PSEUDOFULGURITA EL ROSARIO: UN AGREGADO VÍTREO EXÓTICO EN EL ESTADO DE HIDALGO

Luis Enrique Ortiz Hernández^{1,2} e Israel Hernández Pérez³

¹Consejo de Recursos Minerales, Gerencia de Investigación Aplicada.

Blv. Felipe Ángeles s/n km 93.5 Col. Venta Prieta, C.P. 42080, Pachuca, Hgo.

²Sección de Estudios de Posgrado e Investigación IPN, ESIA-Unidad Zacatenco.

Ed. No. 12, 3er. Piso, Apdo. Postal 75-136, México, D.F.

³Consejo de Recursos Minerales, Gerencia de Geofísica. Blv. Felipe Ángeles

s/n km 93.5 Col. Venta Prieta, C.P. 42080, Pachuca, Hgo.

RESUMEN

Varios fragmentos de pseudofulgurita, siendo el mayor denominado El Rosario de 6.475 kg, encontrados el día 21 de Mayo de 1995, en el Ejido El Rosario, cerca de Tepatepec, estado de Hidalgo. El sitio del hallazgo es un terreno de cultivo ubicado en las coordenadas geográficas 99° 05' de latitud norte y 20° 15' de longitud oeste. Megascópicamente el fragmento estudiado tiene un aspecto vítreo de color verde olivo y brillo resinoso con abundantes oquedades y escasas esferas metálicas gris acero, rodeado por una coraza gris negruzca de aspecto escoriáceo, parcialmente brechada y conteniendo estructuras tubulosas.

El peso específico promedio del agregado vítreo es de 2.548. Su análisis mineralógico muestra que la parte vítrea está formada de un vidrio silicoaluminoso ($n > 1.537$), con estructura brechoide, conteniendo esferas metálicas de silicidos y microcristales subedrales de clinopiroxeno. En la parte escoriácea que recubre la parte vítrea se identificó a polimorfos de la sílice (cuarzo, tridimita, cristobalita) y plagioclasa, así como impregnaciones de portlandita, calcita e hidróxidos de calcio.

Los análisis químicos de roca total muestran un enriquecimiento en componentes refractarios tales como SiO_2 y Al_2O_3 y valores menos importantes de Na_2O , K_2O , CaO , FeO y TiO_2 , que representa la composición química del material arcilloso y limoso del suelo a partir del cual se formó la pseudofulgurita. La evidencia muestra que el origen de ésta se debió a la descarga eléctrica producida por la ruptura de una línea de alta tensión (13,000 volts) que impactó la superficie del terreno de cultivo.

Palabras clave: Pseudofulgurita, caracterización mineralógica, composición química, estado de Hidalgo, México.

ABSTRACT

El Rosario pseudofulgurita (6.475 kg) and other small vitreous fragments, were recovered May 21st, 1995, in Ejido El Rosario, near Tepatepec, Hidalgo state (99° 05' N and 20° 15' S). A brecciated and tubular structure formed by a green siliceous and aluminous glass with $n > 1.537$ and a specific gravity of 2.548 are the characteristics of the biggest fragment. It include gray metallic spheres of silicides, and rare clinopyroxene microcrysts. In the scoriaceous part surrounding the glass, were identified silica polymorphs (quartz, tridimite and cristobalite), plagioclase, portlandite, calcite and calcic hydroxides.

Whole-rock analysis of both glassy and scoriaceous phases show SiO_2 and Al_2O_3 enrichment, and Na_2O , K_2O , CaO , FeO^* and TiO_2 contents that represent the whole chemical composition of the argillaceous and silty precursor soil. El Rosario pseudofulgurite was produced when a broken high-power line (13,000 volts) fell to the ground.

Key Words: Pseudofulgurite, mineralogical characterization, chemical composition, Hidalgo state, Mexico.

INTRODUCCIÓN

Un agregado vítreo de 6.475 kg así como otros fragmentos pequeños vítreos y escoriáceos fueron recuperados el día 25 de Mayo de 1995, en el Ejido El Rosario, Mpio. de Francisco I. Madero, localizado aproximadamente 8 kms al oriente de Tepatepec, en el estado de Hidalgo. El agregado vítreo, que fue considerado por los habitantes del lugar

como un fragmento de meteorito, contrasta notablemente con las formaciones geológicas circundantes constituidas por suelos arcillosos y limosos derivados de la meteorización de tobas ácidas y tobas carbonatadas, por lo que su origen se considera exótico. El sitio del hallazgo fue un terreno de cultivo, propiedad del señor Tomás Zamora Pérez, ubicado en las coordenadas geográficas 99° 05' de latitud norte y 20° 15' de longitud oeste (Fig. 1).

Figura 1.- Mapa de Localización Geográfica mostrando donde se encontró el fragmento Vítreo.

Los autores del presente trabajo acudieron en compañía de funcionarios municipales de Tepatepec y del Ing. Francisco Quijas Cruz, miembro de la Dirección General de Protección Civil del Estado de Hidalgo, ya que los habitantes de El Rosario solicitaron apoyo para detectar posible radiactividad en la zona del supuesto impacto del meteorito. Con objeto de tranquilizar a éstos, se procedió a medir ésta con un espectrómetro de rayos gamma SCINTREX GIS-4, obteniéndose mediciones del orden de 60-80 cuentas por segundo (cps) de cuenta total, lo que es una medida del valor de fondo del material que conforma el terreno (arcillas y limo).

Relata el señor Alfredo Zamora Vázquez, comisariado ejidal de El Rosario, que el día domingo 21 de Mayo, entre las 19:30 a 20:00 horas se encontraba en las afueras de su domicilio en compañía del señor Tomás Zamora Pérez, cuando de repente se percataron que en el sembradío de chiles propiedad de este último, los cables de alta tensión (13,000 volts) que cruzan éste habían sido rotos. Al acercarse al lugar, se percataron que un objeto incandescente yacía semienterrado en la tierra de cultivo, en una cavidad de forma ovalada de 80 X 60 cm y 10 cm de profundidad. Al otro día volvieron al sitio pero no pudieron desenterrar el objeto ya que estaba aún caliente, lo que se extendió al segundo día.

No fue sino hasta que los empleados de la Comisión Federal de Electricidad fueron a reparar los cables de alta tensión, el miércoles 24, que desenterraron el supuesto meteorito y lo trasladaron a sus instalaciones en la ciudad de Tepatepec. Acto seguido, el señor Alfredo Zamora Vázquez recuperó al otro día el fragmento vítreo, a instancias del ciudadano Presidente Municipal de Tepatepec, Lic. Francisco Morelos Fernández, quien se comunicó a la Dirección General de Protección Civil, en Pachuca, procediendo esta última a solicitar apoyo al Consejo de Recursos Minerales en lo tocante a transporte, medición de radiactividad y clasificación y análisis del agregado vítreo.

Los resultados obtenidos en la caracterización mineralógica y química de este agregado vítreo, así como la discusión acerca de su origen, constituyen el objetivo principal de este trabajo.

DESCRIPCIÓN MEGASCÓPICA

El fragmento vítreo mayor tiene una forma elipsoidal y en parte cilíndrica, con longitud aproximada de 35 cms, un aspecto vítreo de color verde olivo y brillo resinoso, rodeado por una coraza (2 a 3 cms de espesor), gris negruzca de aspecto escoriáceo, parcialmente brechada y conteniendo estructuras tubulosas (Fig. 2). La parte vítreo presenta abundantes oquedades parecidas a vesículas en forma de gota de tamaño variable (0.5-3 cms), en ocasiones intercomunicadas por medio de canales y escasas esferas metálicas gris acero de 1 cm hasta 3 cm de diámetro se

Figura 2.- Aspecto general de la pseudofulgurita mostrando las vesículas en la parte vítrea (Vi), la coraza escoriácea brechoide (Es) que la recubre y las estructuras tubulosas (Tb).

observan diseminadas (Fig. 3). En la coraza gris negruzca se reconoció también escasas impregnaciones de un material de color blanco mate.

Otros fragmentos pequeños vítreos de color verde y escoriáceos de color gris negruzco, semejantes a las estruc-

turas tubulosas del fragmento mayor y de la misma composición también fueron encontrados esparcidos en el terreno de cultivo (Figs. 4 y 5).

MÉTODOS ANALÍTICOS UTILIZADOS

Los análisis necesarios para caracterizar química y mineralógicamente el agregado vítreo fueron desarrollados en el Centro Experimental Tecamachalco del Consejo de Recursos Minerales, en la ciudad de México.

Después de efectuar cortes de la parte vítrea, escoriácea de rayos X, con el objeto de identificar las fases mineralógicas presentes. Las muestras fueron analizadas empleando los tubos de cromo y tungsteno, en un difractómetro de rayos X marca RIGAKU. Acto seguido, se envió otra parte vítrea y otra escoriácea para su análisis de roca total mediante fluorescencia de rayos X, utilizándose un espectro-fotómetro de fluorescencia de rayos X marca RIGAKU DENKI. También se realizó la medición del peso específico de la muestra mediante picnómetro al alcohol 150-propílico a temperatura ambiente (24°C) y se estudiaron tres láminas delgadas al microscopio petrográfico. Dos superficies pulidas fueron preparadas para el estudio de la parte metálica a la microsonda electrónica (marca JEOL-JSM-35C) en el Instituto de Geología de la UNAM. Las condiciones analíticas utilizadas para los análisis cuantitativos a la microsonda electrónica fueron 15 kV de potencial de aceleración y 100 nA de intensidad de corriente. Los análisis obtenidos en porcentaje en peso fueron recalculados a 100% con el programa de corrección ZAF (número atómico, absorción y fluorescencia).

Figura 3.- Abundantes vesículas (Vs) y una esfera metálica (M) en la parte vítrea de la pseudofulgurita. Se observa también la coraza escoriácea brechoide (Es) con una impregnación blanca (b) y las estructuras tubulosas.

Figura 4. Fragmentos vitreos de tamaño pequeño que se encontraron esparcidos en el terreno de cultivo. Nótese su aspecto escoriáceo y su abundancia de vesículas.

Figura 5. Uno de los fragmentos vitreos de mayor tamaño, de aspecto escoriáceo y brechamiento característico.

RESULTADOS OBTENIDOS

Dos mediciones del peso específico de la parte vítrea arrojan valores de 2.488 y 2.608, con un peso específico promedio de 2.548. Este peso específico medio es similar a la densidad media reportada para calizas y dolomitas secas (2.54 gr/cm^3) y es mayor al de fulguritas descritas en la literatura (p.e. = 2.20; Frondel, 1962).

Al microscopio de luz transmitida se observa un material incoloro isotrópico, en ocasiones con tonalidades verdosas, el cual se identificó como un vidrio de composición silicoaluminoso ($n > \text{bálsamo} > 1.537$). Este vidrio está relleno en sus partes brechoides por hematita e hidróxidos de hierro, presentando abundantes oquedades y burbujas redondeadas, exsoluciones vermiformes con extinción ondulante de plagioclasa y tridimita, así como raras diseminaciones de microcristales subdrales de clinopiroxeno y esferas con lustre metálico. Dada la rareza y el tamaño tan pequeño de los microcristales de clinopiroxeno ($< 5 \text{ mm.}$) no fue posible determinar su composición exacta.

Por no tener una estructura atómica bien definida, mediante difracción de rayos X no pudieron determinarse los componentes de la parte vítrea, la cual forma un 87% modal de la muestra. En la parte escoriácea se encontraron polimorfos de la sílice (cuarzo, tridimita y cristobalita), así como plagioclasa (Fig. 6), mientras que en las impregnaciones blancas se reconoció la presencia de calcita, portlandita, óxido de calcio y feldespatos (Fig. 7). El análisis por difracción de rayos X de las esferas metálicas incluidas en el vidrio indica que se trata de una aleación refractaria de Fe y Si acompañada de hematita.

Los constituyentes del agregado vítreo en porcentaje modal se muestran en la Tabla 1. Ellos son reportados subdividiéndolos en parte vítrea, escoriácea e impregnaciones blancas.

Químicamente, en la parte vítrea (muestra MET-1A) y escoriácea (muestra MET-1B) del agregado vítreo se constatan contenidos en elementos mayores casi similares, con la excepción del FeO que presenta un contenido mayor en la parte escoriácea, posiblemente debido a condiciones más oxidantes que prevalecieron en esta parte durante la formación del agregado vítreo (Tabla 2). Este agregado está casi en su totalidad formado de SiO_2 , Al_2O_3 y FeO^* , ya que la suma de estos óxidos varía entre 90 y 88% en la parte vítrea y escoriácea respectivamente. La relación Na/Al de ambas partes es inferior a 1, lo que es característico de mezclas silicoaluminosas y vidrios (Mysen, 1988). Comparado con fulguritas reportadas en Australia (Frondel, 1962) y en Michigan, Estados Unidos (Essene y Fisher, 1986), la pseudofulgurita El Rosario es menos rica en sílice pero más rica en alúmina, hierro total y álcalis.

Los resultados del análisis normativo CIPW de las muestras analizadas indican que tanto la parte vítrea como la escoriácea son sobresaturadas en sílice, lo que hace aparecer cuarzo libre en la norma. También la presencia de corindón normativo corrobora el carácter hiperaluminoso del agregado vítreo. Otros minerales normativos son albita, anortita y ortoclasa, que reflejan los contenidos en Na_2O ,

CHARI NO :
VOLTAGE/CURRENT: 45 KV/ 25 MA SHOOTING : 0
SCAN SPEED : 4.000 DEG./MIN. WAVE LENGTH : 1.5406 Å
SAMPLING WIDTH : 0.020 DEG. DATE : 06-02-1995
PRESET TIME : 0.00 SEC.
FILE NAME : METE100
SAMPLE : METESC 1291

Figura 6. Diafractograma correspondiente a la parte escoriácea, mostrando la presencia de polimorfos de la sílice y plagioclasa.

CHARI NO :
VOLTAGE/CURRENT: 45 KV/ 25 MA SHOOTING : 0
SCAN SPEED : 4.000 DEG./MIN. WAVE LENGTH : 1.5406 Å
SAMPLING WIDTH : 0.020 DEG. DATE : 06-02-1995
PRESET TIME : 0.00 SEC.
FILE NAME : METE100
SAMPLE : MET2 1290

Figura 7. Diafractograma correspondiente a las impregnaciones blancas, mostrando presencia de portlandita, calcita, óxido de calcio y feldespato.

CaO y K₂O del agregado. La hematita e ilmenita también aparecen en la norma, lo que es indicativo del enriquecimiento en hierro y contenido en titanio (Tabla 3).

Los análisis cuantitativos a la microsonda electrónica de la fase vítrea y de la fase metálica de la pseudofulgurita corroboran los datos proporcionados por la fluorescencia de rayos X y permiten profundizar éstos. En efecto, se observan cristales fracturados de aleaciones de hierro-silicio

(silícidos), conteniendo exsoluciones lamelares y vermiformes de similar composición (Fig. 8). Estas exsoluciones presentan variaciones significativas en sus contenidos en Fe y Si del borde hacia el centro, con relaciones de 2:1 a 1:1 y trazas de Ti (Tabla 4). También se observan glóbulos metálicos de silícidos enriquecidos en Fe-Ti y de tamaño pequeño (<5 mm) embestidos en vidrio con contenidos en SiO₂ variando entre 61-65% (Fig. 9).

CLASIFICACIÓN Y ORIGEN DEL AGREGADO

De acuerdo con la literatura geológica, las rocas vítreas se forman por enfriamiento súbito o por choque que induce destrucción de la estructura cristalina. De acuerdo a O'Keef (1984), los vidrios de origen natural son de varios tipos, a saber: volcánico, de impacto, diaplético, tectita, fulgurita y combustion-metamórfico. El origen de estos vidrios es resumido en la Tabla 5. Los tres primeros tipos de vidrio han sido

CONSTITUYENTE	COMPOSICION	% EN LA MUESTRA
PARTE VITREA		
Vidrio silicoaluminoso	Si> Al> Ca> Mg> Fe> K> Na> Ti	87
Clinopiroxeno	(Mg, Fe)SiO ₃ -CaMg (SiO ₃) ₂	2
Hidróxidos de Hierro	2Fe ₂ O ₃ · nH ₂ O	0.5
Silícidos	FeSi (Ti)	2
Hematita	Fe ₂ O ₃	0.5
PARTE ESCORIACEA		
Cuarzo	SiO ₂	1
Tridmita	SiO ₂	2
Cristobalita	SiO ₂	2
Plagioclasa	(Ca, Na)Al ₂ Si ₂ O ₈	1
IMPREGNACIONES BLANCAS		
Calcita	CaCO ₃	0.5
Portlandita	Ca(OH) ₂	0.5
Oxido de calcio	CaO	0.5
Feldespatos	NaAlSi ₃ O ₈ -CaAl ₂ SiO ₈	0.5
TOTAL		100

Tabla 1. Composición mineralógica y porcentaje modal de la parte vítrea, escoriácea e impregnaciones blancas de la pseudofulgurita El Rosario.

OXIDOS	MET-1A	MET-1B	AUSTRALIA	MICHIGAN	MICHIGAN
SiO ₂	65.46	64.1	68.46	61.8	68.9
TiO ₂	0.86	1.02	N.D.	0.2	0
Al ₂ O ₃	19.24	19.39	6.88	10.3	0
FeO	5.58	5.23	1.16	1.9	0.2
MnO	0.09	0.09	N.D.	N.D.	0
MgO	1.46	1.46	0.17	1.2	0
CaO	2.32	2.16	0.17	1.8	0
Na ₂ O	2.38	2.31	0.01	1.5	0
K ₂ O	2.15	2.2	2.68	2.4	0
TOTAL	99.63	98.93	99.34	101.1	99.1

Tabla 2. Análisis químicos de roca total (en % en peso) de la parte vítrea (MET-1A) y escoriácea (MET-1B) de la pseudofulgurita El Rosario. A título de comparación la composición química de una fulgurita de Australia (Fronde, 1962) y de fulguritas de Michigan (Essene y Fisher, 1986).

MINERALES NORMATIVOS	MET-1A	MET-1B
q	36.22	35.44
c	8.79	9.47
or	12.7	12.98
ab	20.21	19.54
an	11.44	10.75
ne	-	-
ac	-	-
ns	-	-
wo	-	-
en	3.63	3.63
fs	-	-
mt	-	-
cm	0.04	0.06
hm	4.85	5.02
il	1.66	0.6
tn	-	-
ru	0.09	0.71
ap	-	-
D.I.	69	68
FeO*/FeO*+MgO	0.79	0.78

Tabla 3. Norma CIPW de la parte vítrea (MET-1A) y escoriácea (MET-1B) de la pseudofulgurita El Rosario.

D.I.=Índice de diferenciación.

encontrados tanto en la superficie de la Tierra, como también en la Luna y algunos meteoritos, mientras que los tres restantes están restringidos a cuerpos planetarios con atmósfera.

Las evidencias encontradas en el terreno de cultivo, tales como la presencia de una cavidad de forma ovalada, una línea de alta tensión rota, fragmentos vítreos y escoriáceos

Figura 8. Fotomicrografía obtenida a la microsonda electrónica mostrando una esfera metálica de silicido (M) incluida en vidrio silicico (Vi). Se observan exsoluciones lamelares y vermiculares de Fe-Si y el fracturamiento característico de los cristales. Los números indican la localización de los análisis puntuales.

Figura 9. Fotomicrografía obtenida a la microsonda electrónica mostrando glóbulos de silicidos (M) de tamaño pequeño incluidos en vidrio silicico (Vi). A la izquierda un cristal de silicido (Si) con estrias de pulido. Los números indican la localización de los análisis puntuales.

de composición similar al fragmento mayor, así como las características megascópicas, microscópicas y la composición mineralógica y química del agregado vítreo, son compatibles con las de las fulguritas (Feldman, 1987), los productos terrestres resultantes de rayos impactando la superficie del suelo o rocas. Las fulguritas han sido producidas también artificialmente haciendo pasar una corriente eléctrica a través de arena u otro material, o cuando líneas de alta tensión han sido rotas sobre suelo arenoso. A estos últimos productos se les denomina pseudofulgurita, ya que no fue formada por fusión producida por el efecto de un rayo sino de una simple descarga eléctrica inducida por la ruptura de una línea de alta tensión (13,000 volts de tensión de aceleración; técnicos de la CFE, comunicación oral) impactando la superficie del terreno arcilloso y limoso. Según el Dictionary of Geology (Tomkeieff, 1983), las fulguritas (del latín *fulgur* igual a fundido) son tubos vitrificados de material silíceo fundido producido cuando un rayo impacta la superficie del terreno. Los vidrios son de color blanco grisáceo, café, marrón, oscuro, negro o verdes amarillentos, bulbosos o con protuberancias alargadas, a veces bifurcadas. Su superficie exterior es rugosa con excrescencias en forma de hilo y vesicular. Algunas de ellas libres de oquedades son parecidas megascópicamente a obsidiana negra, aunque la gran

OXIDOS	1	2
SiO2	61.63	65.05
TiO2	0.47	0.25
Al2O3	23.7	22.35
FeO	2.91	1.73
MnO	0.07	0.05
MgO	3.78	3.66
CaO	5.87	5.29
Na2O	0.75	0.69
K2O	0.83	0.92
P2O5	0	0
TOTAL	100	100

ELEMENTO	3	4	5	6	7	8	9	10
Si	34.83	53.69	34.83	54.48	34.82	54.52	54.7	30.84
Fe	65.1	46.3	65.17	45.52	65.13	45.48	45.3	65.41
Ti	0.07	0.01	0	0	0.05	0	0	3.75
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabla 4.- Análisis puntuales a la microsonda electrónica de la fase vitrea y de la fase metálica de la pseudofulgurita expresados en porcentaje en peso. 1 y 2 fase vitrea. 3 a 10 fase metálica. La ubicación de los análisis efectuados se indican en las figuras 8 y 9.

mayoría presentan tubos pequeños de vidrio pasando al interior de la roca. Estas rocas son comunes en arenas de duna del desierto o en planicies costeras. Ellas han sido reportadas por Frondel (1962) como vidrios naturales o artificiales de composición silícica (90-99% de SiO_2), formadas cuando un rayo golpea y mezcla arenas cuarcíferas, rocas o suelo. Un contenido en sílice variando de 85 al 99% ha sido reportado para fulguritas por Essene y Fisher (1986). Debe considerarse, sin embargo, que la composición química global de las fulguritas depende del protolito o del material a partir del cual se formaron estos agregados vítreos.

El impacto de rayos sobre el terreno produce varios efectos inusuales ocasionando cambios abruptos en la presión, temperatura, densidad y velocidad del medio impactado, provocando mezcla, vaporización, fundido y transformación mineralógica o en su defecto fuertes deformaciones de los materiales rocosos (Brook *et al.*, 1962; Hill, 1971; Uman y Knider, 1989; Newcott, 1963). La fulgurita resultante típicamente consiste de vidrio producido por el intenso calor inducido por la descarga eléctrica. Estas rocas son generalmente tubulares, con interior hueco y frágil y exterior poroso (Daly *et al.*, 1993). Las fulguritas contienen fases que requieren altas temperaturas, excediendo en general 1000°C , siendo la temperatura de mezcla antes de la formación del vidrio estimada entre 1900 a 2700°C (Essene y Fisher, 1986), reflejando las condiciones extremas producidas localmente por el rayo. Esto se produce cuando la descarga eléctrica causa que el campo eléctrico rebase el límite de rompimiento del aire adyacente produciendo mezcla y vaporización. Este rompimiento causa una descarga convectiva formada partir del objeto impactado hacia arriba. La energía liberada y los voltajes y temperaturas involucradas son verdaderamente extraordinarias para alcanzar la mezcla de materiales.

Vidrio	Origen
Volcánico	Enfriamiento de magma intrusivo o efusivo/explosivo
Impacto	Fusión termal de blancos sublimados rápidamente enfriados
Diaplético	Isootropización de minerales en estado sólido por choque o impacto
Tectita	Fusión termal de impacto de capas superficiales
Fulgurita	Vaporización de blancos por impacto de rayos
Combustión-Metamórfico	Combustión subterránea de sedimentos orgánicos

Tabla 5. Tipos de vidrios de origen natural (según O'Keefe, 1984).

Los minerales encontrados en las fulguritas son polimorfos de la sílice, rara vez ZrO_2 , mulita ($\text{Si}_2\text{Al}_6\text{O}_{13}$) (Fron del, 1962) y recientemente se ha señalado la presencia de grafito, fullerenos (C_{60} y C_{70} ; Daly *et al.*, 1993), silícidos ($\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x}$), compuestos de hierro, titanio y fósforos (Essene y Fisher, 1986), todos ellos formados a altas temperaturas y bajas presiones.

En rocas terrestres, la presencia de tridimita y cristobalita es común en las cavidades de rocas volcánicas vítreas. Estos minerales se supone se formaron tardíamente por emanaciones de gases calientes actuando sobre la roca aún no del todo solidificada. Según Deer *et al.* (1993), la tridimita se forma arriba de los 870°C y cuando esta se calienta a $\pm 1470^\circ\text{C}$ se transforma en cristobalita. La presencia de estos polimorfos sugiere altas temperaturas alcanzadas por la pseudofulgurita El Rosario. Esta temperatura alta es también sugerida por la presencia de clinopiroxeno, ya que piroxenos del tipo clinoesstatita coexisten con cristobalita a temperaturas de alrededor de 1570°C (Mysen, 1988) y se sabe también que para que la arena se convierta en un vidrio se necesita una temperatura de alrededor de 1370°C . Por otra parte, se sabe que una descarga de 28000 volts de tensión de aceleración afectando un terreno blando y conductor de electricidad, puede producir una temperatura de aproximadamente

Figura 10. Origen de la pseudofulgurita El Rosario.

2500° C (técnicos de la CFE, comunicación oral), lo cual es suficiente para fundir localmente el terreno y producir vaporización.

El hervimiento del agregado vítreo está evidenciado por la abundancia de vesículas y los canales que intercomunican éstas. La vaporización del oxígeno durante el hervimiento proporcionó las condiciones idóneas para el desarrollo de los silicidos.

Estos silicidos, que consisten de tetraedros de sílice ocupados por otros elementos tales como Fe, Al, Ti, B, P, Sn y otros (Feldman, 1987), han sido encontrados en fulguritas que han experimentado una extrema reducción y denotan una inmiscibilidad entre fase vítrea y metálica (Essene y Fisher, 1986). Estas condiciones son sugeridas también por las exsoluciones de plagioclasa y tridimita en la parte vítrea que dan evidencia de inmiscibilidad y también por la forma esferoidal de las esferas metálicas o glóbulos que sugieren desmezcla de líquido metálico a partir de un líquido silicatado (Essene y Fisher, 1986).

La composición química predominante en sílice y alúmina de la pseudofulgurita es un reflejo del material original a partir del cual ésta se formó, que son suelos del tipo Vertisoles pélicos y Feozems con propiedades vérticas con contenidos en arcilla superiores al 35%, contenidos variables en carbonatos (0.5-8%) y bajos en materia orgánica (Detenal, 1982). Este tipo de suelo presenta una composición predominante de arcillas del tipo de la montmorillonita ($\text{Al}_{1.67} \text{Mg}_{0.33} (\text{OH})_2 (\text{Si}_4 \text{O}_{10})_{0.33} \text{Na}_{0.33} (\text{H}_2\text{O})_4$). También se sabe que la composición de las líneas de alta tensión es aluminio, acero, plástico y partes cerámicas. Estos materiales pudieron fundirse con el suelo para dar origen a un agregado vítreo silicoaluminoso con predominio de materiales refractarios.

CONCLUSIONES

La pseudofulgurita El Rosario constituye un fragmento vítreo exótico en el estado de Hidalgo. Sus características sugieren que se formó por mezcla producida por la descarga eléctrica de una línea de alta tensión (13000 volts de tensión de aceleración) con la superficie del terreno de cultivo arcilloso-limoso que indujo vaporización, fundido, transformación mineralógica y solidificación del material impactado. Su peso específico es 2.548. El vidrio refractario que la constituye es de composición silicoaluminosa con $n > 1.537$ conteniendo escasas diseminaciones de clinopiroxeno, así como esferas y glóbulos de silicidos con trazas de titanio. En su parte escoriácea se identificaron polimorfos de la sílice (cuarzo, tridimita y cristobalita) y plagioclasa. La parte vítrea y escoriácea están constituidas esencialmente de refractarios que expresan químicamente su abundancia en SiO_2 ,

Al_2O_3 y FeO^* , y contenidos bajos en Na_2O , CaO , K_2O y TiO_2 . Las impregnaciones blancas formadas de calcita, óxido de calcio, portlandita y feldespatos, sugiere adición de calcio posiblemente suministrado por las raíces de la vegetación existente en el terreno de cultivo o por la carbonatación de las tobas del cual procede el suelo arcilloso y limoso implicado. Se sabe, en efecto, que los productos formados por la silicificación de raíces de plantas están compuestos de carbonato de calcio, limonita y calcedonia (Fronzel, 1962).

Las características similares de la pseudofulgurita y de los fragmentos vítreos y escoriáceos pequeños encontrados en el terreno de cultivo sugieren que estos son fragmentos disgregados del agregado mayor o que ellos fueron formados por el mismo fenómeno que produjo éste.

La pseudofulgurita El Rosario daría evidencia de un origen exótico, aunque terrestre, ya que es completamente ajena a las formaciones geológicas adyacentes y fue formada por procesos poco usuales en la naturaleza (Fig. 10).

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento a las autoridades del Consejo de Recursos Minerales por las facilidades otorgadas para la publicación del presente trabajo. Se agradece asimismo al personal del Centro Experimental Tecamachalco, Ings. Ma. de la Luz Rivas, Alfonso Cruz y Rolando Nieto por el análisis de las muestras, así como también a los Ings. Gregorio Medina García y José Cárdenas Vargas, por su apoyo logístico. Se agradece asimismo a la Bióloga Margarita Reyes Salas del Instituto de Geología de la UNAM por su apoyo en los análisis cuantitativos de la fase metálica y vítrea en la microsonda electrónica.

BIBLIOGRAFIA

- DETENAL, 1982, Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuestos, Dirección de Estudios del Territorio Nacional, 134 p.
- Brook, M., Kitagawa, N. & Warkman, E.J., 1962, Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground. *Journal of Geophysical Research*, v. 67, No. 2, p. 649-659.
- Daly, T.K., Buseck, P.R., Williams, P. & Lewis, C.F., 1993, Fullerenes from a fulgurite. *Science*, v. 259, p. 1599-1601.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1993, An introduction to the rock-forming minerals. Longman Scientific & Technical, 2nd edition, 696 p.
- Essene, E.K. & Fisher, D.C., 1986, Lightning-strike fusion: Extreme reduction and metal-silicate liquid immiscibility. *Science*, v. 236, p. 189-193.

- Feldman, V., 1987, Comparative characteristics of impactite, tektite and fulgurite glasses. In *Second International Conference on Natural Glasses*. Prague, 21-25 september 1987, published by Charles Universitha, Praga, Kanta, J., ed., 435 p.
- Fronzel, C., 1962, Silicaminals, vol 3 Dana's System of Mineralogy, p. 318-329, John Wiley & Sons, New York.
- Hill, R.D., 1971, Channel heating in return-stroke lightning. *Journal of Geophysical Research*, v. 76, No. 3, p. 637-645.
- Mysen, B.O., 1988, Structure and properties of silicate melts. *Developments in Geochemistry 4*, Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Toronto, 354 p.
- Newcott, W.R., 1993, Lightning. Nature's high-voltage spectacle. *National Geographic*, v. 184, No. 1, p. 82-103.
- O' Keef, J.A., 1984, Natural glasses. In *Natural Glasses*, edited by Pye, L.D., O'Keef, J.A. & Fréchette, V.D., North Holland, Amsterdam, p. 1-17.
- Tomkeieff, S.I., 1983, *Dictionary of Petrology*. Edited by Walton, E.K., Randall, B.A.O., Battey, M.H. & Tomkeief, O., John Wiley & Sons Ltd. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 680 p.
- Uman, M.A. & Knider, Ph., E., 1989, Natural and artificially initiated lightning. *Science*, v. 246, No. 4929, p. 457-463.