



0 210456 987450 2

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
INSTITUTO DE GEOLOGIA

DIRECTOR: ING. GUILLERMO P. SALAS

Boletín 79

LOS MINERALES MEXICANOS
5. LIVINGSTONITA

FRANCISCO J. FABREGAT GUINCHARD, DR. C.



MEXICO, D. F.

1966

CLASIF.
ADQUIS.
FECHA.....
PROCED.....

CONTENIDO

INTRODUCCION	VII
SINOPSIS	1
PARTE CRITICA	13
Descubrimiento	18
Nombre	18
Sinónimos	18
Posición sistemática	18
Noticia histórica	20
Ejemplares estudiados	22
Localidades	22
Yacimiento típico	25
Mineralogénesis	26
Paragénesis	27
Aspecto y agregación	27
Hábito	28
Iconografía publicada	28
Formas	28
Goniometría y cristalometría	29
Orientaciones y matrices de transformación	32
Isomorfismo, pseudomorfismo	35
Maclas. Maclas de corrimiento	35
Dureza	36
Tenacidad	36
Exfoliación	36
Fractura	37
Flexibilidad	37
Color	37
Transparencia	38
Brillo	38
Empañadura	38
Alteración	38
Polvo	38
Raya o raspadura	38
Fusibilidad	38
Minerales análogos	39
Propiedades ópticas	
A. En lámina delgada	39
B. En superficie pulida	39

Coefficientes de absorción	40
Ensayos	41
Espectrografía por fluorescencia	42
Análisis químico	42
Fórmula química	47
Densidad	52
Diagnóstico en superficie pulida	53
Reacciones microquímicas	54
Indíces de Barker	54
Indíces de Donnay	55
Cristales artificiales	56
Diagrama de polvo	57
Celda elemental	61
Forma cuadrática	66
Matrices directa M y recíproca M*	69
Grupo espacial	70
Revisión de las intensidades de los reflejos	74
ESTRUCTURA DE LA LIVINGSTONITA	75
Interpretación de la estructura	79
BIBLIOGRAFÍA	83

INDICE DE TABLAS

I. Valores de las coordenadas azimutales, observados y calculados ..	30
II. Coordenadas azimutales calculadas con base en las relaciones paramétricas (1) y (2)	33
III. Coeficientes de absorción	41
IV. Tabla comparativa de los análisis químicos efectuados	44
V. Cuadro que expone las diversas densidades, observadas y calculadas	46
VI. Tabla general de los diagramas de polvo registrados	59
VII. Cuadro comparativo de las relaciones reticulares	65
VIII. Tabla de la forma cuadrática del espectro de polvo	67
IX. Tabla de coordenadas atómicas en la estructura	79
X. Distancias interatómicas calculadas	80

INDICE DE FIGURAS

LÁMINA. Ejemplar de LIVINGSTONITA	15
FIGURA 1. Mapa índice para la localización del yacimiento típico de livingstonita	23
FIGURA 2. Mapa geológico de la localidad típica	24
FIGURA 3. Cristal de livingstonita, según W. E. Richmond (1936)	28

FIGURA 4. Cristal teórico de livingstonita, trazado a partir de su estereograma	29
FIGURA 5. Estereograma de livingstonita según las mediciones de Berman (relación paramétrica 1)	32
FIGURA 6. Estereograma del cristal calculado con base en la relación paramétrica 2	32
FIGURA 7. La cruz axial en la orientación a) Richmond, a - b - c	34
FIGURA 8. La cruz axial en la orientación b) Gorman, a' - b' - c'	34
FIGURA 9. Correspondencia de símbolos en las dos orientaciones	34
FIGURA 10. Espectrograma por fluorescencia	43
FIGURA 11. Comparación de espectros de difracción	48
FIGURA 12. Prueba estadística de la centrosimetría	50
FIGURA 13. El primer mapa de densidad electrónica $\beta(xz)$ calculado por Niizeki y Buerger (1957)	51
FIGURA 14. Estereograma de livingstonita con la orientación de Barker	55
FIGURA 15. Espectrograma por difracción	58
FIGURA 16. Diagrama de polvo	60
FIGURA 17. Esquema comparativo de las diferentes dimensiones y orientación de las celdas elementales consideradas	63
FIGURA 18. Representación del grupo espacial A2/a.	64
FIGURA 19, 20. Redes b* - c* y a* - b* recíprocas con sus reflejos, según los diagramas de precesión correspondientes	72 y 73
FIGURA 21, 22, 23. Redes recíprocas (h0l), (h1l), (h2l), que interpretan los diagramas de equi-inclinación de Weissenberg I[010]	entre págs. 74 y 75
FIGURA 24. Mapa definitivo de la densidad electrónica $\rho(xz)$, proyectado sobre (010), comprendiendo un octavo de celda	75
FIGURA 25. Mapa tridimensional de Patterson, en su primera sección y = 0/60 Niiz. y B., (1957)	76
FIGURA 26. Representación del grupo espacial A2/m.	77
FIGURA 27. Unidad asimétrica de proyección sobre (001) en el mapa definitivo de densidad electrónica $\rho(xy)$...	78
FIGURA 28. Representación esquemática de la estructura en su unidad asimétrica proyectada sobre (010)	80
FIGURA 29. Complejo molecular completo, proyectado sobre (010)	81



0

Introducción

La livingstonita es un mineral descubierto hará pronto un siglo, en México, y no obstante su importancia y valor cardinal en sistemática mineralógica, no citado como existente fuera del país.

Se trata de un mineral prismático, típico del grupo de las sulfosales aciculares que tienen por común su traslación de 4 A en la dirección de elongación, y único conocido de ese conjunto, que tenga mercurio.

Con su descripción inicial muy somera y predominantemente química se mantuvo durante 60 años, hasta que mereció una más directa atención mineralógica y luego el honor de un estudio estructural digno de encomio.

Dadas sus condiciones paragenéticas y lo común de la antimonita, era de suponer se debiera hallar con frecuencia en los yacimientos de ésta, próximos a depósitos de mercurio. Su composición catiónica vislumbra la importancia económica de que pueden ser objeto sus depósitos minerales.



Introducción

El presente es un primer estudio de la importancia y valor científico de la información mineralógica y de minerales en la industria y en el comercio exterior de Chile. Este estudio se realizó por medio de un cuestionario de 20 A en la industria de minerales y de sus derivados en las empresas que producen y comercializan minerales y productos derivados de ellos. En el presente estudio se han considerado los minerales que se utilizan en la industria de minerales y de sus derivados en Chile. Se han considerado los minerales que se utilizan en la industria de minerales y de sus derivados en Chile. Se han considerado los minerales que se utilizan en la industria de minerales y de sus derivados en Chile.

ENVIGSTONITA de Chile Sinopsis

El presente estudio se realizó en el año 1972, en el marco del proyecto de investigación "Mineralogía y Petrología de Chile" financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) con el número de proyecto 1200000.

El estudio se realizó en el marco del proyecto de investigación "Mineralogía y Petrología de Chile" financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) con el número de proyecto 1200000.

El presente estudio se realizó en el año 1972, en el marco del proyecto de investigación "Mineralogía y Petrología de Chile" financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) con el número de proyecto 1200000.

El presente estudio se realizó en el año 1972, en el marco del proyecto de investigación "Mineralogía y Petrología de Chile" financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) con el número de proyecto 1200000.

El presente estudio se realizó en el año 1972, en el marco del proyecto de investigación "Mineralogía y Petrología de Chile" financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) con el número de proyecto 1200000.

LIVINGSTONITA (M. Bárcena, 1874)

Fórmula: HgSb₂S₃.

Cristalización: Monoclínica holoédrica.

Nombre: Especie dedicada a David Livingstone (Escocia 1813 - Africa Central 1873).

Sinonimia: Ninguna.

Descubrimiento:

Primera referencia: Mariano Bárcena (1874). Descubrimiento de una nueva especie mineral de México.

El Minero Mexicano 2.4 (1874) 84.

La Naturaleza (Méx.) 3 (1874) 35, 172.

Lugar: Mina La Cruz, Mineral de Huitzucó, Edo. de Guerrero, México.

Reseña Histórica: el 26 de abril de 1874 recibió Bárcena unas muestras de las que dio a conocer una ligera descripción mineralógica y caracteres predominantes químicos. Con cierta inseguridad en sus propios estudios busca confirmación de ellos por mineralogistas extranjeros y espera los pareceres de Rammelsberg (Berlín) y de Mallet (Virginia).

Entre tanto recibe nuevas muestras provenientes de Guadalcázar, S. L. P., y no reprime sus ansias por publicar noticias sobre ellas (así sean incompletas).

La especie recién descubierta interesa en Alemania a Sandberger, en París a Pelabon y a Orcel, en Estados Unidos a Larsen, a Short y a Frondel.

Su primera descripción cristalográfica se debe a Richmond (1936) que se vale de algunas determinaciones goniométricas de Berman.

Unos diez años más tarde se estudia de nuevo y con otra orientación por Peacock, Kauman y Gorman (1949): la creyeron triclinica.

La estructura fue intentada por Niizeki con base en la presentación de Gorman; mas recomenzó a fondo los cálculos con Buerger a partir de nuevas muestras de la localidad típica recibidas de Foshag de entre las conservadas en el National Museum de Washington.

Aspecto y agregación: Masas metálicas puras y compactas, deleznales, con color y aspecto de estibinita; generalmente empañadas superficialmente por pátina negra con tintes violeta y rojo oscuro (debido a su polvo).

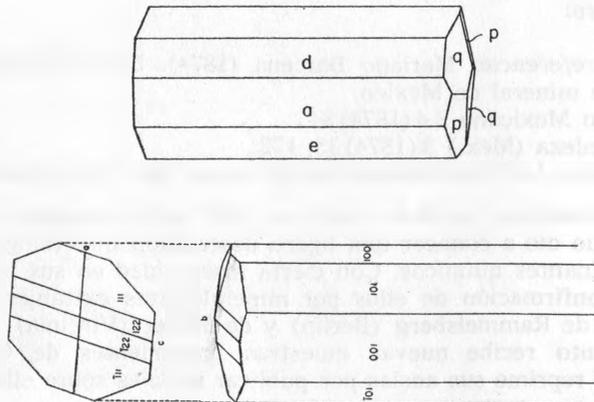
Aspecto general espático, cauliforme, con estriación primaria radiada (semejante a antimonita), y otra secundaria perpendicular a la dirección de las barras, más delicada.

Hábito: Aunque raras veces, cristales aciculares diminutos, individualizados, estriados, englobados algunos en yeso. Frágiles, flexibles, algo curvados. Elongación según b[010].

Su presencia más común es en forma de agregados cauliformes.

Cristalización: Cristales aciculares alargados por b[010], unas veces independientes, aunque raras, y otras en agregados bandeados por coalescencia de las caras prismáticas o agrupación monóxica. La dirección [010] de los cristales se conserva mutuamente paralela en los agregados y es transversa a la longitud de las bandas.

Iconografía:



Formas: Frecuentes las c{001}, a{100}, d{101}, e{101}; además las p{111}, q{122} y otras observadas aisladamente {11·1·0}, {011}, {111}, {122}.

Goniometría: a : b : c = 3.7094 : 1 : 5.3330 β = 104°12'

Coordenadas esféricas azimutales

Caras	φ	ρ
c 001	75°48'01"	90°00'00"
a 100	0°00'00"	90°00'00"

Caras	φ	ρ
d 101	29°56'51"	90°00'00"
e 101	140°53'19"	90°00'00"
p 111	140°53'19"	16°32'47"
q 122	44°50'33"	14°50'20"
011	75°48'01"	10°57'16"
111	29°56'51"	20°35'56"
122	116°01'49"	11°48'12"
11·1·0	180°00'00"	71°53'46"

Matrices cristalométricas:

$$M = \begin{bmatrix} a \operatorname{sen} \beta & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ a \operatorname{cos} \beta & 0 & c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.596152 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.909965 & 0 & 5.333000 \end{bmatrix}$$

$$M^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\operatorname{ctg} \beta \\ a \operatorname{sen} \beta & 0 & c \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.278074 & 0 & 0.047447 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.187511 \end{bmatrix}$$

Orientaciones:

Orientación a/.Richmond: a(100) b(010) c(001) p(111); b[010]
Orientación b/.Gorman: (010) (001) (100) (111); c[001]

Matrices de transformación:

Orient. a → b 001/100/010
Orient. b → a 010/001/100

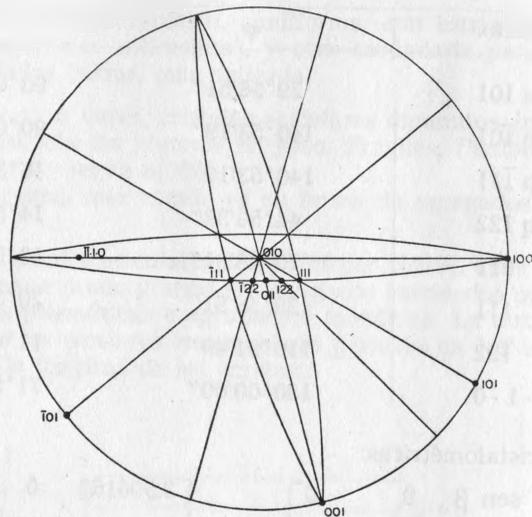
Isomorfismo y pseudomorfismo: citas erróneas.

Agrupaciones cristalinas:

Agregados uniáxicos: según [010], transversa a la dirección de bandeamiento.

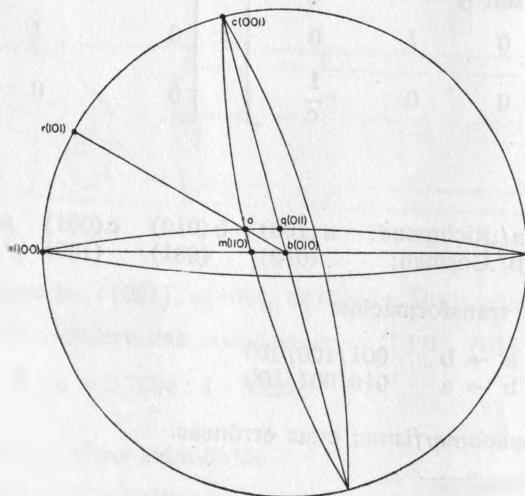
Agregados biáxicos o maclas: no observadas.

*Maclas de corrimiento: T{001}, t[010]



Indices de Barker:

am	bq	cr	ra	ca
(100:110)	(010:011)	(001:101)	(101:100)	(001:100)
74°27'36"	10°57'16"	45°51'52"	29°56'51"	74°48'01"



Indices de Donnay: M-3.709
 a/b 3.709
 c/b 5.333

Dureza: Mohs: 1.5 — 2

Talmage: C; galena < livingstonita < calcopirita.

Tenacidad: frágil a téndil. Agujitas algo flexibles.

En agregados, deleznable a ligero golpe.

Exfoliación: perf. {001}, buena {100}, imperfecta {010}.

Fractura: irregular en monocristales.

espática, cauliforme en los agregados macizos.

Flexibilidad: Agujitas monocristalinas flexibles.

Color: Gris plomo claro.

Brillo: submetálico adamantino vivo, a metálico.

Empañadura: Negra mate, con pátina de metacinnabrio y óxidos de Sb. La superficie de la masa metálica adquiere además tonalidades rojo-violeta oscuras.

Transparencia: Traslúcido rojo carmín a opaco.

Alteración: por intemperismo en material negro pulverulento (metacinnabrio y óxidos de Sb).

Polvo, raya: rojo cereza oscuro, que tizna el papel. Constituye un diagnóstico diferencial de importancia.

Fusibilidad: Escala de Kobell, F = 1.

Propiedades ópticas:

A. En lámina delgada:

Transparencia: translúcido rojo carmín.

Reflexión interna: rojo carmín.

Índice refracción: n(Li) < 2.72

α (B) = extremo

β = 3

Z [010] γ = ?

Birrefringencia: extrema (—)

Extinción

Pleocroísmo: débil (ligero cambio en la tonalidad rojo carmín) Z < X

B. En superficie pulida

Color: blanco galena

Anisotropía: (+) fuerte

Dispersión: grande, comparable a la de la estibinita

Colores de polarización: blanco, azul acerado, negro
 Pleocroísmo: A débil
 H más fuerte, blanco galena a blanco gris pardo
 Poder reflector: elevado. Porcentajes calculados:
 verde 37 %
 anaranjado 32.5 "
 rojo 30 "
 Refracción molecular: calc. 150; obs. 138

Coefficientes de absorción:

Radiaciones	Mo	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	Mn	Cr
μ^*	49.01	186.10	218.76	264.42	316.36	382.03	462.85	566.67

Ensayos:

Insol. en HNO_3 frío; sol, en caliente con ppdo. blanco y S coloidal.
 Funde al soplete y en tubo abierto, desprendiendo humos blancos.
 Volatiliza en el carbón dejando pegadura blanca y aureolas amarillo-rojizas.

Reacciones del Hg, Sb, S.

Diagnóstico en superficie pulida: (Cf. propiedades ópticas y dureza)

Pulimento fácil.

Reactivos: Agua regia: + empañá con irisación y efervescencia.
 HNO_3 : + empañadura lenta, parda, irisada.
 - en algunas muestras.
 HCl: -
 KCN: + empañadura gris o parda, con grietas
 - en algunas muestras.
 FeCl_3 : -
 KOH: + oscurecimiento instantáneo, depósito amarillo (reacción característica)
 HgCl_2 : -

Reacciones microquímicas:

Disolver en agua regia; ppotr. con cloruro mercurioso.

a) Ensayo del Hg:

Disolver ppdo. en HNO_3

Fragmento nitrato Co

Fragmento KCNS \rightarrow arborescencias y prismas color añil.

b) Ensayo del Sb:

Disolver ppdo. en HCl

Fragmento KI

Fragmento CsCl \rightarrow estrellas y hexágonos color anaranjado.

Espectrografía por Fluorescencia (rayos X):

Sb, Hg, Ca, con vestigios de Pb, As.

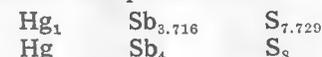
Espectrografía de emisión:

Sb, Hg, As, Fe, Pb, Ca, Cu, Mg, Bi, Mn, Ag, en orden de importancia decreciente.

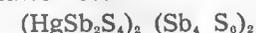
Análisis Químico:

	HgSb ₄ S ₇	HgSb ₄ S ₈	N. B. (1957)	Actual (1965)
S	24.60	27.169	28.08	27.502
Sb	53.40	51.583	51.63	50.223
Hg	22.00	21.246	20.29	22.274
	100.00	99.999	100.00	99.999

Fórmula estequiométrica:



Fórmula estructural:



Densidad: obs.: 4.84; calc.: 5.06

Cristales artificiales: no logrados.

Diagrama de Polvo:

	2.997	3.747	3.487	10.354
	100	80	70	30

Película:	I/I ₀	d	Símbolo
	30	10.354	002
	50	5.142	004
	80	3.747	012
	70	3.487	013
	60	3.458	006
	100	2.997	007
	30	2.865	015,100
	70	2.678	100
	50	2.419	017
	70	2.273	104
	20	2.034	020,019
	20	1.988	106,022
	30	1.881	024

30	1.838	
60	1.726	108
10	1.640	120
40	1.503	
30	1.424	

Celda elemental: (Orientación Richmond)

$$a_0 = 29.765 \quad b_0 = 4.012 \quad c_0 = 21.396 \quad A$$

$$\beta = 104^\circ 12'$$

$$a_0 : b_0 : c_0 = 7.418 : 1 : 5.333$$

Contenido: $Z = 8$; Complejo molecular: $Hg_8 Sb_{32} S_{64}$

Forma cuadrática: $Q(hkl) = h^2 a^{*2} + k^2 b^{*2} + l^2 c^{*2} + 2 lha^*c^* \cos \beta$

$$\beta = h^2 A + k^2 B + l^2 C + lhD$$

$$\text{con } A = 0.12005 \quad C = 0.002324$$

$$B = 0.06210 \quad D = 0.008192$$

Grupo espacial:

$$C(2h)6 - C2/c - A2/a - M(1)6$$

Estructura: Coordenadas atómicas:

Atomo	x	y	z
Hg'	0.000	0.500	0.000
Hg''	0.250	0.001	0.000
Sb'	0.120	0.063	0.075
Sb''	0.042	0.095	0.214
Sb'''	0.131	0.064	0.425
Sb''''	0.208	0.078	0.287
S'	0.062	0.493	0.092
S''	0.229	0.028	0.180
S'''	0.172	0.506	0.039
S''''	0.149	0.521	0.222
S	0.189	0.494	0.407
S'	0.022	0.021	0.318
S''	0.078	0.507	0.460
S'''	0.102	0.483	0.277

Posición sistemática:

Clase II: Sulfuros (etc.)

C: Sulfuros con R:S < 1:1, así como > 1:2

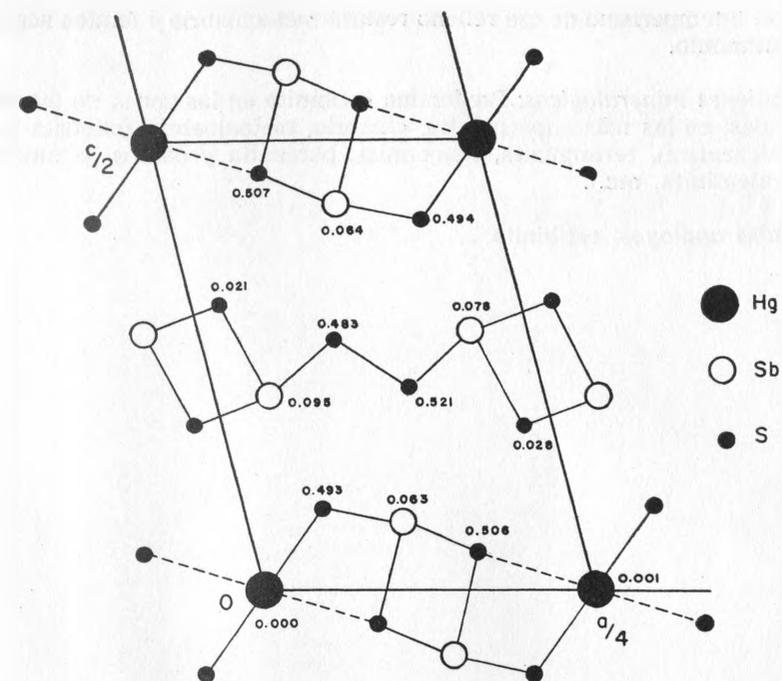
— Subdivisión: "Spiessglanze"

3. Grupo de los "Silberspiessglanze"

Apéndice: Lorandita

Urbaíta

LIVINGSTONITA, $HgSb_4 S_8$



Localidades: Sólo ha sido citado en México,

Estado de Guerrero, Mina La Cruz, Mineral de Huitzucó (loc. tip.)

Mina La Unión

Mina San Agustín.

Estado de San Luis Potosí, Guadalcázar.

Wadley

Estado de Zacatecas, Partido de Mazapil.

Yacimiento típico: Yacimientos mercurio-antimoniales de Huitzucó, a 26 kms. al E. de Iguala. Región de caliza cretácica con formaciones de anhidrita y dolomita, en cuyas brechas se formó livingstonita. Esta recoge todo el Hg de las partes no intemperizadas. Se acompaña ocasionalmente por azufre nativo.

En Guadalcázar, S. L. P., se le encuentra con yeso y azufre.

Paragenesis: La mena de livingstonita y antimonita fue depositada en el pleistoceno, por soluciones mineralizantes de focos ígneos del S. del Dpto. Minero, en cavidades de reemplazamiento entre las dolomitas.

Del intemperismo de ese relleno resultó metacínabrio y óxidos negros de antimonio.

Asociaciones mineralógicas: Predomina estibinita en las zonas no intemperizadas; en las más superficiales, cinabrio, metacínabrio (onofrita y guadalcazarita), terlinguaita, tiemannita, barcenita y óxidos de antimonio (valentinita, etc.).

Minerales análogos: estibinita. . .

Parte crítica



Ejemplar de Livingstonita.

LIVINGSTONITA (M. Bárcena, 1874)

HgSb₄S₈ Monoclínica holoédrica C(2h)6 — A2/a — M(1)6

$$a : b : c = 3.7094 : 1 : 5.3330$$

$$a_0 = 29.765 \quad b_0 = 4.012 \quad c_0 = 21.396 \text{ \AA}$$

$$a_0 : b_0 : c_0 = 7.4189 : 1 : 5.3330$$

$$\beta = 104^\circ 12'$$

$$Z = 8$$

Niizeki y Buerger (1959):

HgSb₄S₈ Monoclínica holoédrica C(2h)6 — A2/a — M(1)6

$$a_0 = 30.25 \quad b_0 = 4.00 \quad c_0 = 21.48 \text{ \AA}$$

$$a_0 : b_0 : c_0 = 7.5625 : 1 : 5.3700$$

$$\beta = 104^\circ 12'$$

$$Z = 8$$

Strunz (1949):

HgS 2Sb₂S₃ Monoclínica holoédrica C(2h)5 — P2./n — M(1)5

$$a_0 = 15.14 \quad b_0 = 3.98 \quad c_0 = 21.60 \text{ \AA}$$

$$a_0 : b_0 : c_0 = 3.804 : 1 : 5.427$$

$$\beta = 104^\circ 10'$$

$$Z = 4$$

Dana (1944). Ref.: Richmond (1936)

HgSb₄S₇ Monoclínica holoédrica C(2h)5 — P2./c — M(1)5

$$a : b : c = 3.75 : 1 : 5.36$$

$$a_0 = 15.14 \pm 0.04 \quad b_0 = 3.98 \pm 0.01 \quad c_0 = 21.60 \pm 0.04$$

$$a_0 : b_0 : c_0 = 3.80 : 1 : 5.43$$

$$\beta = 104^\circ$$

$$Z = 4$$

ASTM. Tarjeta N° 4-0654. Ref.: Gorman (1951)

HgSb₄S₇ Triclínica holoédrica C(1)1 — P $\bar{1}$ — A(1)1

$$a_0 = 7.67 \quad b_0 = 10.84 \quad c_0 = 4.00 \text{ \AA}$$

$$a_0 : b_0 : c_0 = 0.708 : 1 : 0.369$$

$$\alpha = 99^\circ 12' 30'' \quad \beta = 102^\circ 01'$$

$$\gamma = 73^\circ 48'$$

$$Z = 1$$

DESCUBRIMIENTO

Mariano Bárcena.—Descubrimiento de una nueva especie mineral de México.

El Minero Mexicano 2.4(1874)84

La Naturaleza (México) 3(1874)35,172

NOMBRE

LIVINGSTONITA: mineral dedicado a David Livingstone, misionero y viajero inglés, nacido en Blantyre (Escocia) en 1813; fue explorador del Africa Central y Austral.

Desde el Cabo emprendió sus exploraciones, llegando al lago Ngami en 1849, y remontando el Zambeze atravesó el Continente hasta Loanda. Más tarde volvió a explorar ese río y su afluente Chiré; luego de reconocer el Nyassa se dirigió en búsqueda de las fuentes del Nilo.

Dedicó sus esfuerzos a moralizar a los negros y combatir su venta como esclavos. Falleció en 1873. (C y P Augé. Nuevo Pequeño Larousse ilustrado Larousse, París (1954).

Su fallecimiento era la noticia cumbre de aquellos primeros meses de 1874 en que fue estudiada nuestra nueva especie mineral, impresionando a Bárcena, quien decidió conmemorar con ella a ese bienhechor de la Humanidad.

Sinónimos

Ninguno.

POSICION SISTEMATICA

La livingstonita ha sido considerada sistemáticamente:

Hintze (1904), vol. I, pt. 1, pág. 975:

Clase II. Sulfuros y sulfosales.

Grupo: Polisulfosales.

Bolivianita

LIVINGSTONITA

Chiviatita

Cuprobismutita

Dognacskaíta

Rézbányita

Dana (1944), vol. I, pág. 485:

Clase II. Sulfuros y sulfosales.

2 Sulfuros

3. Sulfosales

39. Tipo AB_4X_7

391. LIVINGSTONITA $HgSb_4S_7$

Strunz (1949), pág. 83:

Clase II. Sulfuros (etc.)

C. Sulfuros con $R:S < 1:1$, así como $> 1:2$

— Subdivisión "Spiessglanze"

3. Grupo de los "Silberspiessglanze"

Apéndice: Lorandita

Urbaíta

LIVINGSTONITA $HgS \cdot 2Sb_2S_3$

Por vez primera en 1934, W. Hofmann llamó la atención de que los llamados "Spiessglanze" por los alemanes poseían una traslación reticular de unos $4kX$ o múltiplo de ella, en el sentido de elongación de los cristales y perpendicular al plano de simetría propio de su grupo puntual. Con esta exigencia se conforma la livingstonita, pues su traslación $b_0 = 4.012$ y el alargamiento de sus prismas es $[010]$. Por ello y por sus caracteres morfológicos se halla bien en esta subdivisión.

Por el hábito acicular de sus cristales prismáticos pertenece al grupo de las sulfosales aciculares. Ya se han publicado las estructuras cristalinicas de varios miembros del grupo: berthierita, galenobismutita, aikinita, jamesonita, livingstonita (por Buerger, Jahn, Wickman, Niizeki). La livingstonita es el único mineral conocido del grupo que tenga mercurio.

Mas dentro de la subdivisión de los "Spiessglanze" no halla su lugar: su contenido de Hg y el poseer S en su fórmula le obligan a una posición anómala. En efecto, los grupos sistemáticos establecidos lo son con base en sulfuros de As, Sb o Bi, sencillos o con uno o dos cationes:

1° Sulfuros sencillos de	Cu — Cu
2° Sulfuros de Cu:	Sb — Cu
	Bi — Bi
	As — Bi — Cu
Apéndice:	As — Fe — Cu
	Sb — Fe
	Sb — Bi — Cu
3° Sulfuros de Ag:	As — Ag
	Sb — Ag —
	Bi — Ag
	As — Ag — Cu
	Sb — Ag — Cu
Apéndice:	As — Tl
	Sb — As — Tl
	Sb — Hg → LIVINGSTONITA

- 4° Sulfuros de Pb — Cu: As — Cu — Pb
 Sb — Cu — Pb
 Bi — Cu — Pb
- 5° Sulfuros de Pb — Ag: As — Ag — (Pb, Tl)
 Sb — Ag — Pb
 As — Ag — Pb
 Bi — Ag — Pb
 Bi — Pb — (Ag, Cu)
- Apéndice: Sb — Sn — Pb
- 6° Sulfuros:
- a) de Pb — As: As — Pb
- b) de Pb — Sb: Sb — Pb
 Sb — Pb — Fe
 Sb — Pb — As
- c) de Pb — Bi: Bi — Pb

Como se ve, la posición sistemática de la livingstonita es provisional, colocándola en situación anódina dentro de un apéndice al grupo 3, y sin relación química alguna de familia con la moderna ordenación establecida. Esto es tanto más notorio cuanto que su fórmula química se aparta también de la general, siendo $HgSb_4S_8$ como se demuestra en páginas posteriores.

NOTICIA HISTORICA

Mariano Bárcena recibió el 26 de abril de 1874, de su amigo Sebastián Camacho, una muestra de mineral que le había sido remitido a éste desde Huitzaco, Estado de Guerrero. El donante la confió a Bárcena para su estudio, creyéndola un compuesto raro de estaño.

Luego de dedicarle 4 días a su análisis, verificó tratarse de un sulfuro de mercurio y de antimonio, lo consideró como especie mineral nueva y redactó una noticia sobre su descubrimiento y proceso químico seguido en su identificación. En esta noticia le da el nombre de LIVINGSTONITA, impresionado como estaba por la reciente muerte del famoso explorador de Africa Meridional, cuya noticia era entonces de rigurosa actualidad e impregnaba el ambiente: excúsase ante sus amigos por no llamarla con alguno de sus nombres, y procura justificarse a sí mismo por la elección de un apellido extranjero, con la consideración de que los bienhechores de la Humanidad trascienden a lo universal.

Ese su artículo, fechado el 30 de abril de 1874, apareció en *El Minero Mexicano* 2.4(1874)84 en mayo siguiente. Fue leído ante la Sociedad Mexicana de Historia Natural, y vuelto a publicar en su revista *La Naturaleza* 3(1874)35, 172.

En noviembre de ese mismo año volvió a informar a esa Sociedad sobre un análisis más serio, cuantitativo, que hizo de la sustancia así como de su posible fórmula, aunque sin tener gran confianza en sus determinaciones. Por ello decidió enviar unas muestras a Rammelsberg en Berlín, por mediación de Burkart, amigo suyo entonces en Bonn. Tuvo mala suerte el envío,

ya que el fallecimiento de su amigo a los pocos días, impidió que llegasen a su destino y se extraviaron.

El mismo Bárcena redactó aún en ese año de 1874 otra nota, más mineralógica que las anteriores, aunque limitada a unos cuantos caracteres físicos y ensayos químicos de la livingstonita, para el *American Journal of Science*. En ella se hace notar su parecido con la estibinita. La descripción que hace Bárcena de su nuevo mineral es en realidad predominantemente química: la cita de caracteres mineralógicos es muy rara y deficiente; los propiamente cristalográficos son nulos.

Siempre obsesionado por su livingstonita, repite Bárcena los análisis en 1876 sobre nuevas muestras recibidas de Huitzaco, a su parecer más puras, encontrando un 20% más de Hg; en cambio sólo indicios de Fe.

Ante esta divergencia recurre a J. W. Mallet, profesor de la Universidad de Virginia, con el designio de aceptar ciegamente cualquier respuesta; mas el maestro confía el estudio del mineral a uno de sus discípulos, J. P. Venable, recibiendo en respuesta dos análisis y la posible fórmula.

Con todo ese conjunto de resultados y nuevas observaciones y muestras que acababa de recibir de Guadalcázar (1877), redacta un informe final (septiembre de 1879) terminando con las diferencias entre los ejemplares de ambas localidades. (Cabe preguntarse: ¿Se trataría realmente de livingstonita o de guadalcazarita?)

Harrington (1875) publica asimismo otra nota también en *American Journal of Science*, con el análisis centesimal y las razones atómicas correspondientes. Es de notar su afirmación tomada de Bárcena de que otros sulfuros de la localidad sean "seudomorfos" (?) de livingstonita.

No satisfecho aún Bárcena con la propaganda casi excesiva de su especie recién descubierta, publica de nuevo en *La Naturaleza* 4(1879)268 una serie de notas yuxtapuestas: sus análisis de 1874, los reiterados en 1876, el estudio químico de Venable y la última comunicación suya a la Sociedad Mexicana de Historia Natural, referente a la livingstonita de Guadalcázar.

En carta del 20 de febrero de 1876, desde Würzburg, escribe Sandberger a Leonhard haber recibido de Adam y Bertrand en París, un interesante mineral y muy característico, livingstonita, indicándole el descubridor y su localidad típica, "teniéndolo como isomorfo de la antimonita". Con este carácter de ortoclínico otorgado tan gratuitamente al nuevo mineral, y sólo por su burdo parecido con la estibinita, se mantuvo muchos años, ... hasta 1936.

Entre tanto siguen publicándose en *Chemical News* varias notas predominantemente químicas (aparte de los resultados de Venable y de Mallet, 1879 y 1870), la de Page y la de Baker, ambas en (1880).

Pelabon en 1905 y Orcel en 1928 escriben desde París sobre el mismo tema. Larsen y Short la estudian en sus propiedades ópticas para incluirla en sus tablas determinativas; Frondel mide su densidad.

Finalmente, la cristalografía moderna llega a fijar su atención sobre el mineral de Huitzaco, y Richmond (1936) publica su estudio goniométrico, con unos datos propios y otros observados por Berman. En este trabajo se presenta a la livingstonita con su sentido de elongación como eje b.

La memoria sobre la livingstonita de Guerrero, publicada por Richmond (1936), sirvió de base a las citas del *Dana's System of Mineralogy* 1(1944), en donde se la describe como monoclinica 2/m. De ella trae su referencia el *Strukturbericht*, vol. IV, 1936.

Algún tiempo después, Peacock descubre con base en diagramas de Weissenberg que la livingstonita es de simetría triclinica, aseveración demostrada luego por Kaiman y después por Gorman (1949), ambos discípulos suyos.

Gorman (1951), de la Universidad de Toronto, Canadá, considera el mineral de Huitzucu con criterios puramente röntgenográficos y mide su red triclinica con la orientación que cumple la condición de $c < a < b$.

Los primeros estudios sobre la estructura de la livingstonita fueron intentados por Buerger y Niizeki (1954) admitiendo todas las constantes publicadas por Gorman, y en particular con la fórmula química aceptada de los 7S. De este intento se publicó un avance en *American Mineralogist* (op. cit.). Construyeron un mapa de Patterson, calcularon la centrosimetría de la celda por el método estadístico y efectuaron una proyección de Fourier. Con todo ello demostraron la incongruencia de la fórmula aceptada hasta entonces (mediante un esfuerzo que llama la atención, por pretender justificar el trabajo de Gorman, de quien habían recibido el material de su estudio) y se resolvieron por recomenzar su trabajo con datos propios, a partir de otra nueva muestra proporcionada por Foshag del National Museum de Washington, cristal de selenita con inclusiones de livingstonita en forma de finas agujas.

Realizaron nuevos análisis más precisos de la sustancia y procedieron a recalcular su fórmula de $HgSb_4S_8$, sus constantes reticulares y la estructura de ese mineral establecido definitivamente como monoclinico.

EJEMPLARES ESTUDIADOS

Los ejemplares estudiados en este informe pertenecen al Museo de Mineralogía del Consejo de Recursos Naturales no Renovables, que los tiene muy bonitos de Huitzucu, Guerrero, su localidad tipo. Se encuentran en forma de masas cristalinas, las cuales se describen más adelante.

Se han de agradecer asimismo al Ing. Raúl Ortiz Asiain por facilitar una muestra de livingstonita, y al Dr. Richard A. Gaines su solicitud en la aportación de unos cristales aislados, de la misma especie.

En el Museo de Mineralogía del Instituto Geológico de San Luis Potosí, S. L. P., tienen un ejemplar de livingstonita de Wadley, S. L. P.

LOCALIDADES

Ha sido citada la livingstonita en México, en varias localidades:
Estado de Guerrero. Mineral de Huitzucu. Mina La Cruz (localidad típica).

Estado de San Luis Potosí, Guadalcázar y Wadley.

Estado de Zacatecas. Partido de Mazapil.

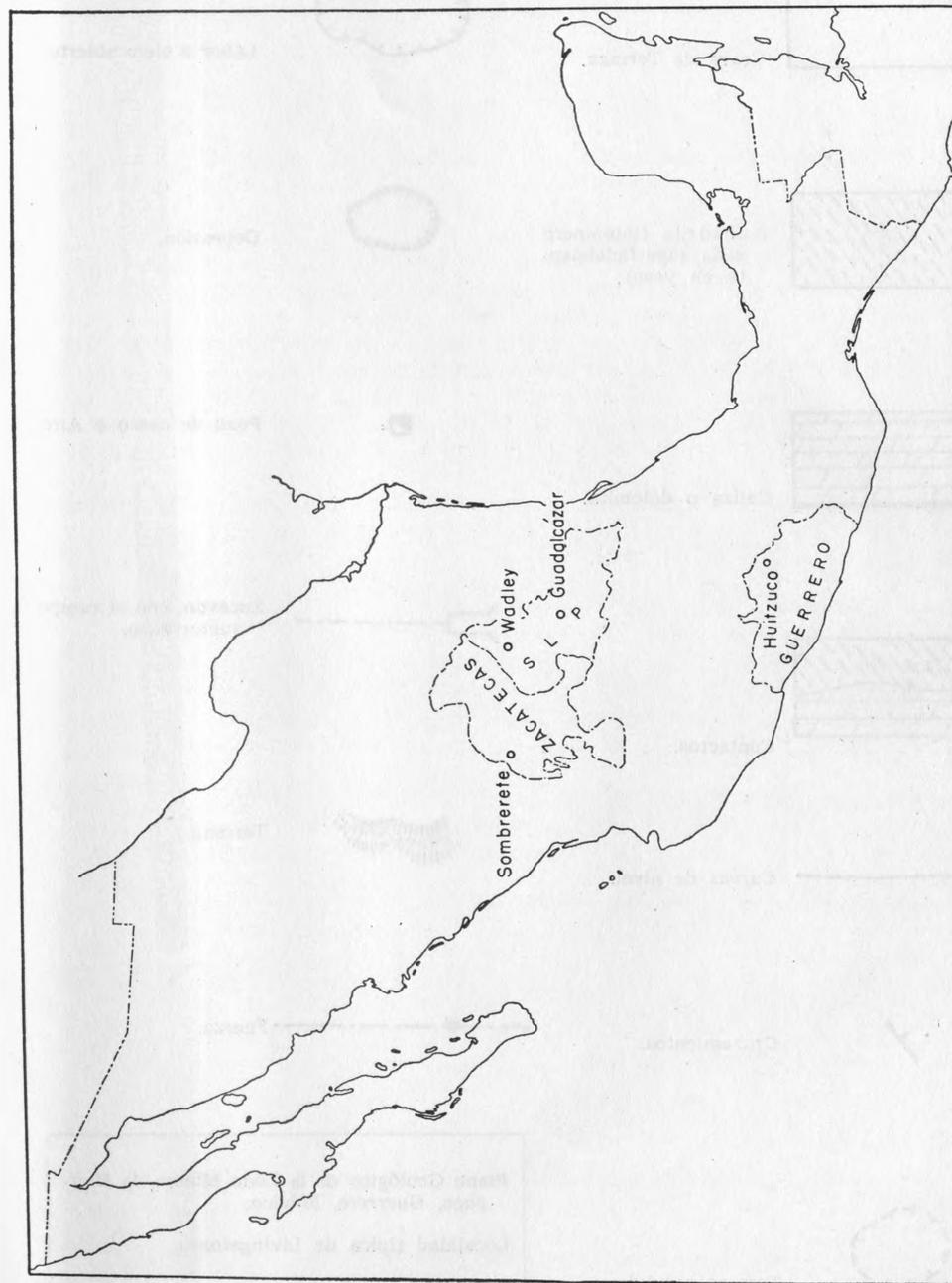


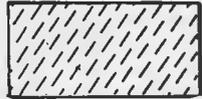
Fig. 1. Mapa índice de los yacimientos mexicanos de livingstonita.



Grava de Terraza.



Labor a cielo abierto.



Anhidrita (intemperizada superficialmente en yeso).



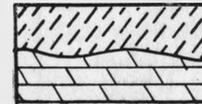
Depresión.



Caliza o dolomita.



Pozo de casco o Aire.



Contactos.



Socavón, con el rumbo subterráneo.



Curvas de nivel.



Terreno.



Cruzamientos.



Fuerza.



Terreno hundido.

Plano Geológico de la Zona Minera de Huit-zuco, Guerrero, México.
Localidad típica de Livingstonita.



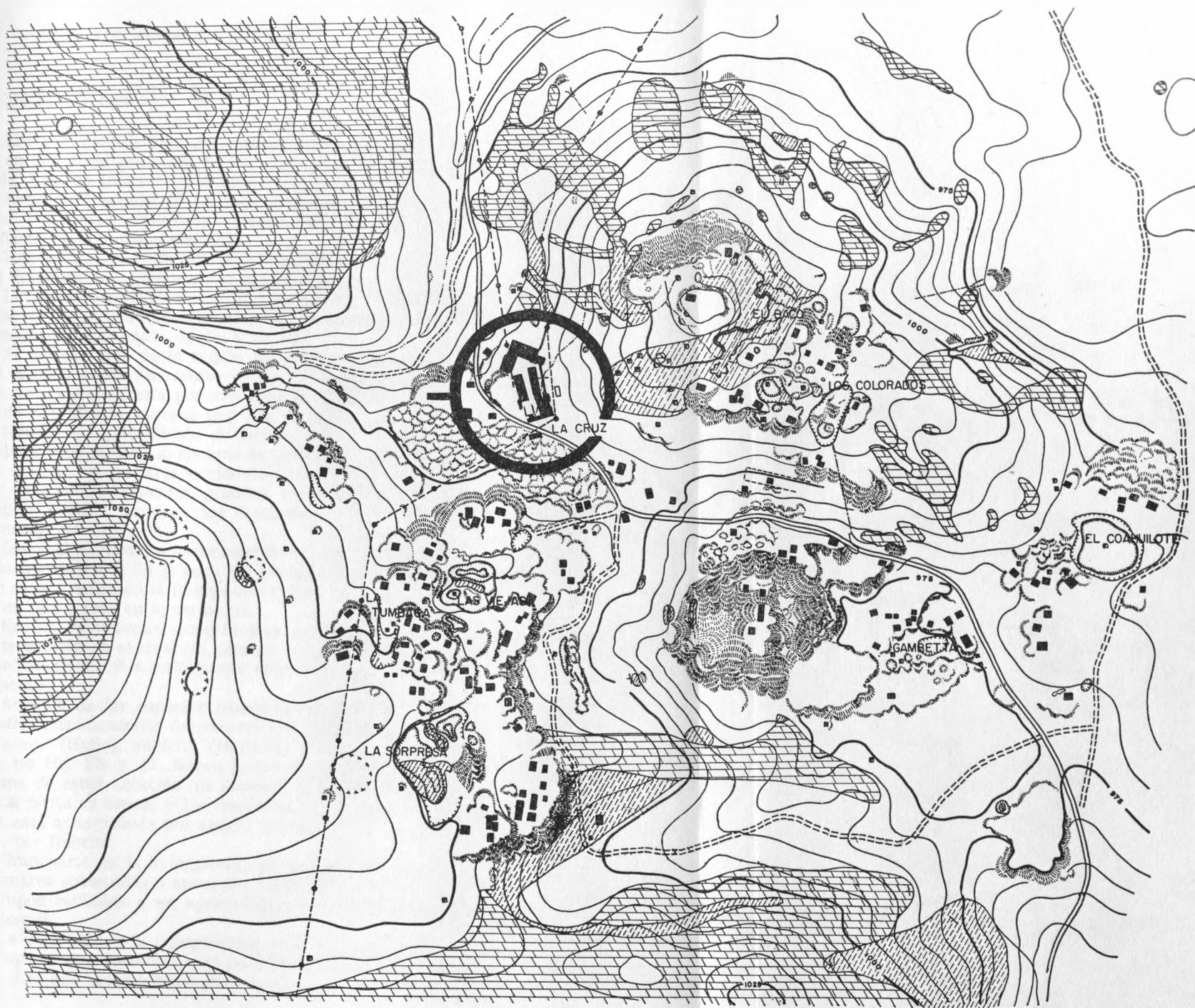


Fig. 2. Mapa Geológico de la localidad típica.

YACIMIENTO TIPICO

Los yacimientos mercurio-antimoniales del distrito de Huitzucos se hallan en una zona entre 2 y 4.5 km. al sur de esa población (26 km. al E. de Iguala, Edo. de Guerrero, México). (Hernández, D. y McAllister, J. F., 1946.)

Estructura geológica: La roca dominante en esa región es caliza cretácica, con fallas y pequeñas intrusiones de pórfido granítico, sin metamorfismo de contacto apreciable.

Hay formaciones de anhidrita (transformada en yeso en la superficie) y de dolomita, más importantes aquéllas que éstas.

Las soluciones con mercurio y antimonio crearon livingstonita y estibinita en la brecha dolomitizada. La primera ha sido descompuesta por intemperismo de óxidos de Sb y de Hg.

El diastrofismo de la región es anterior a la mineralización. Los pliegues expuestos son recostados y quizá contemporáneos al fallamiento principal. Este se manifiesta por una zona de brechas entre la mina de La Cruz y la de San Martín, cortada por otra de fallas.

Nótase un alineamiento de dolinas y de cavidades de disolución de la anhidrita, casi paralela al sistema de juntas más definido, rumbos NW. al W., y al drenaje en la parte occidental del área. Son de interés en la anhidrita unos tubos verticales, grandes, llamados "trojes" rellenos de material detrítico, y otros menores, los "tecontles". Algunos rellenos de los tubos son menas de mercurio.

Los yacimientos: La mena mercurio-antimonial de Huitzucos es mineralógicamente sencilla. En la roca no alterada por intemperismo, todo el mercurio se encuentra en la livingstonita; mientras que una parte del antimonio está en ella y otra en la estibinita.

En los yacimientos superficiales intemperizados, el mineral principal que se explota es el cinabrio, aunque han sido también mencionados el metacínabrio (HgS) y la terlinguaíta (Hg₂ClO), así como barcenita y óxidos de antimonio.

Además de las especies minerales ya descritas, se han citado las siguientes: guadalcazarita (composición como la del cinabrio, con 4% de Zn), tiemannita (HgSe), onofrita (Hg(S,Se)) y otros arseniuros y antimonuros raros de Hg, Sb y Tl. Hacen notar Hernández y McAllister (1946) que ninguna de estas especies fue encontrada allí por ellos.

La pirita es escasa y los minerales de la ganga son insignificantes. La mena está acompañada por azufre nativo, selenita, calcita, grafito y, en un lugar, por fluorita.

Gran parte de la livingstonita de la mena de Huitzucos forma cristales columnares subedrales o anedrales hasta de 10 cms. de largo, presentándose en grupos radiados o en agregados menos regulares que reemplazaron a la dolomita.

La estibinita y la livingstonita se encuentran estrechamente asociadas en proporciones variables, aunque ambas pueden encontrarse también aisladas. Las dos reemplazan a la dolomita.

Los minerales asociados con las menas no oxidadas se hallan más difundidos que los anteriores. El azufre nativo forma bolsas hasta de 30 cm. de largo en los cuerpos de mena, así como otras menores e hilos en la roca asociada; se le halla también en el peso sobre la superficie. Cerca de la mena se observaron grandes cristales aislados de selenita transparente. El grafito está concentrado a lo largo de las fallas posteriores a la mineralización. La calcita forma hilos irregulares a través de la caliza y de la dolomita. La fluorita, escasa y de grano fino, se observó únicamente en las cercanías de la mina de La Cruz.

Las principales especies minerales en los yacimientos oxidados son el cinabrio y la barcenita pulverulentos. Los óxidos de antimonio se presentan en algunos lugares como pseudomorfos de la livingstonita.

Distribución: Los yacimientos minerales que afloraban se concentran al E. y S. de la mina de La Cruz, en la parte norte del distrito.

Había un grupo alargado, mucho más pequeño, al SE. de dicha mina cerca de La Unión, así como otros junto a la mina San Agustín.

El alineamiento mejor definido es hacia el E-NE.

El análisis sobre la distribución de las menas sugiere que los yacimientos siguen un rumbo general, hacia el N, con ramificaciones transversales.

MINERALOGENESIS

(Hernández, D. y McAllister, J. F., 1946.) La primera actividad geológica que afectó la localización de las menas de livingstonita en el yacimiento de Huitzucó, tuvo lugar cuando esfuerzos de compresión originaron fallas a lo largo de las cuales se formaron brechas en la caliza maciza y pliegues isoclinales en las capas menos rígidas. La intrusión de los magmas ígneos ocurrió probablemente un poco después. Las soluciones mineralizantes, sin embargo, no pudieron haber provenido directamente de las masas de pórfido granítico-biotítico. La inclinación hacia el sur de los dos cuerpos extraídos de mineral de livingstonita, así como el echado del contacto norte de la anhidrita en la mina de La Cruz, sugieren que estos cuerpos de mena fueron depositados por soluciones que emanaron de focos ígneos situados debajo o al sur del distrito minero.

Esta acción hidrotermal tuvo varios efectos, siendo el último la formación de la mena. Al principio, gran parte de la caliza de la brecha fue sustituida por dolomita; la restante fue reemplazada en parte por anhidrita. En la zona de intemperismo se transformó en yeso la anhidrita, formándose oquedades en ella por el movimiento descendente de las aguas superficiales. Estas cavidades se rellenaron posteriormente por el asentamiento del material. Fue quizá después, tal vez durante el Pleistoceno, que principió a depositarse la mena. Una resurgencia final de las soluciones hidrotermales dio origen a la livingstonita y a la antimonita, que reemplazaron selectivamente algo de dolomita y una parte del relleno de las cavidades. La acción continuada del intemperismo oxidó a esos dos minerales de relleno, resultando como alteración del metacinabrio y los óxidos negros de Sb. Es difícil establecer la edad de la livingstonita con relación a la del relleno

de las cavidades, esto es, determinar si la livingstonita fue depositada en el relleno o si fue uno de sus constituyentes clásticos.

De haber sido la mineralización contemporánea con la del antimonio en Oaxaca a poca distancia al SE de Huitzucó, sería más antigua que el relleno de las cavidades, porque según White y Guiza, el Sb está claramente relacionado con los diques de pórfido cuarcífero que han sido considerados como del Terciario. Parece preferible, sin embargo, relacionar la mineralización de Huitzucó con la del mercurio del Pleistoceno, que se encuentra en los rellenos de las cavernas cercanas a Coacoyula, a unos 40 km. al SW. de Huitzucó.

PARAGENESIS

(Hernández, D. y McAllister, J. F., 1946.) La mena primaria de Huitzucó, hasta donde se conoce, se formó por la precipitación de livingstonita y estibinita a partir de soluciones hidrotermales, que reemplazaron a la dolomita relativamente cerca de la superficie.

Dicha mena primaria ha sido la mayor fuente de producción de mercurio. Considerados en detalle, los clavos de mena rica están formados por series de vainas o lentes más o menos alargadas y conectadas entre sí.

Los cuerpos individuales son relativamente pequeños, con bolsas de livingstonita de menos de un metro.

En las menas secundarias, los minerales principales son el cinabrio y los óxidos de antimonio, supuestos productos de la descomposición de la livingstonita y de la estibinita. Los óxidos de antimonio encontrados en muchos ejemplares son pseudomorfos de esas dos especies. El cinabrio pulverulento se halla tan abundante y en tal asociación con la livingstonita, que parece ser ésta la especie original.

ASPECTO Y AGREGACION

Se presenta generalmente la livingstonita en masas metálicas muy puras y compactas, aunque fácilmente deleznable al menor golpe, con color y aspecto de antimonita. Estas masas metálicas de livingstonita pierden su brillo característico y se empañan por una pátina negra peculiar. En algunos lugares se notan manchas de color rojo oscuro con tintes violeta. Es, asimismo, característica su estriación primaria radial como la de la estibinita, difiriendo empero de ella por la curvatura frecuente de sus haces radiales.

El aspecto general es espático, cauliforme.

A lo largo de cada uno de sus radios primarios se percibe una estriación transversa secundaria, característica también diferencial de la livingstonita, debida a la agrupación paralela uniáxica de multitud de monocristales, desprendibles con relativa facilidad. Este es el aspecto general y más propio de las muestras de Huitzucó, Guerrero, que ya Sandberger (1876) decía ser "conocido como mineral muy característico".

HABITO

No siempre se hallan cristales de livingstonita en masas espáticas y cauliformes —aunque este estado de agregación es su aspecto más frecuente y abundante— sino que también en cristales aciculares individualizados, si bien raros. Las muestras del National Museum de Washington enviadas por Foshag a Niizeki y Buerger para su segundo estudio y determinación de estructura, fueron precisamente unas agujitas aisladas, englobadas en yeso. Asimismo, algunas muestras empleadas para su investigación son precisamente agujitas individualizadas (también de Huitzucó).

Ya Bárcena había hecho notar (1879) que en Guadalcázar, San Luis Potosí, se hallan ejemplares con cristales finos, capilares, entretejidos o radiales, sin agrupación paralela como la de las muestras de Guerrero. Las agujitas son diminutas, frágiles, muy flexibles, por lo que se encuentran muchas curvadas. No es precisamente notable esta curvatura de las agujitas, sino más bien parece que en algunas ha habido corrimiento al separarlas de la masa, y según la cara (010).

Richmond (1936) les reconoce unas dimensiones entre 0.25 y 0.50 mm. como longitud, y tan sólo 0.1 mm. de espesor; aunque se encuentran monocristales algo mayores y muy perfectos.

El alargamiento de los monocristales, sentido de las agujitas aisladas o de las estriaciones transversas de los radios primarios en las masas de livingstonita, ha sido interpretado como ejes c o b cristalográficos, según las dos orientaciones con las que se los ha estudiado. En este trabajo se retiene su elongación como eje b.

Su hábito es francamente prismático.

ICONOGRAFIA PUBLICADA

La figura que cita Dana (1944), vol. I, pág. 485 es copia algo reducida de la original y primera del mineral que aparece en el trabajo de Richmond (1936). Se trata de un cristal columnar, echado, del que se traza una de sus terminaciones: corresponde a la orientación de Richmond, *American Mineralogist* 21(1936)719.

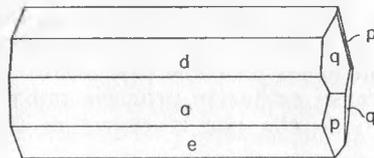


FIG. 3. Cristal de livingstonita, según W. E. Richmond (1936).

FORMAS

El primero en someter los cristales de livingstonita a un estudio cristalográfico más riguroso fue Richmond (1936), quien no sólo dio a conocer sus formas halladas sino también la medida de sus diedros.

Con el material de que se dispuso para esta revisión crítica se imposibilita hacer un estudio directo de su morfología cristalina: las muestras con que primero se trabajó fueron barritas de exfoliación; y aunque luego se dispuso de agujitas naturales, se repitieron algunas de las operaciones sin ser posible su medición goniométrica completa: las agujitas carecen de caras terminales, y las prismáticas, aunque todas muy brillantes y perfectas algunas, se hallaron estar reemplazadas por finísimas estrías de caras vecinales.

Las muestras de Richmond fueron, asimismo, unas agujas diminutas, provenientes de Huitzucó. Examinadas por H. Berman en el goniómetro teodolítico demostraron ser monoclínicas, aciculares, alargadas en sentido de [010], calidad que se pudo confirmar en nuestras muestras por medición goniométrica de algunos ángulos ecuatoriales y por su radiografía lograda mediante el röntgoniómetro de precesión de Buerger (Cf. pág. 64) no sólo en los cristales aciculares aislados, sino que también en las citadas barritas de exfoliación separadas de la masa espática de livingstonita. La elongación utilizada como eje de giro es perpendicular al sentido de alargamiento de las bandas radiales curvadas y mayores que se describieron al tratar del hábito cauliforme de este mineral.

Las formas observadas por Berman, con la orientación Richmond, son: $c\{001\}$, $a\{100\}$, $d\{101\}$, $e\{\bar{1}01\}$, además de las $p\{\bar{1}11\}$, $q\{122\}$ y otras observadas aisladamente: $\{\bar{1}1 \cdot 1 \cdot 0\}$, $\{011\}$, $\{111\}$, $\{\bar{1}22\}$.

Se demostraron como holoédricas.

Este autor, Richmond (1936), publica la única figura que se ha dado a conocer sobre el cristal de livingstonita, siendo luego citada por Dana (1944).

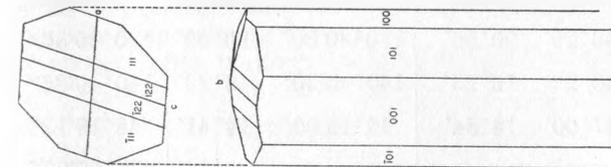


FIG. 4. Cristal teórico de livingstonita, trazado a partir de su estereograma (cf. fig. 6).

GONIOMETRIA Y CRISTALOMETRIA

Por la índole de los cristales de que se ha dispuesto, ha resultado muy laboriosa su medición goniométrica. Sin embargo, por algunas de las mediciones logradas sobre la mitad de la zona de sus caras prismáticas, de cuatro agujitas cristalinas, se confirman algunas de las mediciones aducidas por Richmond.

El trabajo de este autor da a conocer un cuadro de valores goniométricos, coordenadas azimutales, elaborado por H. Berman con base en mediciones logradas sobre ocho agujas cristalinas diminutas y alargadas en su sentido [010], que es el del giro del mismo en el aparato. Al conocer las

dificultades que ofrecen tales apreciaciones se ha de reconocer la meritoria labor realizada.

Con tales mediciones queda establecida la calidad monoclinica del cristal de livingstonita. Antes se la tuvo como "probablemente ortoclinica" (Hintze, 1904), haciéndose eco de la observación incompleta supuesta por Bárcena y afirmada categóricamente por Sandberger (1876) en su carta a Leonhard, dado su parecido macroscópico y supuesto isomorfismo con la estibinita, aunque sin medición goniométrica alguna que les sirviera de base.

La hipótesis triclinica de Gorman (1951), a más de haber sido demostrada como estructuralmente imposible, no es congruente con las mediciones morfológicas de Berman, debiendo descartarse.

Por su relación paramétrica morfológica se puede apreciar la notable cortedad del eje $b[010]$.

TABLA I. Valores observados y calculados para las coordenadas azimutales

Caras	Berman (1936)		Calculados		Fabregat (1965)	
	Observados:		Calculados		Calculados	
	φ	ρ	φ	ρ	φ	ρ
c 001	75°50'	90°00'	75°50'	90°00'	75°50'02"	90°00'00"
a 100	0°39'	90°00'	0°00'	90°00'	0°00'00"	90°00'00"
d 101	29°53'	90°00'	30°05'30"	90°00'	30°05'56"	90°00'00"
e $\bar{1}01$	140°29'	90°00'	140°40'30"	90°00'	140°40'36"	90°00'00"
p $\bar{1}11$	140°29'	16°23'	140°40'30"	16°23'	140°40'36"	16°23'12"
q 122	47°00'	14°34'	45°19'00"	14°41'	45°19'12"	14°41'10"
011					75°50'02"	10°50'15"
111					30°05'56"	20°23'10"
$\bar{1}22$					115°49'49"	11°42'00"
$\bar{1}\bar{1}.1.0$					180°00'00"	71°40'35"

$$a : b : c = 3.7572 : 1 : 5.3660 \quad \beta = 104^\circ 10'$$

La forma se demuestra como de la holoedría monoclinica.

La verificación de los ángulos citados en la tabla expuesta se efectuó por nosotros empleando el procedimiento matricial. A este efecto se calculó la matriz recíproca M^* :

$$a : b : c = 3.7572 : 1 : 5.3660 \quad (1)$$

$$\beta = 104^\circ 10'$$

$$M^* = \begin{bmatrix} \frac{1}{a \sin \beta} & 0 & -\frac{\text{ctg } \beta}{c} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.274503 & 0 & 0.047040 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.186358 \end{bmatrix}$$

con base en la relación paramétrica morfológica citada, que es la admitida por Richmond. Se hace notar que la primera razón de esta relación es sensiblemente la mitad de la estructural que establecimos con base en una celda doble que la resultante de estas mediciones morfológicas expuestas.

La relación paramétrica morfológica deducida de nuestras mediciones estructurales (Cf. pág. 69) resulta ser:

$$a : b : c = 3.7094 : 1 : 5.3330 \quad (2)$$

$$\beta = 104^\circ 12'$$

mucho más cercana a la realidad de la que deduce Richmond en el mismo trabajo por consideraciones análogas:

$$a : b : c = 3.804 : 1 : 5.427 \quad (3)$$

así como de las demás calculadas por los otros autores, cuales pueden verse en la tabla correspondiente (pág. 65).

Con base en la relación paramétrica estructural (2), la matriz M^* sería,

$$M^* = \begin{bmatrix} 0.278074 & 0 & 0.047447 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.187511 \end{bmatrix}$$

y los ángulos recalculados se exponen en la segunda columna de la tabla II, en parangón con los que resultaron antes (se repiten en la primera columna de esta tabla).

De la consideración de estos valores y su comparación con los observados, se deduce que se habrán de tener por calculados los hallados a partir de la relación paramétrica (2) deducida de la estructural.

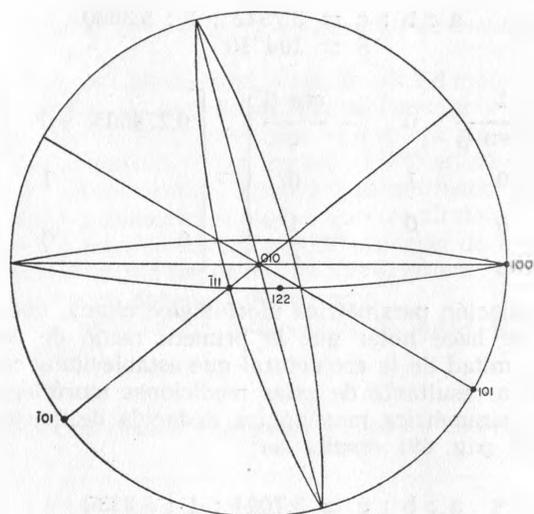


Fig. 5. Estereograma de livingstonita según las mediciones de Berman (relación paramétrica 1).

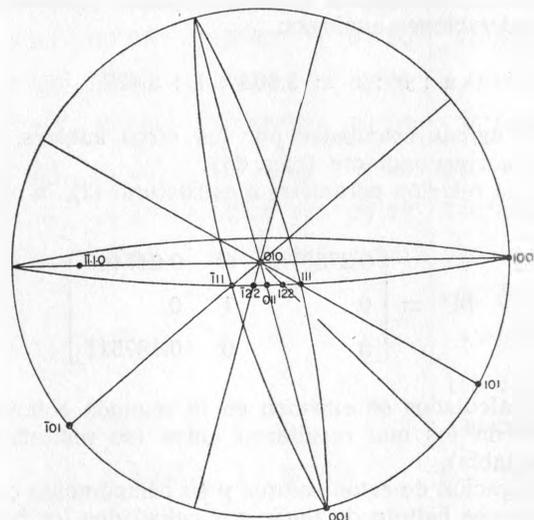


FIGURA 6. Estereograma del cristal calculado con base en la relación paramétrica (2).

ORIENTACIONES Y MATRICES DE TRANSFORMACION

Se han estudiado los cristales de livingstonita con dos orientaciones:
a) *Orientación Richmond*: considera el sentido de elongación de las agu-

TABLA II. Coordenadas azimutales calculadas con base en las relaciones paramétricas (1) y (2). Se admiten como definitivos los de la segunda columna.

$$a : b : c = 3.7094 : 1 : 5.3330 \quad \beta = 104^{\circ}12'$$

Caras	Valores con base en (1)		Valores con base en (2)	
	φ	ρ	φ	ρ
c 001	75°50'02"	90°00'00"	75°48'01"	90°00'00"
a 100	0°00'00"	90°00'00"	0°00'00"	90°00'00"
d 101	30°05'56"	90°00'00"	29°56'51"	90°00'00"
e $\bar{1}01$	140°40'36"	90°00'00"	140°53'19"	90°00'00"
p $\bar{1}11$	140°40'36"	16°23'12"	140°23'19"	16°32'47"
q 122	45°19'12"	14°41'10"	44°50'33"	14°50'20"
011	75°50'02"	10°50'15"	75°48'01"	10°57'16"
111	30°05'56"	20°23'10"	29°56'51"	20°35'56"
$\bar{1}22$	115°49'49"	11°42'00"	116°01'49"	11°48'12"
$\bar{1}1.1.0$	180°00'00"	71°40'35"	180°00'00"	71°53'46"

jitas cristalinicas naturales como eje [010]. Este es, asimismo, el de alargamiento de las agujitas obtenidas por exfoliación, transversas al de las barras radiales que se observan en las masas minerales y marcan en ellas una estriación transversa característica.

Esta orientación tiene bases morfológicas, y es satisfactoria también en los röntgenogramas obtenidos de esa *celda monoclinica*.

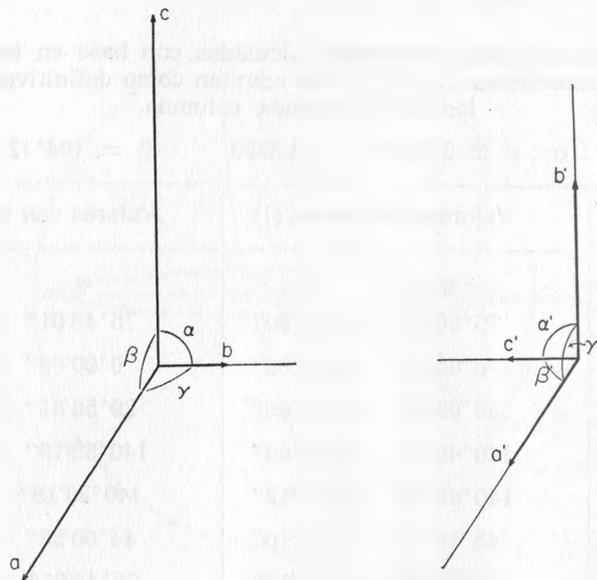
b) *Orientación Gorman*: tiene como eje c[001] al de elongación del cristal y al de las barritas de exfoliación, aunque sentido contrario, cual impone la apreciación que hace de su ángulo γ ($= \beta$ de Richmond), de 73°48', suplemento del 106°12', cual se puede ver en el cuadro de dimensiones de la celda elemental. Sus ejes b y c se intercambian con los de Richmond.

Esta orientación es puramente röntgenográfica, y fijada por Gorman para obedecer a la condición $c < a < b$, calculadas para su *celda triclinica*.

En este trabajo se adopta como más conveniente la primera orientación, y a ella se refieren los símbolos cuando no se indica expresamente lo contrario.

Entre ambas,

$$a = 2a' \quad b = -c' \quad c = 2b'$$



Figs. 7 y 8. Cruces axiales con las orientaciones: a/Richmond, a-b-c; b/Gorman, a'-b'-c'.

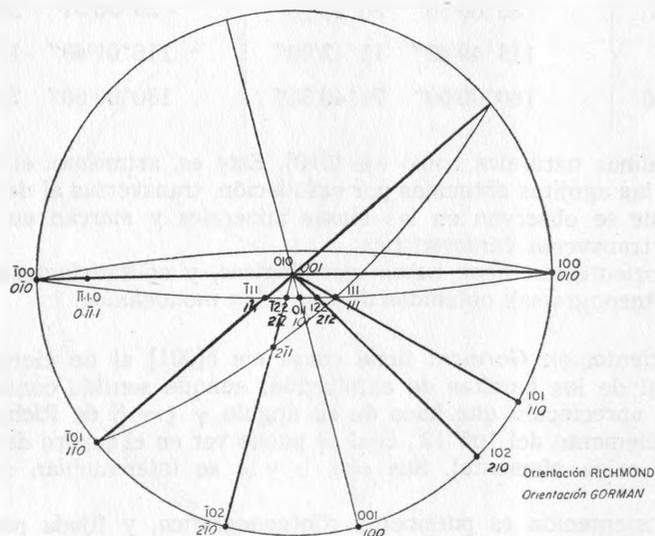


FIGURA 9. Correspondencia de símbolos en las dos orientaciones.

Se hace notar la necesidad de dar a c el signo contrario en estas ecuaciones, para la coincidencia de ambas cruces axiales, dada la magnitud diferente de β que consideran ambos autores. O bien, lo cual es lo mismo.

$$a = 2b' \quad b = c' \quad c = 2a'$$

En las figuras 5 y 6 se han trazado los estereogramas del cristal de livingstonita representado en la Fig. 9, con ambas orientaciones. En ellas se puede comparar la relación respectiva de los símbolos, que es:

Orient. b	100	010	001	111	101	011	122	$\bar{1}11$	$\bar{1}01$	$\bar{1}22$	$\bar{1}\bar{1}.1.0$
Orient. a	010	001	100	111	110	101	212	$\bar{1}\bar{1}1$	$\bar{1}\bar{1}0$	$\bar{2}\bar{1}2$	$0.\bar{1}\bar{1}.1$

vinculadas entre sí por las matrices de transformación:

$$\begin{aligned} \text{Orient a} \rightarrow \text{b} &: && 001 / 100 / 010 \\ \text{Orient b} \rightarrow \text{a} &: && 010 / 001 / 100 \end{aligned}$$

ISOMORFISMO, SEUDOMORFISMO

Estos dos conceptos han sido muy mal atribuidos a la livingstonita, y tratado de ellos desde las primeras publicaciones sin tener en cuenta su exacta significación.

Es muy notable, por ejemplo, el que la primera medición goniométrica se efectuase hasta el año de 1936 por Richmond, y sin embargo, se hayan atrevido los autores anteriores a tratar sobre el isomorfismo de la livingstonita: la estibinita es ortoclínica y la livingstonita monoclinica (!), etc.

Ello es excusable porque en los tiempos a que se alude, se consideraban como conceptos novedosos en Mineralogía, elegantes esos nuevos vocablos, y por lo visto, mal comprendidos. Por otra parte, no se le puede atribuir esa excusa a Dana (1944) por solidarizarse en su cita con los primeros autores.

No siendo aquí el lugar de precisar conceptos, nos limitamos a transmitir escuetamente las referencias:

Seudomorfismo: Harrington (1875), hay varios sulfuros en la localidad (Huitzuco, Gro.), que tienen forma de livingstonita, mas le son seudomorfos. Bércena (1874.1879), id.

Dana (1944), se ha citado al cinabrio como seudomorfo según livingstonita.

Isomorfismo: Bércena (1874), aparentemente prismas isomorfos con la estibina, y como ella en grupos columnares delicados.

Mallet en Bércena (1879), aspecto general de sulfuro de Sb, con el que parece isomorfo.

MACLAS

No se han observado agregaciones biáxicas o maclas entre los cristales de livingstonita. Únicamente se agrupa en agregados uniáxicos con la dirección común [010], que es la de elongación de las agujas prismáticas como dirección de paralelismo.

El conjunto se dispone en agregados espáticos bandeados, con esa direc-

ción como transversa a las bandas, cual se indica en el artículo que trata sobre su hábito (Cf. pág. 28).

Sin embargo, se puede adivinar cierta indicación de maclado por las laminillas que se observan: se deben a la asociación antedicha. Schneiderhöhn las tiene como indicio de maclas de corrimiento y las ve ocasionalmente curvadas: afirmación posible por la facilidad de exfoliar según el plano (001).

MACLAS DE CORRIMIENTO

En su examen sobre superficie pulida, interpreta Short la existencia de ciertas líneas de crucero como debidas a laminillas de traslación, a veces un tanto curvadas. Probablemente se refiere a las asociaciones uniáxicas de los cristales, cuales ya se han hecho notar en anterior artículo.

Orcel (1928) alude también a maclas de corrimiento. Berman, citado en Dana (1944), afirma existir traslación $T\{001\}$, $t[010]$.

DUREZA

Desde las primeras publicaciones sobre livingstonita quedó apreciada definitivamente su dureza, $D = 2$ (Bárcena, 1874, 1879) y $D = 1.5$ a 2 (Bárcena, 1879), según la escala de Breithaupt de 12 términos.

Con la escala de Mohs más difundida actualmente, se puede fijar asimismo en $D = 1.5$ a 2 , como coeficiente generalmente admitido.

Este dato es corroborado por Larsen y Berman (1934); mientras Schneiderhöhn la califica de débil y Short (1940) con la escala de Talmage le asigna el término C. Este dato lo cita asimismo Uytenbogaardt (1951) en sus tablas, colocándola entre las durezas: galena < livingstonita < calcopirita.

TENACIDAD

Mineral frágil y téndil, flexible en las agujitas. Los agregados fácilmente deleznable.

EXFOLIACION

La masa mineral de livingstonita es poco compacta: con ligero golpe se muestra muy deleznable, separándose en multitud de fragmentos y polvo. Entre los trozos más chicos se hallan con facilidad agujitas alargadas de $1/2$ y 1 mm, que al ser examinadas con aumento dan la impresión de monocristales (algunos sí lo son en efecto y dan radiografías de notable nitidez).

Aunque ciertamente, la exfoliación según las caras prismáticas (orientación de Gorman) es muy perfecta, no deja de serlo menos notable según el tercer pinacoide.

Bárcena (1879) habla ya del "crucero básico perfecto" de la livingstonita, y en la referencia de Dana (1944) da el plano $\{001\}$ como de exfoliación perfecta y los $\{010\}$, $\{100\}$ (orientación de Richmond) como de exfoliación pobre.

De la comparación de las observaciones de los diversos autores y de las actuales, resulta que la perfección de la exfoliación decrece según las caras $\{001\}$, $\{010\}$, $\{100\}$.

En las tablas determinativas de Donnay (1954) se encuentra la observación de que la cita que se hace en el *Strukturbericht* (Gottfried, 1956) sobre esta propiedad, tomada del trabajo de Richmond (1936), es errónea. Puede obedecer a cierta confusión en la orientación considerada.

Richmond 1936)	Gorman (1951)
(001) perfecta	(010) perfecta
(100) perfecta	(100) perfecta
(010) imperfecta	(001) imperfecta

No obstante la diferente orientación de la celda y su cambio de calidad monoclinica (Richmond) a triclinica (Gorman), las direcciones de crucero son las mismas. El ángulo entre las dos exfoliaciones más perfectas es para Richmond de 104° y para Gorman de $104^\circ 21'$.

Schneiderhöhn habla de una exfoliación clara en (001) y ocasional en (010), (100): no es muy exacto en sus apreciaciones, pues si bien la (001) puede tenerse como perfecta, no así la (010) ya que si se separan con facilidad agujitas prismáticas de exfoliación alargadas según [010], se ven todas rotas por sus cabos.

La perfecta exfoliación por (001) queda muy justificada por la estructura que se establece para livingstonita: el cristal rompe los enlaces secundarios que hay entre los dos tipos alternos de cadenas estructurales, y con menos facilidad los planos (100).

FRACTURA

La fractura de los monocristales puede calificarse de irregular; la de la masa mineral como espática, con bandas cauliformes.

FLEXIBILIDAD

Sumamente flexible, causa ésta del encurvamiento de los fragmentos que se intentan desprender de la masa por algún esfuerzo de disgregación.

COLOR

Color gris claro, como el de la galena o la estibinita, en cortes frescos. Las masas adquieren tonalidades más oscuras (empañadura) y en algunos puntos se observan manchas con tintes rojo oscuros hacia lilas.

Ya Bárcena (1874) le reconoció su "color gris plomo claro". Dana (1944) lo califica de gris negruzco.

Para Schneiderhöhn, su color es blanco galena.

TRANSPARENCIA

En condiciones especiales (lámina delgada, aumento medio, polarizador) se aprecia traslúcido rojo carmín (Cf. propiedades ópticas, pág. 39). En esquivirlas se le ve como opaco.

BRILLO

Brillo vivo, submetálico, con aspecto casi idéntico de la antimonita, en fracturas recientes. En las partes expuestas se altera rápidamente por la empañadura negra mate que las recubre.

Para Bárcena (1879) el brillo es "resplandeciente, que pasa a lustroso"; Dana (1944) califica el lustre como adamantino a metálico.

EMPAÑADURA

El brillo se pierde y torna mate, recubriéndose de una pátina gris negra de metacinnabrio y de óxidos de Sb.

En las masas metálicas, ese color general negro adquiere tintes rojo-violeta, debidos al color del polvo formado, sobre todo en las partes expuestas a cualesquiera injurias mecánicas.

ALTERACION

Por intemperismo se altera la livingstonita en un material pulverulento negro (mezcla de metacinnabrio y óxidos de antimonio) mismo que produce su empañadura.

Dana (1944) cita la observación de Page (1880) a este respecto.

POLVO

El polvo suficientemente fino es de color rojo oscuro. Tizna el papel. La suavidad del mineral permite su pulverización por simple frote con los dedos sobre una hoja blanca.

Ya en 1874 habla Bárcena de su carácter de polvo rojo, en lugar del negro de la antimonita. En su trabajo de 1879 vuelve sobre la propiedad notable de su raspadura roja; cita luego la tonalidad rojo cochinilla de su polvo.

El tono rojo oscuro de su tiznadura se ensombrece en la hoja de papel por mechones negros de la estibinita acompañante.

RAYA O RASPADURA

Las tonalidades de su raya roja (casi opaca según Dana, 1944) que se podría más bien calificar de opaca, son correspondientes a las particularidades citadas al tratar de su polvo.

FUSIBILIDAD

Término 1 de la escala de Kobell (Larsen y Berman, 1934).

MINERALES ANALOGOS

La livingstonita se parece mucho a la estibinita, de la cual se distingue fácilmente por su raspadura roja o por el matiz rojizo que adquiere al frotarla. Además, es característica diferencial entre ambas el que la disposición radiada tan propia de la antimonita suele ser con frecuencia curvada en la livingstonita, y generalmente perceptible en los radios una estriación transversa.

Hay otros minerales que teniendo asimismo disposición radiada, poseen un brillo metálico y tienen tonalidad gris análoga:

— blanco estaño hacia gris plomo	bismutita
— gris plomo, citado como el más semejante	estibinita
— gris acero, a menudo abigarrado	berthierita
— gris acero hacia gris plomo oscuro	jamesonita
— gris acero; también pardo negruzco	manganita

mas no ofrece duda su identificación.

PROPIEDADES OPTICAS

A. Los cristales de livingstonita son opacos, si bien en lámina delgada se aprecian traslúcidos, con color rojo carmín cuando se les examina en el microscopio con mediano aumento. La reflexión interna roja intensa citada por Short (1940) en su examen sobre superficie pulida se refiere probablemente a la observación en lámina delgada, con las condiciones citadas.

Su índice de refracción fue medido por Larsen (1921) como $n_{Li} =$ menos de 2.72. Este autor aprecia posteriormente (1934) sus índices $\alpha(B = \text{extremo})$, $\beta = 3$, $\gamma = ?$, no siendo posibles otras determinaciones que den indicio sobre la posición de su indicatriz óptica; si bien Dana (1944) tiene como posición del eje óptico $Z = [010]$ la del sentido de elongación de los cristales.

Para este autor la livingstonita es probablemente de signo óptico negativo (—) y de extrema birrefringencia.

Presenta extinciones entre nícoles cruzados.

Su pleocroísmo por transparencia, apreciable asimismo, sólo en lámina delgada, es muy débil y se desarrolla siempre con la misma tonalidad rojo carmín; se aprecia únicamente por un ligero cambio en la intensidad de coloración del campo del microscopio. Igual lo juzgan asimismo Larsen y Berman (1934), aunque Dana (1944) lo tiene como "moderado en rojo, con $Z < X$ ".

B. En superficie pulida se le ve blanco (mejor gris plomo claro), con anisotropía (+) muy fuerte y de gran dispersión, comparable a la de la estibinita. Short (1940) la califica de intensa, y los colores de polarización los tiene por blanco, azul acerado, negro.

Su pleocroísmo es débil; según Schneiderhöhn,

A = débil

H = más fuerte, de blanco galena a blanco gris pardo.

Presenta un poder reflector elevado, con reflexiones internas rojo profundas (Dana, 1944 cita a Short, 1940) que más bien se le ha de tener por rojo carmín oscuras (Cf. la salvedad aludida al comienzo de este párrafo), con los porcentajes calculados por Phillips (1932):

verde	37
anaranjado	32.5
rojo	30

Estos porcentajes de reflectividad fueron calculados por ese autor, análogamente a como se los calcula en el caso de sustancias transparentes (aunque su brillo tenga un significado diferente), deduciendo su índice de refracción n y su reflectividad R por las ecuaciones de Fresnel,

$$n = \frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}}$$

y de Lorenz-Lorentz para la refracción molecular,

$$MR = \frac{Pm (n^2 - 1)}{d (n^2 + 2)}$$

Teniendo en cuenta la densidad de 4.8 y el peso molecular con la fórmula $HgSb_4S_7$ por entonces admitidas, calcula

	Reflectividad	Refracción molecular	
		calculada	observada
Livingstonita	32.5	150	138

No se repiten ahora los cálculos con las nueva densidad y fórmula adoptadas definitivamente por ser datos puramente apreciativos y no alterarse fundamentalmente.

Puédese apreciar cierta indicación de maclado por las laminillas que se observan: se deben más bien a la asociación uniáxica o paralela de los monocristales para formar las bandas que se aprecian macroscópicamente en la masa mineral. Schneiderhöhn las tiene como indicio de maclas de corrimiento y las ve ocasionalmente curvadas.

COEFICIENTES DE ABSORCION

Los coeficientes de absorción de masa μ^* de la livingstonita $HgSb_4S_8$ para las radiaciones más comunes, se han calculado dividiendo su absorción molecular correspondiente a ellas, por su peso molecular, $Pm = 944.102$.

TABLA III. Coeficientes de absorción

Radiación $K\alpha$	Hg	Sb	S	absor. mol.	μ^*
		4 Sb	8 S		
Mo	26500	4300 17200	322 2576	46276	49.0116
Zn	37300	29800 119200	2400 19200	175700	186.1027
Cu	44700	34600 138400	2930 23440	206540	218.7687
Ni	54600	41600 166400	3580 28640	249640	264.4205
Co	66200	49200 196800	4460 35680	298680	316.3641
Fe	81000	58700 234800	5610 44880	360680	382.0349
Mn	94500	71700 286800	6960 55680	436980	462.8525
Cr	111000	88500 354000	8750 70000	535000	566.6760

ENSAYOS

Los ensayos que se describen como característicos del mineral son datos de interés puramente histórico, ya que los métodos analíticos actuales han progresado y adquirido precisión, con el desarrollo de la ciencia.

Al describirlos no se pretenden citar como exclusivos de la especie mineral en estudio, ya que son los generales para la identificación del S, Hg y Sb, sus componentes; ni exponer aquí los más adecuados para ello, que no es su lugar.

No se altera sensiblemente con el HNO_3 en frío; caliente lo disuelve al mineral, dando precipitado blanco insoluble, con separación de S. Se disuelve añadiendo HCl.

El H_2SO_4 lo precipita, formando sulfuro amarillo y otro de color negro.

El H_2S forma abundante depósito amarillo soluble en gran parte en sulfhidrato de NH_4 , quedando depósito de sulfuro negro insoluble. (Datos analíticos de Bárcena, 1874, 1879, y de Mallet en Bárcena, 1879.)

La fusibilidad de la livingstonita es del grado 1 de la escala de Kobell. Funde al primer intento de aproximación del soplete, con desprendimiento de abundantes humos blancos.

Refiriéndose Bárcena a la muestra de livingstonita de Guadalcazar, añade que calentada en tubo abierto emite asimismo humos blancos; añadiéndole cal sodada, vapores mercuriales que se depositan formando glóbulos metálicos en la parte fría del tubo. Se volatiliza sobre el carbón dejando una pegadura blanca muy amplia y ciertas aureolas amarillas y

IV Tabla comparativa de los análisis químicos efectuados

	HgSb ₂ S ₇ (Hintze, 1904)	HgSb ₂ S ₇ (Dana, 1944)	Hg ₂ Sb ₂ S ₁₃ (Hintze, 1904)	HgSb ₂ S ₈ (Niizeki, 1957, actual, 1965)	Bárcena (1874, 1879)	Harrington (1875)	Mallet (1876)	Bárcena (1876)	Venable en Bárc. (1879)
	A	B	C	D	I	II	III	IV	V
S	24.82	24.60	23.46	27.169	29.08	29.08	—	22.97	20.43
Sb	53.03	53.40	53.99	51.583	53.12	53.12	53.75	53.12	46.49
Hg	22.15	22.00	22.55	21.246	14.00	14.00	22.52	20.00	19.56
Fe	—	—	—	—	3.50	3.50	vestig	—	0.16
Res.	—	—	—	—	—	—	—	3.91	12.93
Tot.	100.00	100.00	100.00	99.999	99.70	99.70	96.09	97.57
T	e				H	u	t	z	c
				o					o

	Venable en Bárc. (1879)	Venable (1879)	Dana (1944)	Page (1880)	Baker (1880)	Niizeki y Buerger (1957)	Actual (1965)
	VI	VII	IX	X	XI	XII	XIV
S	19.64	23.62	23.73	24.50	24.56	24.83	28.08
Sb	44.26	53.76	53.75	52.21	[53.04]	52.20	51.63
Hg	18.47	22.62	22.52	22.61	22.40	22.71	20.29
Fe	0.10	—	—	0.68	—	—	—
Res.	16.16	—	—	—	—	—	—
Tot.	100.00	100.00	100.00	100.00	100.74	100.00
H	u		G		A		H
				u	r		u
				z	t		z
				c	f		c
				o	i		o
					c		
					o		

nita y repitió sus análisis, hallando según él "la misma proporción de Sb, pero un 20% más de Hg (análisis III); no determina el S." Luego calcula ese S (IV) por un procedimiento "jocosos"; supone una fórmula del compuesto, HgS 2 Sb₂S₃, y halla que el S necesario para ello es (19.77 + 3.20 = 22.97), lo cual daría sus resultados (IV) no concordantes con los afirmados antes y después (I) en la misma publicación, siendo propiedad de Harrington (II). En la suma de porcentajes (IV) se equivoca, dándole un total de 99.09 y no de 100.00 que es la correcta. Con esta enmienda, cita Hintze (1904) este análisis (IV) tan escabroso.

6° Ante sus perplejidades, resuelve Bárcena (1879) enviar unas muestras a Alemania, de las que no tuvo respuesta, y luego a Mallet a los Estados Unidos, cual ya se hizo notar en la reseña histórica que precede a esta revisión crítica. Mallet endosa el encargo (Bárcena, 1879) a un discípulo suyo, Venable, quien publica la descripción del mineral con los análisis efectuados (1879) y los comunica a Bárcena: éste adjunta a su artículo los datos recibidos.

Los dos análisis (V y VI) efectuados por Venable son irreales: en uno y otro considera como componentes centesimales el "S libre", o de las pegaduras de S nativo de la ganga que acompaña las muestras; además, en la parte que se puede agrupar como residuo, incluye yeso, residuo insoluble y humedad con un 8.96% (V) o sólo yeso 12.59% (VI) siendo impurezas de la ganga. Los porcentajes de estos análisis son inadmisibles.

7° De los análisis (V) y (VI) previos, admite Venable como definitivos los (VII y VIII) que calculan los porcentajes de los elementos puros de las respectivas muestras anteriores. Hintze (1904) los cita ambos, y Dana (1944) da como composición del mineral de Huitzucó el promedio (IX) de los dos.

8° El único análisis publicado sobre la livingstonita de Guadalcázar (X) es el de Page (1880), citado como tal por Hintze (1904) y por Dana (1944).

9° En 1880 intenta Baker una síntesis de la livingstonita, y hace una mezcla, de la que obtuvo sólo una masa que interpreta como tal, aunque no precisamente cristales. De ese producto deduce los análisis (XI) y (XII). Los cita Hintze (1904).

10° Se hace notar que Richmond (1936) no efectúa el análisis de su muestra que emplea para sus radiografías, ni mide su densidad. Se basa en datos anteriores publicados: para la composición admite el análisis (IX), promedio de los dos que hizo Venable (con error de 0.02 en el porcentaje de S, pues le pone 23.75 cuando debía transcribir 23.73).

11° Gorman (1951) tampoco efectúa el análisis de sus muestras, admitiendo como base de su trabajo la composición y fórmula en las que se basa Richmond. Para calcular el complejo molecular de la celda elemental no determina tampoco la densidad de su muestra, sino que admite la determinada por Frondel, de 5.00, citada por Dana (1944).

12° En la determinación preliminar sobre la estructura de livingstonita, calculada por Buerger y Niizeki (1954) a partir de los datos de Gorman (1951) y en particular de su fórmula admitida de HgSb₄S₇, hallaron esos autores unas anomalías de posición de los átomos de S, llegando a la conclusión que debería ser más bien la de HgSb₄S₈.

Repetieron el análisis químico (XIII) confirmándolo por otro espectrográfico, a partir de una muestra de Huitzucu, Guerrero, proporcionada por Foshag, del National Museum de Washington. Se trataba de un cristal de

Análisis químico		Análisis espectrográfico	
S	27.61	Si	0.1 — 1.0%
Sb	50.46	Al	0.1 — 1.0
Hg	19.49	Ca	500 — 3000 ppm
As	0.29	Cu	200 — 1000
Fe	0.22	Mg	100 — 500
Pb	0.24	Bi	100 — 500
		Mn	50 — 300
		Ag	5 — 25
		Na	5 — 25
		Te	2 — 10

selenita que incluía varias agujitas de livingstonita. Luego de ser aislados de la matriz previamente disuelta por HCl, se separaron mediante líquidos pesados y seleccionaron bajo el binocular. Los resultados fueron (Niizeki y Buerger, 1957), los de la tabla anterior.

Este análisis se resume:

1° Suponiendo el Al y el Si espectrográficos como debidos a algún silicato no identificado, y suprimiendo los elementos espectrográficos menores. Lo restante se calcula sobre 100.

2° Se agrupan juntos por un lado el Hg, Pb, Fe y por otro el Sb, As, como posibles sustituciones isomorfas.

De este modo se tiene:

V Cuadro que expone las diversas densidades observadas y calculadas

	Análisis	Normalización	HgSb ₄ S ₇	HgSb ₄ S ₈
S	27.61%	28.08%	24.61	27.17
Sb	50.46			
As	0.29	50.75	53.40	51.48
Hg	19.49			
Pb	0.24	19.95	21.99	21.25
Fe	0.22			
	<u>98.31</u>	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>
Dens. obs. (Frondel)	5.00			
Dens. calc. (Niiz. Buerger.)			4.88	5.06

hallando mayor correspondencia entre las columnas 2 y 5. En esta última, el término 51.48 debe ser error tipográfico; es 51.58, según nuestros cálculos expuestos en la tabla general; además de que la suma así es correcta.

13° Para efectos de la memoria actual sobre livingstonita, se realizó cuidadosamente por parte de R. Courtade nuevo análisis de un ejemplar proveniente de la localidad típica, teniendo cuidado por seleccionar la parte de mineral más puro. No obstante se hallaron como impurezas parte de la matriz (Ca, etc.) que se eliminan del conjunto obedeciendo a criterios semejantes a los expuestos en el párrafo anterior.

Se halló:

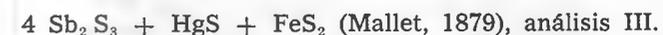
	Análisis	Normalización
S	25.83%	27.5021%
Sb	47.17	50.2235
Hg	<u>20.92</u>	<u>22.2742</u>
	93.92	
Imp.	6.08	
Total	<u>100.00</u>	<u>99.9998</u>

Estos resultados concuerdan con el análisis espectrográfico por fluorescencia (Cf. pág. 43) que indica Sb, Hg, Ca, Pb ?, As ? El comportamiento del Pb y el del As en nuestro análisis puede ser interpretado como en el anterior, por lo cual habría que esperar un aumento de algunas centésimas en los porcentajes de Hg y de Sb, confirmando con ello la precisión de ambos análisis.

FORMULA QUIMICA

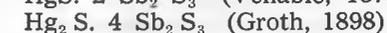
Hg Sb₄ S₈

Las fórmulas dobles postuladas para la livingstonita, tales como



(Bárcena, 1874, 1879), análisis I.

Este autor halla la misma fórmula que Harrington, del que probablemente toma los porcentajes analíticos.



etc.,

no son admisibles, pues como lo prueba el diagrama de polvo obtenido, se trata de un compuesto único y no de mezcla de varios componentes: en efecto, sus líneas de difracción no son integración de los máximos de los componentes sencillos.

Con respecto a la primera de las fórmulas (de la de Mallet, derivada de los análisis III y IV), sostiene Groth la existencia de HgS en las sulfosales, como más probable que la de Hg₂S (análogamente al Cu₂S en los sulfoan-

timonitos) y deduce por ello $\text{Hg}_2\text{S} \cdot 4\text{Sb}_2\text{S}_3$ como sal del ácido $\text{H}_2\text{Sb}_8\text{S}_{13}$; sin embargo, más tarde (Tab. Uebers. (1898)32) también le asigna a livingstonita la fórmula HgSb_4S_7 .

Las líneas de difracción más intensas de los compuestos a que hacen referencia las fórmulas dobles citadas son:

ASTM: 6-0474 Estibinita Sb_2S_3 (ortocl)	ASTM: 6-0261 Metacínabrio HgS (cúbico)	ASTM: 6-0256 Cínabrio Hg_2S (trigón)	ASTM: 6-0710 Pirita FeS_2 (cúbico)	ASTM: 4-0654 Livingstonita HgSb_4S_7 (tric)
57 5.052	100 3.378	100 3.359	84 2.709	40 5.15
67 3.573	57 2.068	94 2.863	66 2.423	70 3.74
72 3.556	45 1.7644		52 2.2118	70 3.48
95 3.053			40 1.9155	100 3.00
100 2.764			100 1.6332	60 2.27
52 2.680				50 1.73
46 2.525				
46 1.940				

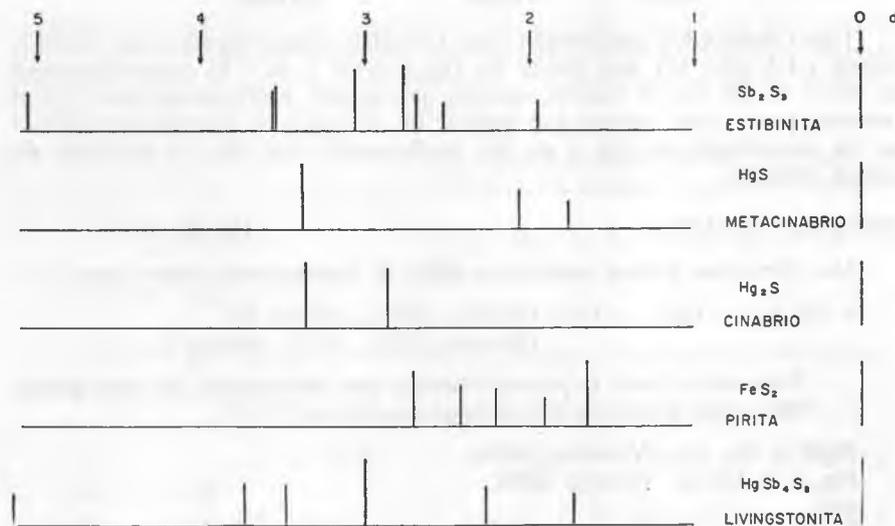


FIGURA 11. Comparación de espectros de difracción, para rechazar las fórmulas propuestas que se han propuesto.

En cuanto a las otras fórmulas propuestas:

HgSb_4S_7 , utilizada por Richmond (1936) y citada por Dana (1944) y por Hintze (1904), proviene del análisis IX (Cf. la tabla de análisis de la pág. 44), es promedio de los análisis VII y VIII de Venable (1879).

	%	r	n	
S	23.75	0.7407	6.6016	r = razones atómicas n = razón al menor r
Sb	53.75	0.4414	3.9340	
Hg	22.52	0.1122	1.	

resultando,



Según los cálculos de Mallet,



y por los de Venable, $\text{Hg}_1 \text{Sb}_{4.2} \text{S}_7$ se confirma la fórmula hallada.

$\frac{1}{2} (\text{Fe}, \text{Hg})_3 \text{Sb}_2 \text{S}_6$ determinada por Harrington (1875) y copiada probablemente por Bárcena (1874, 1879), con base en los análisis I y II.

S	29.08	0.9069	2.0786
Sb	53.12	0.4363	1.
Hg	14.00	0.6979	1.5995
Fe	3.50	0.6267	1.4363

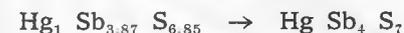
resultando,



Harrington halla las razones atómicas $\text{S} = 18.17$, $\text{Sb} = 8.7$, $\text{Hg} = 7.4$, $\text{Fe} = 1.2$, afirmando corresponder aproximadamente a $\text{Fe}_1 \text{Hg}_1 \text{Sb}_7 \text{S}_{15}$ (?), y Bárcena a las $\text{Fe}_1 \text{Hg}_{1.4} \text{Sb}_{7.3} \text{S}_{15.1}$ que luego recalcula en $\text{Fe}_1 \text{Hg}_1 \text{Sb}_6 \text{S}_{13}$. $\text{Hg}_2 \text{Sb}_8 \text{S}_{13}$ obedece a los análisis de Baker (1880) sobre las muestras de livingstonita artificial de este autor (promedio de los análisis XI y XII)

S	24.73	0.7712	6.857675
Sb	53.08	0.4359	3.8764
Hg	22.56	0.1124	1.

resulta,



prácticamente igual a la de Richmond.

$(\text{Fe}, \text{Hg}) \text{Sb}_4 \text{S}_7$ calculada con base en el análisis de Page (1880) efectuado sobre muestras de Guadalcázar (análisis X):

S	24.50	0.764096	62.7542
Sb	52.21	0.4288	35.2192
Hg	22.61	0.1127	9.2573
Fe	0.68	0.0121	1.

resulta,



o sea, aproximadamente,



$\text{HgSb}_4 \text{S}_8$ es la determinada para este trabajo y coincide con la publicada por Niizeki y Buerger (1957). Por el análisis XIII de la tabla de análisis se tiene,

S	27.50	0.8577	7.7270
Sb	50.22	0.4125	3.716
Hg	22.27	0.1110	1.

resultando,



cuya correspondencia con las anteriores, por la comparación de los análisis efectuados, por las densidades calculada y observada... hacen retener como la más adecuada, tanto más que por las consideraciones expuestas al razonar nuestro análisis, habrán de admitirse como algo más elevados los porcentajes reales de Sb y de Hg.

Para confirmar la preferencia de Niizeki y Buerger en favor de esta última fórmula, se sirven estos autores de un criterio estructural que aquí se resume. Comenzaron su determinación de estructura basándola en todos los datos publicados por Gorman y calcularon con ellos una proyección de

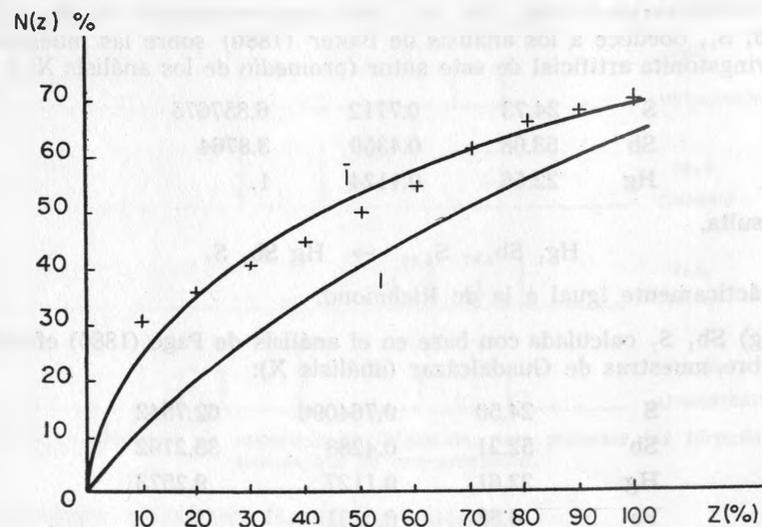


FIGURA 12. Prueba estadística de la centrosimetría. La curva teórica de la centrosimetría del cristal se designa por I; la de la no centrosimetría, por 1. Las cruces representan los resultados de F^2 (hOl).

Patterson P(xz). El átomo de Hg se fijó en el centro de simetría origen de la celda de Gorman, del grupo P1. Una interpretación cuantitativa de las alturas de los máximos en esa proyección dio la posición de los átomos de antimonio.

Al verificar la centrosimetría por el método estadístico de Howells, Phillips y Rogers, llegaron al trazado de la curva de la fig. 12, que indicó el centro de simetría en la proyección.

Por una síntesis de Fourier calculada empleando sólo los signos determinados por átomos pesados se confirmaron las situaciones de los átomos de Sb y se delimitaron las áreas posibles para la colocación de los átomos de S. Los cálculos de otras síntesis de Fourier demostraron que uno de los siete S debería ocupar el centro de simetría (suponiendo centrosimétrica a la livingstonita); mas no fue así, sino que en dos máximos, de coordenadas $x = 0.598$ y $z = 0.444$. (Fig. 13).

En consecuencia, la fórmula de 7S debe ser desechada para admitir la de $\text{HgSb}_4 \text{S}_8$.

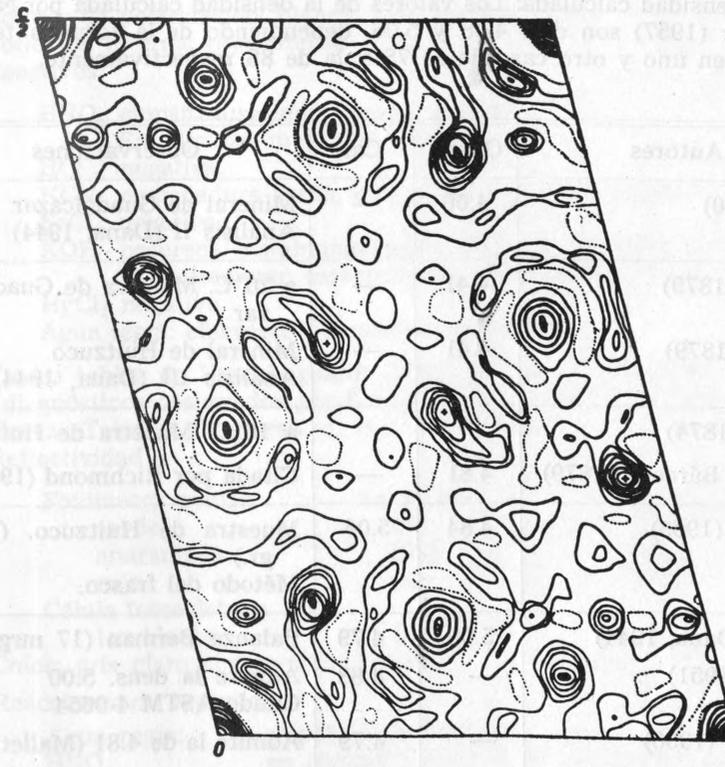


FIGURA 13. El primer mapa de densidad electrónica β (xz) calculado por Niizeki y Buerger (1957).

DENSIDAD 4.84 (obs.) 5.06 (calc.)

En el cuadro siguiente se exponen de manera sinóptica las diferentes apreciaciones de densidad de que ha sido objeto la livingstonita, sus densidades calculadas y observaciones pertinentes:

El valor de 4.84 determinado se hizo con grandes precauciones, por el método del frasco, sobre la muestra bastante pura de mineral que sirvió para su análisis. Extraña un poco a primera vista el no obtener un valor algo más elevado, tanto más que la densidad calculada nos da el de 5.06; mas al fijar la atención en las impurezas intercrystalinas halladas en la determinación cuantitativa de la livingstonita (véase el análisis XIV, de pág. 44) y las sustituciones isomorfas que da pie a esperar hasta llegar a obtener los porcentajes teóricos, explican muy bien el valor real de la densidad hallada. Esto tiende a justificar el valor de 5.00 encontrado por Frondel, el más elevado de los determinados experimentalmente, efectuando sus mediciones por la balanza de torsión de Berman, y midiéndolo sobre agujitas cristalinas independientes.

B. Densidad calculada: Los valores de la densidad calculada por Niizeki y Buerger (1957) son dos: 4.88 y 5.06, dependiendo de la fórmula teórica aceptada en uno y otro caso: la de 7S y la de 8S respectivamente.

Autores	Obscr.	Calc.	Observaciones
Page (1880)	4.06	—	Mineral de Guadalcázar Análisis II (Dana, 1944)
Bárcena (1879)	4.41	—	a 20°C. Muestra de Guadalcázar
Venable (1879)	4.41	—	Mineral de Huitzuco Análisis III (Dana, 1944)
Bárcena (1874)			a 16°C. Muestra de Huitzuco
Mallet en Bárcena (1879)	4.81	—	Citada por Richmond (1936)
ACTUAL (1965)	4.84	5.06	Muestra de Huitzuco. (10.65 gr.) Método del frasco.
Fronde! (Dana, 1944)	5.00	4.79	Balanza Berman (17 mrg.)
Gorman (1951)	—	4.88	Admite la dens. 5.00 Citado ASTM 4-0654
Richmond (1936)	—	4.79	Admite la de 4.81 (Mallet)
Niizeki y Buerger (1957)	—	4.88	Admiten 5.00 (Fronde!)
	—	5.06	

Los cálculos hechos para este trabajo, fijada ya la elección de la fórmula $HgSb_4S_8$, confirman el valor de 5.06 de los autores anteriores. En efecto, a partir de ella, siendo su peso molecular $Pm = 944.102$ y con un contenido de $Z = 8$ por celda elemental, que se fija más adelante, se calcula su volumen molecular:

$$V_m = \frac{V_c}{Z} = \frac{2477.5002}{8} = 309.6875$$

(V_c , volumen de la celda, Cf. pág. 66), y de allí la densidad teórica:

$$d = \frac{Pm}{V_m \cdot N} = \frac{944.102}{309.6875 \cdot 0.60236 \cdot 10^{24}} = 5.06104$$

DIAGNOSTICO EN SUPERFICIE PULIDA

Método de Short (1940)

Anisotropía intensa

Colores de polarización: blanco, azul acerado, negro.

Reflexión interna: roja intensa

Reactivos:

HNO_3 empañadura lenta, parda, irisada.

En algunas muestras negativa.

HCl negativa.

KCN empañadura parda, con grietas; en otras muestras, negativo.

$FeCl_3$ negativa.

KOH oscurece instantáneamente, dejando depósito amarillo: acción altamente característica, parecida a la de la estibinita.

$HgCl_2$ negativo

Agua regia: efervesce y empaña con irisación.

En las tablas de Uytendogaardt (1951) se citan entre otros los caracteres diagnósticos observados por Schneiderhöhn y Ramdohr (1931):

Dureza Talmage C; galena < H < calcopirita.

Reflectividad

Fotómetro ocular:	En el aire	En el Aceite
verde	37	22
anaranjado	32.5	19.5
rojo	30	16.5

Célula fotoeléctrica

luz blanca 31.6 | —

Color: gris claro con tonalidad crema.

Reacciones de superficie:

Agua regia: empaña con irisación.

HNO_3 : en algunas muestras +, en otras —.

KCN: empañadura gris o parda; en otras muestras, negativo.

KOH: oscurecimiento instantáneo, dejando precipitado amarillo: reacción muy típica, semejante a la de estibinita.

HCl, FeCl₃, HgCl₂: negativa.

Nota: Se pule fácilmente.

Reflectividad más bien alta.

Ref. pleocroísmo de reflexión: patente, gris crema a crema pardo con tonalidad violeta.

Anisotropía: fuerte, violeta oscuro o verde gris claro (nícoles no completamente cruzados).

REACCIONES MICROQUIMICAS

Método de Short (1940):

Disolver el mineral con una gota de agua regia.

Precipitar con cloruro mercurioso.

a) Ensayo de Hg:

Disolver el precipitado con una gota de HNO₃ 1%.

Trasladar la gota, disolviendo en ella un fragmento de nitrato de Co.

Añadir un fragmento de KCNS.

Se forman arborescencias y prismas color azul-añil.

b) Ensayo del Sb:

Disolver el precipitado con una gota de HCl 1 : 5.

Trasladar la gota, añadiendo fragmento de KI: la solución se vuelve amarilla cerca del trocito. Esperar que se disuelva.

Añadir fragmento de CsCl.

Se forman estrellas y hexágonos color anaranjado.

INDICES DE BARKER

No se halla cita de la livingstonita entre los cristales monoclinicos recopilados en el Indice de Barker (Porter y Spiller, 1956).

Tampoco aparece, como así era de esperar, entre los cristales triclinicos cuyo volumen es de reciente publicación, de pensar que los autores hubiesen aceptado la presentación del cristal y cálculos ofrecidos por Gorman.

Vuelto a su calidad de monoclinico con la que aquí se le estudia, reivindicada ya por Niizeki y Buerger, los ángulos de Barker calculados deberían ser:

LIVINGSTONITA HgSb₄S₈

$$am = (100 : 110) = 74^{\circ}27'36''$$

$$bq = (010 : 011) = 10^{\circ}57'16''$$

$$cr = (001 : 101) = 45^{\circ}51'52''$$

$$ra = (101 : 100) = 29^{\circ}56'51''$$

$$ca = (001 : 100) = 74^{\circ}48'01''$$

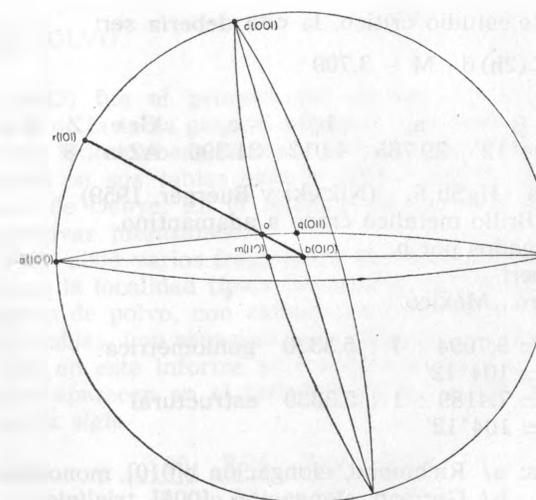


FIGURA 14. Estereograma de livingstonita con la orientación de Barker.

$$a : b : c = 3.7094 : 1 : 5.3330 \text{ goniométrica}$$

$$a : b : c = 7.4189 : 1 : 5.3330 \text{ estructural}$$

$$\beta = 104^{\circ}12'$$

Simetría: C(2h)6 - A2/a - M(1) Monoclínica holoédrica.

INDICES DE DONNAY

En las tablas de Donnay (1954) se halla citada la livingstonita con una sola referencia:

LIVINGSTONITA C(2h)5 M - 5.427

						Densid.				
a/b	c/b	β	a ₀	b ₀	c ₀	Gr. esp	Z	Tip.es	obs	cal
5.427	3.804	104°	21.60	3.98	15.14	P2 ₁ /n	4	...	4.81	...
			±0.04	±0.01	±0.04					

Livingstonita HgSb₄S₈ Strukturber. IV, 150(B)

Gris plomo, brillo submetálico.

Prismas, alargados por b.

Exfol.: (100) perf.

Huitzucó, México.

$$(a : b : c) = 5.3660 : 1 : 3.7572$$

$$\beta = 104^{\circ}10' \text{ goniométrica}$$

Error Strukturber.: exfoliación.

Extinciones dadas en Strukturber. no justifican el eje 2₁.

Según el presente estudio crítico, la cita debería ser:

LIVINGSTONITA C (2h) 6 M - 3.709

a/b	c/b	β	a_0	b_0	c_0	Gr.e	Z	T.e	obs	cal	Densid.
3.709	5.333	104°12'	29.765	4.012	21.396	A2/a	8	...	4.84	5.06	

Livingstonita HgSb₄S₈ (Niizeki y Buerger, 1959)

Gris plomo. Brillo metálico craso a adamantino.

Prismas alargados por b.

Exf.: (001) perf.

Huitzucó, Gro., México.

a : b : c = 3.7094 : 1 : 5.3330 goniométrica

$\beta = 104^\circ 12'$

$a_0 : b_0 : c_0 = 7.4189 : 1 : 5.3330$ estructural

$\beta = 104^\circ 12'$

Orientaciones: a/ Richmond, elongación b[010], monoclinico.

b/ Gorman, elongación c[001], triclínico.

Matrices transformación:

a/ → b/ : 001/100/010 ; b/ → a/ : 010/001/100

CRISTALES ARTIFICIALES

Barker (1880), citado por Hintze (1904), obtuvo de unas mezclas de HgS y de Sb₂S₃ en una atmósfera de CO₂ una masa parecida a livingstonita, mas no cristales. Ello prueba que las agujitas de esta especie no se hallan en el sistema HgS-Sb₂S₃, con las condiciones experimentales tratadas (Dana, 1944).

Haciendo Barker el análisis de la masa resultante halló su composición, lo cual no ha de extrañar por haberla puesto así para su síntesis frustrada.

Pelabon (1905) repite el experimento con otras circunstancias, aunque sin lograr tampoco cristales de livingstonita: disuelve HgS en sulfuro de Sb fundido y mantenido a temperatura elevada. La curva de fusibilidad de las muestras obtenidas tiene forma de V. Hay mezcla eutéctica que funde a unos 455° en donde la relación R entre la masa del HgS y la total de la muestra es R = 0.34.

La temperatura de solidificación de las muestras más ricas en HgS resulta difícil determinar por las sublimaciones de los componentes. Las experiencias se hicieron con tres volúmenes moleculares de HgS y con un mol de Sb₂S₃. La temperatura mayor, lograda a presión ordinaria, es de 590° (corresponde a su mezcla con R = 0.65). Nótese que durante la sublimación del sulfuro de Hg y la temperatura quedan constantes en ese nivel térmico.

La constante crioscópica calculada es de 797 para el Sb₂S₃, y la de 788 es del HgS.

DIAGRAMA DE POLVO

2.997	3.747	3.487	10.354
10	8	7	3

Harcourt (1942) fue el primero en obtener un diagrama de polvo de livingstonita (I de la tabla general adjunta), con base en una muestra de Beresow, cerca de Ekaterinberg, Rusia y se halla publicado con el de otras especies minerales en sus tablas para la identificación de las menas mediante diagramas de Debye. En él aparece sólo la lista de los espaciados d con sus respectivas intensidades.

Gorman (1951) aisló varios fragmentos de exfoliación de unas muestras de livingstonita de la localidad típica (Guerrero), pulverizando algunas para lograr su diagrama de polvo, con cámara de 114.6 mm y radiación de Cu filtrada (II de la tabla). Los espaciados aparecen en unidades kX en el trabajo original, que en este informe se traducen a A para uniformarlas con los demás, según aparecen en el tarjetero de la ASTM (fichas N° 4-0654) que los cita con la sigla

3.00	3.74	3.48	5.15
100	70	70	40

(Rad. CuK α , cámara de Debye 114.6 mm). Acompaña a la relación de espaciados y de intensidades, las de espaciados calculados y de símbolos correspondientes: desgraciadamente hace la numeración con base en la supuesta por él calidad triclínica del cristal, y como se recordará con la orientación tipo (b), con el eje c[001] como de elongación. Dicha numeración del espectro de difracción se efectuó mediante el método gráfico de Peacock (1938).

En un estudio posterior y más completo sobre livingstonita, Niizeki y Buerger (1957) publican entre otros los datos de su espectro de difracción (III de la tabla) con los espaciados medidos y calculados, así como la numeración correspondiente. Para ello toman los autores como base la celda monoclinica medida por ellos (Cf. pág. 62). La referencia de este trabajo y explícitamente la descripción de su diagrama de Debye, aparece en Berry y Thompson (1962).

Para la crítica de datos que se lleva con este trabajo, se obtuvieron otros dos diagramas el fotoespectrométrico por difracción (fig. 15), rad, CoK α , filtro Fe, 32 kv, 10 mA, 2-8-1, y el fotográfico (fig. 16), rad. CuK α , cámara Debye 114.6 mm diámetro (diagrama IV de la tabla).

Todos los diagramas citados se comparan en la tabla general anexa a este artículo, uniformando las unidades a A. En ella se ha calculado el diagrama que se considera aquí como definitivo (columna V) con el promedio de todos los otros diagramas obtenidos, para lograr la mayor exactitud de lecturas, y teniendo como base las líneas del espectro fotográfico logrado. Las escalas de intensidades preceden a las columnas de espaciados. La de Harcourt nos la muestra sobre 10.

Es notable la buena coincidencia entre todas esas lecturas tomadas independientemente, lo cual apoya en considerar el diagrama promedio como válido y aceptable cual definitivo.

Para la numeración de este diagrama, véase pág. 67.

CELDA ELEMENTAL

A. Así como a Richmond (1936) se debe la primera medición geométrica de la livingstonita, fue también el primero en medir las dimensiones de su celda elemental monoclinica. La orientación elegida es la que llamamos tipo (a): el eje de alargamiento del cristal es la dirección de la traslación b_0 , y los otros dos a_0 y c_0 yacen en el plano perpendicular a ella.

Sus cálculos le llevan a las constantes:

$$a_0 = 15.14 \pm 0.04 \quad b_0 = 3.98 \pm 0.01 \quad c_0 = 21.60 \pm 0.04$$

$$\beta = 104^\circ$$

$$a_0 : b_0 : c_0 = 3.80 : 1 : 5.43$$

Esas dimensiones reticulares fueron determinadas por H. Berman a partir de un diagrama de cristal de livingstonita, giratorio por $[010]$, dirección de elongación de los cristales, y por otros diagramas de Weissenberg de niveles 0 y 1, con mismo giro. (Rad. $\text{CuK}\alpha$.)

Calculan estos autores un volumen de su celda monoclinica de $V = 1262 \cdot 10^{-24}$, con peso molecular $P_m = 3679$ y densidad $d = 4.81$.

En el Dana's System of Mineralogy (1944) se citan estas dimensiones calculadas por Richmond (1936); también se halla referencia de ellas en las tarjetas de la ASTM.

B. Gorman (1951) repite las mediciones reticulares y halla la livingstonita triclinica. Publica sus resultados en kX, citados luego en A por las tarjetas de la ASTM, a propósito de registrar el diagrama de polvo de la sustancia.

De un fragmento de exfoliación obtuvo este autor unos diagramas de rotación y otros de Weissenberg, niveles 0 y 1. Tomó arbitrariamente la arista de exfoliación como eje c_0 y eje de giro para sus röntgenogramas.

Mediante los diagramas de nivel 0 calculó $d(100)$, $d(010)$, γ^* .

Con los diagramas de nivel 1 calculó α^* , γ^* mediante coordenadas rectangulares en el diagrama de Weissenberg, y con esos datos dedujo matemáticamente los demás elementos recíprocos.

Nótese que la orientación de Gorman ($a' - b' - c'$) que llamamos tipo (b), difiere de la de Richmond ($a - b - c$) tipo (a) en,

$$a = 2a' \quad b = -c' \quad c = 2b$$

esto es, admite la misma dirección del eje a, intercambiando mutuamente las de los otros dos. Esta orientación de Gorman se conforma ciegamente con la condición

$$c < a < b$$

mas en este caso es preferible considerar el cristal como alargado según el eje b, dada su morfología peculiar.

Es preciso evitar el equívoco a que se aboca uno naturalmente al relacionar los ángulos interaxiales de ambas celdas (de Richmond y de Gorman)

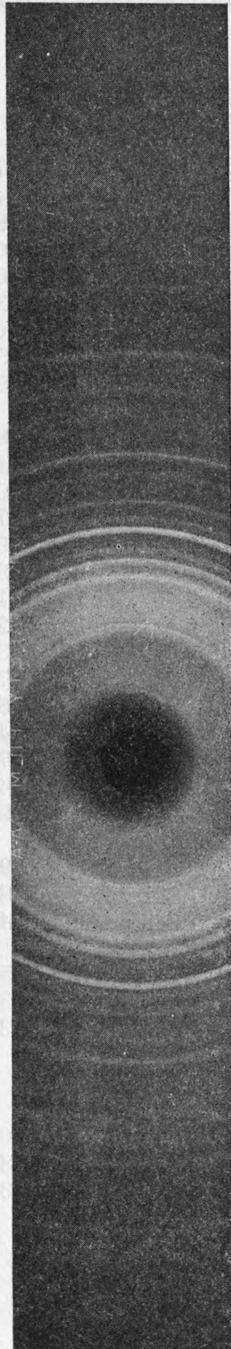


FIGURA 16. Diagrama de polvo.

por la similitud de valores de los ángulos 104° (Rich.) y $102^\circ 01'$ (Gorm.) que en la realidad de la orientación tipo (a) son los ángulos β y γ respectivamente. En este equívoco caen Niizeki y Buerger (1957). En cuanto a los valores citados para $\beta = 104^\circ$ y $\beta = 73^\circ 48'$, indica que Gorman mide la abertura entre los ejes a y -c de Richmond.

Las dimensiones calculadas por Gorman son citadas en el tarjetero de la ASTM recalculándolas en unidades A, y no en kX como se leen en la publicación original. El autor cita la tabla siguiente:

Mediciones	red recíproca	red directa
c 3.990 kX	a* 0.13819	a 7.650 kX
d(100) 7.236	b* 0.09685	b 10.817
d(010) 10.326	c* 0.25776	c 3.990
γ^* $104^\circ 44' 30''$	α^* $83^\circ 46'$	α $99^\circ 12' 30''$
	β^* $80^\circ 04'$	β $102^\circ 01'$
	γ^* $104^\circ 44' 30''$	γ $73^\circ 48'$

De esos datos se ve que dos de los elementos lineales de Richmond aparecen apreciados en mitad por Gorman; las celdas son semejantes, si bien la de Richmond se aprecia sensiblemente 4 veces mayor que la del otro.

Con los nuevos elementos, la celda tiene un volumen de 308.27 kX^3 (para HgSb_4S_7 , $Z = 1$), resultándole una densidad calculada de 4.88. Fron del la mide de $d = 5.00$ con la balanza de torsión (Dana, 1944) y Richmond (1936) calculó la de 4.79.

Sin embargo, Gorman no hizo el análisis de su muestra, ni midió su densidad, valiéndose de los datos citados por otros autores. Además, al final de su artículo subraya lo arbitrario de sus juicios indicando preferir para el cristal la holoedría triclinica a la hemiedría, "por el hecho de ser aquella más frecuente en mineralogía, que ésta" (sic).

C. Niizeki y Buerger (1957) publican las mediciones de la celda elemental de livingstonita, citadas por Berry y Thompson (1962) con el diagrama de polvo correspondiente.

En un cálculo preliminar que hicieron estos autores (1954) sobre la determinación de estructura, optaron por basarla en la presentación de la celda hecha por Gorman; mas posteriormente (1957) rechazan su celda triclinica y admiten la fórmula HgSb_4S_8 para un análisis estructural más profundo: adoptan la orientación de Richmond y su calidad monoclinica de la red. Eligen definitivamente una celda doble de la de Gorman y ocho veces mayor que la de Richmond:

$$a_0 = 30.25 \quad b_0 = 4.00 \quad c_0 = 21.48$$

$$\beta = 104^\circ 12'$$

$$a_0 : b_0 : c_0 = 7.562 : 1 : 5.370$$

Sin embargo, se advierte en su segundo trabajo un empeño grande por justificar el estudio de Gorman, en cuyo material basaron sus análisis.

Afirman (1957) que la celda triclinica ($a' - b' - c'$) de Gorman puede explicarse como imponiendo una orientación triclinica primitiva a su celda (A—B—C) monoclinica centrada, y admitiendo sus dimensiones lineales para la de triclinica:

$$A = 2a = 4a' \quad B = b = -c' \quad C = c = 2b'$$

(no obstante, ellos equivocan el sentido negativo del eje c') con lo cual, la relación de volúmenes entre esas tres celdas sería:

Richmond	:	Gorman	:	Niizeki
(a—b—c)	:	(a'—b'—c')	:	(A—B—C)
4	:	1	:	8

La justificación de Gorman resulta plausible.

En la tabla general comparativa se expone esa relación de celdas trata-da, reduciéndolas todas a una misma orientación y mismo orden de volumen; eso es precisamente lo que pretenden indicar los esquemas de la fig. 17, o también los de la fig. 18, que corresponden a la 4 del trabajo de Niizeki y Buerger (1957).

En esta figura se representa el grupo espacial que llaman A 2/a por sus proyecciones a lo largo de los ejes b, c. El contorno grueso señala la celda submúltiplo, proyectada en (010).

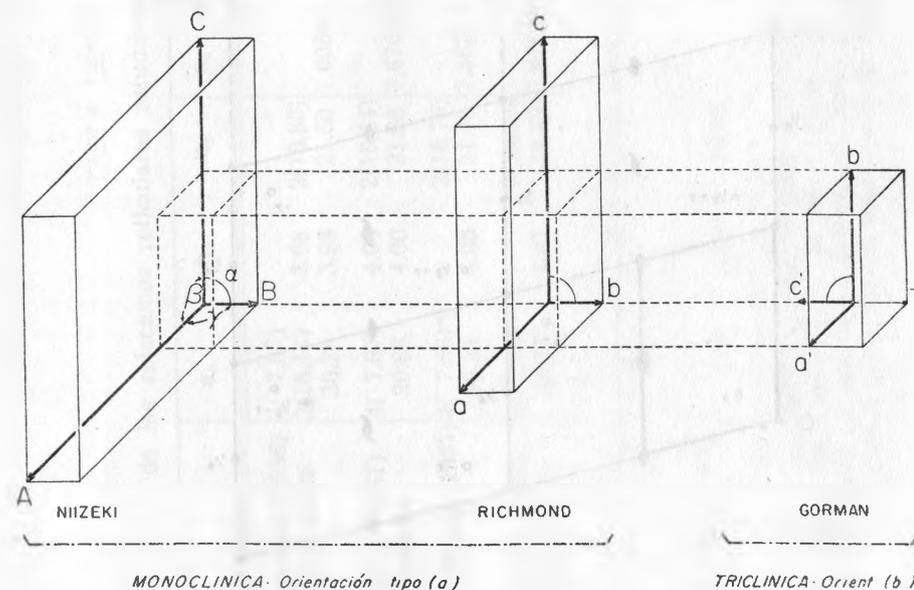


FIGURA 17. Esquema comparativo de las diferentes dimensiones y orientación de las celdas elementales consideradas.

D. Nuestras determinaciones están acordes con la simetría monoclinica y con las mediciones de la celda, tanto métricas cuanto angulares. La orientación adoptada es la de Richmond, con la elongación del cristal como eje de giro.

El estudio röntgenológico se efectuó sobre un cristal único de linvings-tonita.

Midiendo los diagramas de precesión, con el eje de giro como el de alargamiento (que se toma como eje b), para rad. Cu 1.54178, en unidades absolutas:

Radiogr. N° 344: $d^*(010) = 0.2492111$ $d^*(001) = 0.047838$
 $\alpha^* = 90^\circ 00'$
 Radiogr. N° 346: $d^*(010) = 0.498422$ $d^*(100) = 0.346547$
 $\gamma^* = 90^\circ 00'$

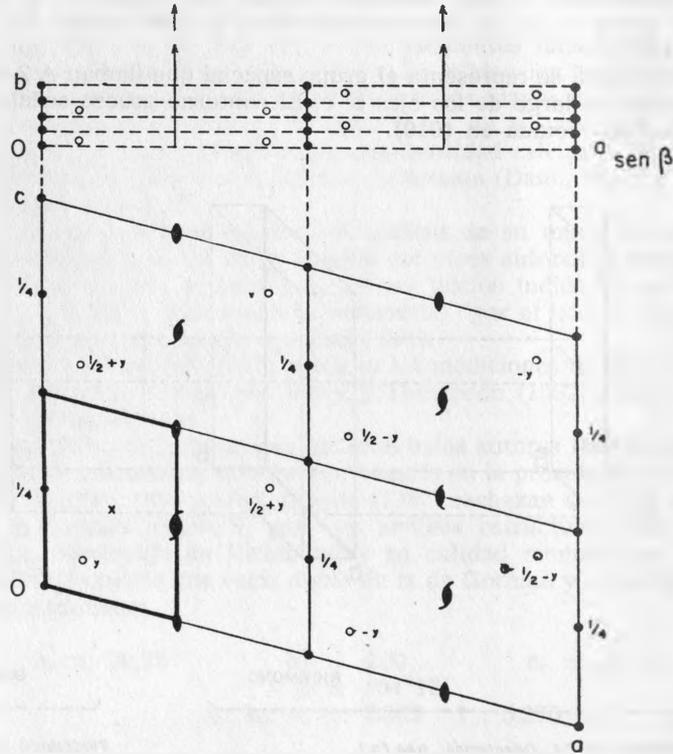


FIGURA 18. Representación del grupo espacial A2/a. El paralelogramo trazado con línea gruesa es el octavo de celda con su pseudocentro de simetría.

TABLA GENERAL COMPARATIVA

de las relaciones reticulares estudiadas, en orientación de Richmond, unidades A.

	a_0	b_0	c_0	$a_0 : b_0 : c_0$	α	β	γ	V	Z	Fórmula
Richmond (1936) Monoclinica	4 (7.57) 2(15.14) 30.28	3.98 3.98	2(10.80) 21.60	7.6080:1:5.4271	—	104°00' 104°00'	—	2(1262) 2524	4 8	$HgSb_4 S_7$
Gorman (1951) Triclínica	4 (7.67) 30.68	4.00 4.00	2(10.84) 21.68	7.6700:1:5.4200	99°12' 99°12'	S°73°48' 106°12'*	102°01' 102°01'	8 (310) 2481	8 8	$HgSb_4 S_8$
Niiz. Buerg. (1957) 4 (7.56)** 30.25	4.00	4.00	2(10.75) 21.49	7.5625:1:5.3725	—	104°12'	—	—	8	
Fabregat (1965) Monoclinica	4 (7.44) 29.76	4.01	2(10.69) 21.39	7.4189:1:5.3330	—	104°12'	—	2477	8	
La celda de Niizeki y Buerger (1957) referida a los ejes A =	$\frac{a}{4}$				$\frac{b}{2}$	$\frac{b}{2}$	$\frac{c}{2}$; C = b, calculan			
Niiz. Buerg. ser: Triclínica	7.62	4.00	10.93	—	100°31'	104°49'	73°46'	—	1	

OBSERVACIONES: Datos equivocados en la tabla comparativa, análoga a ésta, tabla 4 de Niiz. Buerg. (1957) dan el valor de 7.64 en vez del correcto, 7.56

***) no tienen en cuenta los autores el cambio de orientación de Gorman: además de alternar los ángulos β γ , deberían considerar el suplemento de 73°48', por el sentido opuesto de su eje c.

la comparación entre ambos diagramas indica que la traslación correcta es la del primero, dando como promedio de mediciones:

$$\begin{array}{lll} d^*(100) = 0.346547 & d^*(010) = 0.249211 & d^*(001) = 0.047838 \\ \alpha^* = 90^\circ 00' & \beta^* = 75^\circ 48' & \gamma^* = 90^\circ 00' \end{array}$$

con el ángulo $\beta^* = 75^\circ 48'$ se satisfizo el giro del tambor exactamente, valor prefijado por el ángulo $\beta = 104^\circ 12'$ dado por Niizeki y Buerger (1957) que así quedó confirmado como correcto.

De esos elementos recíprocos se calculan los directos de la celda monoclnica de livingstonita (orientación Richmond):

$$a = \frac{1}{a^* \sin \beta} = 29.975625 \text{ A}$$

$$b = \frac{1}{b^*} = 4.012664$$

$$c = \frac{1}{c^* \sin \beta} = 21.3965$$

$$V = a b c \sin \beta = 2477.500263 \text{ A}^3$$

Por lo tanto, la celda monoclnica admitida tiene por características:

$$\begin{array}{lll} a_0 = 29.765 & b_0 = 4.012 & c_0 = 21.396 \text{ A} \\ & \beta = 104^\circ 12' & \\ a_0: b_0: c_0 = 7.418993 : 1 : 5.333000 \end{array}$$

haciendo notar que estas dimensiones hallan su plena confirmación con las calculadas a partir del diagrama de polvo por medio de la forma cuadrática.

FORMA CUADRATICA

En la determinación de las traslaciones elementales, independiente de la efectuada con base en los diagramas de precesión, se siguió el método de Ito. Así se llegan a recalculan las dimensiones recíprocas

$$a^* = 0.3464 \quad b^* = 0.2492 \quad c^* = 0.04821$$

que confirman las calculadas a partir de los citados diagramas de precesión (Cf. pág. 64).

$$d^*(100) = 0.346547 \quad d^*(010) = 0.249211 \quad d^*(001) = 0.047838$$

con sorprendente aproximación (admitido ya como definitivo el ángulo $\beta^* = 75^\circ 48'$).

Para la numeración del diagrama de polvo y verificación de las dimensiones de la celda elemental, se empleó la forma cuadrática aplicada al caso monoclnico

$$\begin{aligned} Q_{(hkl)} &= h^2 a^{*2} + k^2 b^{*2} + l^2 c^{*2} + 2 l h a^* c^* \cos \beta \\ &= h^2 A + k^2 B + l^2 C + l h D \end{aligned}$$

siendo:

$$\begin{array}{l} A = 0.12005 \\ B = 0.06210 \\ C = 0.002324 \\ D = 0.008192 \end{array}$$

Para simplificar la cantidad de resultados por calcular, con el fin de obtener todos los índices, se redujeron las operaciones únicamente para aquellos que obedecen a los criterios citados al final de la tabla adjunta.

Con objeto de confirmar con más abundamiento las dimensiones reticulares que se critican, se calcularon también las formas cuadráticas con base en las diferentes determinaciones reticulares: ninguna se halla con mayor número de coincidencias, y ninguna tiene desviaciones menores en sus valores.

TABLA

Formas cuadráticas e interpretación del diagrama de polvo promedio de los registrados, tomando como base el diagrama de Debye obtenido para este trabajo. Se hace en él la comparación de las numeraciones calculadas por Niizeki y por nosotros. (Cf. diagramas de polvo, pág. 59)

Diagr.	Niizeki-Buerger d	Simb	d	Fabregat Q	Simb
10.354			10.370	0.009296	002
5.142	5.20	004	5.186	0.037184	004
3.747	3.75	211	3.744	0.071396	012
		$\bar{8}02$			
3.487	3.48	$\bar{4}06$	3.472	0.083016	013
		006			
3.458			3.445	0.083664	006
3.284	3.28	213			
3.231					
2.997	3.005	$\bar{6}13$	2.964	0.113876	007
		611			

Diagr.	Niizeki-Buerger d	Simb	d	Fabregat Q	Simb
2.865	2.890	$\bar{8}06$	2.887	0.120050	100
	2.874	406	2.885	0.120100	015
2.678	2.692	$\bar{6}15$			
	2.676	613			
2.419	2.433	217			
	2.415	$\bar{8}08$	2.384	0.175976	017
2.273	2.286	217	2.294	0.190002	104
	2.281	408			
	2.276	$\bar{1}2.0.6$			
2.034	2.043	$\bar{2}19$			
	2.034	$\bar{8}0.10$	2.007	0.248400	020
	2.000	020	1.999	0.250344	019
1.988			1.997	0.250724	021
			1.993	0.251866	106
			1.970	0.257696	022
1.881	1.885	$\bar{1}4.1.11$			
	1.884	4.0.10			
	1.874	$\bar{1}6.0.2$	1.872	0.285584	024
	1.851	$\bar{1}4.1.5$	1.853	0.291270	107
	1.848	$\bar{4}24$			
1.838	1.846	$\bar{1}0.1.9$			
	1.735	0.0.12	1.735	0.332064	026
1.726	1.726	16.0.2	1.729	0.334322	108
1.640			1.648	0.368450	120
1.503					
1.424					

Se hace notar que nuestra numeración de máximos de difracción no es total; se ha limitado sólo a símbolos pinacoidales y prismáticos positivos, dígitos para facilitar la escritura, y cuyo valor de Q no excediera a los límites señalados por las rayas de los diagramas leídos. Se cree que con sólo ellos se tiene una prueba suficiente de la legitimidad de las dimensiones calculadas.

Nuestras coincidencias entre valores observados y calculados están muy por dentro de los límites que admiten Niizeki y Buerger para sus resultados.

MATRICES DIRECTA M Y RECÍPROCA M*

Obsérvese que entendemos cristalográficamente por matriz recíproca M*, la inversa y traspuesta de la M del sistema cristalográfico directo, por deducirse así naturalmente del sistema cristalográfico axial recíproco, $M^{-1} = M^*$.

Las citadas matrices posibilitan el cálculo de un cristal de livingstonita, que se considera monoclinico y alargado en sentido del eje b[010], con las constantes reticulares calculadas de

$$a_0 = 29.765 \quad b_0 = 4.012 \quad c_0 = 21.396 \text{ \AA} \\ \beta = 104^\circ 12'$$

cuya relación paramétrica correspondiente es

$$a_0 : b_0 : c_0 = 7.4189 : 1 : 5.3330$$

no pueden basar en ella sus matrices de cálculo cristalográfico de las formas, puesto que como se ha visto en el párrafo dedicado a cristalometría (Cf. pág. 29) esa relación paramétrica estructural difiere algo de la morfológica, que se admite ser ésta

$$a : b : c = 3.7094 : 1 : 5.3330$$

En consecuencia,

$$M = \begin{bmatrix} a \operatorname{sen} \beta & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ a \operatorname{cos} \beta & 0 & c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.596152 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.909965 & 0 & 5.333000 \end{bmatrix}$$

$$M^* = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ \frac{1}{a \operatorname{sen} \beta} & 0 & -\frac{\operatorname{ctg} \beta}{c} & \\ 0 & 1 & 0 & \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.278074 & 0 & 0.047447 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.187511 \end{bmatrix}$$

ya aplicada esta última en el cálculo de las coordenadas azimutales de los polos de cara.

GRUPO ESPACIAL

Como advertencia preliminar se hace notar que el orden en que se escriben los símbolos de los grupos puntuales al citar las cuatro modalidades de ellos en una línea, es el siguiente:

- 1° Símbolo de Schönfliess
- 2° Símbolo de Hermann-Maugin según la primera edición de las Tablas Internacionales, (1935).
- 3° Símbolo de Hermann-Maugin según la segunda edición de las Tablas Internacionales, (1952).
- 4° Símbolo de Pardillo (Cons. Sup. Invest. Cientif. Barcelona, Estudios Geológicos N° 7 (1947), pág. 7).

Además, en gracia a la facilidad tipográfica de su escritura se consignan traslocando subíndices y exponentes en los 1° y 4°, para obedecer a su modo de lectura. Así,

C_{2h}^5 se escribirá $C(2h)5$

Las referencias que se han hecho con respecto al grupo espacial de la livingstonita son:

A. RICHMOND (1936): $C(2h)5 - P 2/c - P 2/b - M(1)5$

Citado por Dana (1944)

Citado por la tarjeta 4-0654 de la ASTM, en la que se hace referencia a Dana (1944):

$C(2h)i - P 2/m - P 2/m - M(1)1$

Trátase de una cita falsa, pues la realidad de los datos no obedece a esa notación.

Cita de Gottfried en el Strukturbericht (1936):

$C(2h)5 - P 2_1/n - P 2_1/b - M(1)5$

Richmond basa sus determinaciones en la calidad holoédrica de su simetría, deducida de las determinaciones cristalográficas efectuadas por Berman, y en el examen de las extinciones:

$h 0 1$	mitad cuando h es impar
$h 0 1$	" " " " " "
$h 0 1$	" " " " $h + 1$ es impar
$0 1 0$	" " " " " "

que Gottfried (1936) interpreta en la referencia del Strukturbericht como: extinción ($h01$) cuando h ó 1 y $(h + 1)$ sean impares; empero Donnay, en su tabla de datos cristalinos hace observar que estas extinciones no justifican la existencia del eje 2.

El grupo sería:

$C(2h)5 - P 2_1/n - P 2_1/b - M(1)5$

B. GORMAN (1951) determina:

$C(1)1 - P \bar{1} - P \bar{1} - A(1)1$

Citado por la tarjeta de la ASTM (aludida) como referencia principal:

"Pretendido demostrar por Gorman (1951) la simetría triclinica de la livingstonita, se enfrenta con la elección de grupo espacial y en su trabajo declara preferir "el $P \bar{1}$ de preferencia al $P 1$, principalmente porque el primero es común, y raro el segundo" (sic). Tal determinación resulta así un juego eventual y aunque estadísticamente probable carece de valor alguno científico: no ha de tenerse en cuenta.

No obstante, en su estudio preliminar sobre la estructura de la livingstonita, adoptaron Buerger y Niizeki (1954) este grupo espacial (y los demás datos reticulares) determinados así por Gorman.

C. NIIZEKI Y BUERGER (1957):

$C(2h)6 - C 2/c - A 2/a - M(1)6$

Citado por Berry y Thompson (1962).

Con base en las nuevas radiografías obtenidas directamente por esos autores para su cálculo definitivo de estructura, utilizando los cristales de livingstonita que les proporcionó Foshag, observaron las extinciones sistemáticas,

$h k l$	con $h + l = \text{par}$
$h 0 l$	con l par ; $h = 4n$
$0 k 0$	con k par

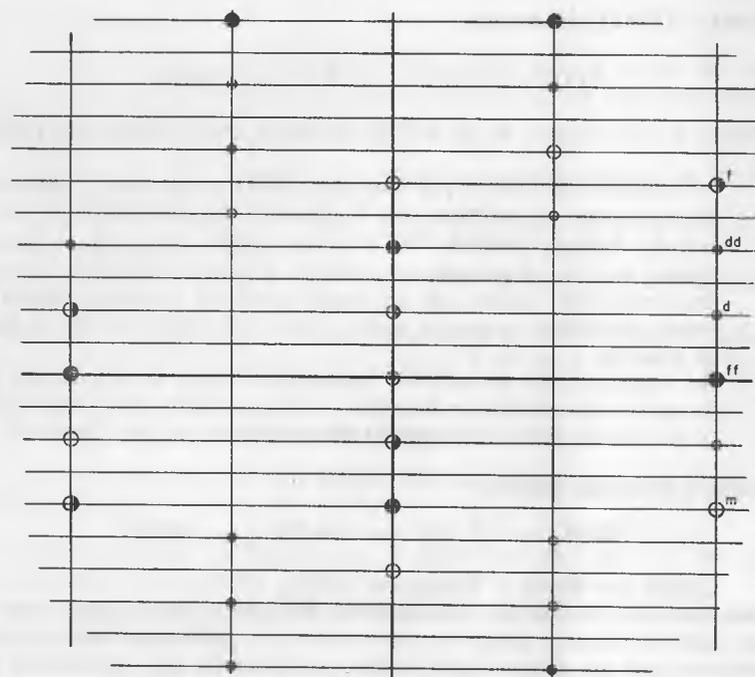
Las extinciones $h0l$ son poco usuales; se tuvieron que decidir por la paridad de h y de l para su elección entre red centrosimétrica $A 2/a$ y no centrosimétrica $A a$.

Las extinciones extrasistemáticas $h = 4n + 2$, $l = \text{impar}$ fueron interpretadas como debidas a la ordenación de la estructura.

No pudiendo basarse en ninguna ley de macla satisfactoria que diese razón de las ausencias registradas, adoptaron el grupo centrosimétrico citado $C(2h)6$ para ese cristal monoclinico holoédrico que los autores designaron por $A 2/a$; aunque en realidad corresponde al $B 2/b$ con otra orientación, según la expresión de las nuevas Tablas Internacionales (1952).

Este grupo espacial $A 2/a$ tiene su representación como se indica en la fig. 18, con un motivo de repetición señalado con línea gruesa, que equivale al $1/8$ del volumen total de la celda.

El centro de simetría que resultó del cálculo estadístico con base en $F^2(h01)$ se interpreta como correspondiente a un seudocentro de simetría de coordenadas $(1/8, 0, 1/4)$ señalado con una x en el centro del motivo de repetición.

FIG. 19. Red $b^* - c^*$ recíproca con sus reflejos, según los diagramas de precesión.

D. FABREGAT (1965):



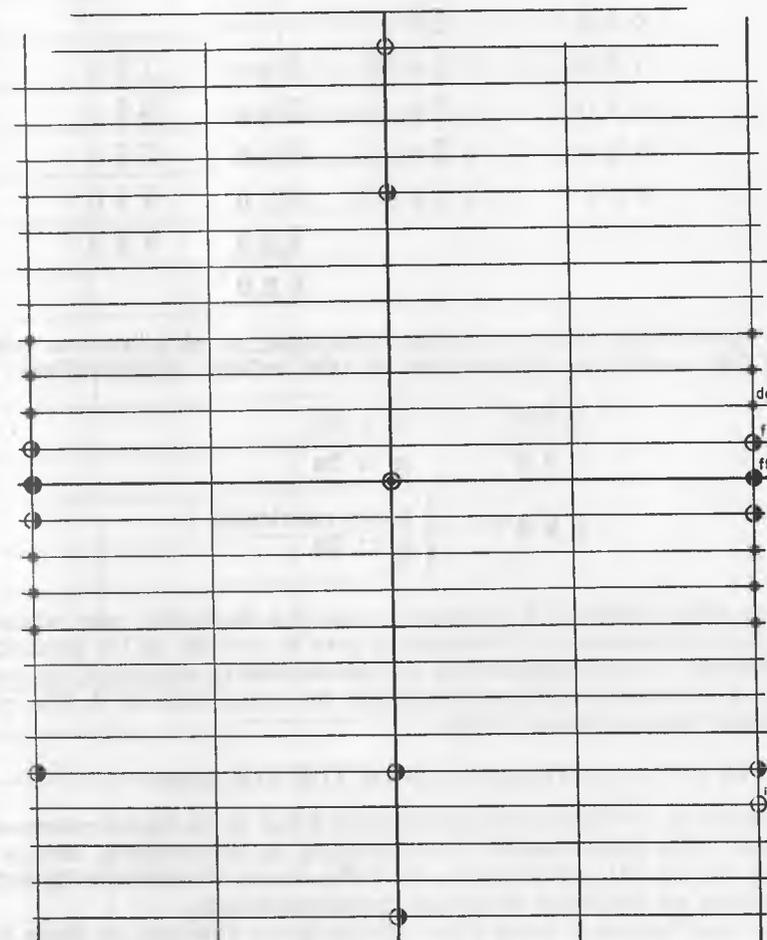
confirmando los resultados inmediatamente anteriores, obtenidos de un modo admirable por Niizeki y Buerger. Para ello se lograron dos diagramas de precesión, figs. 19 y 20, empleando un cristal acicular natural de livingstonita, montado de tal manera que su dirección de elongación $b[010]$ se aprovechase como eje de giro, y sobre los planos (c^*b^*) y (a^*b^*) respectivamente.

En las figuras citadas se representan las redes recíprocas obtenidas.

De la fig. 19, registrado como diagrama N° 344, se obtuvieron los reflejos siguientes:

020	004	$0\bar{2}0$	$00\bar{4}$
002	006	$00\bar{2}$	$00\bar{6}$

022	$02\bar{2}$	$0\bar{2}2$	$0\bar{2}\bar{2}$
024	$02\bar{4}$	$0\bar{2}4$	$0\bar{2}\bar{4}$
015	$01\bar{5}$	$0\bar{1}5$	$0\bar{1}\bar{5}$
026	$02\bar{6}$	$0\bar{2}6$	$0\bar{2}\bar{6}$
017	$01\bar{7}$	$0\bar{1}7$	$0\bar{1}\bar{7}$
019	$01\bar{9}$	$0\bar{1}9$	$0\bar{1}\bar{9}$
0.1.11	$0.1.\bar{1}\bar{1}$	$0.\bar{1}.11$	$0.\bar{1}.\bar{1}\bar{1}$

FIG. 20. Red $a^* - b^*$ recíproca con sus reflejos, según los diagramas de precesión.

cuyas intensidades relativas pueden observarse en el esquema reticular (c^*b^*). Las condiciones de aparición de tales reflejos se generalizan,

$$\begin{array}{ll} 0 k 0 & \text{par} \\ 0 0 l & \text{par} \\ 0 k l & k + l = \text{par} \end{array}$$

De la fig. 20, registrado como diagrama N° 346, se obtuvieron los reflejos siguientes,

$$\begin{array}{cccc} 8 0 0 & \bar{8} 0 0 & & \\ 12 0 0 & \bar{12} 0 0 & \bar{16} 0 0 & \\ 0 2 0 & 0 \bar{2} 0 & & \\ 1 2 0 & 1 \bar{2} 0 & \bar{1} 2 0 & \bar{1} \bar{2} 0 \\ 2 2 0 & 2 \bar{2} 0 & \bar{2} 2 0 & \bar{2} \bar{2} 0 \\ 3 2 0 & 3 \bar{2} 0 & \bar{3} 2 0 & \bar{3} \bar{2} 0 \\ 4 2 0 & 4 \bar{2} 0 & \bar{4} 2 0 & \bar{4} \bar{2} 0 \\ & & \bar{8} 2 0 & \bar{8} \bar{2} 0 \\ & & \bar{9} 2 0 & \end{array}$$

cuyas intensidades relativas pueden observarse en el esquema reticular (a^*b^*). Las condiciones de aparición de tales reflejos se generalizan,

$$\begin{array}{ll} h 0 0 & h = 4n \\ 0 k 0 & k = 2n \\ h k 0 & \left\{ \begin{array}{l} h \text{ sin restricción} \\ k = 2n \end{array} \right. \end{array}$$

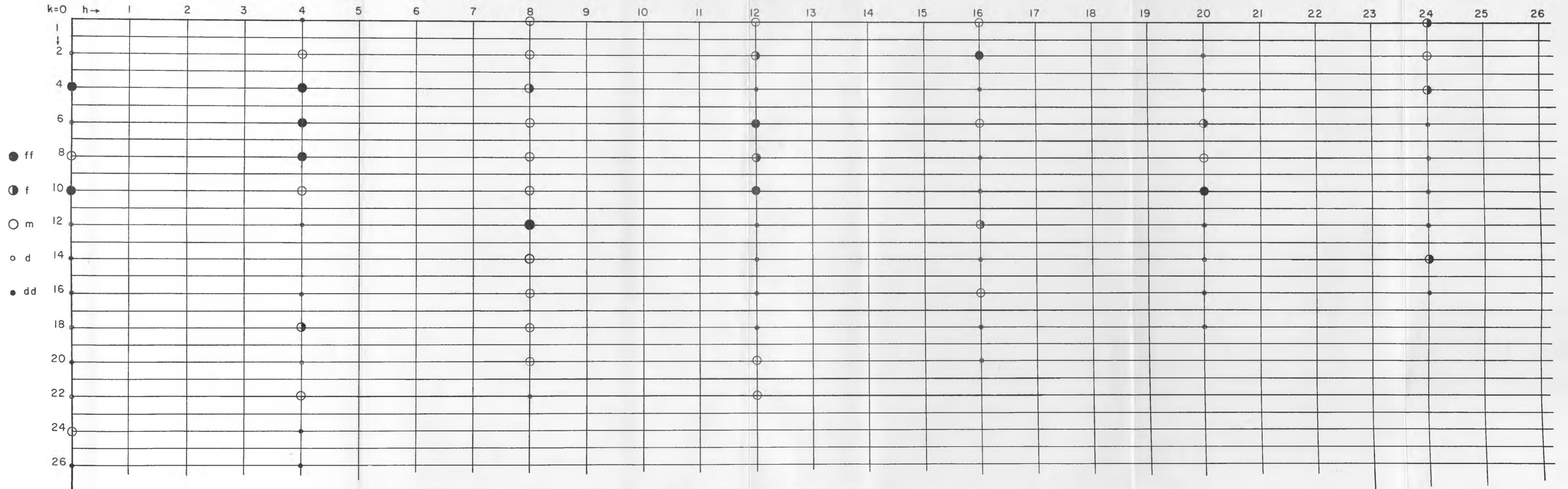
Con estos criterios de extinción y con los deducidos más adelante a partir de los diagramas de Weissenberg para la revisión de las intensidades de los reflejos y su correspondencia con los factores de estructura calculados, se llega a la conclusión de la legitimidad del grupo espacial A 2/a citado. (Cf. Tablas Internacionales, 1952.)

REVISIÓN DE LAS INTENSIDADES DE LOS REFLEJOS

Además de los diagramas de precesión a que se ha hecho referencia se obtuvieron unos diagramas de equi-inclinación de Weissenberg, niveles 0, 1 y 2 (figs. 21, 22, 23), con radiación de $\text{CuK}\alpha$, cuyas intensidades de reflejos se presentan en las redes recíprocas correspondientes.

Con esas figuras se evita citar aquí en tablas extensas los datos hallados. Encontrando conformes las intensidades y extinciones con las calcula-

LIVINGSTONITA TeO_3 Nivel 0.



FIGURAS 21, 22, 23. Redes recíprocas (h0l), (h1l), (h2l) que interpretan los diagramas de equi-inclinación de Weissenberg I[010] en 3 de sus niveles, con las intensidades relativas de los reflejos observados.

LIVINGSTONITA $\bar{1}010$ Nivel I



FIGURA 22

LIVINGSTONITA $\bar{1}010$ Nivel 2.



FIGURA 23

das por Niizeki y Buerger con base en los factores de estructura, se remite al trabajo original para su comparación más precisa (op. cit. pág. 154, tabla 12).

Estos autores obtuvieron inicialmente unos diagramas de Weissenberg con anticátodo de $\text{MoK}\alpha$, pero la magnitud de la celda les dio un röntgenograma con reflejos superiores demasiado juntos, viéndose obligados a utilizar un anticátodo de $\text{CuK}\alpha$, aun con perjuicio de incrementar la absorción del cristal. Las intensidades se corrigieron por los factores de Lorentz y de polarización; por el de absorción hasta el final del análisis.

ESTRUCTURA DE LA LIVINGSTONITA

La estructura de la livingstonita fue determinada por Niizeki y por Buerger (1957) con resultados completamente satisfactorios.

A partir de los valores $F^2(h0l)$ calcularon el mapa $\rho(xz)$ de densidad electrónica, fig. 24, mediante las series de Fourier.

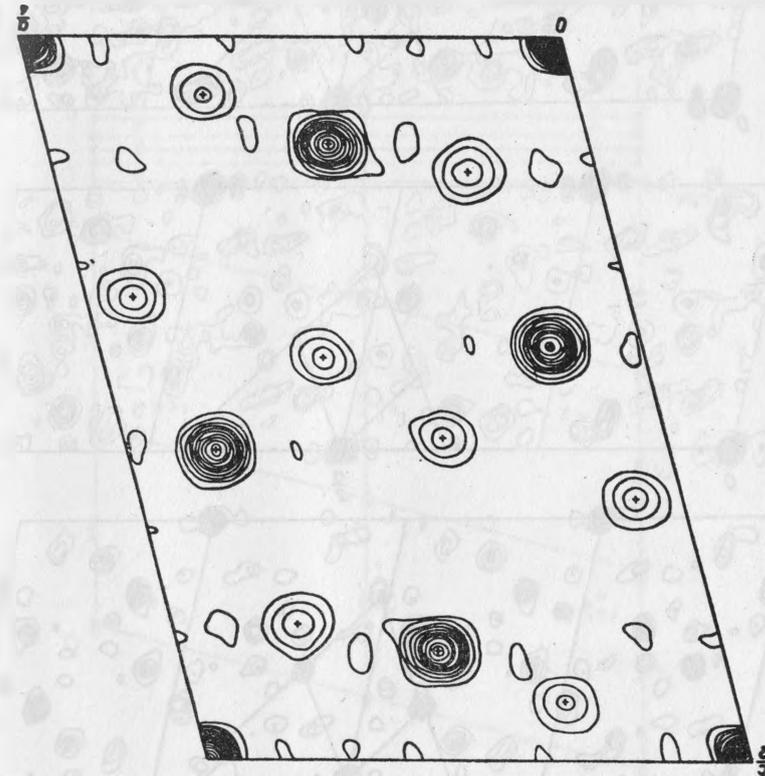


FIGURA 24. Mapa definitivo de la densidad electrónica $\rho(xz)$, proyectado sobre (010), comprendiendo un octavo de celda.

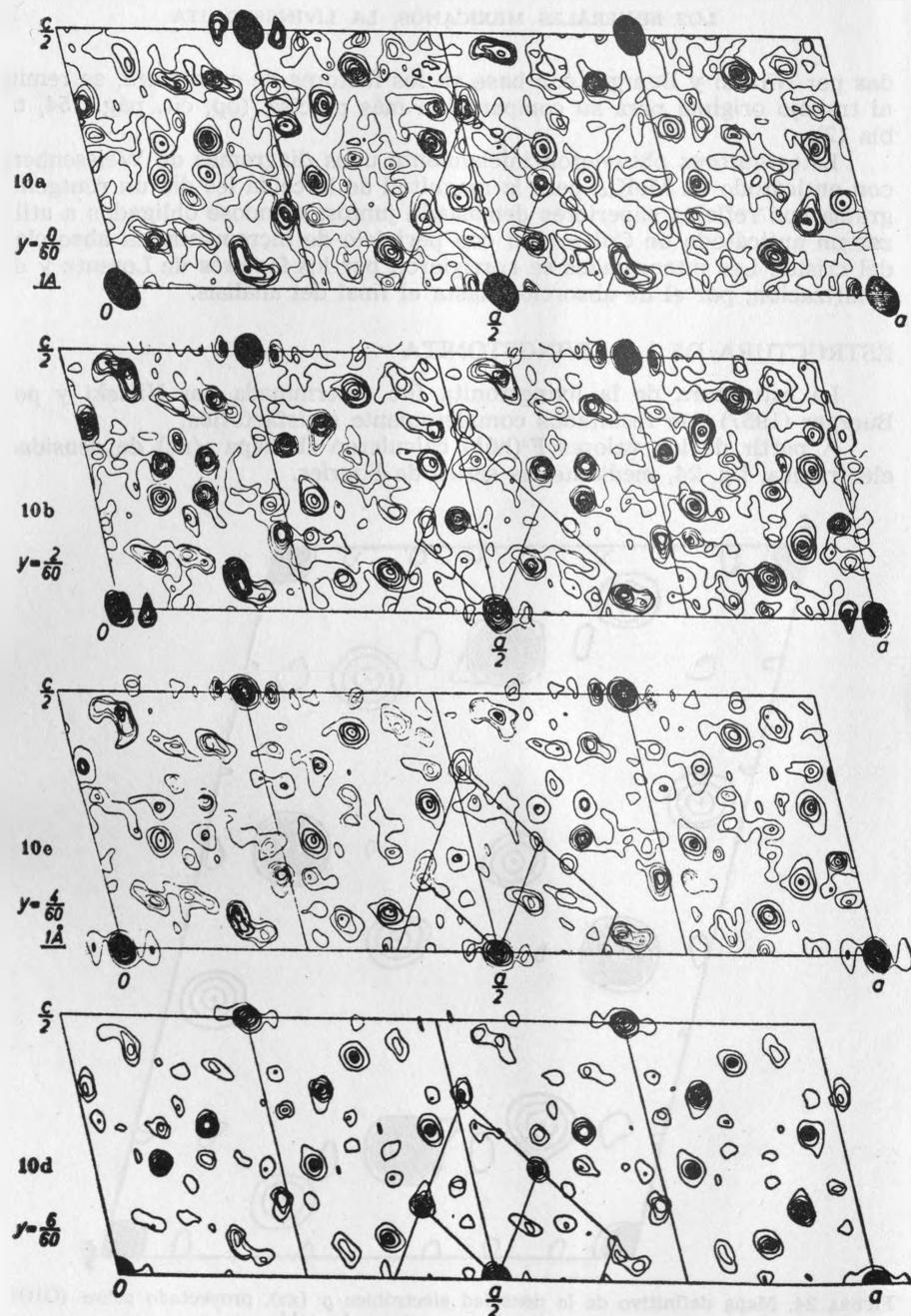


FIGURA 25. Mapa tridimensional de Patterson, en su primera sección $y = 0/60$ (Niiz. y B., 1957).

La comparación de esa proyección con las estructuras que han sido calculadas hasta ahora de las otras sulfosales aciculares, se utilizó para tener una idea sobre las longitudes de las terceras coordenadas atómicas, encontrando que todos los átomos se hallan muy cerca del plano a de deslizamiento, a $y = 0$ ó $y = 1/2$.

Con objeto de calcular exactamente esas terceras dimensiones se procedió primero a la determinación de los átomos pesados interpretando directamente cuatro secciones de Patterson tridimensionales. A partir de la tabla calculada de factores de estructura se computaron las series de Fourier,

$$P\left(u, \frac{n}{60}, w\right) = \sum_h \sum_k \sum_l |F(hkl)|^2 \cos 2\pi \left(hu + k \frac{n}{60} + lw\right)$$

con $n = 0, 2, 4, \dots$ hasta 14, logrando así los mapas de densidad de la La interpretación de esos diagramas de Patterson se hace teniendo en

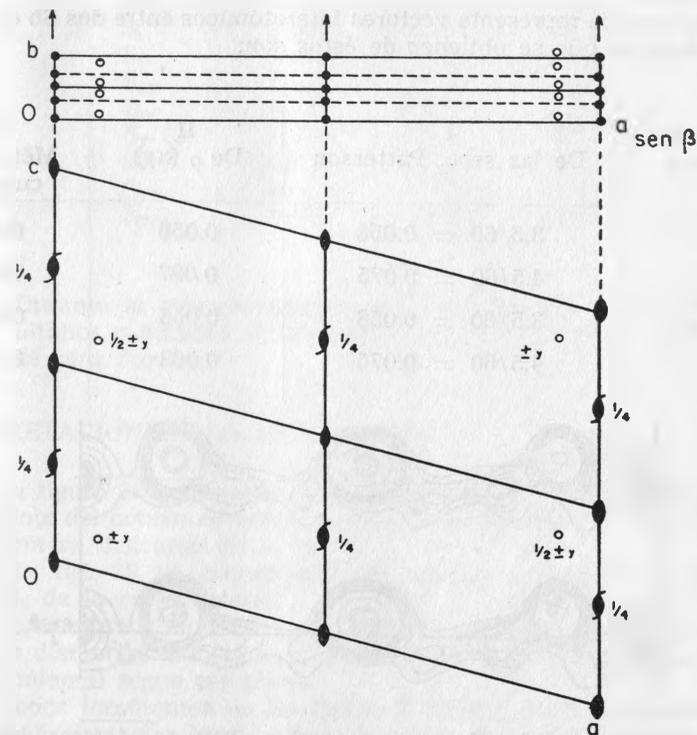


FIGURA 26. Representación del grupo espacial $A2/m$.

cuenta que el grupo de Patterson A 2/m es el que corresponde al espacial A 2/a propio del cristal elegido.

Con base en el complejo molecular determinado $8 \text{ HgSb}_4\text{S}_8$: a) las consideraciones sobre puntos equivalentes distinguen dos clases de átomos Hg:

Hg_I en centros de simetría 4(b),
 Hg_{II} en los ejes binarios 4(e),

ambos con una diferencia de altura de $b/2$.

b) los demás átomos ocupan posiciones generales 8 (f).

Hay 4 diferentes átomos Sb por celda elemental, y las dos hipótesis para la determinación de sus coordenadas se deducen de las interpretaciones de los máximos.

a/ Hg — Sb : no es práctica porque las desviaciones de las coordenadas con respecto a 0 ó a $1/2$ son muy pequeñas y próximas a la sección 0/60, solapándose por la operación de reflexión en ese nivel.

b/ Sb — Sb : se reconocen dos especies de máximos Sb:

|*| una corresponde al vector interatómico entre un Sb y sus equivalentes simétricos.

|*| la segunda representa vectores interatómicos entre dos Sb diferentes.

Las coordenadas que se obtienen de éstos son:

Coordenadas y Átomos	I De las secc. Patterson	II De $\rho(xy)$	III Mét. últim. cuadrad.
Sb_I	$3.5/60 = 0.058$	0.056	0.063
Sb_{II}	$4.5/60 = 0.075$	0.087	0.095
Sb_{III}	$3.5/60 = 0.058$	0.056	0.064
Sb_{IV}	$4.5/60 = 0.075$	0.063	0.078

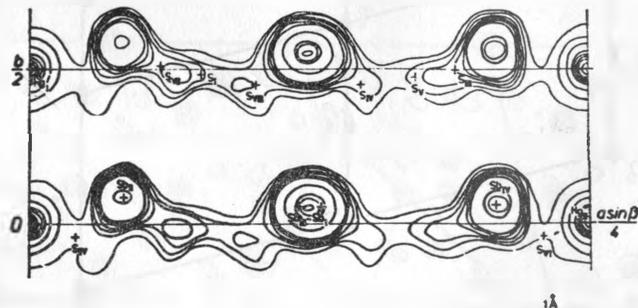


FIGURA 27. Unidad asimétrica de proyección sobre (001) en el mapa definitivo de densidad electrónica $\rho(xy)$.

Mediante esas coordenadas y las de los átomos pesados se calcularon los factores de estructura $F(hk0)$ y los mapas de densidad electrónica $\rho(xy)$ a lo largo del eje c (fig. 27).

Se hizo el refinamiento tridimensional de la estructura por el método de los últimos cuadrados, de Sayre, empleando 1950 factores $F^2(hkl)$, que se corrigió por la aproximación sucesiva de los factores escalares (método estadístico de Wilson).

En definitiva, se lograron las coordenadas atómicas:

Atomo	x	y	z
Hg_I	0.000	0.500	0.000
Hg_{II}	0.250	0.001	0.000
Sb_I	0.120	0.063	0.075
Sb_{II}	0.042	0.095	0.214
Sb_{III}	0.131	0.064	0.425
Sb_{IV}	0.208	0.078	0.287
S_I	0.062	0.493	0.092
S_{II}	0.229	0.028	0.180
S_{III}	0.172	0.506	0.039
S_{IV}	0.149	0.521	0.222
S_V	0.189	0.494	0.407
S_{VI}	0.022	0.021	0.318
S_{VII}	0.078	0.507	0.460
S_{VIII}	0.102	0.483	0.277

Durante el refinamiento de la estructura por el método de los últimos cuadrados se calcularon los coeficientes de temperatura B de cada átomo.

INTERPRETACION DE LA ESTRUCTURA

En la figura 28 se representa la disposición de una molécula de HgSb_4S_8 , ocupante del octavo de volumen de la celda elemental, cuyos elementos de simetría se indicaron en la fig. 4.

En la fig. 29 se esquematiza el complejo molecular completo de $8 \text{ HgSb}_4\text{S}_8$ de la celda entera.

La estructura comprende dos estratos diferentes, ambos paralelos a (001), y a distancias mutuas no menores de 3.3 Å, lo que explica la exfoliación del mineral según ese plano.

1. Todos los átomos de Sb tienen 3 átomos de S como vecinos más próximos, a distancias 2.5 — 2.6 Å, formando grupos SbS_3 , que se vinculan entre sí en sentido de la traslación b , en cadenas de composición SbS_2 .

TABLA.—Distancias interatómicas calculadas, en Å:

	S _I	S _{II}	S _{III}	S _{IV}	S _V	S _{VI}	S _{VII}	S _{VIII}
Hg _I	2.37							3.34 3.38
Hg _{II}			3.34 3.37		2.33			
Sb _I	2.54 2.95		2.70 2.94	3.57 3.75			2.49	
Sb _{II}	3.25 3.62					2.44 2.47 3.11		2.52 3.15
Sb _{III}			2.47		2.55 2.96		2.62 2.95	3.51 3.86
Sb _{IV}		2.54 2.59 2.88		2.66 2.98	3.24 3.63			
S _{II}			3.64 3.74					
S _{IV} S _{VI}							3.66 3.72	2.07

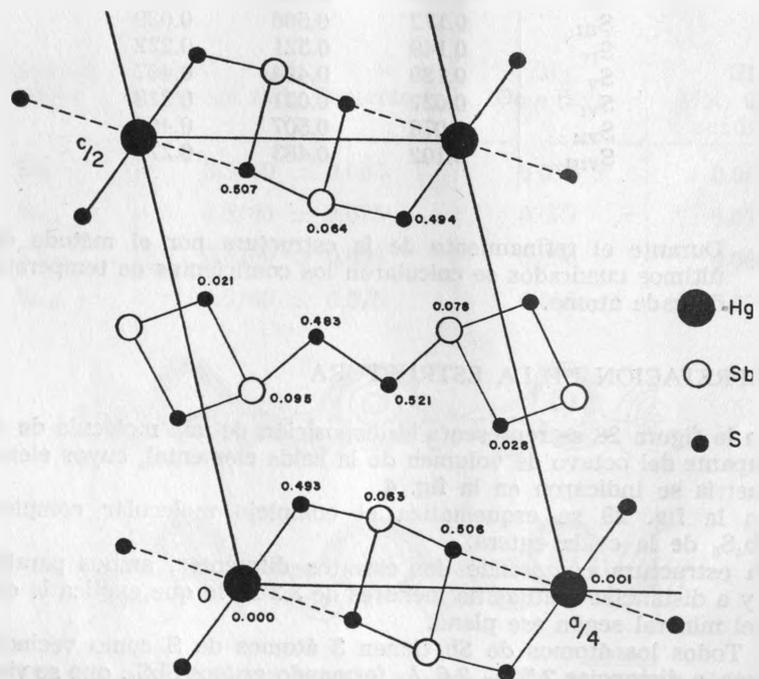


FIGURA 28. Representación esquemática de la estructura en su unidad asimétrica proyectada sobre (010).

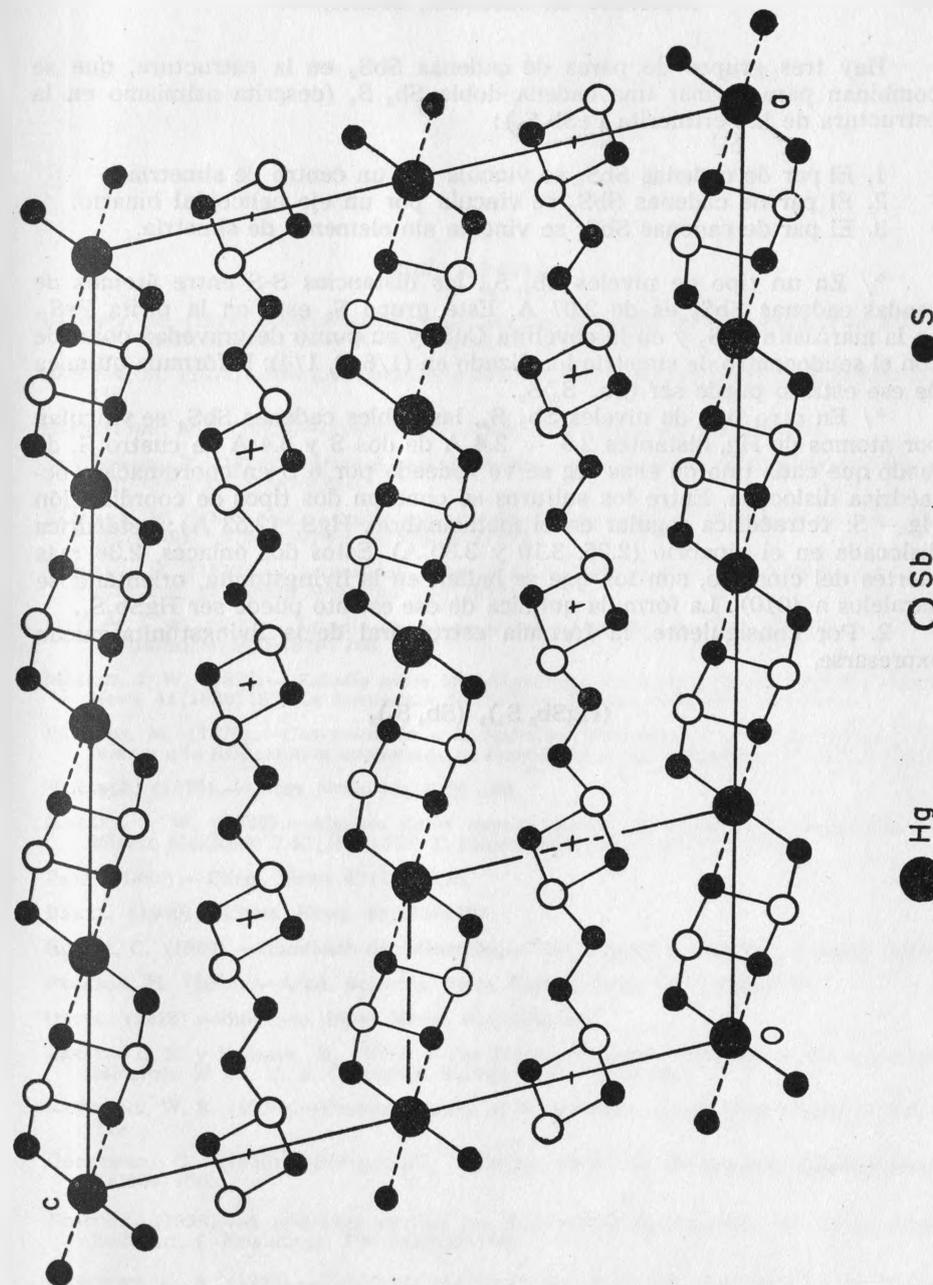


FIGURA 29. Complejo molecular completo, proyectado sobre (010).

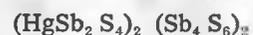
Hay tres grupos de pares de cadenas SbS_2 en la estructura, que se combinan para formar una cadena doble $Sb_2 S_4$ (descrita asimismo en la estructura de la berthierita $FeSb_2 S_4$):

1. El par de cadenas SbS_2 se vincula por un centro de simetría.
2. El par de cadenas SbS_2 se vincula por un eje helicoidal binario.
3. El par de cadenas SbS_2 se vincula sin elemento de simetría.

*/ En un tipo de niveles $Sb_2 S_4$, las distancias S-S entre átomos de sendas cadenas SbS_2 es de 2.07 Å. Este grupo S_2 está en la pirita FeS_2 , en la marcasita FeS_2 y en la covellita CuS , y su punto de gravedad coincide con el seudocentro de simetría localizado en $(1/8, 0, 1/4)$: la fórmula química de ese estrato puede ser $(Sb_4 S_6)S_2$.

*/ En otro tipo de niveles $Sb_2 S_4$, las dobles cadenas SbS_2 se vinculan por átomos de Hg, distantes 2.3 — 2.4 Å de dos S y 3.4 Å de cuatro S, de modo que cada uno de esos Hg se ve rodeado por 6 S en coordinación octaédrica dislocada. Entre los sulfuros se conocen dos tipos de coordinación Hg — S: tetraédrica regular en el metacínabrio, HgS , (2.53 Å); octaédrica dislocada en el cinabrio (2.36, 3.10 y 3.30 Å). Estos dos enlaces, 2.36 más fuertes del cinabrio, son los que se hallan en la livingstonita, orientándose paralelos a (010). La fórmula química de ese estrato puede ser $HgSb_2 S_4$.

2. Por consiguiente, la fórmula estructural de la livingstonita puede expresarse,



BIBLIOGRAFIA

- BÁRCENA, M. (1874).—*Descubrimiento de una nueva especie mineral de México*. El Minero Mexicano 2.4(1874) 54. La Naturaleza 3(1874)35.
- BÁRCENA, M. (1874).—*On Livingstonite, a new mineral*. Amer. Journ. of Science 8(1874) 145.
- HARRINGTON, B J. (1875).—*Livingstonite*. Amer. Journ. of Science 9(1875)64.
- SANDBERGER, F. (1876).—*Briefwechsel. Mitteilungen an Prof Leonhard Neues Jahrbuch*. Min. Geol. Pal. (1876)281.
- BÁRCENA, M. (1874).—*El estudio químico del livingstonite*. El Minero Mexicano 2.33(1874)404. La Naturaleza 3(1874-1877) 172.
- BÁRCENA, M. (1877).—*Composición química de la livingstonita*. La Naturaleza 4(1877-1879)268. El Minero Mexicano 4.50(1877).
- MALLET, J. W. (1877).—*Estudio acerca de la misma especie mineral (Livingstonita)*. La Naturaleza 4(1877-1879) 268.
- MALLET, J. W. (1877).—*Estudio sobre la livingstonita*. La Naturaleza 4(1877)271. Chem. News 42(1880)195. La Naturaleza 5(1880)84. Revista Científica Mexicana.
- BÁRCENA, M. (1877).—*Comunicación a la Sociedad Mexicana de Historia Natural*. (Referente a la livingstonita encontrada en Guadalcázar). La Naturaleza 4(1877-1879)272.
- VENABLE. (1879).—*Chem. News* 40(1879) 186.
- MALLET, J. W. (1880).—*Algunos datos nuevos acerca del mineral "Livingstonita"*. El Minero Mexicano 7.42(1880)502. El Minero Mexicano 7.43(1880)510.
- PAGE. (1880).—*Chem. News* 42(1880)195.
- BAKER. (1880).—*Chem. News* 42(1880)196.
- HINTZE, C. (1904).—*Handbuch der Mineralogie*. Vol. I parte I. Von Veit. Leipzig (1904).
- PELABON, H. (1905).—*Acad. Sciences, Paris, Compt. Rend.* 140(1905)1389.
- ORCEL. (1928).—*Bull. Soc. franc. Miner.* 51(1928) 202.
- LARSEN, E. S. y BERMAN, H. (1934).—*The Microscopic determination of the nonopaque Minerals*. 2ª Ed. U. S. Geological Survey, Bull. 848(1934).
- RICHMOND, W. E. (1936).—*Crystallography of livingstonite*. Amer. Mineralogist 21(1936) 719.
- GOTTERIED, C. (1936).—*Livingstonit. HgSb₂S₄*; (Ref. de Richmond) Strukturbericht 4(1936)150.
- PEACOCK. (1938).—*A graphical method for determining the spacings of lattice planes*. Zeitschr. f. Kristallogr. 100(1938)93-103.
- HARCOURT, G. A. (1942).—*Tables for the identification of ore minerals by x-ray Powder Patterns*. Amer. Mineralogist 27.2(1942)63-113.
- DANA. (1944): Ver por Palache, Berman, Frondel (1944).

- PALACHE, CH., BERMAN, H., FRONDEL, C. (1944).—*Dana's System of Mineralogy*. Vol. I, pág. 485. Wiley, New York (1944).
- MC ALLISTER, J. F. y HERNÁNDEZ, D. (1945).—*Quicksilver-antimony deposits of Huitzuco, Guerrero, México*. U. S. Geological Survey, Bull. 946 b (1945).
- HERNÁNDEZ, D. y MC ALLISTER, J. F. (1946).—*Los yacimientos mercurio-antimoniales de Huitzuco, Estado de Guerrero*. Comité Dir. Invest. Recursos Minerales México, Bol. 6 (1946).
- SHORT, M. N. (1948).—*Microscopic determination of the Ore Minerals*. U. S. Geological Survey, Bull. 914 (1948) 2º Ed.
- GORMAN, D. H. (1951).—*An x-ray study of the mineral livingstonite*. Amer. Mineralogist 36.5 (1951) 480-483.
- DONNAY, J. D. H. y NOWACKI, W. (1954).—*Crystal data. Classification of substances by Space Groups and their Identification from Cell Dimensions*. Geolog. Society of Amer., Memoir (1954).
- BUERGER, M. J. y NIIZEKI, N. (1954).—*The crystal structure of Livingstonite HgSb₂S₅*. Amer. Mineralogist 39 (1954) 319-320.
- NIIZEKI, N. y BUERGER, M. J. (1957).—*The crystal structure of Livingstonite HgSb₂S₅*. Zeitschr. f. Kristallogr. 109 (1957) 129-157.
- BERRY, L. G. y THOMPSON. (1962).—*X ray Powder Data for Ore Minerals. The Peacock Atlas. Livingstonite N° 212*. Geol. Soc. Amer, Memoir 85 (1962) 170.
- PHILLIPS, F. C. (1934).—*Some relationships between the reflectivities of sulphide ore-minerals*. Mineralogical Magazine 23 (1932-1934) 461.
- PÉLABON, H. (1905).—*Sur la fusibilité des mélanges que le sulfure d'antimoine forme avec le sulfure cuivreux et le sulfure mercurique*. Acad. Sciences, Paris, Compt. Rend. 140 (1905) 1389.
- UYTENBOGAARDT, W. (1951).—*Tables for Microscopic Identification of ore Minerals*. Princeton University Press. New Jersey (1951).
- SCHNEIDERHÖHN, H. y RAMDOHR, P. (1931).—*Lehrbuch der Erzmikroskopie*. Bd. II. Berlin (1931).

“Los Minerales Mexicanos. 5. Livingstonita”, se terminó de imprimir el 6 de junio de 1966 en IMPRENTA NUEVO MUNDO, S. A., Calzada del Moral 396, Ixtapalapa, México 13, D. F. Se tiraron 1,200 ejemplares.