

Para la gran mayoría de los autores, siguiendo a Petty (1936), el descubridor de las fulguritas es el pastor alemán David Hermann (1706), aunque algunos abogan

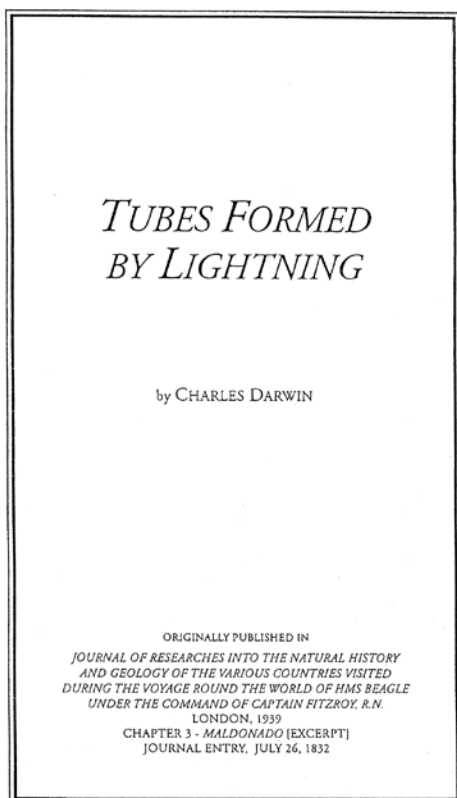


Figura 1. Facsímil del trabajo del geólogo naturalista Charles Darwin citado, como homenaje de parte de los autores de esta nota técnica. [6]

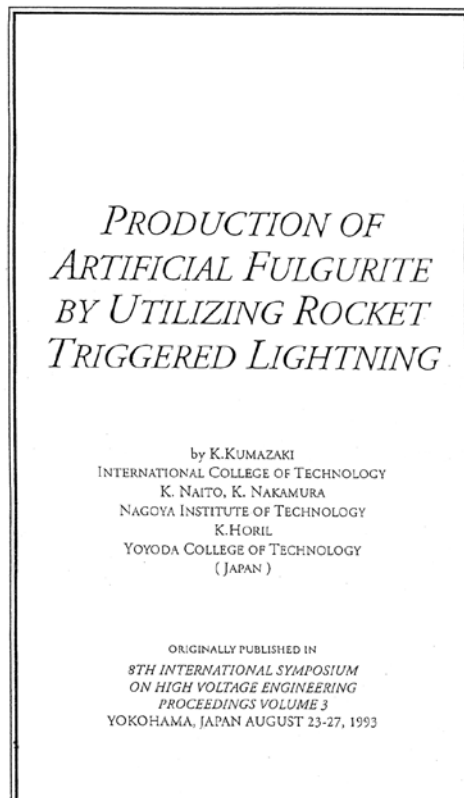


Figura 2. Facsímil del trabajo de los científicos japoneses citados, como reconocimiento de parte de los autores de esta nota técnica. [7] [8]

por el doctor Hentzen como la primera persona que reconoce “tubos de vidrio” como producto del impacto de rayos, en dunas de arena cerca de la ciudad alemana de Padderborn (Gailliot, 1980). La primera publicación en la que se describe de forma precisa una fulgurita se debe a Fiedler (1817), cuando era estudiante en Gottingen.

Hitchcock publicó en 1861 el hallazgo de un tubo de vidrio encontrado por el doctor Cobb en Massachussets: se considera la primera referencia a una fulgurita en Estados Unidos.

William Hallock, de la Universidad de Nueva York, observó la caída de un rayo en agosto de 1900 sobre una montaña cercana al lago Champlain. Informó que en la zona había un pino roto y en las zonas circundantes, incrustaciones blancas en líneas zigzagueantes, que considera una fulgurita.

La historia sobre fulguritas de 1910, escrita por Barrows, representó un hito porque la descripción de los eventos conocidos hasta entonces adjunta una amplia bibliografía.

Publicación pionera sobre petrología de fulguritas fue la de Myers y Peck de 1925, donde describen una fulgurita encontrada en South Amboy (Nueva Jersey, Estados Unidos). Se trataba de una fulgurita producida en un suelo arenoso-arcilloso, con un centro de cuarzo rodeado de un borde de cristobalita y unas manchas negras de óxidos de hierro. Esta descripción ha servido de modelo para publicaciones posteriores. Como curiosidad, al recogerla se les rompió en pedazos; el mayor tenía quince centímetros.

Por la trascendencia del autor, merece una mención especial la descripción realizada por Charles Darwin en el diario del 26 de julio de 1832 de su viaje en el Beagle. Bajo el título “Tubes formes by lightning” (“tubos formados por rayos”), describe tubos de vidrio en unos montículos de arena silíceo cerca de Maldonado, en la ribera del Plata. Utiliza como referencia una publicación del doctor Priestly en 1790, en *The Geological Transactions*, de una fulgurita encontrada en Cumberland. La descripción de

Darwin sobre esas fulguritas, realizada un año después del comienzo del viaje, pone de manifiesto que “la única capacitación formal del joven Charles, aunque breve, era en Geología, y se consideraba a sí mismo -básicamente- un geólogo” (Kings y Kennett, 2010).

En general, las referencias en la literatura a la descripción y génesis de fulguritas son escasas pero, como hemos visto, se conocen desde hace siglos.

Origen de los vidrios naturales en la Tierra

Las fulguritas se forman por una solidificación no cristalina, cuando el fundido (nuestro diminuto magma) provocado por el impacto del rayo se transforma en vidrio (materia no cristalina, sin ordenamiento interno) en respuesta a un rápido sobreenfriamiento. Otros vidrios se originan en fracturas (pseudotaquilitas) o en rocas impactadas por meteoritos (vidrios de shock). Se incluye en la solidificación no cristalina las transformaciones de geles a sólidos amorfos, como de gel de sílice a ópalo (López y Bellos, 2006).

De acuerdo a O'Keef (1984), los vidrios de origen natural son:

- » **Volcánicos**, por enfriamiento rápido de un magma.
- » **De impactos**, fusión y enfriamiento rápido por impacto meteorítico.
- » **Diapléticos**, tectonificación por presión de impacto o choque.
- » **Tectitas**, fusión y mezcla de la zona superficial del bólido al atravesar la atmósfera.
- » **Fulguritas**, fusión por impacto de descargas eléctricas de alta tensión (rayos).
- » **De combustión-metamórfico**, fusión por combustión subterránea de sedimentos orgánicos.

La materia vítrea no solo se forma por enfriamiento súbito sino que se puede producir por destrucción de la estructura cristalina en choques de cuerpos rocosos.

En general, existen tres procesos naturales de formación de vidrio en la Tierra: volcánicos, impactos meteorí-

ticos y caídas de rayos (Lozano *et al.*, 2007). El volcánico forma materiales tipo obsidiana, el meteorítico forma vidrios de brechas de impacto, y la caída de rayos forma las fulguritas. Aunque las fulguritas sean poco abundantes, representan una forma especial de producción de vidrios naturales en la Tierra.

Formación y tipos de fulguritas

La formación de fulguritas depende de la dirección e intensidad del impacto del rayo y de la composición, humedad y textura de la superficie de impacto. Aunque no se ha cuantificado la influencia de estos parámetros (Vavrek *et al.*, 2004) se puede alcanzar la fusión de los sedimentos o rocas en milisegundos a temperaturas mayores de 2000 °C.

Las fulguritas se clasifican en dos grupos: de suelo arenoso (Petty, 1936; Rogers, 1946; Galliot, 1980; Wright, 1998) y de roca dura (Purdom, 1966; Libby, 1986).

Las más frecuentes y conocidas son las producidas en sedimentos arenosos de carácter silíceo en desiertos de arena y dunas litorales, dada la facilidad del rayo para penetrar en materiales no consolidados. Esta tipología de fulguritas suele mostrar una sección circular o elíptica (con o sin hueco central), y una morfología tubular vertical, a veces ramificada, pudiendo llegar a varios metros en casos extraordinarios (ver figuras 3, 4 y 5).

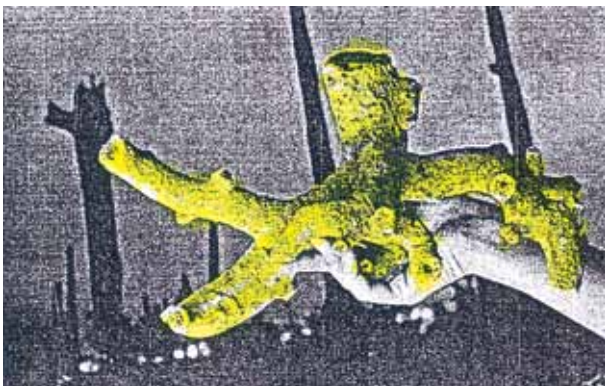


Figura 3. Fulgurita con la típica forma de raíz de árbol. Desierto de Libia. Foto: cienciapopular.com

Las fulguritas de roca dura son tubulares más pequeñas (centímetros) y menos comunes que las anteriores, porque desaparece el vidrio por alteración, aunque suele quedar el hueco. Perforaciones mayores se pueden producir en zonas de debilidad de la roca (diaclasado).

Se han descrito fulguritas no penetrantes en rocas y suelos caracterizados por surcos horizontales donde se produce, a pequeña escala, la fusión del material (Mohling, 2004).

Hay propuestas de nuevas tipologías de fulguritas en suelos arcillosos (Gifford, 1999) y en otros suelos, pero son muy pocas las inventariadas porque la actividad edáfica las altera rápidamente.

El tubo fulgurítico

Ya se ha indicado que las fulguritas más comunes son las producidas en arenas silíceas formando tubos verticales con interior hueco y frágil y exterior poroso (Daly *et al.*, 1993). La morfología del tubo es el reflejo de la trayectoria del rayo cuando penetra en el suelo (Viemeister, 1983). Generalmente, tienen una longitud media de diez centímetros y una sección circular o elíptica más o menos aplanada por la presión de la arena circundante cuando el material fundido está muy caliente y plástico. La cavidad central hueca se debe a la expansión de los gases (figuras 4 y 5).

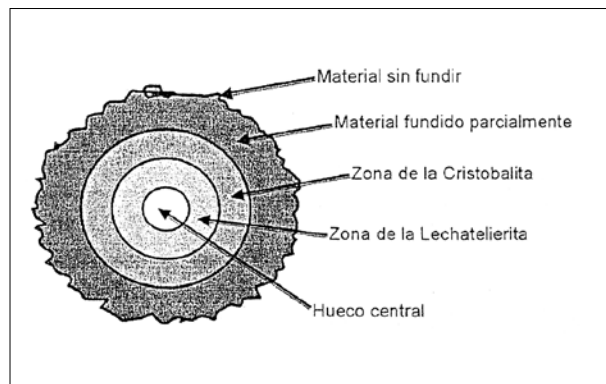


Figura 4. Corte transversal idealizado de una fulgurita silícea. Modificado de Naito y Nakamura (1993a).



Figura 5. Fulgurita tubular con burbujas y ramificación.

Los tubos verticales pueden penetrar metros en la arena, ramificándose al descender. El material vidrioso con vacuolas puede contener granos de cuarzo (dependiendo de la temperatura). Los análisis muestran que la lechatelurita de neoformación es más rica en sílice que los sedimentos o rocas madres debido a que algunos minerales se han disuelto en el vidrio en lugar de fundir directamente en el instante del impacto del rayo. A veces se observan finas hebras de vidrio que se extienden desde la superficie del tubo como si se hubiesen proyectado porciones fundidas hacia el exterior. La temperatura de mezcla para la formación del vidrio debe ser, en el primer instante, entre 1900 y 2700 °C (Essene y Fisher, 1986).

Los granos de cuarzo que no se han fundido totalmente se vuelven muy blancos y semiopacos. Los granos que han tenido contacto con el vidrio muestran, usualmente, una solución parcial. En ocasiones, se observa, al microscopio, una cristalización incipiente, dando pequeños microlitos dentro de la matriz hialina, que se disponen en líneas o haces (Alasia, 2009).

Según el Diccionario de Geología (Tomkeieff, 1983), los tubos silíceos varían de color dependiendo de la composición de la arena en donde se formaron. Se han

encontrado de color negro, grisáceo, amarillo, café, bronce, verde y blanco translúcido. Los negros sin burbujas recuerdan microscópicamente a la obsidiana negra. La parte interna suele presentar un aspecto brillante liso con finas burbujas mientras que la externa es rugosa debido a los fragmentos de minerales o roca que no han llegado a fundir. También las hay con el exterior liso, con surcos y con excrecencias en forma de hilo y/o vesicular. En conjunto tienen apariencia de raíz y a menudo muestran pequeños agujeros (Fron del, 1962).

Composición y minearología de las fulguritas

En la mayoría de las fulguritas conservadas, la composición varía entre el 85 y 99% de dióxido de silicio (Essene y Fisher, 1986). La química global de las fulguritas depende del protolito o material madre que por el impacto del rayo sufre violentos cambios en la presión, temperatura y densidad, provocando mezclas, vaporizaciones, fundidos, transformaciones mineralógicas y deformaciones (Brook *et al.*, 1962; Hill, 1971; Uman y Knider, 1989; Newcott, 1993). La mineralogía de las fulguritas es el reflejo de esas condiciones extremas.

Los principales minerales encontrados en las fulguritas son los polimorfos de la sílice (trimidita, cristobalita) de alta temperatura y baja presión (ver figura 6). La trimidita rómbica o hexagonal suele aparecer maclada y la cristobalita tetragonal o cúbica se presenta en pequeños cristales octaédricos (Dana-Hurlbut, 1960). Rara vez aparecen óxidos de zirconio (Fron del, 1962), grafito, fulerenos (Daly *et al.*, 1993), minerales de hierro, titanio y fósforos (Essene y Fisher, 1986).

Según Deer *et al.*, 1993, el cuarzo pasa a tridimita por encima de los 870 °C y esta a cristobalita, a partir de los 1470 °C. Las altas temperaturas a las que se producen las fulguritas quedan reflejadas por la presencia de esos polimorfos y, a veces, de clinopiroxenos, ya que la clinosta-tita coexiste con la cristobalita a temperaturas de alrededor de 1570 °C (Mysen, 1988).

La vaporización del oxígeno durante el proceso de ebullición proporciona las condiciones idóneas para la génesis de minerales silíceos (Ortiz y Hernández, 1996). Los estudios realizados con microscopios ópticos, microscopía electrónica, análisis de rayos X por difracción y fluorescencia y espectroscopía Raman, revelan que en los minerales silíceos de fulguritas que han experimentado una extrema reducción, los tetraedros de sílice contienen elementos como hierro, aluminio, y otros (Feldman, 1987).

Estos minerales son consecuencia de un proceso de inmiscibilidad entre la fase vítrea y la metálica (Essene y Fisher, 1986), evidenciadas por las exsoluciones de plagioclasas y tridimitas de la parte vítrea y por la forma esferoidal de los agregados metálicos que sugieren desmezcla del líquido metálico a partir del silicatado (Essene y Fisher, 1986).

Otras investigaciones muestran que la minearología de fulguritas de suelos tipo vertisoles con abundante arcilla (montmorillonita), aportan al sílice alúmina, carbonatos y restos de materia orgánica (Detenal, 1982).

Nuestro estudio termoelectrónico de las fulguritas silíceas [tabla 1]

En la bibliografía (7; 8), los científicos japoneses Kumazaki, Naito, Nakamura y Horil detallan la producción artificial de una fulgurita de sílice cilíndrica tubular (tres centímetros de largo y diámetro exterior de un cen-

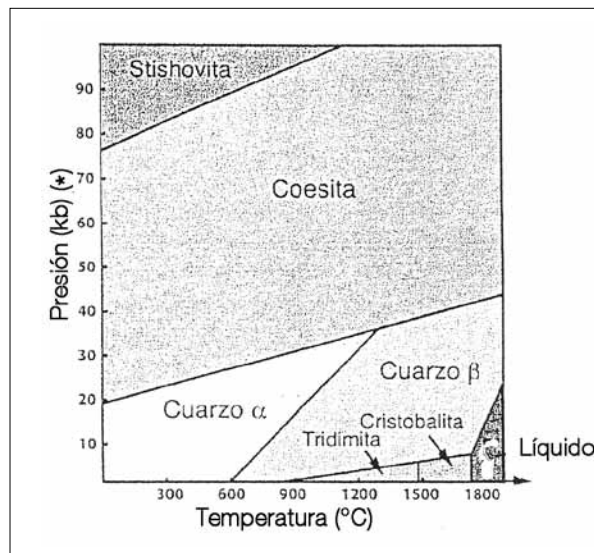


Figura 6. Polimorfos de la sílice. La tridimita y cristobalita son las formas de alta temperatura y baja presión.
* kb: kilobar (1 kb = 100 Mpa).

tímetro e interior de 0,6) mediante la caída de rayos negativos nube-tierra, naturales, captados mediante un cohete captor de rayos, y caídos sobre una línea aérea de media tensión en desuso. [3] [4] [7] [8]

Las corrientes de dos rayos negativos descendentes nube-tierra naturales fueron aplicados sobre una celda bielectrónica con una muestra de arena silícea ribereña, y es de 12 kAc el primer rayo y de 17 el segundo. Tomamos al promedio aritmético de las corrientes (14,5 kAc) como valor más probable en nuestros cálculos energéticos.

Tabla 1. Cuadro de valores numéricos estimados de las fulguritas estudiadas por los autores.

Fulguritas silíceas	Corriente presunta	Energía térmica	Masa estimada	Largo tubular cilíndrico equivalente
	Ip	Wtfe	m	Lc
Unidad	kAc	kJ	g	cm
Artificial japonesa	14,5	4	2	3
Natural uruguayaya	363	2500	1322	160
Valor medio geométrico	72,5	100	51,4	22

Nota: Wtfe es la energía térmica de formación de la fulgurita por fusión y ebullición de la arena silícea.

El investigador Charles Darwin (6), el 26 de julio de 1832, en el cerro de Montevideo (Maldonado, Uruguay), desenterró de la arena ribereña una fulgurita natural tubular silíceo de 1,6 metros de largo y una masa estimada de 1300 gramos de sílice. Con estos datos hicimos nuestros cálculos termoeléctricos.

Representación gráfica de los valores numéricos de la tabla 1

Mediante el análisis de regresión lineal en coordenadas bilogarítmicas, hemos deducido las funciones monómicas $Y = aI_p^b$ de la corriente presunta I_p del rayo negativo nube-tierra (corriente del retorno a la nube de las cargas positivas que fueron inducidas en la superficie terrestre por el rayo negativo descendente nube-tierra). Así elaboramos la tabla 2.

Tabla 2.

Variable Y	Coefficiente a (unidad)	Exponente b
Wtfe	0,0191 kJ	2 (adimensional)
m	0,0091 g	2,017 (adimensional)
Lc	0,11 cm	0,24 (adimensional)

Estas tres funciones $Y = aI_p^b$ se representan en el nomograma de la figura 7, cuya escala vertical que representa los valores de Y se deben leer en las unidades del coeficiente a (es decir, en kilojoules; gramos; centímetros según sea la variable Y de las ordenadas en la escala vertical). Las abscisas están en las unidades (valores numéricos) de la corriente presunta I_p medida en kiloamperes de cresta (kAc). ■

Bibliografía

- (1) Duque Macías, J. (2010), "Fulguritas: observaciones sobre el rayo petrificado", en *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 198-309.
- (2) Arago, D. F. J (1821), "Sur des tubes vitreux que paraissent produits par des coups de foudre" en *Ann. de Chim. et de Phys.*, 19, 290-303.
- (3) Arai, B (1968), "The preliminary experiment of the artificial fulgurite" en *Departmental Bulletin Paper*, Universidad Nacional de Yokohama, 18-24.
- (4) Brook, M., Kitagawa, N. y Warman, E. (1962). "Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground", en *Journal of Geophysical Research*, 67 (2), 649-659.
- (5) Dana, H. (1960), *Manual de minearología*, Reverte, Barcelona.
- (6) Darwin, C. (1832), "Tubes formed by lightning", en *Journal of Researches into the Natural History and Geology of the various countries visited during the voyage around the world of HMS Beagle under the command of Captein Fitz Roy*, Londres, 1939
- (7) Naito, K., Nakamura, K. (1993a), "Fulgurite and its artificial production in laboratory" en actas del 8° *International Symposium on high voltage engineering proceedings*, 3. Yokohama, en http://www.usfcam.usf.edu/cam/exhibitions/1998_12_McCollum/supplemental_didactics/15.VoltArtif.pdf
- (8) Naito, K., Nakamura, K. (1993b), "Production of artificial fulgurite by utilizing rocket triggered lightning" en actas del 8° *International Symposium on high voltage engineering proceedings*, 3. Yokohama, en http://www.usfcam.usf.edu/cam/exhibitions/1998_12_McCollum/supplemental_didactics/16.VoltArtif.pdf

Por Juan Carlos Arcioni, de IRAM,
y Jorge Francisco Giménez, de CITEDEF

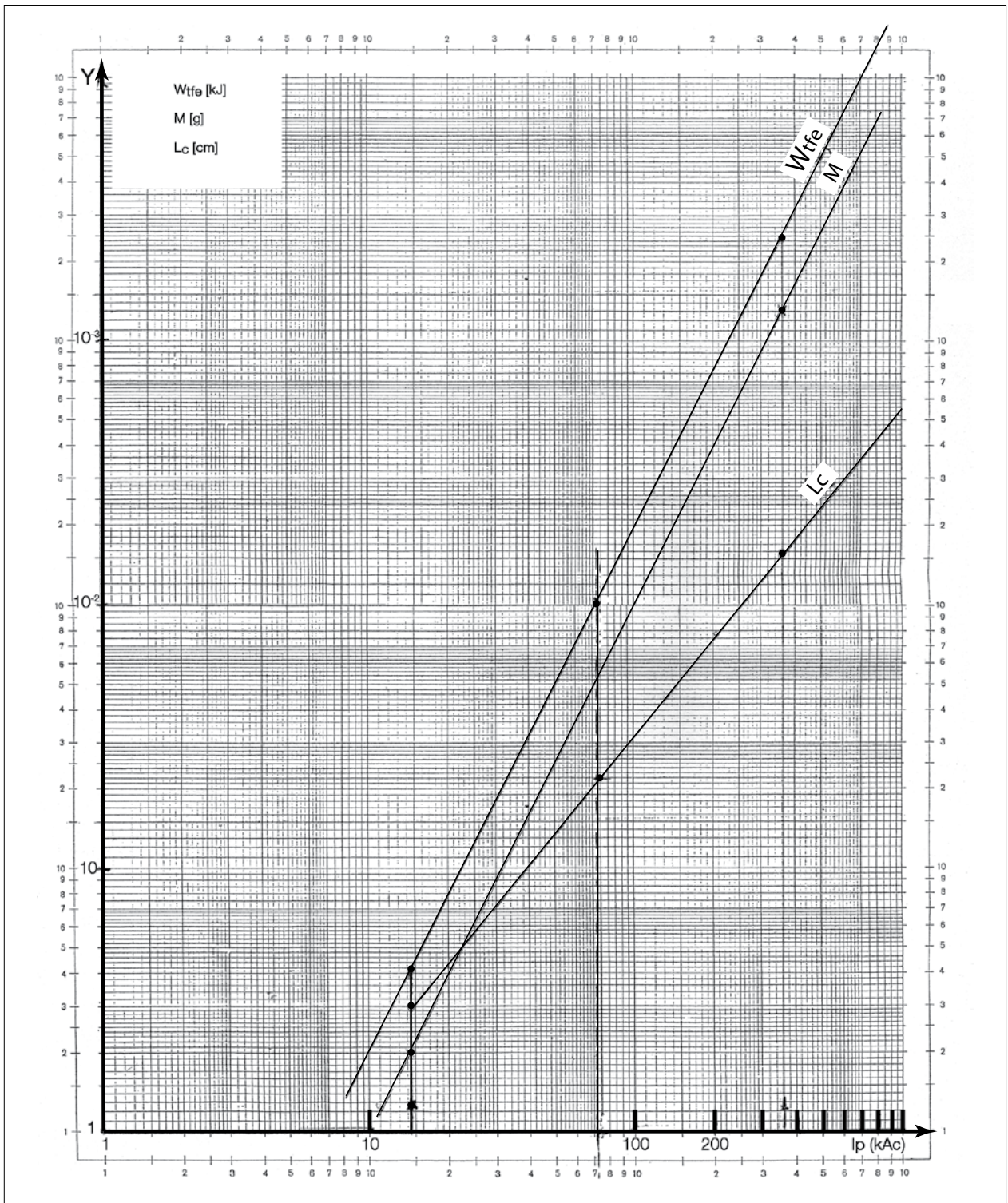


Figura 7. Nomograma de las funciones W_{tfe} , m , L_c de la corriente presunta I_p (kAc) de rayos a tierra formadores de fulguritas síliceas.