



Geología

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Otoño 2021

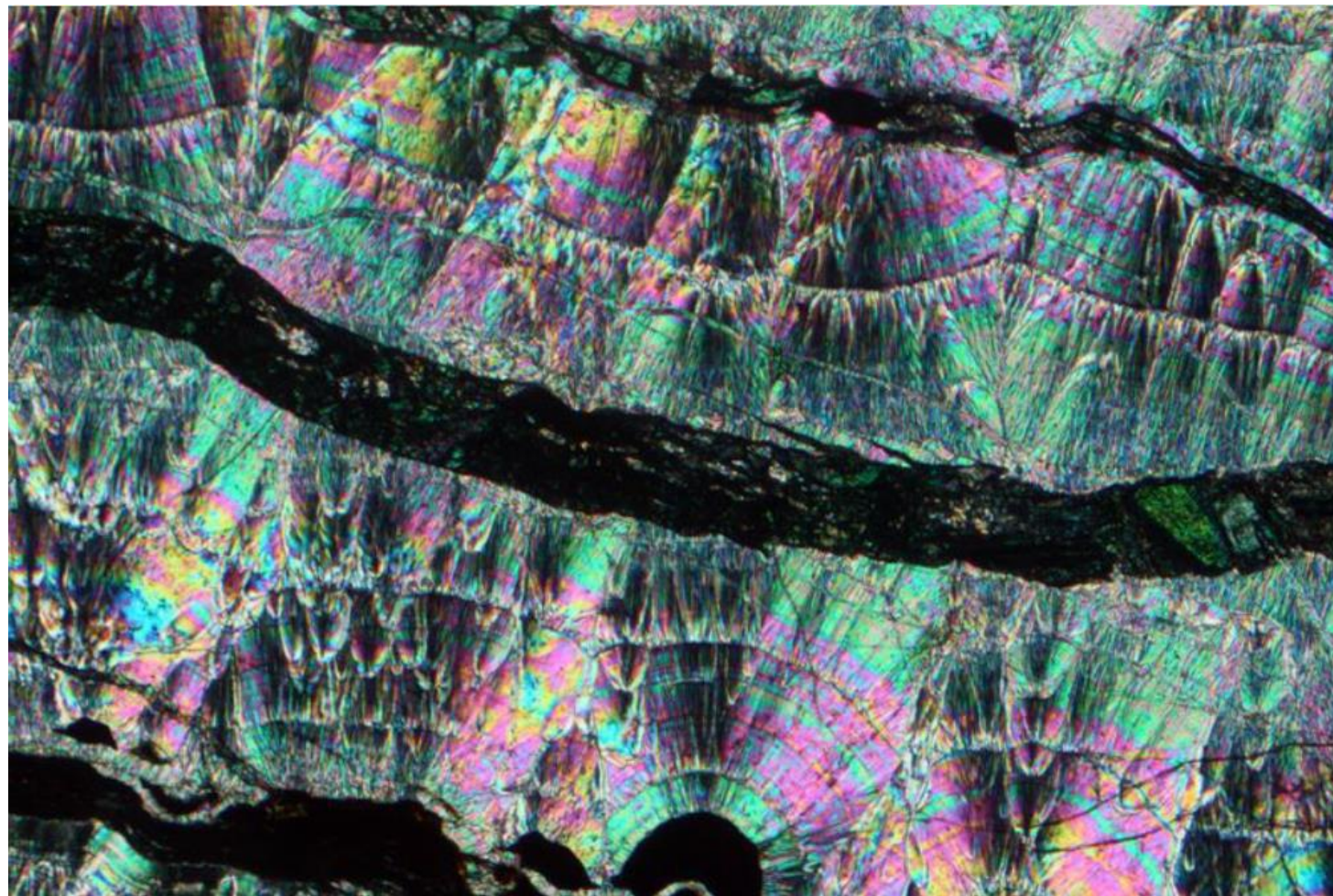
Metalogénesis: Enriquecimiento secundario

Procesos y mineralogía

Cuerpo Docente:

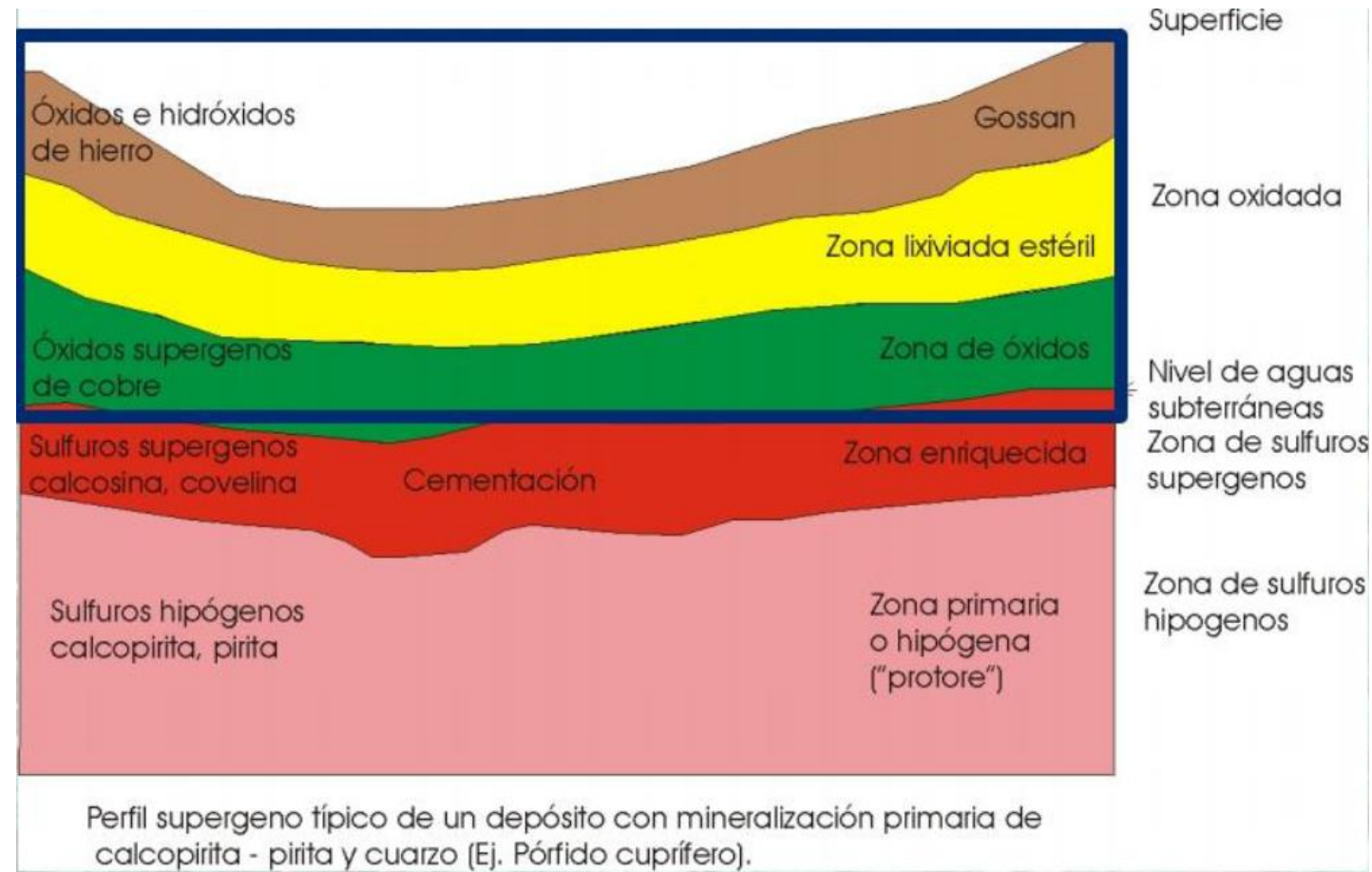
Rodrigo Espinoza Reyes

José Moreno Toledo



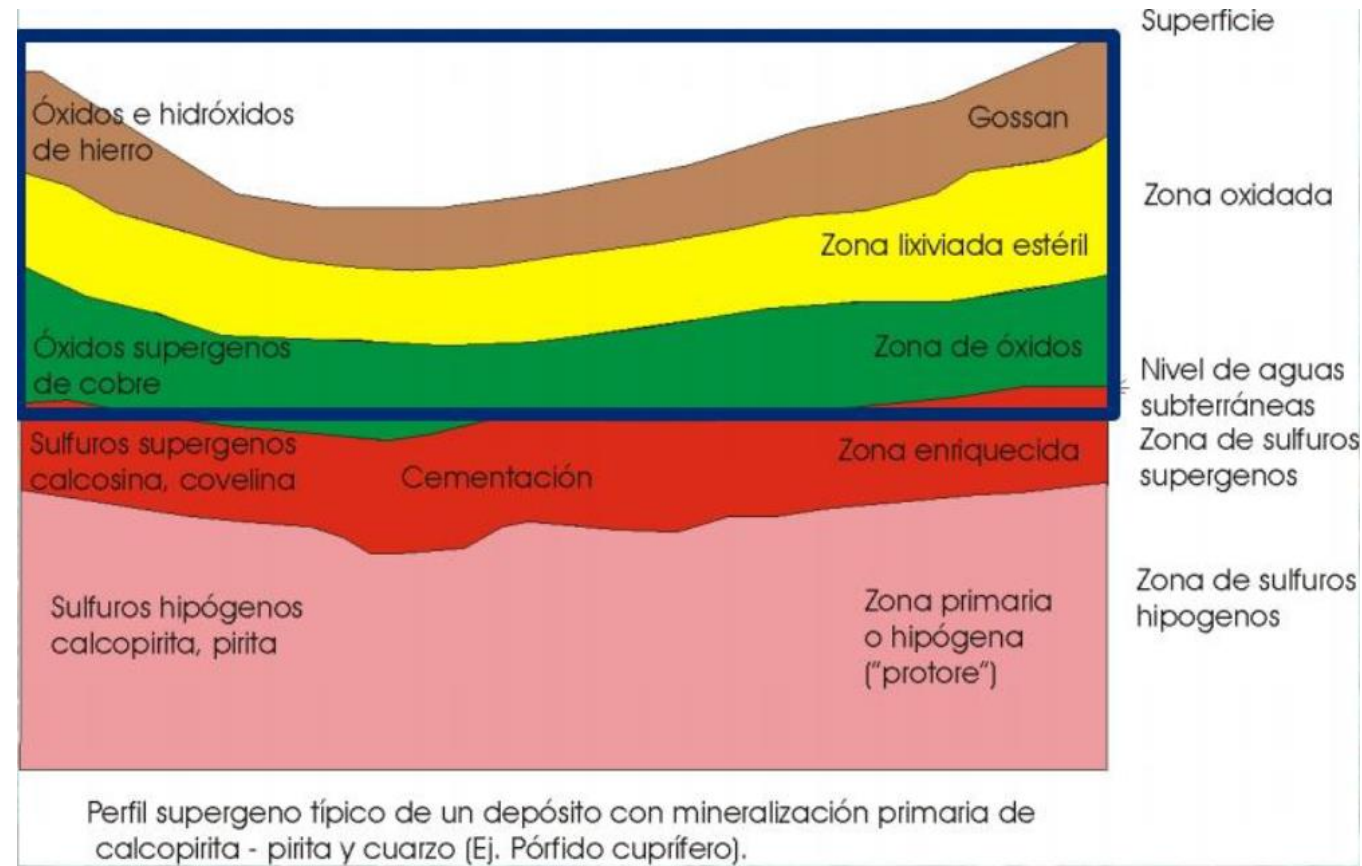
Alteración supérgena

- Proceso de reequilibrio hidrotermal de la mineralogía hipógena.
- Al ser expuesta a condiciones oxidantes sobre el nivel freático.
- Sulfuros se descomponen y meteorizan en contacto con la atmósfera.
- Se produce ácido sulfúrico, complejos sulfatados y liberaciones de cationes.



Alteración supérgena

- La alteración supérgena de depósitos minerales hidrotermales libera cationes metálicos y aniones sulfato.
- Oxidación de sulfuros hipógeno.
- Se produce lixiviación y transporte de metales.
- Pirita principal fuente de soluciones ácidas.
- Factores: Clima, mineralogía hipógena, permeabilidad de la roca, nivel freático, sulfuro hipógeno.

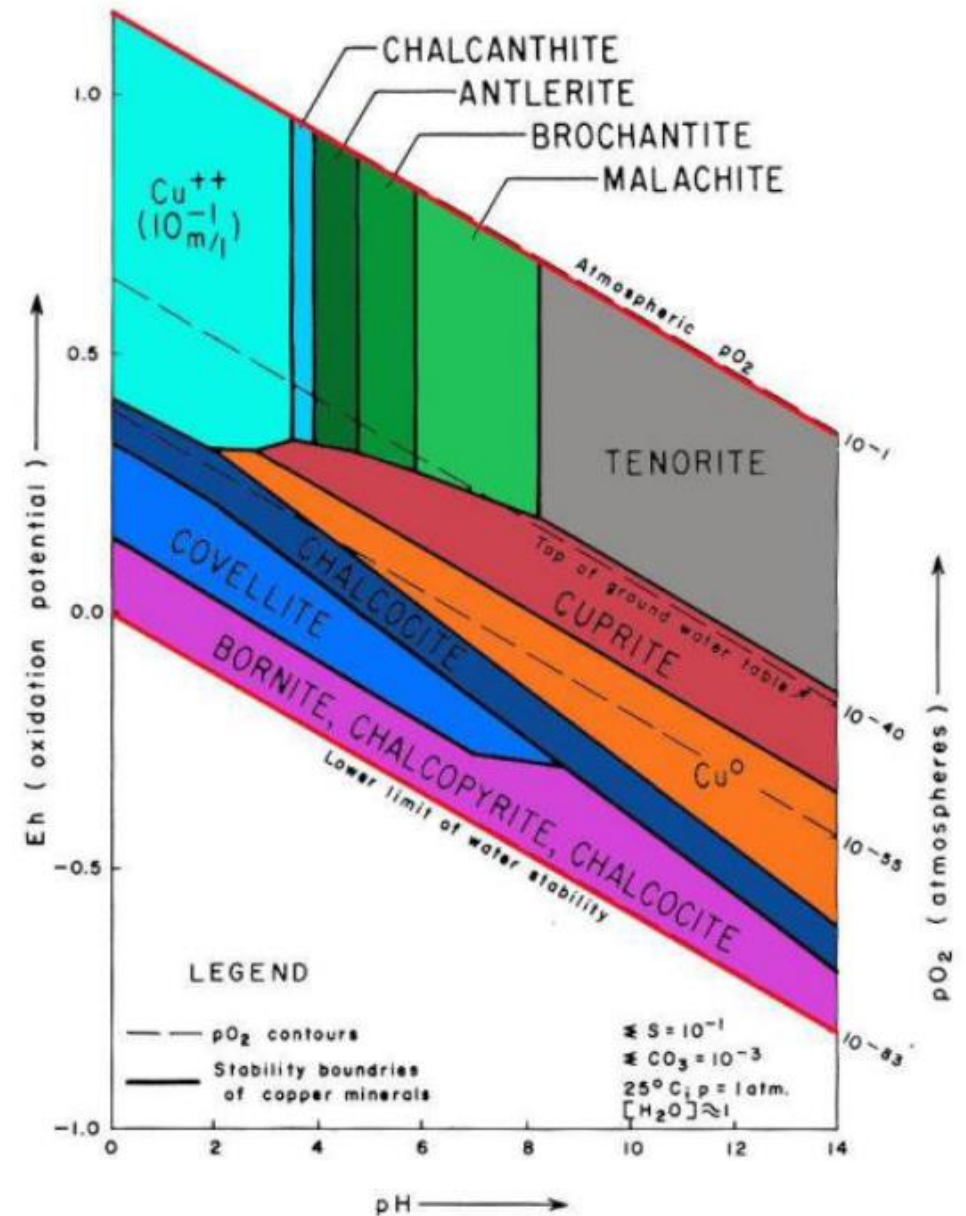


Enriquecimiento secundario

- Bajo el nivel freático se produce un enriquecimiento de los minerales sulfurados.
- Nivel de aguas subterráneas marca nivel bajo el cual disminuye el oxígeno.

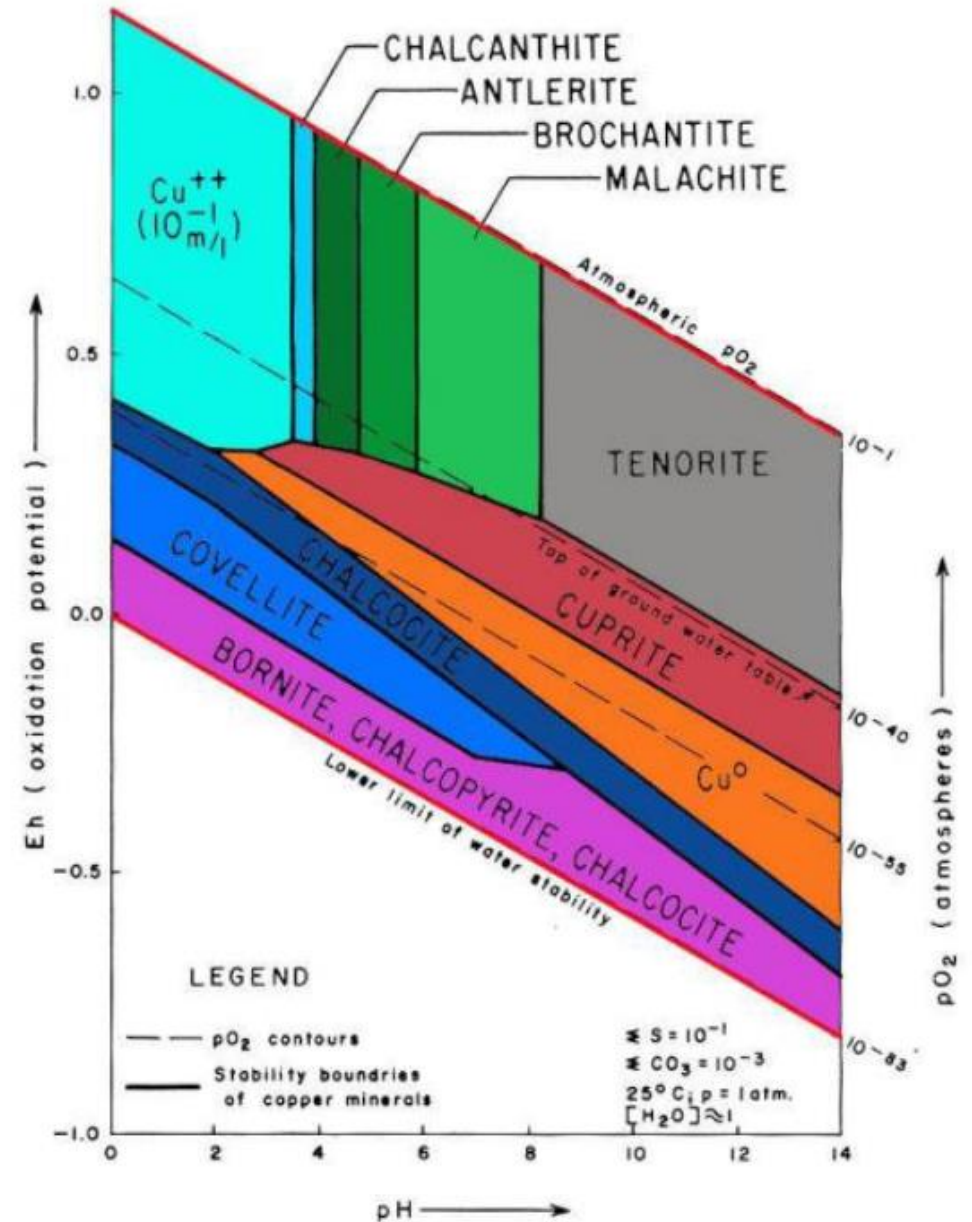
Nivel freático:

- Sobre: Eh alto (ambiente oxidante) y pH bajo (ácido). Sulfuros inestables.
- Bajo: Eh bajo (ambiente reductor) y pH alto (básico). Sulfuros estables.

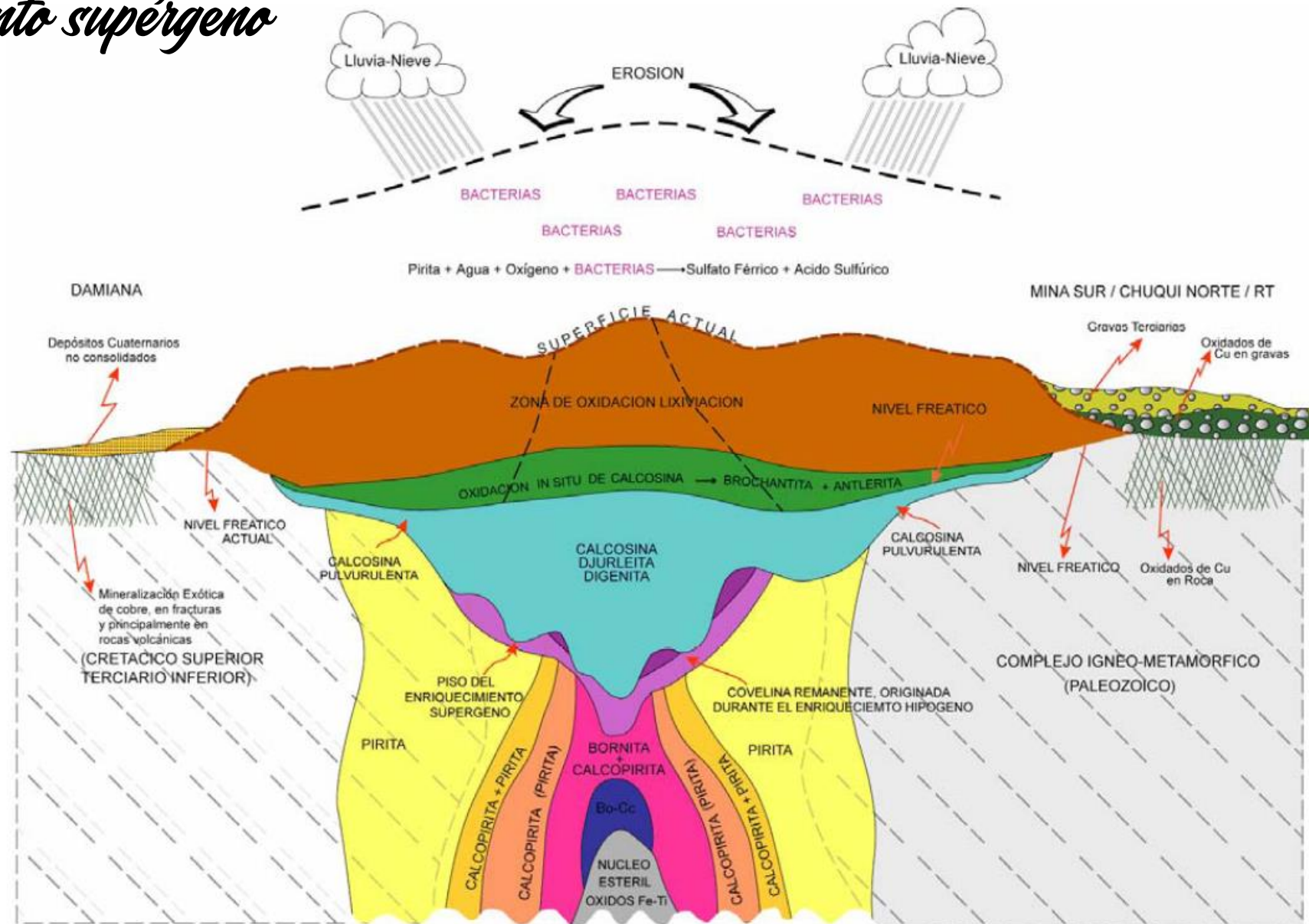


Comportamiento metales

- Los metales liberados por la lixiviación se transportan en soluciones ácidas.
- Fe, Mn, Ni: inmóviles, forman óxidos estables en ambiente ácido y oxidante.
- Cu, Mo, Zn, Ag: móviles, inestables a condiciones oxidantes.
- Bajo el nivel freático reprecipitan como sulfuros supérgenos en un ambiente reductor.
- Au: No es reactivo químicamente.

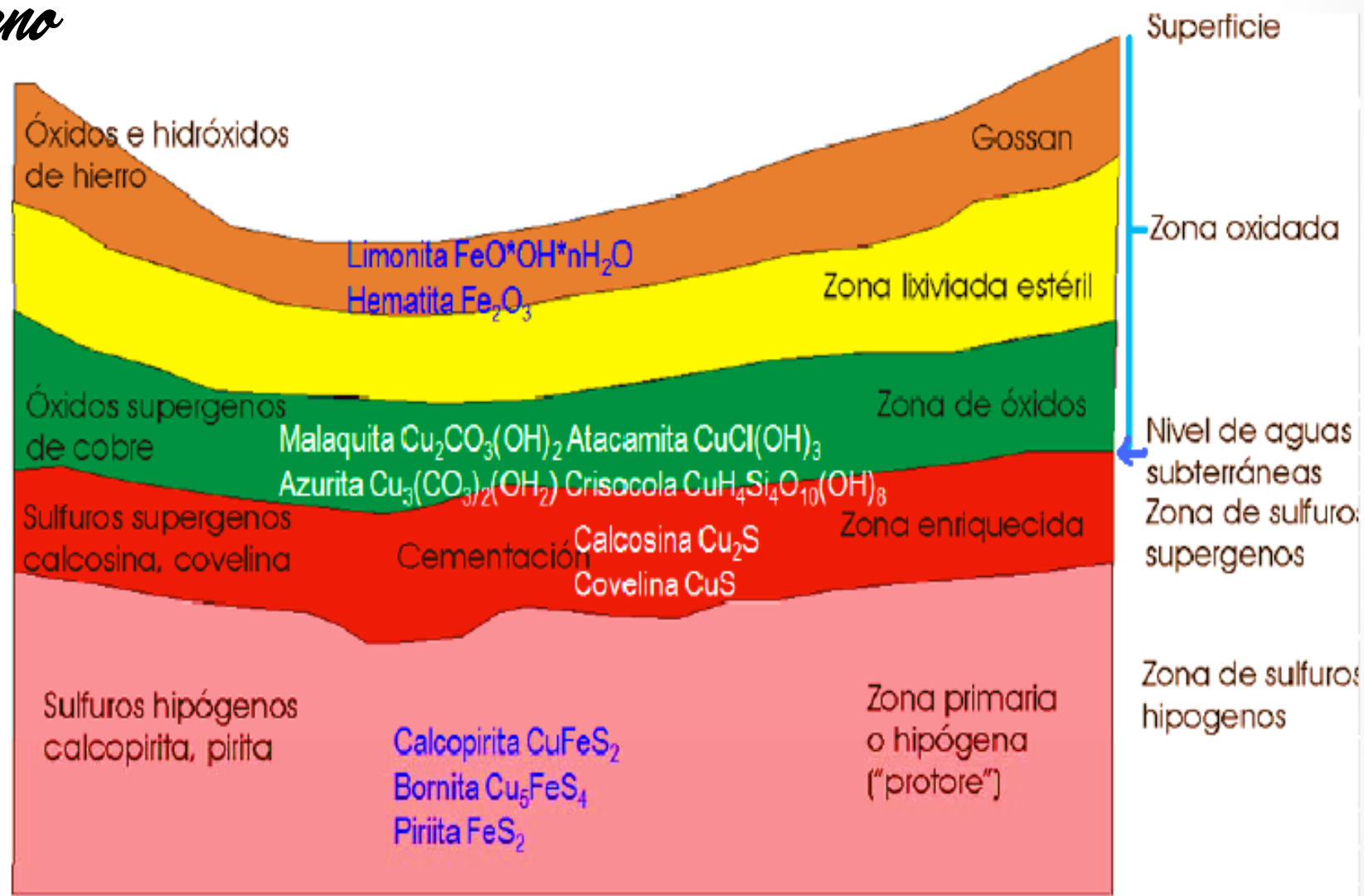


Enriquecimiento supérgeno



Geofield,
modificado
de Becerra
(2001)

Enriquecimiento supérgeno



Perfil de enriquecimiento secundario típico con mineralización hipógena (hidrotermal) de pirita-calcopirita (Ejemplo, asociada a un pórfido cuprífero).

Gossan o Sombrero de Hierro

- Oxidación de minerales hipógenos.
- Oxidación de sulfuros de Fe libera Fe^{+2} y Fe^{+3} , generando nuevos minerales.
- Minerales característicos:
 - Hematita
 - Magnetita
 - Goethita
 - Limonita
 - Jarosita



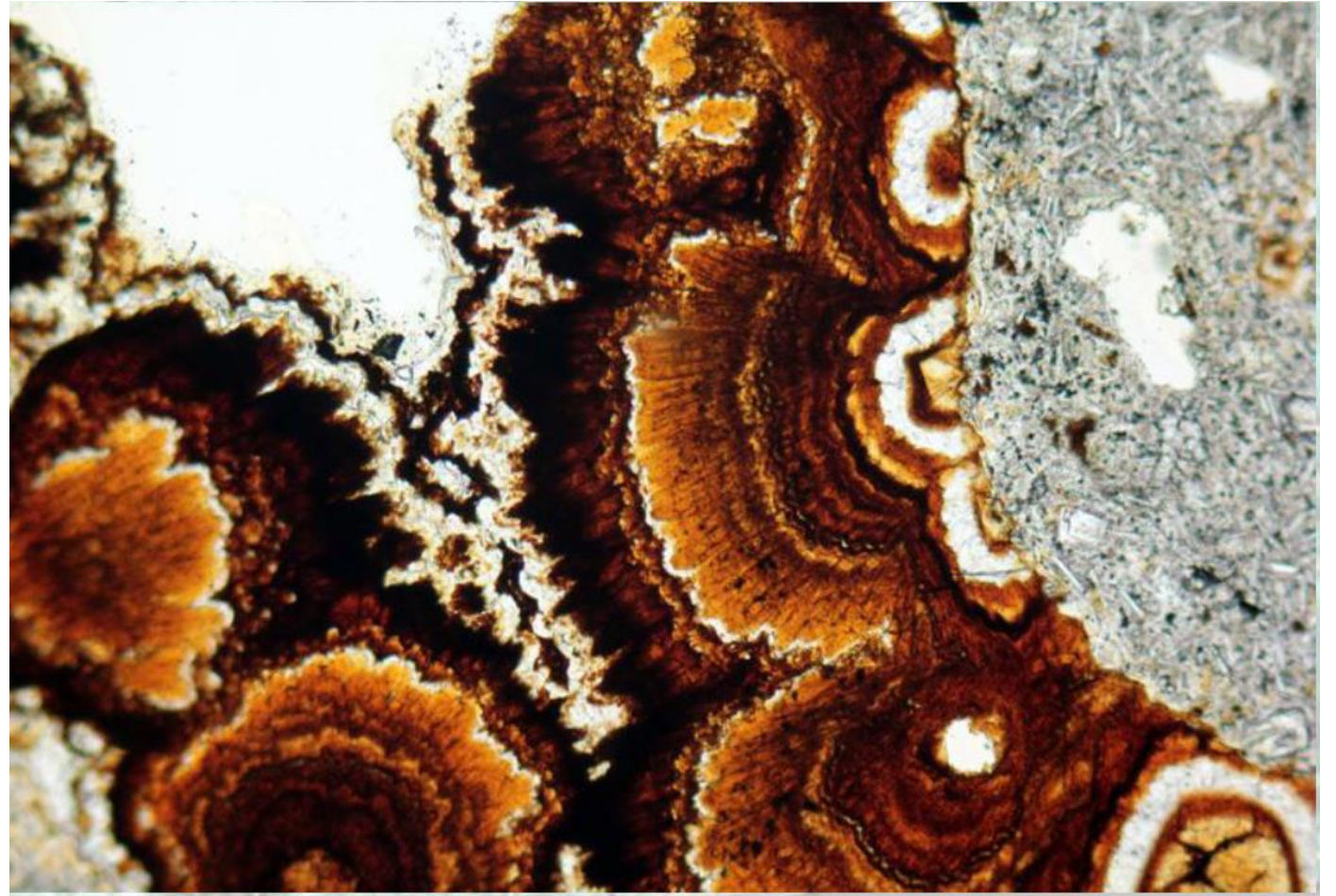
Zona lixiviada estéril

- Debido a la lixiviación de sulfuros hipógenos.
- Depende de la capacidad de la mineralogía hipógena para producir soluciones ácidas.
- Caracterizada por alta presencia de oquedades, boxwork, cuarzo residual, arcillas y minerales de Fe.
- Hematita, magnetita, geothita, limonita y Jarosita.



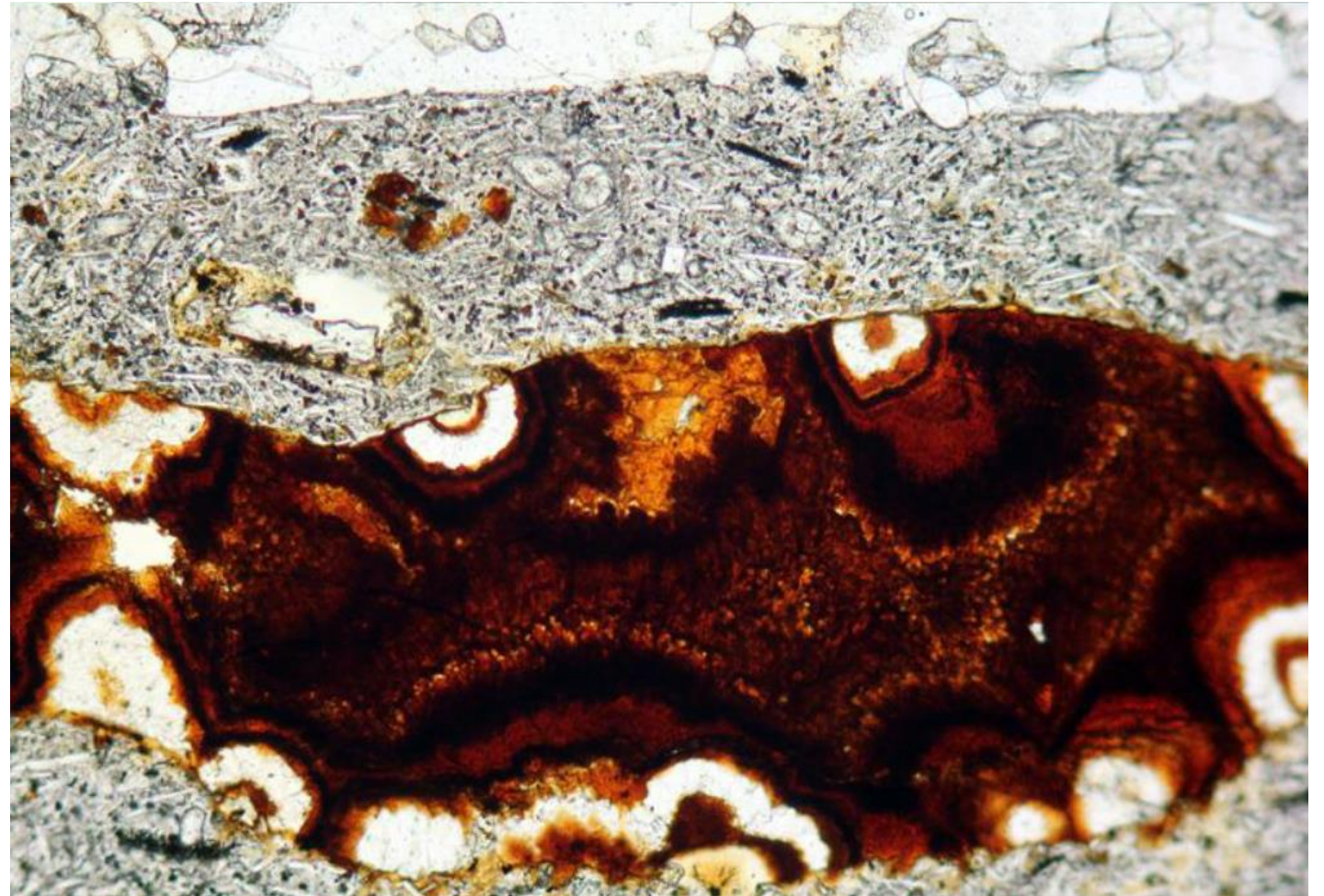
Hematita Fe_2O_3

- Variedad terrosa.
- Color rojizo a marrón.
- Muy bajo relieve.
- Se infiere de bordes rojizos de minerales opacos.



Hematita Fe_2O_3

- Variedad terrosa.
- Color rojizo a marrón.
- Muy bajo relieve.
- Se infiere de bordes rojizos de minerales opacos.



Jarosita $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$

Color: incoloro a amarillo

Pleocroísmo: débil, tonos amarillos

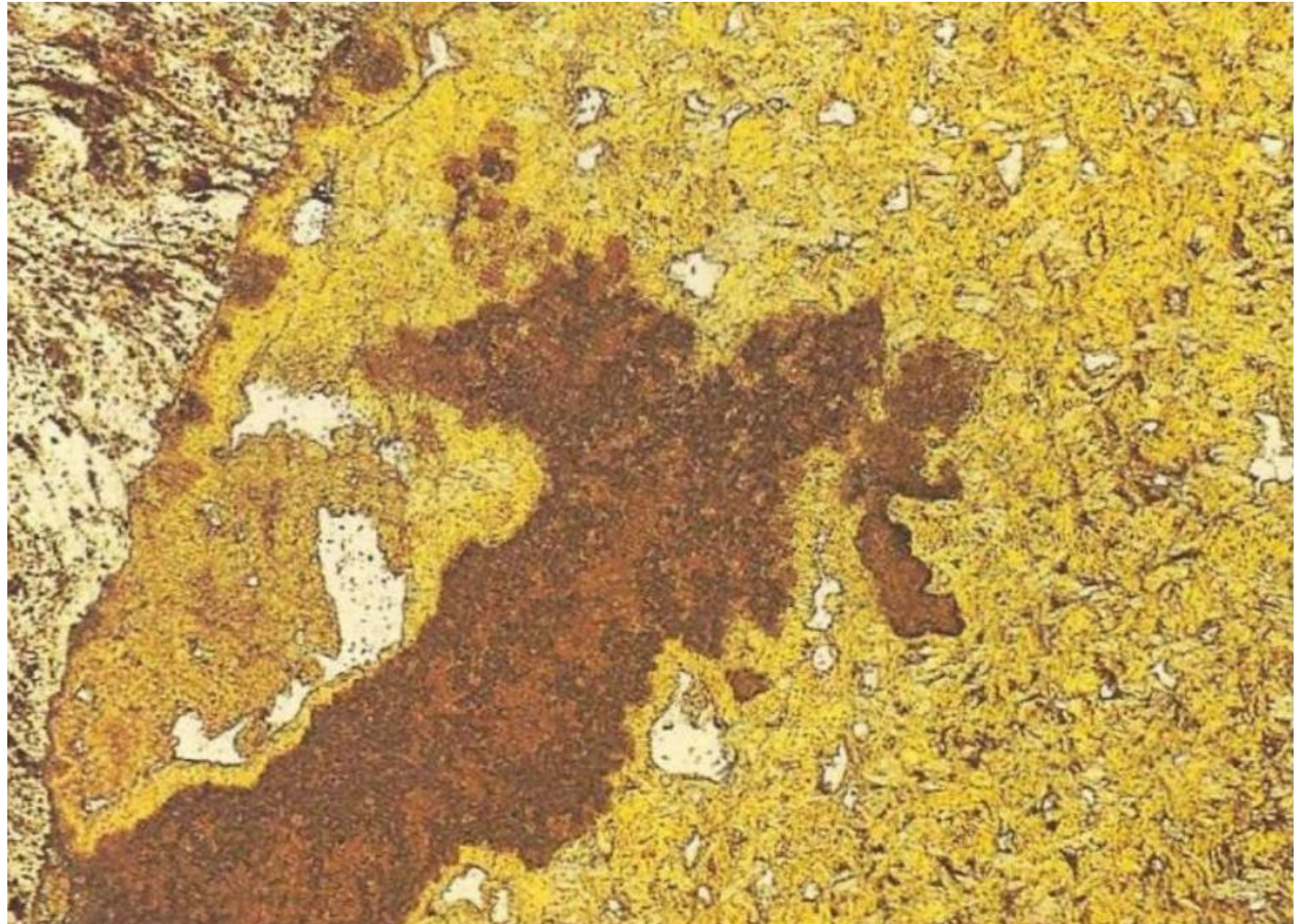
C.I.: Variable según composición hasta tercer orden.

Extinción: recta

Relieve: muy alto

Hábito: granos rombohédricos. Agregados criptocristalinos. Pseudomorfos de pirita.

Estilo: diseminado a masivo



Jarosita $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$

Color: incoloro a amarillo

Pleocroísmo: débil, tonos amarillos

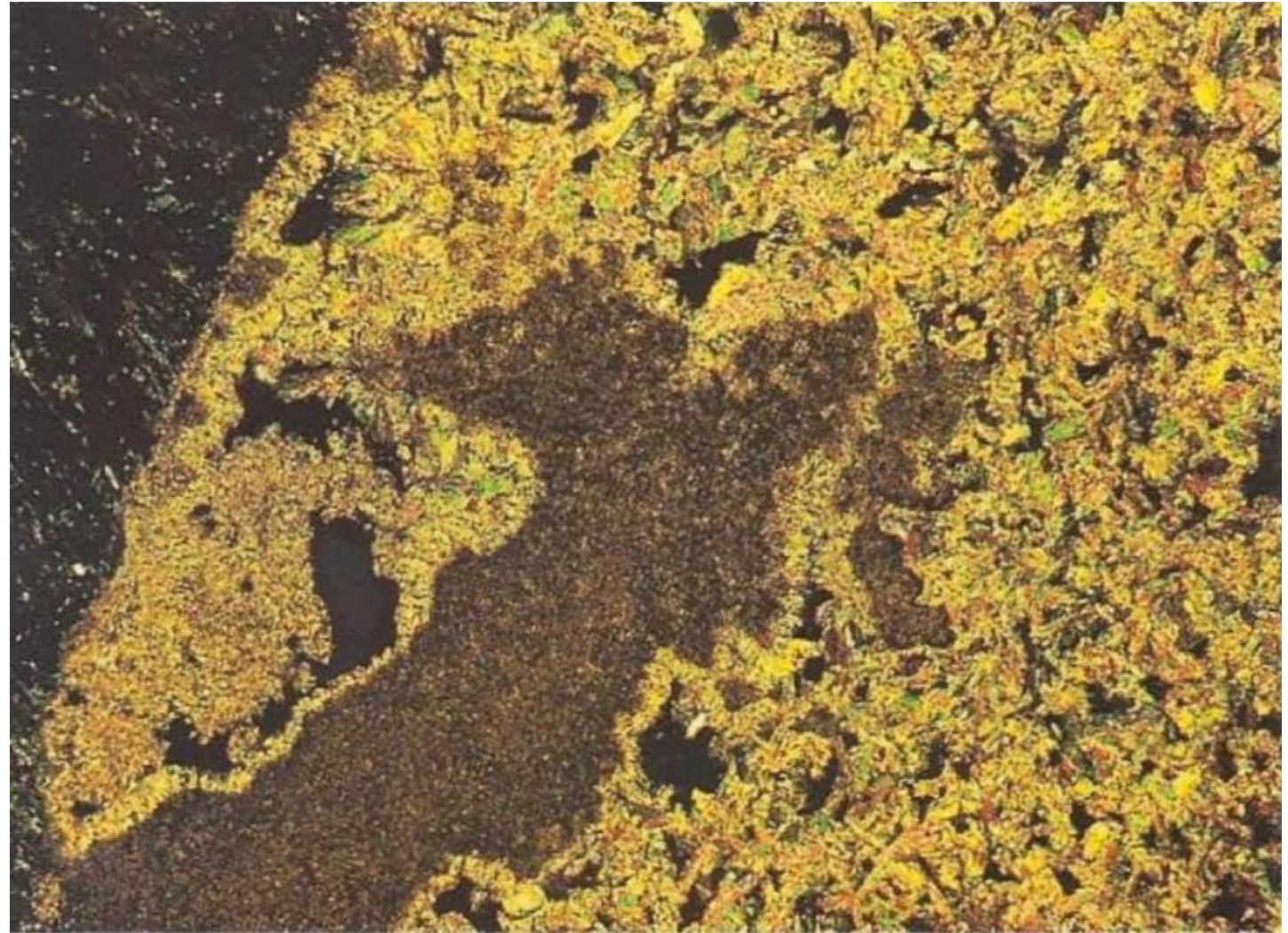
C.I.: Variable según composición hasta tercer orden.

Extinción: recta

Relieve: muy alto

Hábito: granos romboédricos. Agregados criptocristalinos. Pseudomorfos de pirita.

Estilo: diseminado a masivo



Goethita FeO(OH)

Color: Marrón, rojizo

Pleocroísmo: amarillo claro a marrón. Verdoso posible

C.I.: ordenes mayores a enmascarado

Extinción: recta

Relieve: extremo

Hábito: Acicular radial con cristales idiomorfos

Asociado a magnetita



Goethita Feo(OH)

Color: Marrón, rojizo

Pleocroísmo: amarillo claro a marrón. Verdoso posible

C.I.: ordenes mayores a enmascarado

Extinción: recta

Relieve: extremo

Hábito: Acicular radial con cristales idiomorfos

Asociado a magnetita



Goethita Feo(OH)

Color: Marrón, rojizo

Pleocroísmo: amarillo claro a marrón. Verdoso posible

C.I.: ordenes mayores a enmascarado

Extinción: recta

Relieve: extremo

Hábito: Acicular radial con cristales idiomorfos

Asociado a magnetita



Zona de óxidos

- Zona de óxidos estables sobre el nivel freático.
- Depende de:
 - Eficacia de la lixiviación: inestabilidad a pH muy bajo.
 - Eficacia del transporte descendente.
- Precipitación o reemplazo.



Zona de óxidos

Minerales:

- Atacamita
- Azurita
- Malaquita
- Antlerita
- Chalcantita
- Brocantita
- Crisocola
- Cuprita



Zona de óxidos

Minerales:

- Atacamita
- Azurita
- Malaquita
- Antlerita
- Chalcantita
- Brocantita
- Crisocola
- Cuprita



Zona de óxidos



Mineral	Formula	Cu
Atacamita	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	59,51
Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH}_2)$	55,31
Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	57,48
Antlerita	$\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$	53,74
Chalcantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$	25,45
Brocantita	$\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$	56,2
Crisocola	$(\text{Cu},\text{Al})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	33,86
Tenorita	CuO	79,89
Cuprita	Cu_2O	88,2

Crosocola

Color: Incoloro a verde azulado pálido. Posibles tonos amarillos.

Pleocroísmo: verde azulado pálido a incoloro.

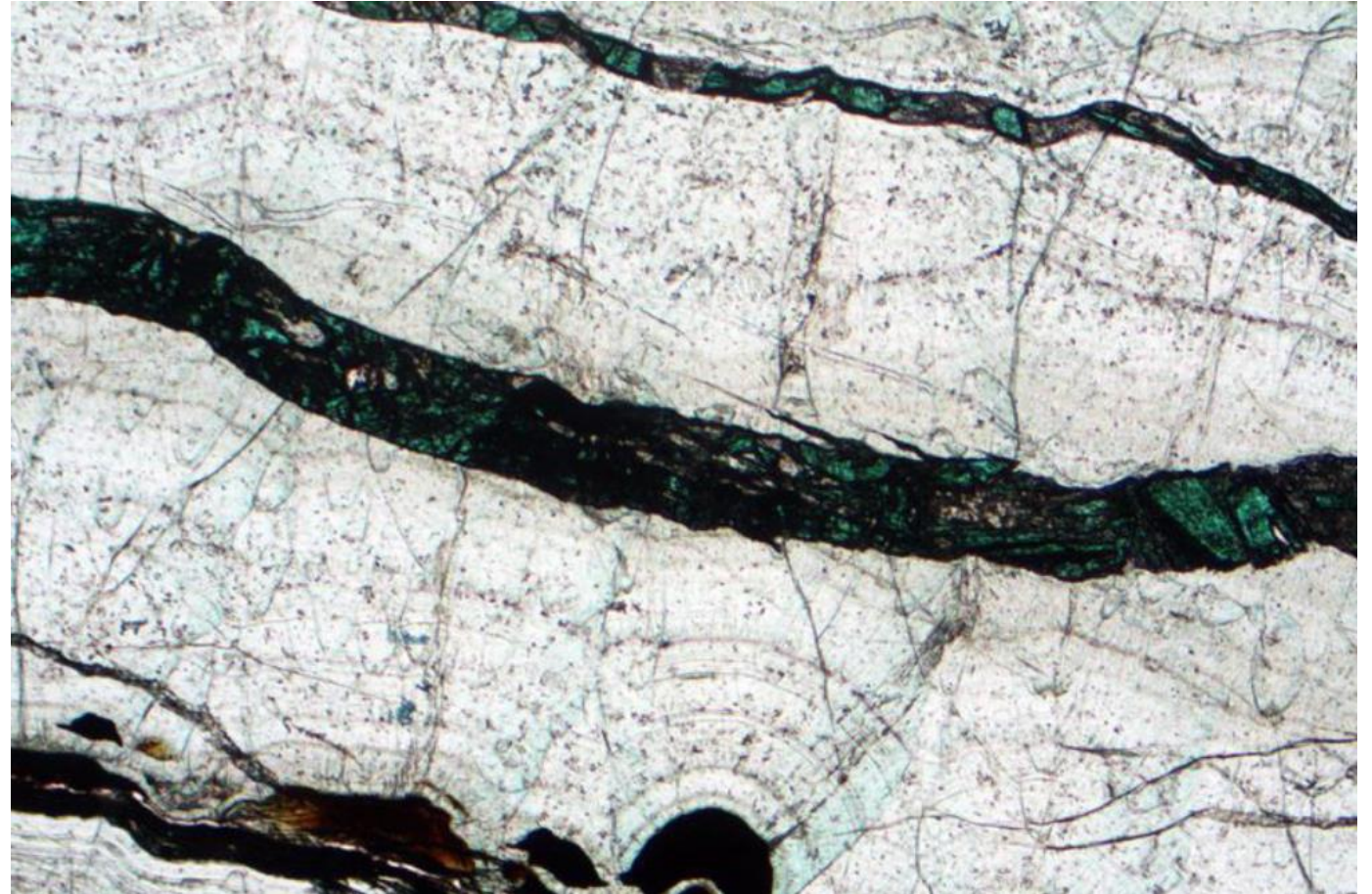
C.I.: Alta birrefringencia, puede ser más baja a isótropo.

Extinción: oblicua y en abanico.

Relieve: bajo.

Hábito: Botroidal, relleno de vetas y oquedades.

Asociada a atacamita.



Crisocola

Color: Incoloro a verde azulado pálido. Posibles tonos amarillos.

Pleocroísmo: verde azulado pálido a incoloro.

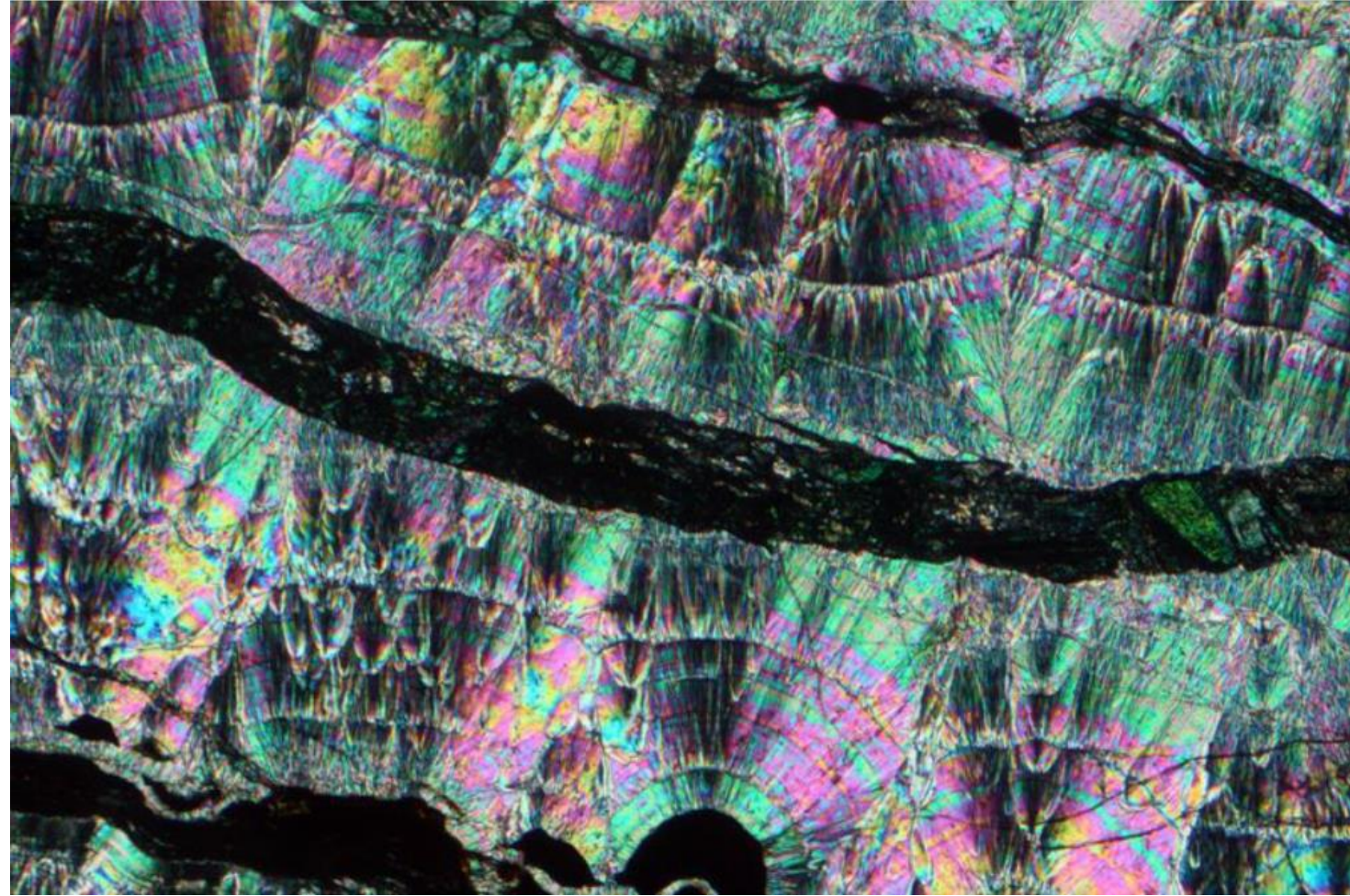
C.I.: Alta birrefringencia, puede ser más baja a isótropo.

Extinción: oblicua y en abanico.

Relieve: bajo.

Hábito: Botroidal, relleno de vetas y oquedades.

Asociada a atacamita.



Crisocola

Color: Incoloro a verde azulado pálido. Posibles tonos amarillos.

Pleocroísmo: verde azulado pálido a incoloro.

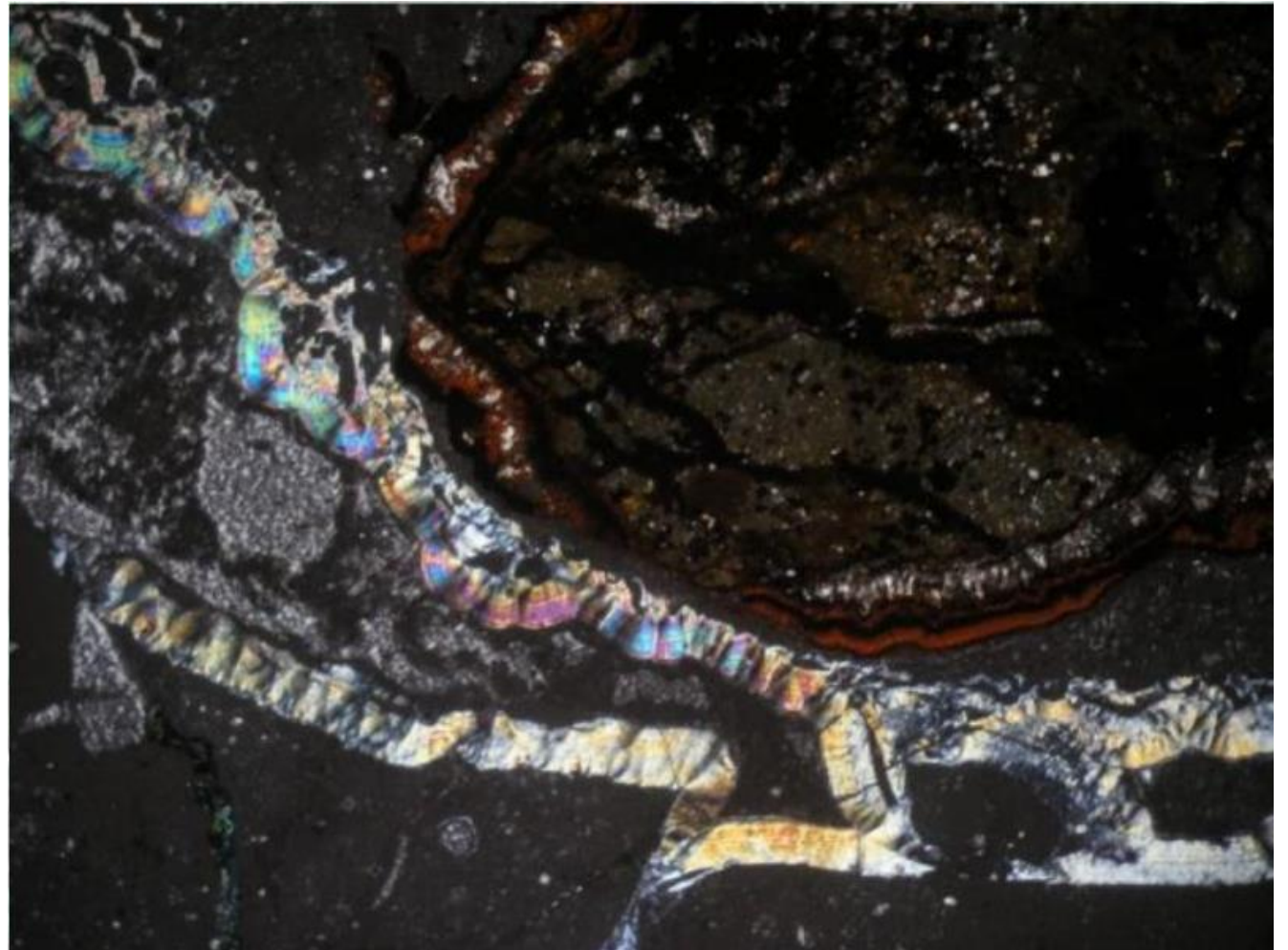
C.I.: Alta birrefringencia, puede ser más baja a isótropo.

Extinción: oblicua y en abanico.

Relieve: bajo.

Hábito: Botroidal, relleno de vetas y oquedades.

Asociada a atacamita.



Atacamita

Color: verde claro y oscuro.

Pleocroísmo: variable. Tonos verde-amarillo.

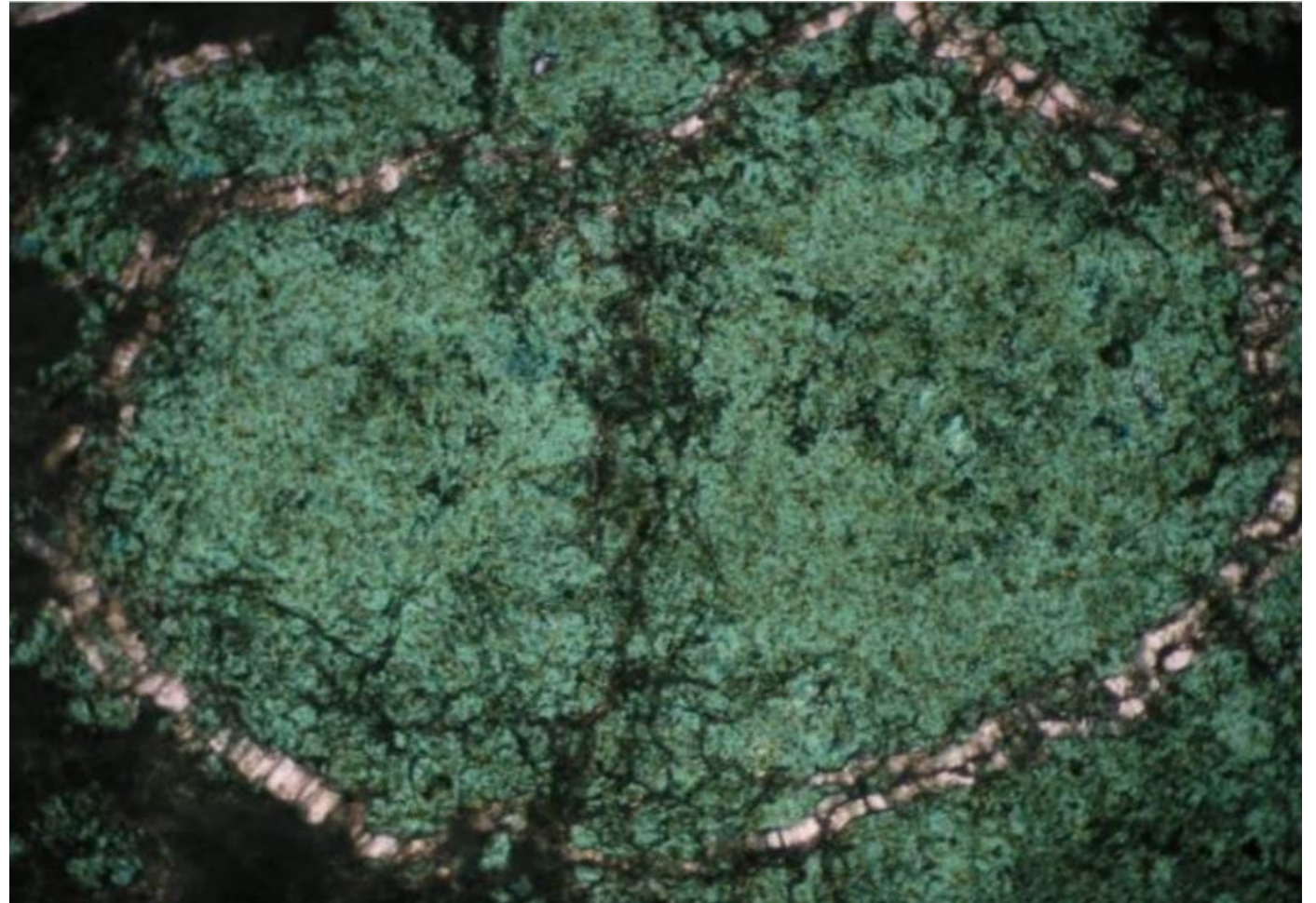
C.I.: generalmente azul. Puede tomar colores vivos mezclado con crisocola. Enmascarado. C.I. menor que malaquita.

Extinción: recta.

Relieve: muy alto.

Hábito: granos prismáticos a radiales.

Vetillas y diseminado.



Atacamita

Color: verde claro y oscuro.

Pleocroísmo: variable. Tonos verde-amarillo.

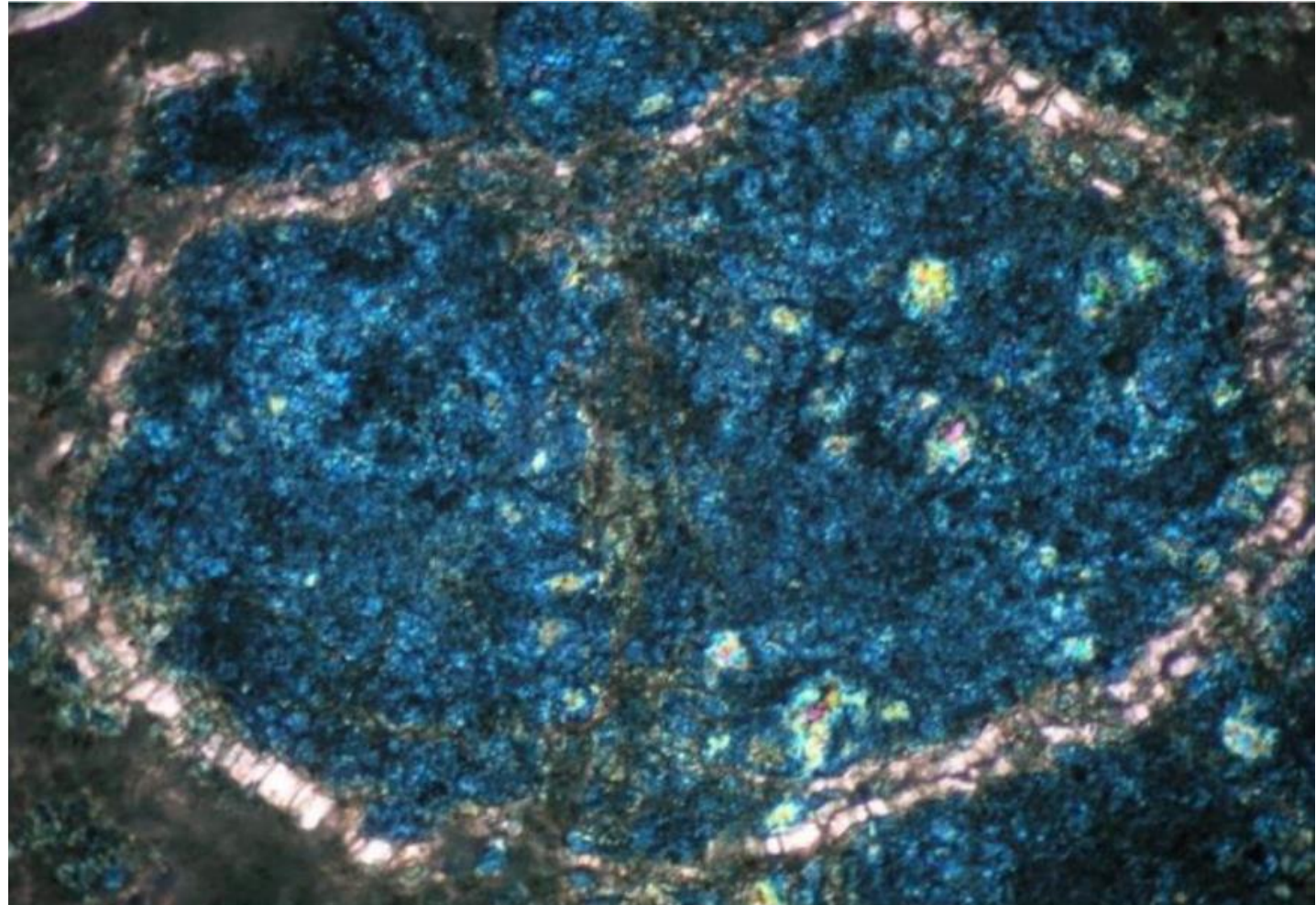
C.I.: generalmente azul. Puede tomar colores vivos mezclado con crisocola. Enmascarado. C.I. menor que malaquita.

Extinción: recta.

Relieve: muy alto.

Hábito: granos prismáticos a radiales.

Vetillas y diseminado.



Antlerita

Color: verde claro.

Pleocroísmo: fuerte en tonos verde-amarillo.

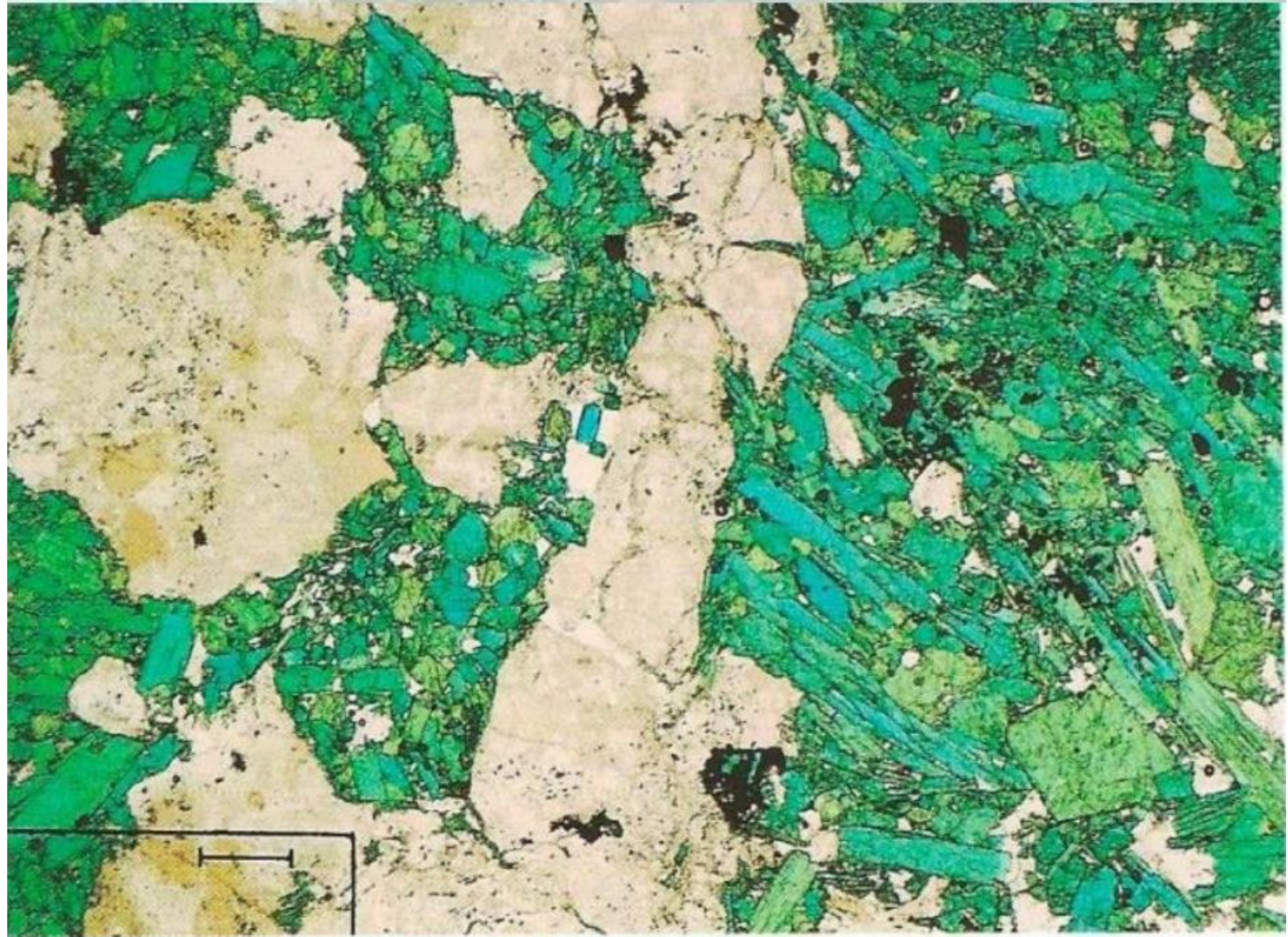
C.I.: ordenes elevados.

Extinción: recta.

Relieve: muy alto.

Hábito: cristales idiomorfos a microgranulares. Puede formar pseudomorfos.

Vetillas con cristales perpendiculares a ella.



Antlerita

Color: verde claro.

Pleocroísmo: fuerte en tonos verde-amarillo.

C.I.: ordenes elevados.

Extinción: recta.

Relieve: muy alto.

Hábito: cristales idiomorfos a microgranulares. Puede formar pseudomorfos.

Vetillas con cristales perpendiculares a ella.



Brocantita

Color: verde (algo amarillento).

Pleocroísmo: débil, verde azulado.

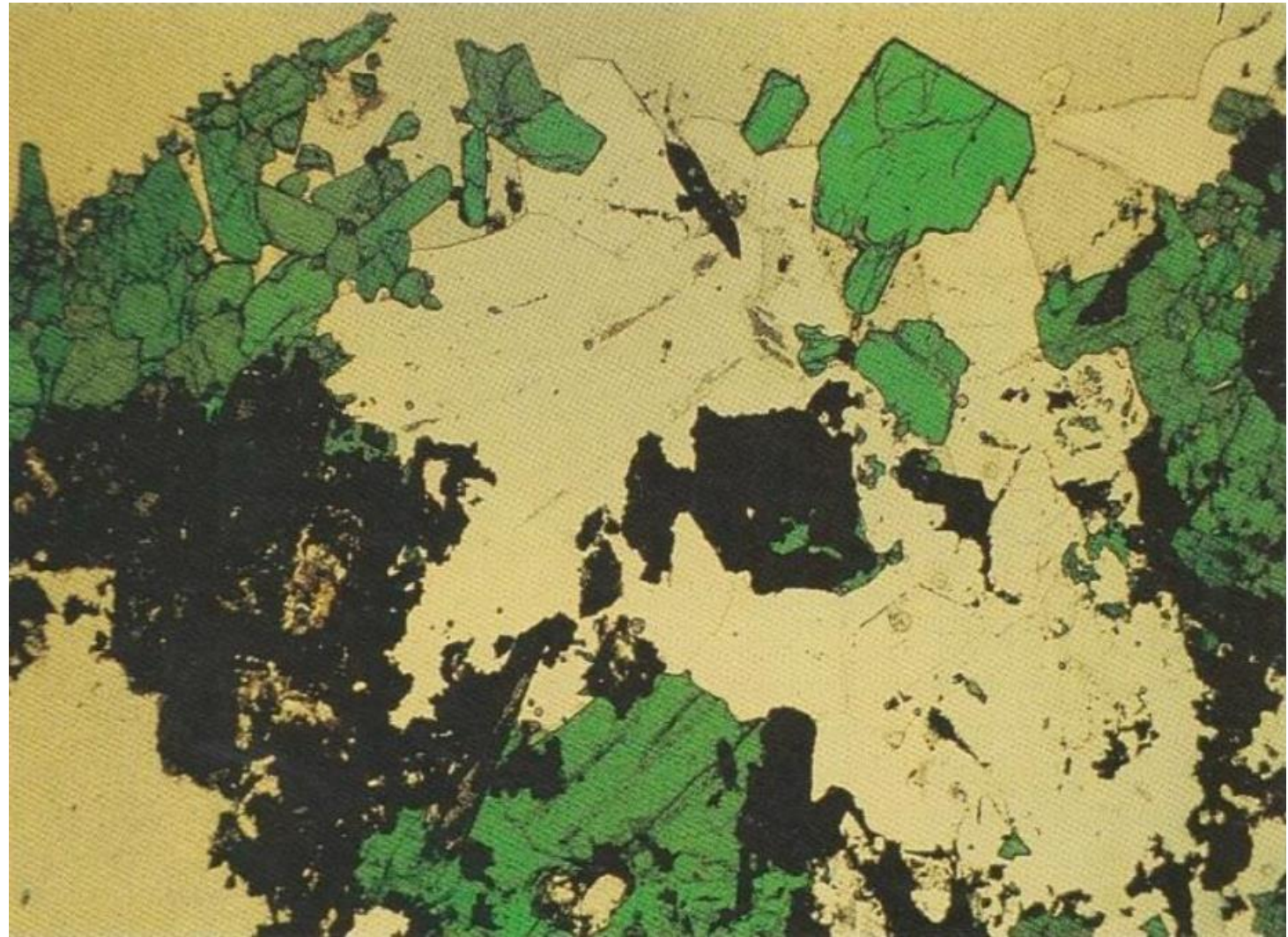
C.I.: ordenes elevados.

Extinción: oblicua.

Relieve: muy alto.

Hábito: agregados radiales y botroidales. También prismático.

Clivaje: en 1 dirección.



Brocantita

Color: verde (algo amarillento).

Pleocroísmo: débil, verde azulado.

C.I.: ordenes elevados.

Extinción: oblicua.

Relieve: muy alto.

Hábito: agregados radiales y botroidales. También prismático.

Clivaje: en 1 dirección.



Malagueta

Color: verde brillante vivo.

Pleocroísmo: marcado (incoloro-verde amarillo-verde oscuro).

C.I.: ordenes elevados a enmascarado.

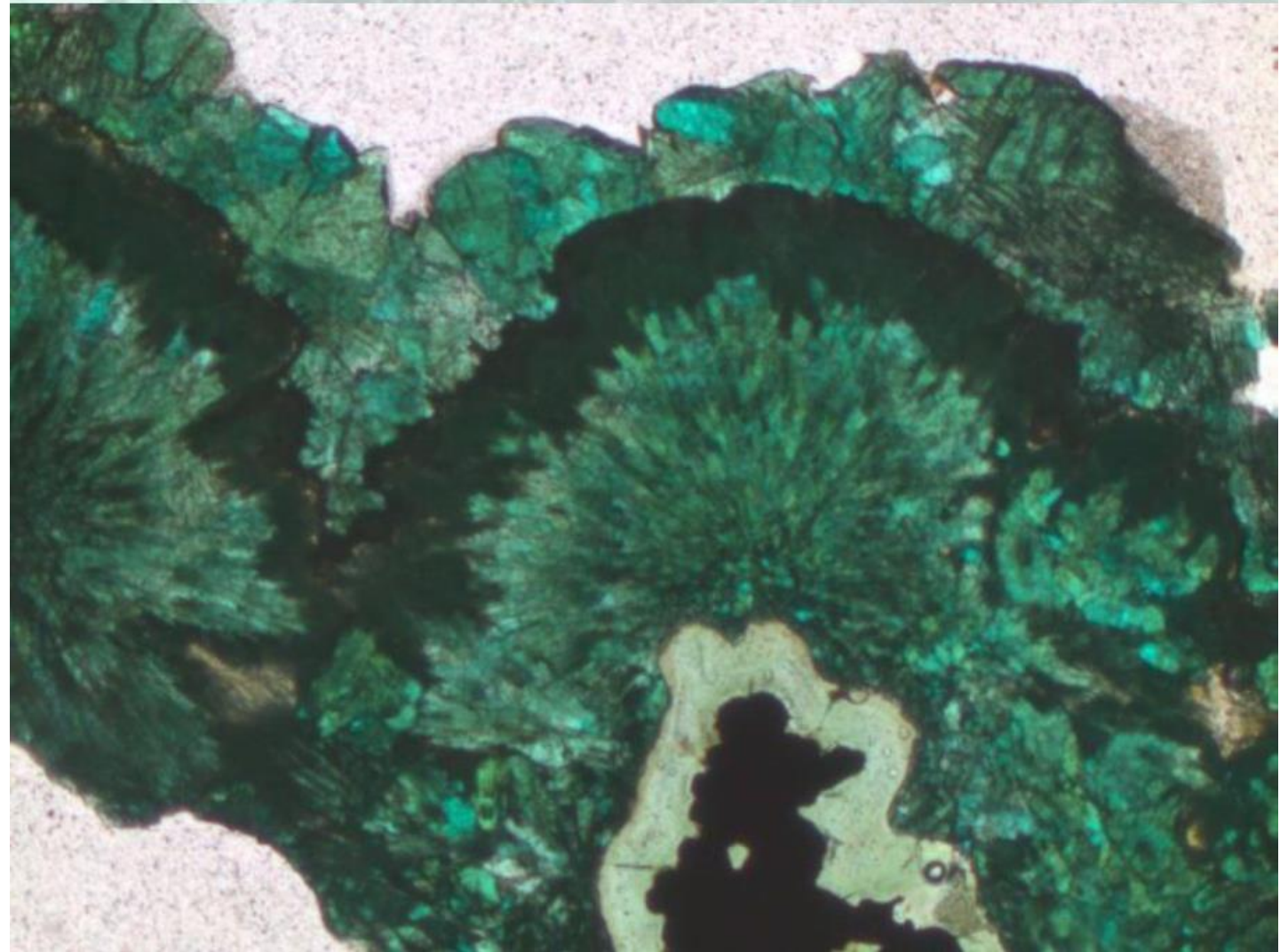
Extinción: oblicua (23°).

Relieve: moderado a muy alto.

Hábito: cristales prismáticos, radiales, acicular radial y fibroso.

Clivaje: perfecto.

En relación a azurita.



Malagueta

Color: verde brillante vivo.

Pleocroísmo: marcado (incoloro-verde amarillo-verde oscuro).

C.I.: ordenes elevados a enmascarado.

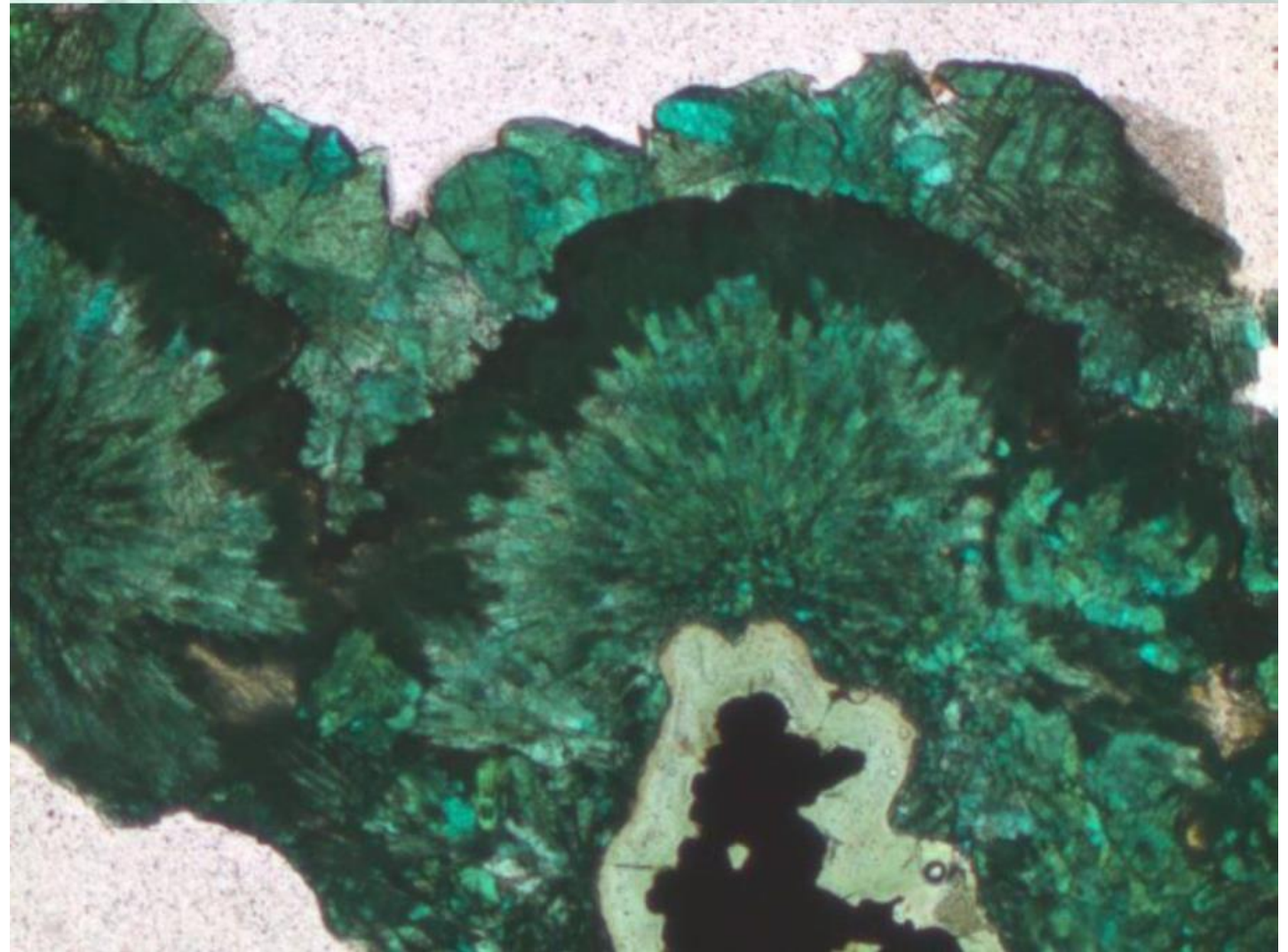
Extinción: oblicua (23°).

Relieve: moderado a muy alto.

Hábito: cristales prismáticos, radiales, acicular radial y fibroso.

Clivaje: perfecto.

En relación a azurita.



Malagueta

Color: verde brillante vivo.

Pleocroísmo: marcado (incoloro-verde amarillo-verde oscuro).

C.I.: ordenes elevados a enmascarado.

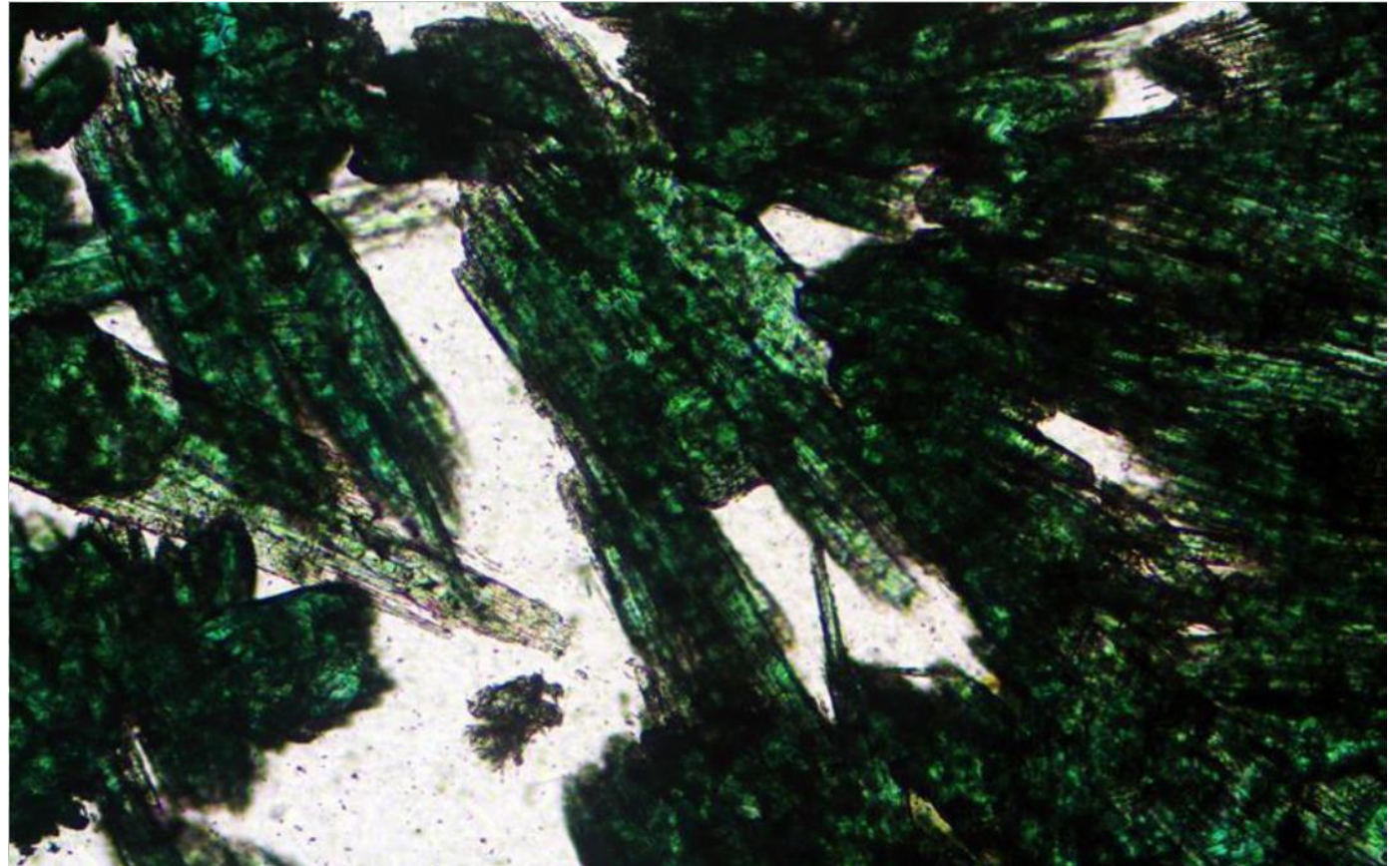
Extinción: oblicua (23°).

Relieve: moderado a muy alto.

Hábito: cristales prismáticos, radiales, acicular radial y fibroso.

Clivaje: perfecto.

En relación a azurita.



Malagueta

Color: verde brillante vivo.

Pleocroísmo: marcado (incoloro-verde amarillo-verde oscuro).

C.I.: ordenes elevados a enmascarado.

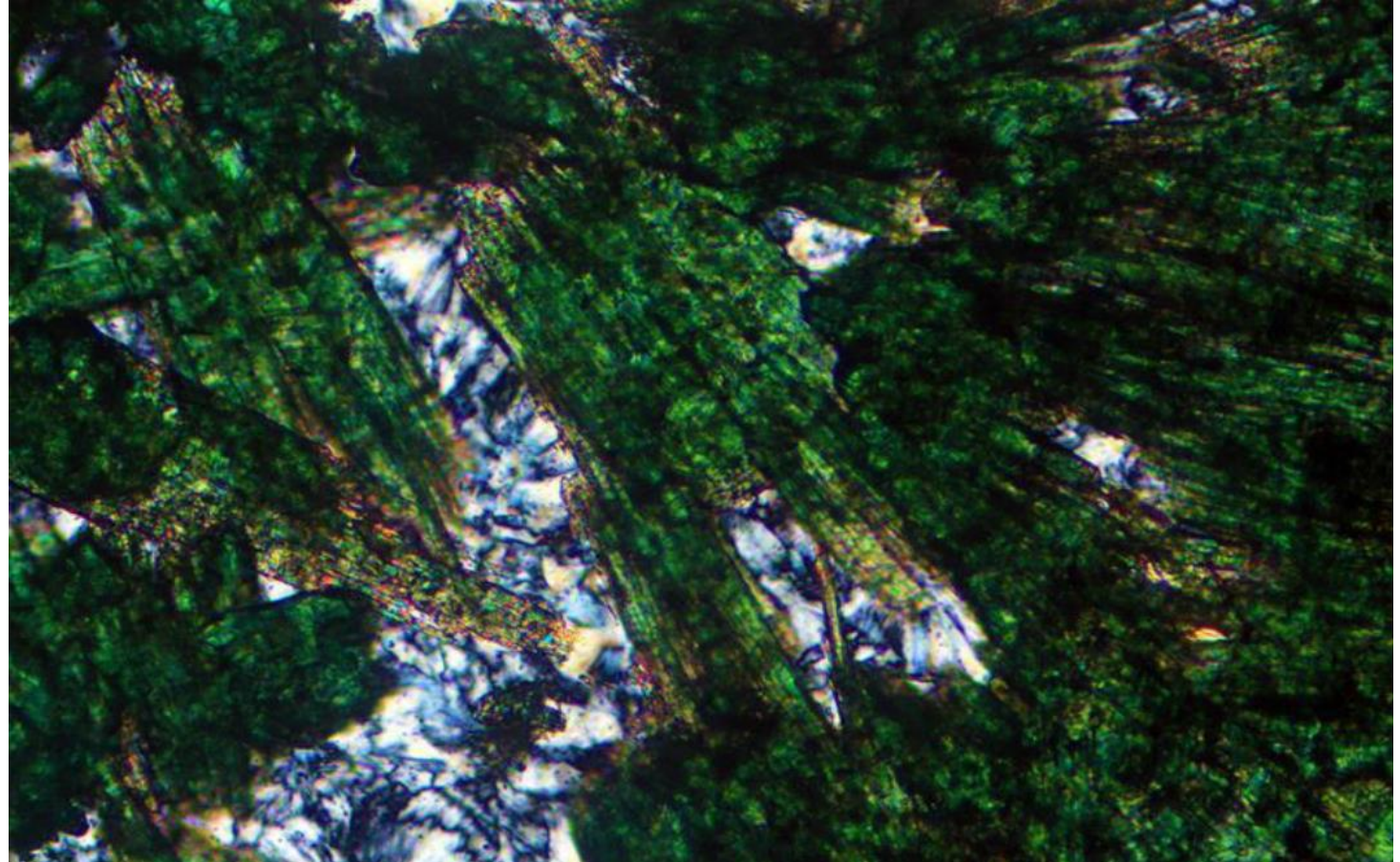
Extinción: oblicua (23°).

Relieve: moderado a muy alto.

Hábito: cristales prismáticos, radiales, acicular radial y fibroso.

Clivaje: perfecto.

En relación a azurita.



Azurita

Color: azul.

Pleocroísmo: débil (azul-azul claro).

C.I.: ordenes elevados a enmascarado.

Extinción: levemente oblicua (13°).

Relieve: muy alto.

Hábito: tabular, paralelo, acicular, nodular.

En relación a malaquita.



Azurita

Color: azul.

Pleocroísmo: débil (azul-azul claro).

C.I.: ordenes elevados a enmascarado.

Extinción: levemente oblicua (13°).

Relieve: muy alto.

Hábito: tabular, paralelo, acicular, nodular.

En relación a malaquita.



Azurita

Color: azul.

Pleocroísmo: débil (azul-azul claro).

C.I.: ordenes elevados a enmascarado.

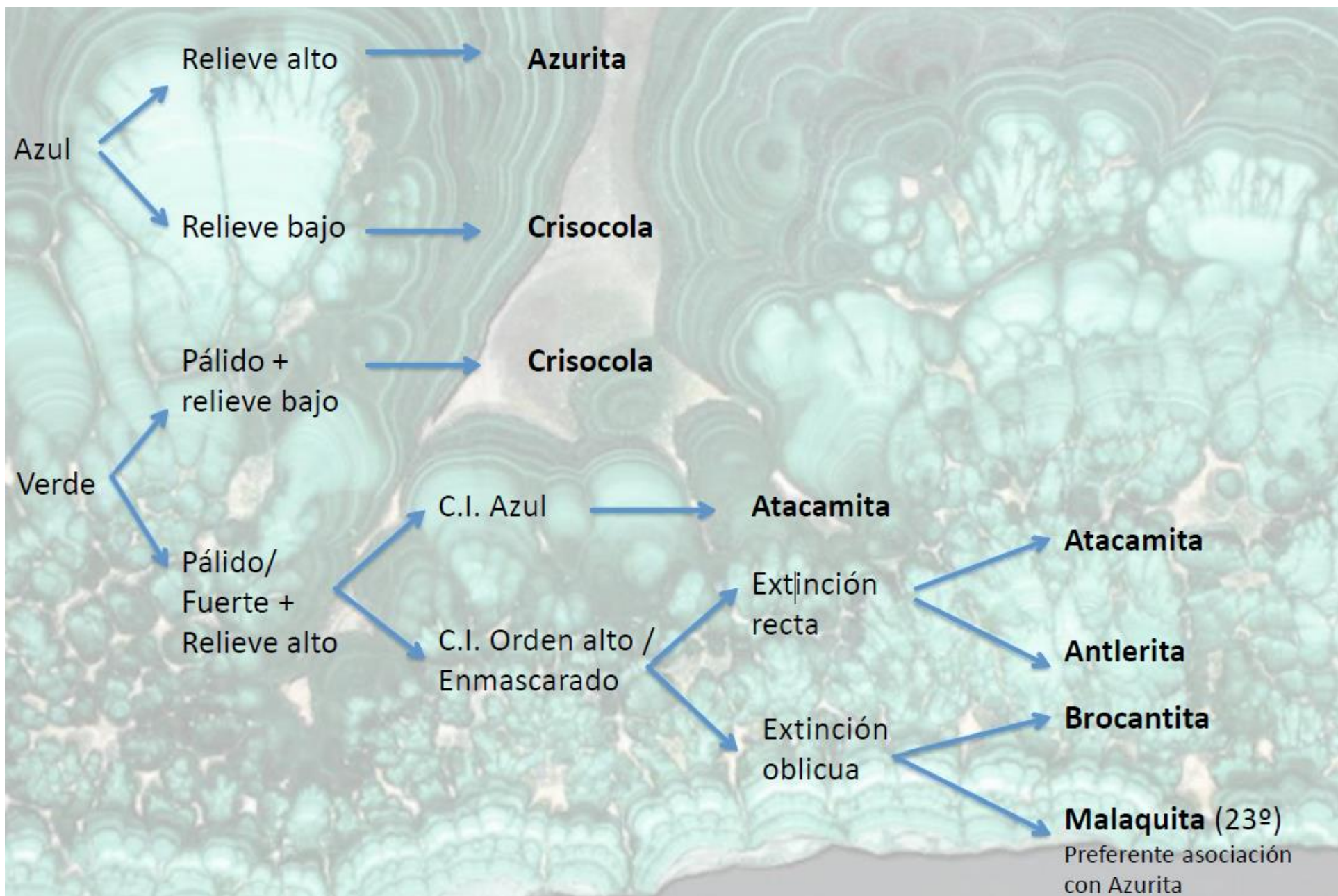
Extinción: levemente oblicua (13°).

Relieve: muy alto.

Hábito: tabular, paralelo, acicular, nodular.

En relación a malaquita.





Zona enriquecida

- Bajo nivel freático, condiciones reductoras y pH básico.
- Fluido rico en metales interactúa con sulfuros hipógenos, reemplazándolos y enriqueciéndolos.
- Calcosina, Covelina.



Zona primaria o hipógena

- Conocida como “protore”.
- Preservan mineralogía hipógena debido a alteración hidrotermal.
- No hay percolación de aguas meteóricas ni soluciones ácidas de lixiviación.
- Calcopirita, Bornita, Pirita.



Depósitos exóticos

- Sistema que incluye enriquecimiento supérgeno, transporte lateral de Cu y precipitación.
- Migración lateral de soluciones ácidas con Cu.
- Depósito en condiciones de pH y Eh adecuadas en rocas permeables.
- Mineralización de Cu cemento de gravas aluviales.
- Preferentemente oxidados de Cu.



Depósitos exóticos

