

DISTRITO URANÍFERO DE MACUSANI:  
MODELO DE MINERALIZACIÓN USANDO ISÓTOPOS ESTABLES

MACUSANI URANIUM DISTRICT:  
MINERALIZATION MODEL USING STABLE ISOTOPES

**Guido Arroyo Pauca**

Sociedad Minera Austria Duvaz. Tte. Arístides del Carpio 1355, Lima, Perú ([garroyo.gap@gmail.com](mailto:garroyo.gap@gmail.com))  
Palabras clave: Meta-autunita, Pechblenda, vidrio volcánico, toba, volátiles.

## 1. Abstract

En las rocas volcánicas de la Fm. Quenamari (Puno), hay mineralización de U: meta-autunita, que es el producto final por oxidación de la pechblenda, debido a la profundización del relieve. Los isótopos estables explican el paso continuo de la mezcla del  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ , de la pechblenda hasta la meta-autunita. Durante la evolución del vulcanismo que rellena la depresión tectónica de Macusani, se forma una flexura que controla los principales depósitos de uranio.

In volcanics rocks of Fm. Quenamari (Puno), there is U mineralization: meta-autunite, which is the final product by oxidation of pitchblende, due to the deepening of the relief. The stable isotopes explain the continuous passage of the mixture of  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ , from pitchblende to meta-autunite. During the evolution of the volcanism that fills the Macusani tectonic depression, a flexure is formed that controls the main uranium deposits

## 2. Introducción

El Distrito Uranífero de Macusani (*DUM*), se ubica en la provincia de Carabaya, región Puno, al SE del Perú, a una cota promedio de 4400 m.s.n.m.; accesible por la Carretera Interoceánica; a una distancia de  $\approx 220$  Km al NNW de la ciudad de Puno.

Existen publicaciones desde 1970; el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), descubre Uranio en el plateau volcánico de Quenamari en 1978. Los estudios son de Geología, Petrogénesis, Mineralización, dataciones, isótopos estables, etc.

## 3. Geología

El DUM se encuentra en la Cordillera Oriental; donde la Fm. Quenamari yace en discordancia sobre rocas de edad paleozoica:

GRUPO MITU; constituido por cuarcitas (*blancas*), areniscas, limolitas (*rojas*), y volcánicos andesíticos, tienen amplia distribución al E de la depresión (*nevado Allin Ccapac*); se depositó en un ambiente continental árido, de edad Pérmico superior a Triásico inferior; yace en discordancia angular sobre rocas metamórficas del paleozoico inferior.

FORMACIÓN QUENAMARI; es una secuencia de tobas e ignimbritas riolíticas, constituidas por cuarzo bipiramidal, sanidina, biotita, muscovita; andalucita, sillimanita, obsidiana (*0.01 a 4 mm*), monazita, apatito, turmalina, etc.; así como lapillis de diversos tamaños.

También hay en Macusani obsidianas de diámetro 5.0 a 10.0 cm, llamada "MACUSANITA".

Estructuralmente la Fm. Quenamari tienen amplia distribución en el flanco occidental de la Cordillera Oriental; está controlada por depresiones tectónicas: Macusani, Crucero y Picotani; estas depresiones son de carácter tensional (*graven*) de dirección andina: SE - NW, con fallas conjugadas E - W, las que han sido obliteradas por las últimas etapas del vulcanismo

Es una sucesión de unidades de enfriamiento o ciclos volcánicos; que corresponden a dos fases:

- FASE EXPLOSIVA, origina depósitos tipo lluvia de piroclásticos; forma en el terreno superficies de pendiente suave; con la presencia de lapillis, pómez de naturaleza riolítica las que gradan de la base al tope; igualmente de la cercanía a los focos de emisión (*proximal*) hacia los bordes (*distal*); así como líticos.
- FASE NUBE ARDIENTE, da lugar a rocas tipo ignimbritas; típicas por la disyunción columnar, con presencia de lapillis.

## 4. Información Geoquímica

Las tobas riolíticas y los vidrios de obsidiana; han sido estudiados por 2 equipos: A. Clark y M. Pichavant; indican que las tobas son:



Fuertemente peraluminosas  
A/CNK, incluido Li = 1.19 - 1.35  
Corindón normativo superior a 2  
Corindón normativo: tobas = 3  
Macusanitas = 3 a más de 5  
FeO<sub>t</sub>/MnO y Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O > 1

La presencia de obsidiana o MACUSANITA, es muy importante; se ha demostrado que las tobas y la Macusanita son equivalentes, pero no coetáneas, porque corresponden a las últimas erupciones que han sido erosionadas.

Además dan información relevante de la composición del magma.

**4.1. Volátiles;** se observa que la macusanita presenta más volátiles que la toba, excepto por el agua.

Pichavant	Macusanita (%)	Toba (%)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.50	0.36
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.54	0.03
Li <sub>2</sub> O	0.76	0.17
F	1.34	0.41
CO <sub>2</sub>	0.08	0.00
H <sub>2</sub> O	0.44	1.51

Explica la desgasificación de las tobas explosivas, al emplazarse lo hacen a una temperatura más baja sufrieron un enfriamiento muy violento al estar en contacto con la atmósfera; que origina la alteración argílica de la matriz.

Las tobas efusivas o nube ardiente, se habrían desgasificado parcialmente manteniendo aún volátiles, se emplazaron a una temperatura mayor que las tobas explosivas.

**4.2. Fertilidad de Uranio;** se observa que las obsidianas, tienen valores altos en U, en tanto el Th está empobrecido; esto quizá se deba a que la macusanita, corresponde a un vulcanismo más joven.

	Fm. Quenamari			Macusanita			
	IPEN	Arribas	A. Clark	Pichavant	IPEN	Arribas	Pichavant
U (ppm)	5.6 - 18.0	10.2	10.0 - 30.0	8.10 - 11.30	18.44	6.8	19.55 - 27.40
Th (ppm)	8.6 - 13.3	3.7		9.80 - 11.85	2.27	3.0	0.09 - 2.00

**4.3. Isotopos Estables;** se tienen resultados de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ , de la meta-autunita; y la obsidiana o "macusanita", que refleja la composición del fluido silicatado del magma; por lo tanto refleja la composición isotópica del U<sup>+4</sup> disperso en la matriz de las tobas efusivas tipo nube ardiente.

Se observa (fig. 1) que hay una gran dispersión de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ , en la meta-autunita de los diferentes prospectos mineralizados, que refleja los diversos estadios de mezcla con el agua meteórica que han oxidado la pechblenda para transformarse en meta-autunita. En tanto en la

macusanita en  $\delta^{18}\text{O}$  tiene muy poca dispersión.

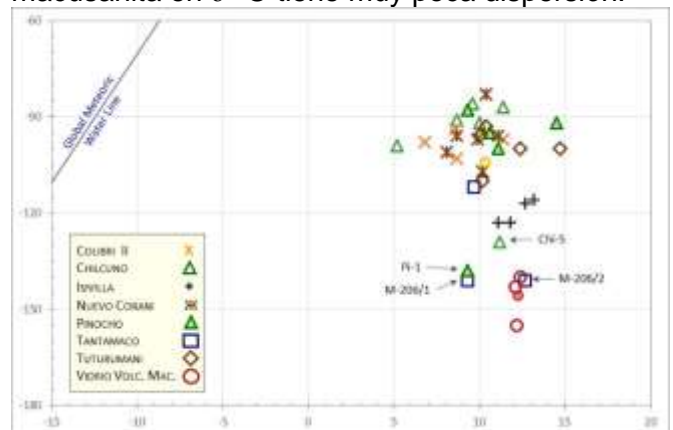


Fig. 1. Composición isotópica de la Meta-autunita; y de la obsidiana o "macusanita".

NOTA: los círculos llenos son promedios: Meta-autunita (amarillo) y Vidrio (rojo)

La muestra de Tantamaco (M-206/2) aún tiene los valores similares a la macusanita, lo que implica que hay una mezcla incipiente con las aguas meteóricas; las muestras (M-206/1) de Tantamaco y (Pi-1) de Pinocho están ligeramente empobrecidas en  $\delta^{18}\text{O}$ , que denota una mezcla inicial con las aguas meteóricas.

## 5. Mineralogía

En la CNEA (Argentina), se identificó la meta-autunita, es mineral predominante; posteriormente la Weeksita en forma subordinada; se ha observado ocurrencias de U asociado a Mn.

En Pinocho se observó pechblenda, donde la presencia de Fe, se debe a la alteración de la piritita y de la pechblenda (por ello se observa en forma pulverulenta), o sea la transformación de Fe<sup>+2</sup> a Fe<sup>+3</sup> y de U<sup>+4</sup> a U<sup>+6</sup>, de pechblenda – gummita – meta-autunita; notar también la presencia de Be y Li.

	Pinocho	Chilcuno	Isivilla	Nuevo Corani	Tantamaco	Colibri II	Fuente
	Pi-2	Chi-6-1	Is-2	Mac-207/202	Mac-206	Clb-2-1	V. Li
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	0.59	0.09	0.21	0.05	0.48	0.1	Table 4.3-6
Be ppm	3,785	3,137	210	235	249	1,977	Table 4.8
Li ppm	177	7	10	121	135	6	Table 4.8
Mn ppm	68	170	21	161	131	29	Table 4.8

En C° Calvario se encontró meta-Autunita con hábito botroidal, los esferulitos alcanzaban hasta 2.00 cm; se trata de un pseudomorfismo, en este caso la meta-Autunita tiene el hábito típico de la pechblenda.

## 6. Controles de la Mineralización del Uranio

**6.1. Estructural;** las tobas Quenamari yacen en niveles sub-horizontales, con una inclinación hacia el NE (< 10°), en el borde oriental presenta una

inclinación inversa ( $2^\circ$  a  $5^\circ$ ) hacia el SW; hay una flexura que es paralela a las fallas Antajahua (*oriental*) y Corani (*N*); que se origina por la subsidencia de los volcánicos en la depresión de Macusani y que a su vez da origen a fallas inversas de bajo ángulo.

**6.2. Litológico;** la mineralización de U está asociada a la fase efusiva o nube ardiente. Se tiene cuarzo ahumado (*negro*), debido a la radiactividad, que es una guía de la mineralización.

**6.3. Fracturamiento;** la mineralización está asociada a fracturas de dos tipos:

- SUB-VERTICALES; que constituyen los prismas de disyunción columnar; que agrupados forman un alineamiento estructural (¿tectónica precoz?), caso de Chapi Alto, donde es SSW - NNE
- SUB-HORIZONTALES; son fallas inversas y se generan próximos a la falla Antajahua, como Pinocho y Chilcuno VI.

**6.4. Inclusiones Fluidas;** se reportan “temperaturas de homogenización de  $226 - 285^\circ\text{C}$ , ricas en  $\text{CO}_2$  en las paredes de las fracturas” (V. Li, pag. 128); esta temperatura, da información relevante a la precipitación de la pirita y pechblenda; el fluido (*de origen volcánico, durante el enfriamiento de las tobas efusivas*) lixivió de la matriz de las tobas el U y Fe, donde la desvitrificación depende de la Temperatura y la Salinidad del fluido; así mismo alteró a arcillas la matriz; donde se han identificado illita y esmectita.

## 7. Modelo de Mineralización

En el emplazamiento, la FASE EXPLOSIVA, “pierde volátiles”, por contacto con la atmósfera; se enfría más rápido, y la matriz se altera a arcillas.

La FASE EFUSIVA durante el ascenso de la columna y su posterior deposición por fluidez del sistema, “pierde pocos volátiles”, su emplazamiento es a mayor temperatura, por tanto hay dos componentes intrínsecos: la Temperatura y el contenido de Volátiles.

Los volátiles ( $\text{S}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{B}^-$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , etc.), por la pendiente de emplazamiento, comienza a fluir en el nivel de la toba efusiva; a una velocidad lenta, los volátiles comienzan a poner en solución los cationes de mayor movilidad: U, Fe, etc., así como a desvitrificar a las obsidias de la matriz; mientras los fluidos avanzan a favor de la pendiente; las tobas se van enfriando, y comienzan a formarse las

diaclasas de enfriamiento o disyunción columnar, al arribar a estas aberturas los fluidos comienzan a ebullicar, el solvente se evapora, pero el soluto se precipita, el Fe con el S, forma la pirita, proporcionando el medio reductor y de esta forma se precipita la pechblenda; la mineralización primaria es: U – Py; posteriormente cuando viene la erosión; el sistema se torna oxidante y empieza la transformación de la pechblenda en meta-autunita; el Fe migra más rápido que el U, en la fractura se transforma en meta-autunita y comienza a dispersarse en la toba que es la dispersión del mineral tal como se observa en la actualidad.

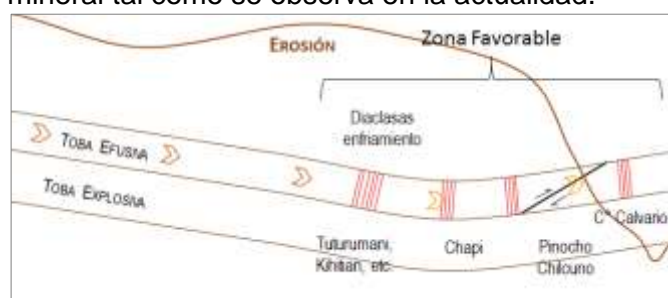


Fig. 2 Migración del fluido post-volcánico, hacia la flexura; formación de las diaclasas de enfriamiento y fallas inversas, donde se precipita el U.

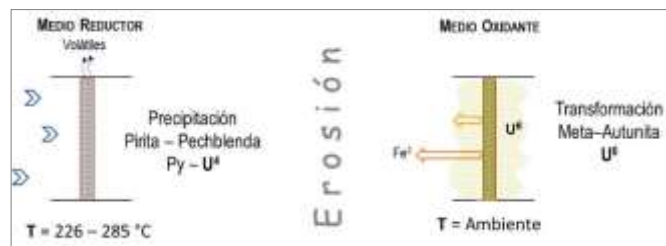


Fig. 3 Precipitación de pirita - pechblenda, en las fracturas (*medio reductor*); después de la erosión; se emplaza el medio oxidante, transformando la pechblenda en meta-autunita; en esta etapa el Fe se desplaza a mayor distancia que el U, aún se observa óxidos de Fe en Pinocho, Chapi Bajo, etc.

El sistema es tipo post-volcánico, y la asociación U – Py, se observa en Pinocho (*Huiquiza*), en Chapi Bajo. En C° Calvario se encontró meta-autunita con el hábito de la pechblenda (*pseudomorfismo*).

La evolución se puede observar en los isótopos de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ , para ello se usan los promedios (Fig. 4)

## 8. Edad

Se ha encontrado mineralización en tres niveles y hay un cuarto nivel con mineral de alta ley (1.80%  $\text{U}_3\text{O}_8$ ) las rocas han sido datadas:

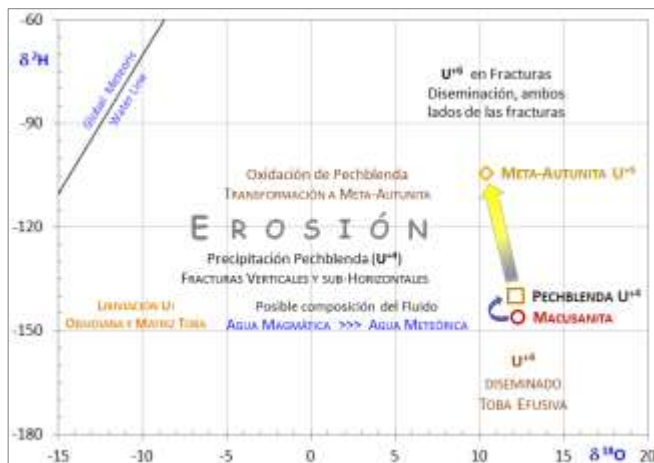


Fig. 4 Evolución usando los promedios de la dispersión isotópica

Nivel Mineralizado	Edad (Ma)	Fuente
Chapi Alto, C° Concharrumioc	6,9 - 6,8	Cheillettz-Arroyo
C° Calvario, Pinocho, Chilcuno, Quychine, quebrada Amariza o Calvario 3, etc.	7,5	Cheillettz-Arroyo
Chapi Bajo, Revancha	7,8	Cheillettz-Arroyo
Kihitian (100 m. debajo río Macusani, DDH PT-CH4-V)	10,0	V. Li - Henkle

Se han realizado dataciones en 6 prospectos:  
 Nuevo Corani > 500 ka Chilcuno 400 ka  
 Pinocho 220 y 160 ka Tuturumani 220 ka  
 Colibri 210 y 110 ka Tantamaco 140 ka  
 Estas edades indican la transformación de la pechblenda (U<sup>4</sup>) en meta-autunita (U<sup>6</sup>).

Reflejan la evolución geomorfológica, por efecto del clima; son edades de los diferentes episodios de erosión de los valles en el plateau volcánico; profundización de los cauces por los grandes periodos pluviales; tal como se observa en las edades de Pinocho y Chilcuno.

### 8. Consideraciones finales

Se propone un modelo, que incrementa el potencial de uranio, en la flexura y ambos lados del eje paralelo a la falla Corani y Antajahua.

La presencia de U por debajo del río Macusani (DDH PT-CH4-V), es una evidencia del modelo de mineralización propuesto.

### 9. Conclusiones

- Existen 4 niveles mineralizados.
- La mineralización primaria: U – Py tendría una edad post vulcanismo de la toba efusiva.
- La mineralización primaria es de U – Py (U<sup>4</sup>); posteriormente se tiene la erosión que determina la transformación a Meta-autunita (U<sup>6</sup>).
- La información isotópica de δ<sup>18</sup>O e δ<sup>2</sup>H, confirma esta hipótesis.
- Se propone un modelo de mineralización.

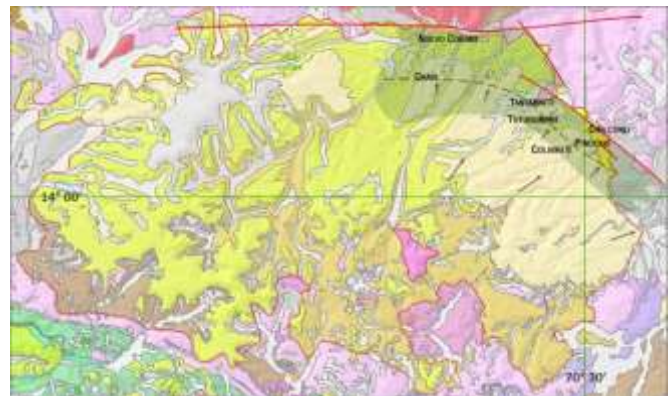


Fig. 5 Modelo de mineralización; ubicación de la flexura y prospectos; la zona sombreada es el área más favorable para la ocurrencia mineralización de Uranio (Geología: INGEMMET)

- La existencia de mineralización por debajo del río Macusani, corrobora el modelo.
- Se determina el área favorable en el sector oriental del campo volcánico de Macusani.

### 10. Agradecimientos

A la Dra. Maria Lau, por revisar; a la información científica de la Universidad de Queen's, Canadá; de Plateau Uranium Inc.; de CNRS-Francia e IPEN.

### Referencias

- Arribas, A. & Figueroa, E. Las mineralizaciones de uranio en las rocas volcánicas de Macusani (Peru), 41, Estudios Geológicos, 323
- Cheillettz A.; Clark A.; Farrar E.; Arroyo G.; Pichavant M.; Sandeman H. (1992). Volcano-stratigraphy and <sup>40</sup>A/<sup>39</sup>A geochronology of the Macusani field: monitor of the Miocene geodynamic of the Andes of southeast Peru. Tectonophysics, 205 (1992), 307-327
- IPEN; inf. Internos; G. Arroyo; J. Barrera; E. Figueroa; G. Flores; W. Herrera; C. Kihien; C. Rogovich; F. Rosado; J. Valencia; etc.
- Li V.; Queen's University, Kingston, Canada. The U Mineralization of the Macusani District, Southeast Peru: Mineralogy, Geochemistry, Geochronology and Ore-Genetic Model. PHD; april 2016.
- O'Connor T., Stefan L., Plateau Uranium Inc; Clark A., Kyser K., Li V., Queen's University, Kingston, Canada; Macusani Uranium Deposits, Puno, Peru: Products of Episodic Late Pleistocene Periglacial Flooding. IAEA (URAM-2018)
- M. Pichavant; J. Valencia; S. Boulmer; L. Briquet. J.L. Joron; L. Marin; A. Michard; et al (1987). The Macusani glasses, SE. Peru: evidence of chemical fractionation in peraluminous magmas. Geochemical Society Special Publication.
- Barnes V. E.; Edwards G.; Mclaughlin W.A.; Friedmann L.; Joensuu O.; 1970. Macusanite occurrences; age and composition, Macusani Peru. Geol. Soc. Am. Bull., 18; 1539-154