

---

# Curso MINERÍA

---

Profesor: Dr. Julián M. Ortiz

# 03 – Exploración

---

---

# Introducción

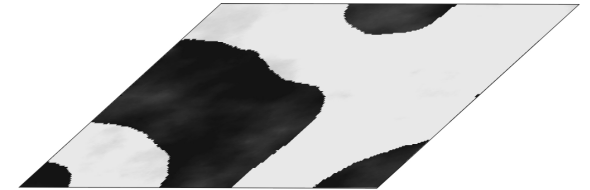
---

- **Prospección:**
  - Búsqueda de mineral o de ocurrencias geológicas que tienen el potencial de convertirse en depósitos
- **Exploración:**
  - Actividades relacionadas con la evaluación de un prospecto geológico para determinar su tamaño, forma, ley y potencial de beneficio
- Usualmente estos dos aspectos se confunden y normalmente aparecen bajo el nombre de exploración
- Geólogos y geofísicos

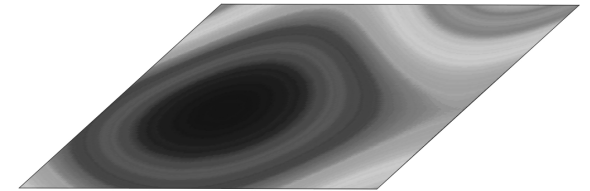
# Introducción

- La exploración es el resultado de:
  - Combinar **información** de distintos orígenes
    - Mapeo geológico
    - Ensayos geofísicos
    - Fotografías aéreas
    - Muestras de suelo
    - Geoquímica de superficie
    - Sondajes
  - **Modelo metalogénico**
    - Alteraciones
    - Mineralización
    - Litologías
    - Emplazamiento
    - Estructuras

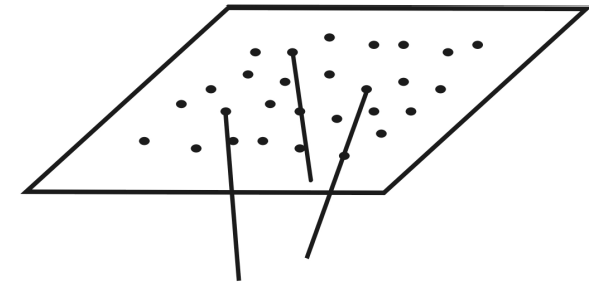
Geological Map



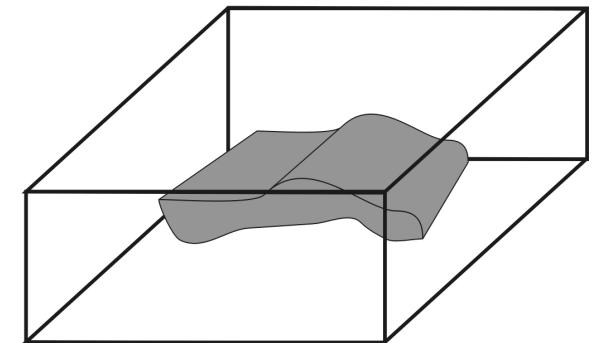
Geophysical Survey Model



Surface Geochemical Data  
Drillhole 3D Sample Data



Mineralization 3D  
Inferred Model



# Introducción

- Un ejemplo de combinación de datos y presentación en sistema SIG East Silver Bell, Arizona

GEOLOGY

Valerie Gold Initial  
Drilling Sequence:  
ESB-15, 10, 3, 11(b)  
Possible Alternate Sequence:  
ESB-16, 10, 3, 11(b)

MO Soil Geochem

Ground Magnetics

-250 Feet IP

-500 Feet IP

-1000 Feet IP

JABA (US) INC.  
S.G.M., 5-8-98

SCALE 1:14400, one Inch = 1200 feet

Perspective View of East Silver Bell  
IP, Mag, Mo Geochem and Geology

JABA

---

# Introducción

---

- Es necesario conocer las **propiedades físicas** de la Tierra y entender los **principios geológicos** para analizar la naturaleza de ocurrencias minerales
- Ingenieros de minas deben conocer los principios (sin ser expertos) de:
  - Geología física
  - Rocas y minerales
  - Geología estructural
  - Depósitos minerales
- La presencia de ciertas alteraciones y minerales indican la posibilidad de encontrar mineralización...



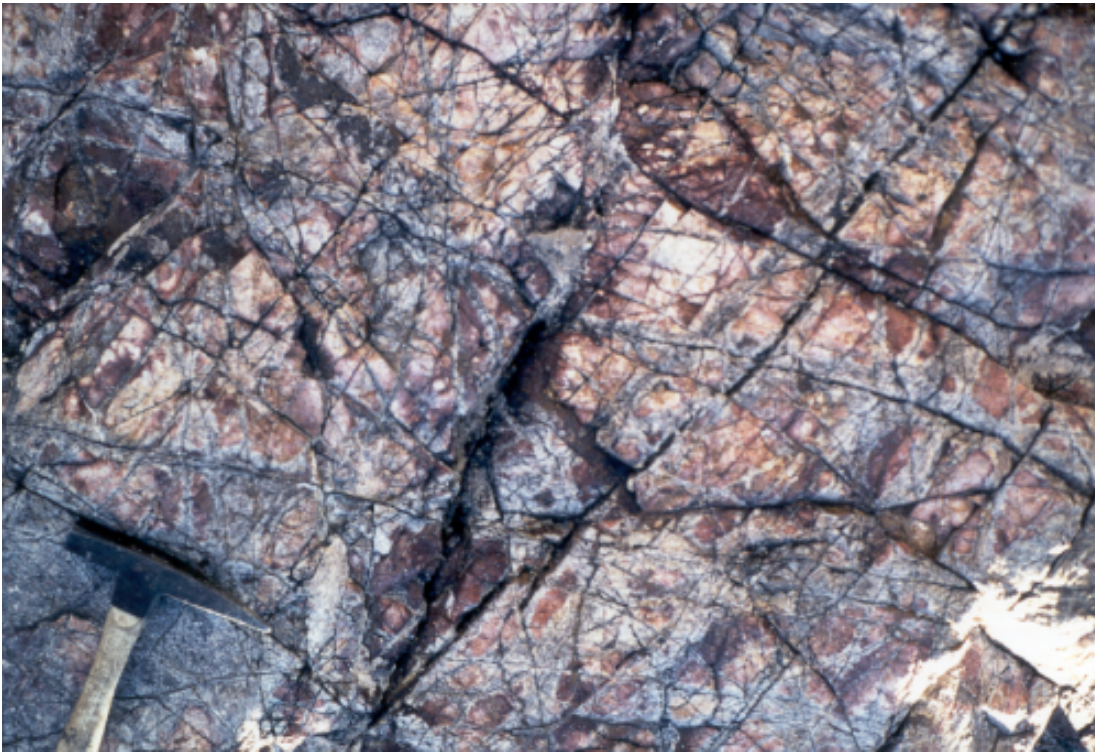
---

# Fuente de Minerales: procesos geológicos

---



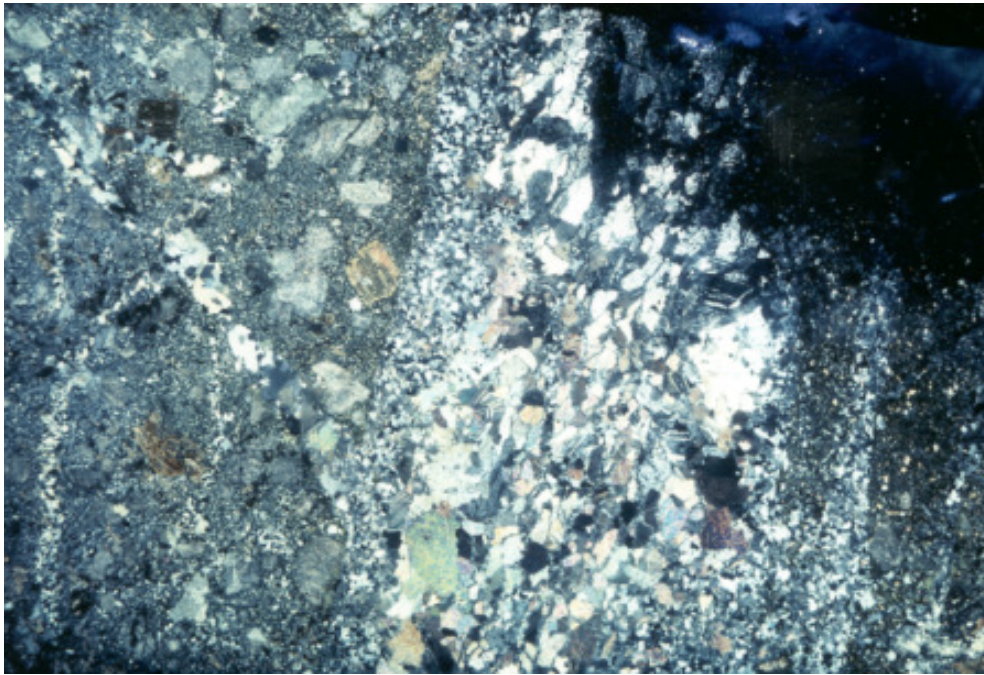
BAJO DE LA ALUMBRERA EN 1975



## ALTERACION EN BAJO

Geología de Exploración  
Geología de Producción  
Ingeniería de Minas





CUARZO-MAGNETITA-Cu-Au

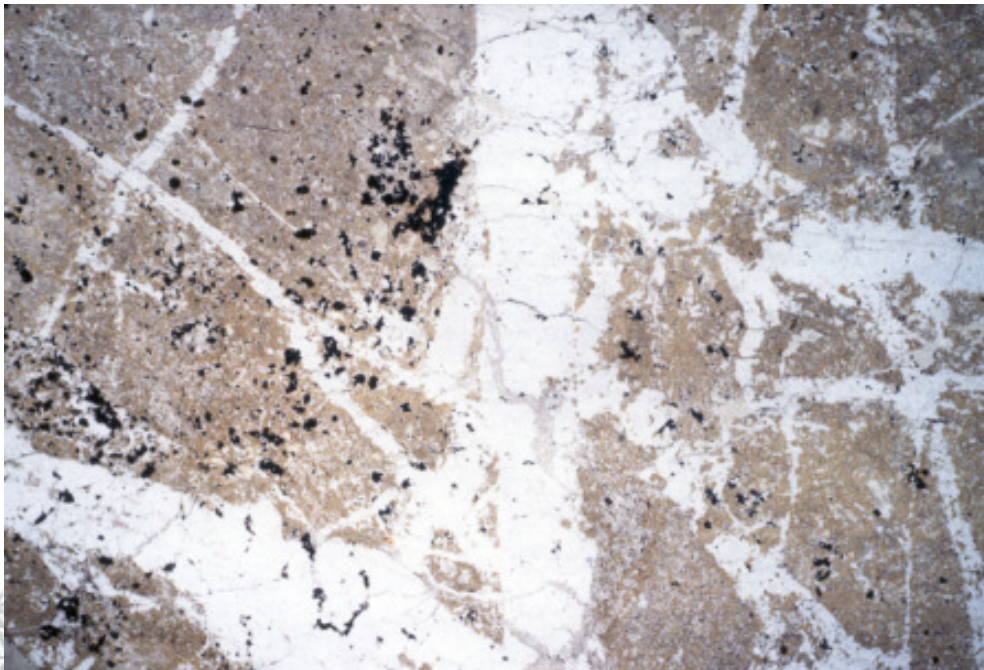
---

POTASICA - Q-Anhy-Kfeld-Mgt

---

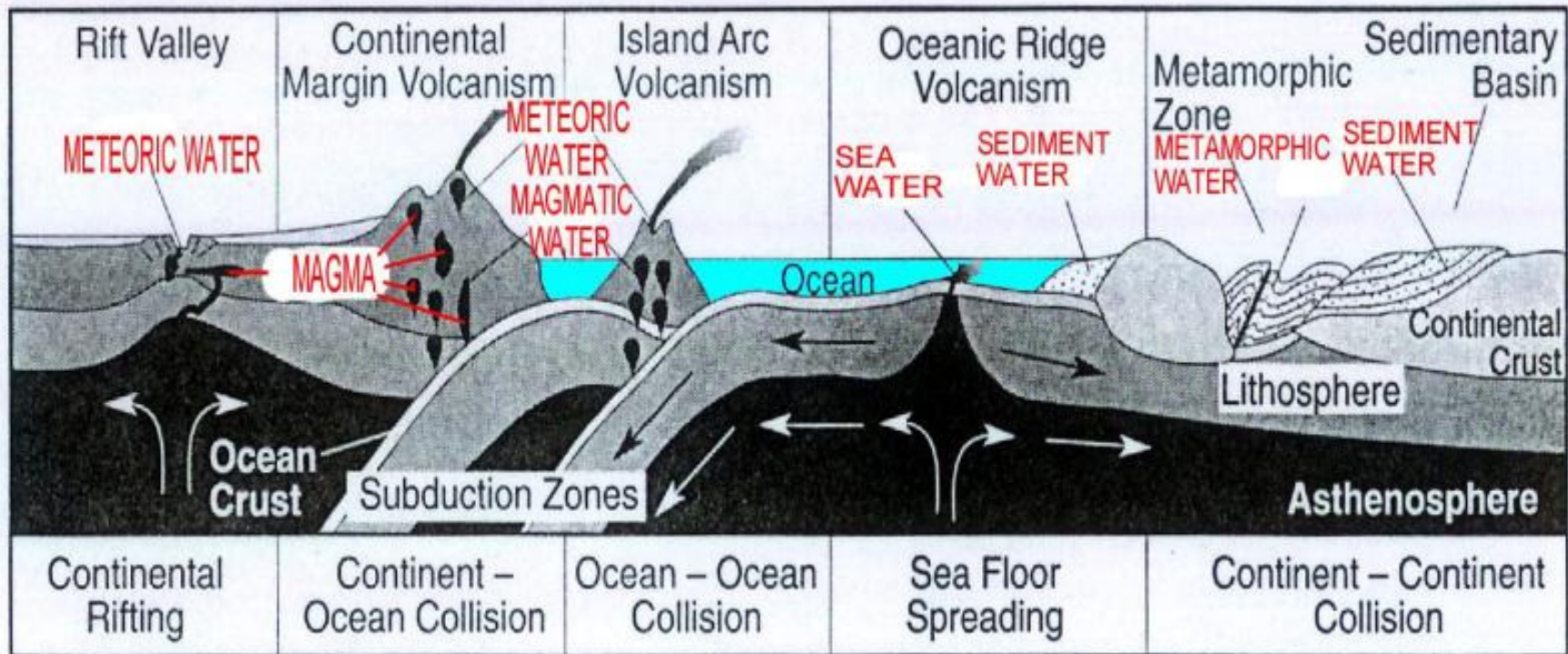


FILICA - Q-Ser-Py



# ¿Dónde realizar prospección/exploración?

Plate Tectonics and Mineral Deposit Environments



Sitios en el ciclo geológico  
donde se forman depósitos minerales

(Modificado de S.E. Kesler)

---

# Tipos de depósitos

---

- Descubrimiento económico: Ingresos  $>$  US\$20 millones y TIR  $>$  10%
- Descubrimiento significativo: Ingresos  $>$  US\$ 500 millones
- Descubrimiento de clase mundial (“World Class”):
  - Capaz de ser operado continuamente y generando retornos consistentemente incluso durante periodos de precios bajos
  - De tamaño suficiente para afectar significativamente las ganancias de una corporación mediana
  - Posicionado en el tercio de menores costos por unidad de metal entre minas similares

---

# Estadísticas

---

- Algunas estadísticas:
  - 1 de cada 1000 depósitos pasa de prospecto a mina en operación
  - 1 de cada 1500 depósitos genera retornos altos
  - 2.3 descubrimientos de clase mundial al año con un costo de US\$ 290 millones por depósito
  - Al menos 50 proyectos mineros se inician cada año con inversiones que van desde los US\$ 2.4 millones hasta US\$ 2800 millones
  - Inversión promedio (1999) era de US\$ 400 millones por proyecto
- Todos los depósitos son anomalías y requieren de un enriquecimiento del elemento de interés en la corteza

---

# Enriquecimiento

---

- Depósitos son anomalías geológicas

| <b>Metal</b> | <b>Abundancia en la corteza (%)</b> | <b>Mínima Ley de Corte (%)</b> | <b>Factor de enriquecimiento</b> |
|--------------|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Mercurio     | 0.0000089                           | 0.2                            | 22500                            |
| Plomo        | 0.0013                              | 4                              | 3100                             |
| Estaño       | 0.00017                             | 0.5                            | 2900                             |
| Tungsteno    | 0.00011                             | 0.2                            | 1800                             |
| Oo           | 0.00000035                          | 0.003                          | 900                              |
| Molibdeno    | 0.00013                             | 0.1                            | 800                              |
| Uranio       | 0.00017                             | 0.1                            | 600                              |
| Cinc         | 0.0094                              | 3                              | 300                              |
| Cobre        | 0.0063                              | 0.3                            | 50                               |
| Níquel       | 0.0089                              | 0.3                            | 35                               |
| Hierro       | 5.8                                 | 30                             | 5                                |
| Aluminio     | 8.3                                 | 30                             | 4                                |

# Etapas

**Prospección:**  
reconocimiento  
/ identificación  
de blancos  
favorables

- Evaluación regional (100000 km<sup>2</sup>)
- Evaluación de depósitos (1000 km<sup>2</sup>)

Afinar la búsqueda a áreas cada vez menores y a menos blancos

**Exploración:**  
evaluación de  
blancos

- Evaluación regional (100 km<sup>2</sup>)
- Evaluación de depósitos (1 – 10 km<sup>2</sup>)

Aumentar la probabilidad de que las áreas seleccionadas tengan depósitos minerales

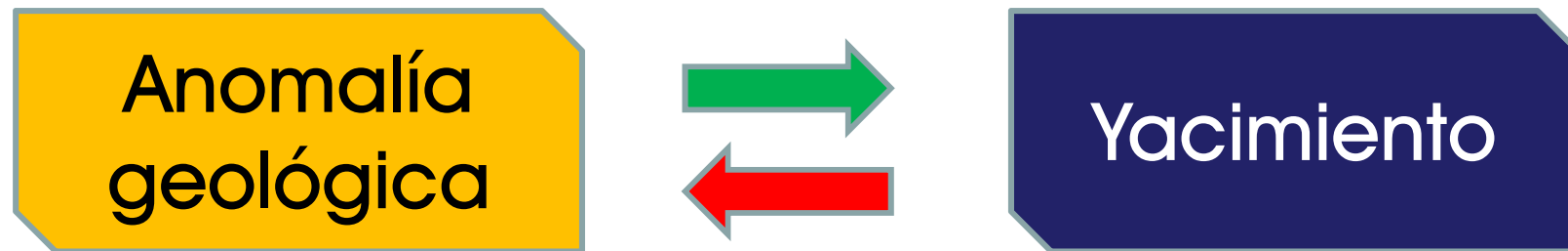
Reducir el riesgo

---

# Objetivo

---

- Descubrir el máximo número de depósitos con potencial económico (mínimo costo)
- Búsqueda de una anomalía



- Búsqueda por área / por commodity

---

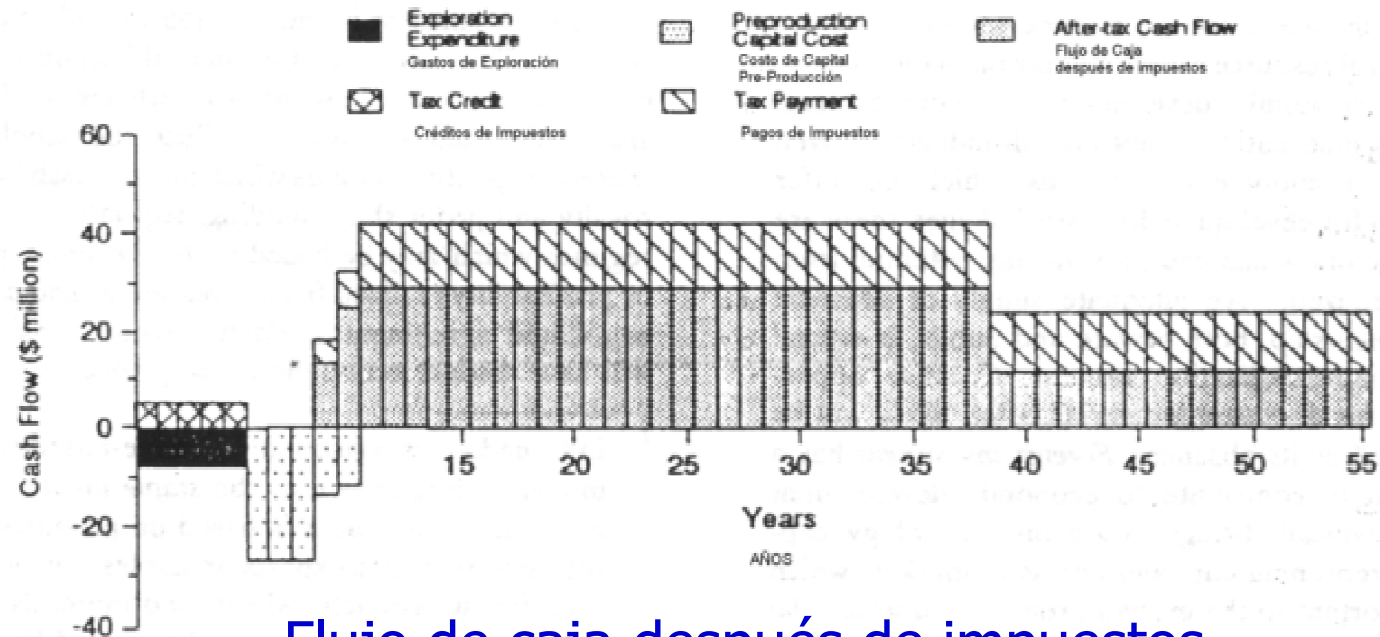
# Generalidades

---

- Blancos
  - Potencial de mineral
  - Aspectos políticos
    - Tributación
    - Regulaciones ambientales
    - Pueblos aborígenes
    - Áreas protegidas
    - Infraestructura
    - Situación laboral







---

# Pasos

---

- Técnicas de búsqueda directa → afloramientos
  - Examen físico
  - Estudio geológico
  - Mapeos geológicos
  - Muestreo
  
- Métodos indirectos → depósitos cubiertos
  - Geofísica
  - Geoquímica
  - Geobotánica

---

# Pasos

---

1. Buscar reportes geológicos y otra literatura técnica
2. Estudiar mapas geológicos y de superficie disponibles
3. Estudiar fotos aéreas y satelitales disponibles
4. Preparar mapas geológicos a partir de la información disponible y nueva información aérea
5. Realizar estudios geofísicos aéreos del área en estudio
6. Establecer una base de operaciones en terreno, llevar un control del mapeo y organizar los equipos de trabajo en terreno
7. Conducir levantamientos de terreno preliminares geológicos, geofísicos y/o geoquímicos
8. Consolidar y analizar la información colectada

---

# Métodos de prospección y exploración

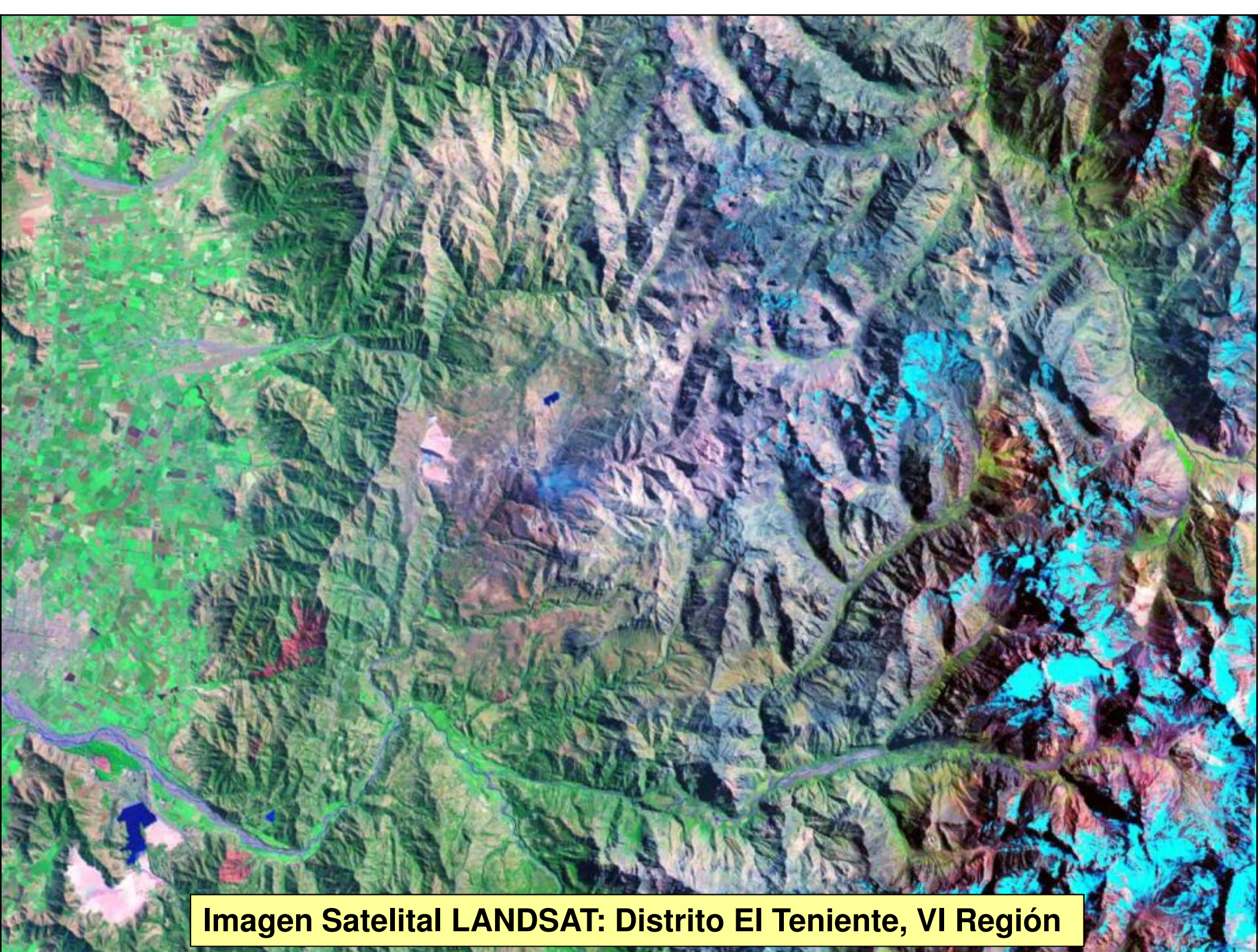
---

## Geológicos

- Recopilación de información
- Estudio fotogeológico
- Examen aéreo
- Examen de afloramientos
- Mapeo e investigaciones geológicas
- Mapeo de sondajes

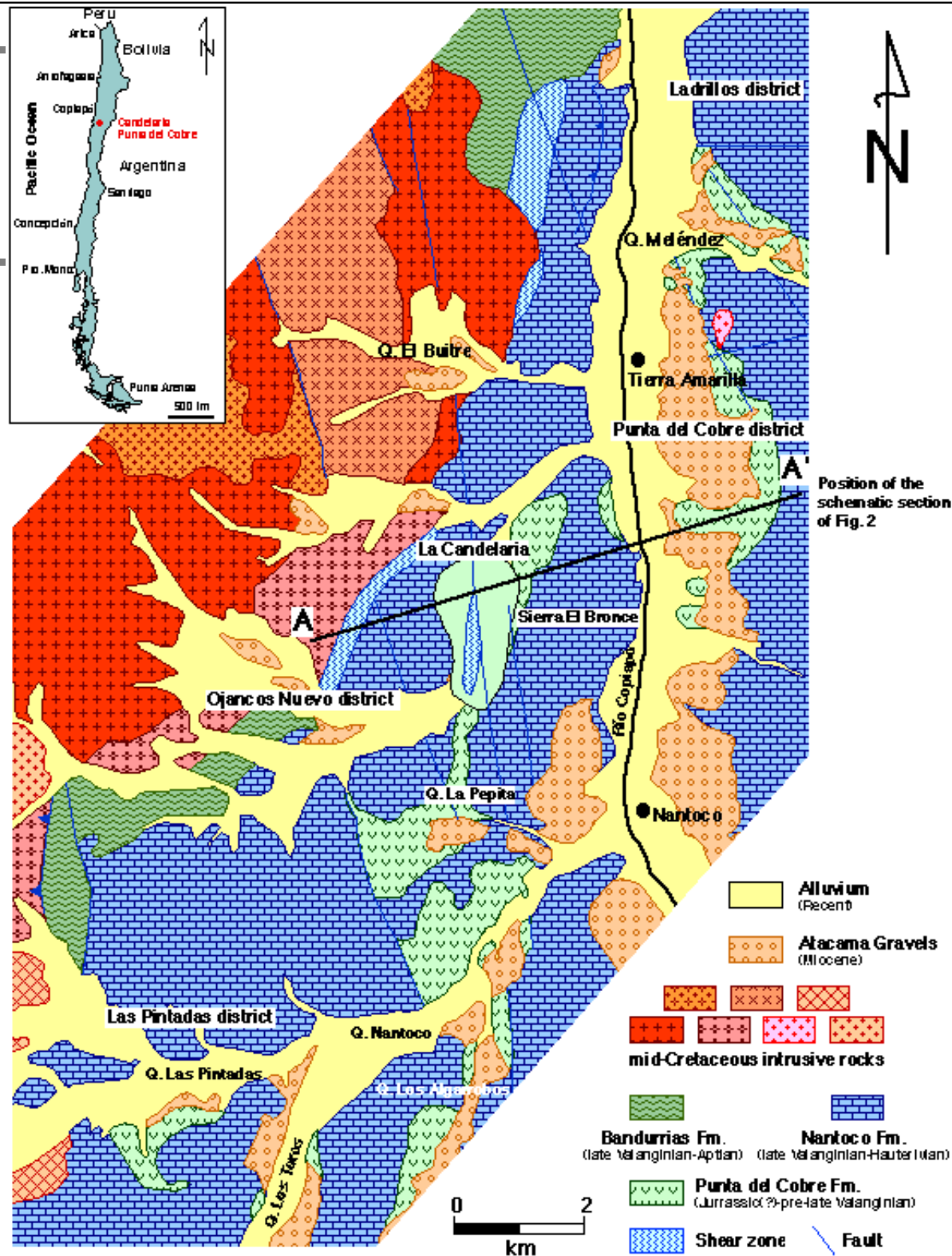
## Geoquímica

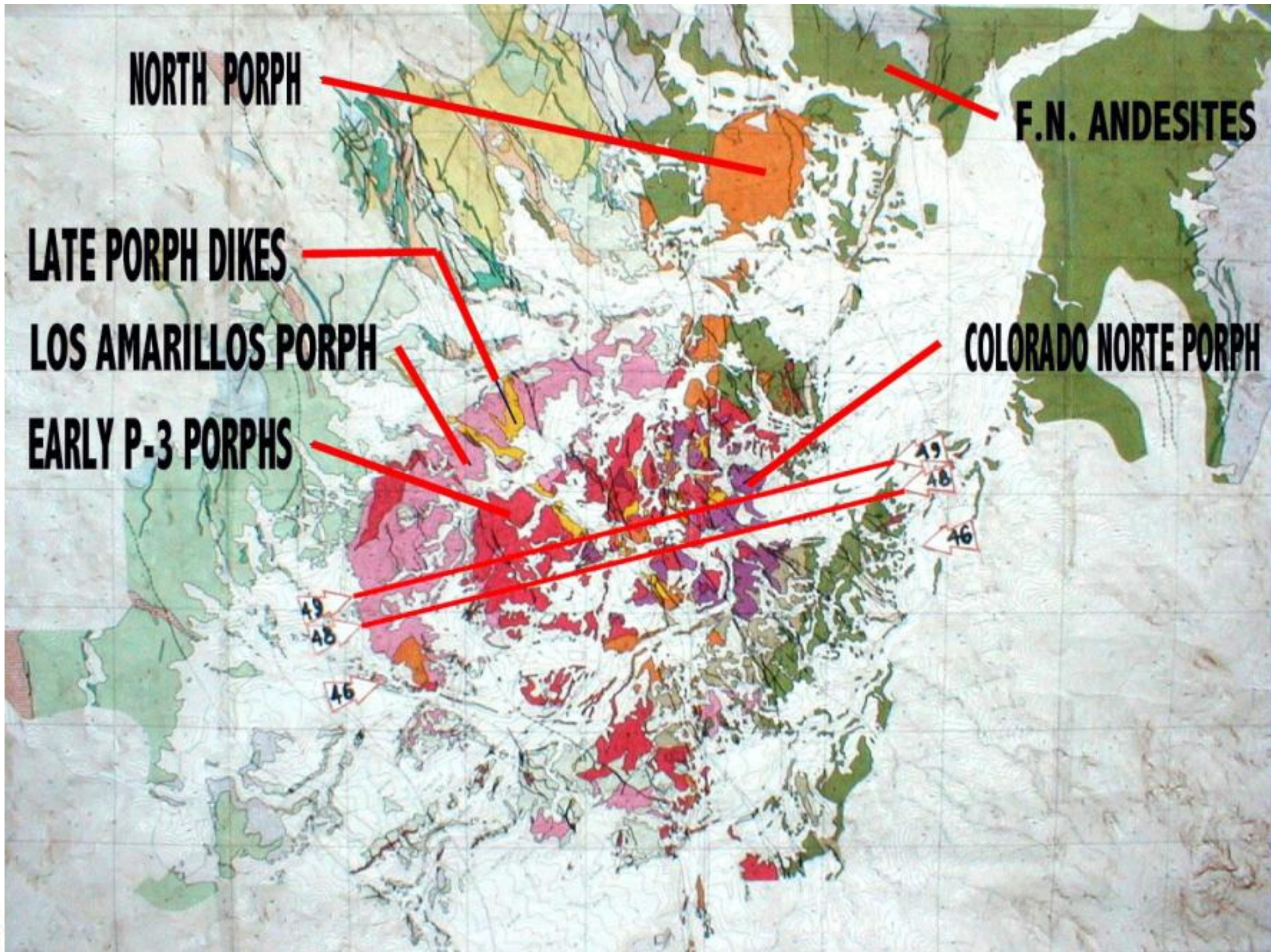
- Muestreo de sedimentos de flujo
- Muestreo de agua
- Muestreo de roca
- Ensayos



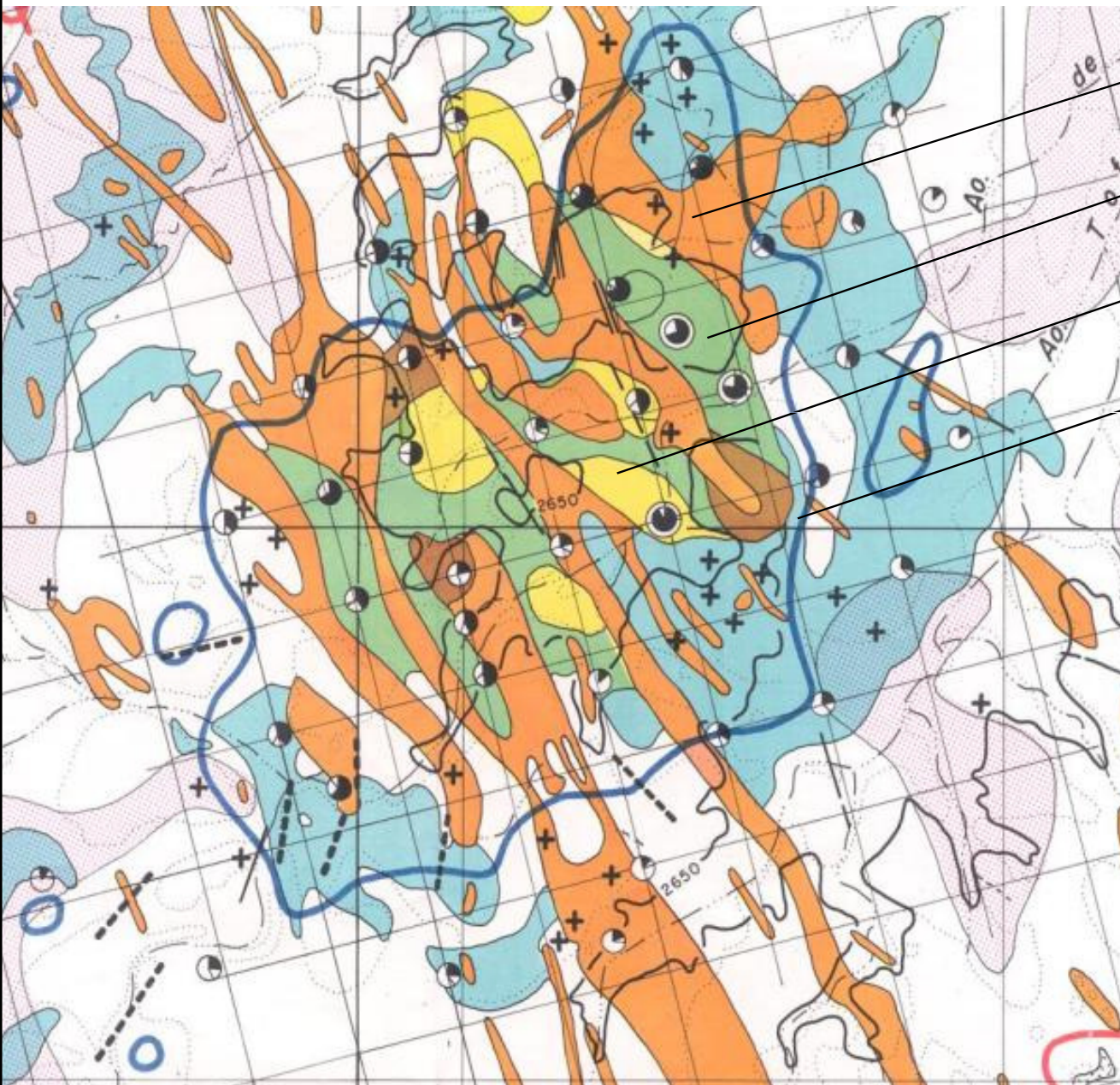
**Imagen Satelital LANDSAT: Distrito El Teniente, VI Región**

# Geología





# Mapeo geológico



DACITE

SILICIFIED DACITE

INTENSE SILICA

OUTER EDGE,  
POTASSIC ZONE



---

# BAJO DE LA ALUMBRERA PLANO DE LEYES DE SUBSUPERFICIE

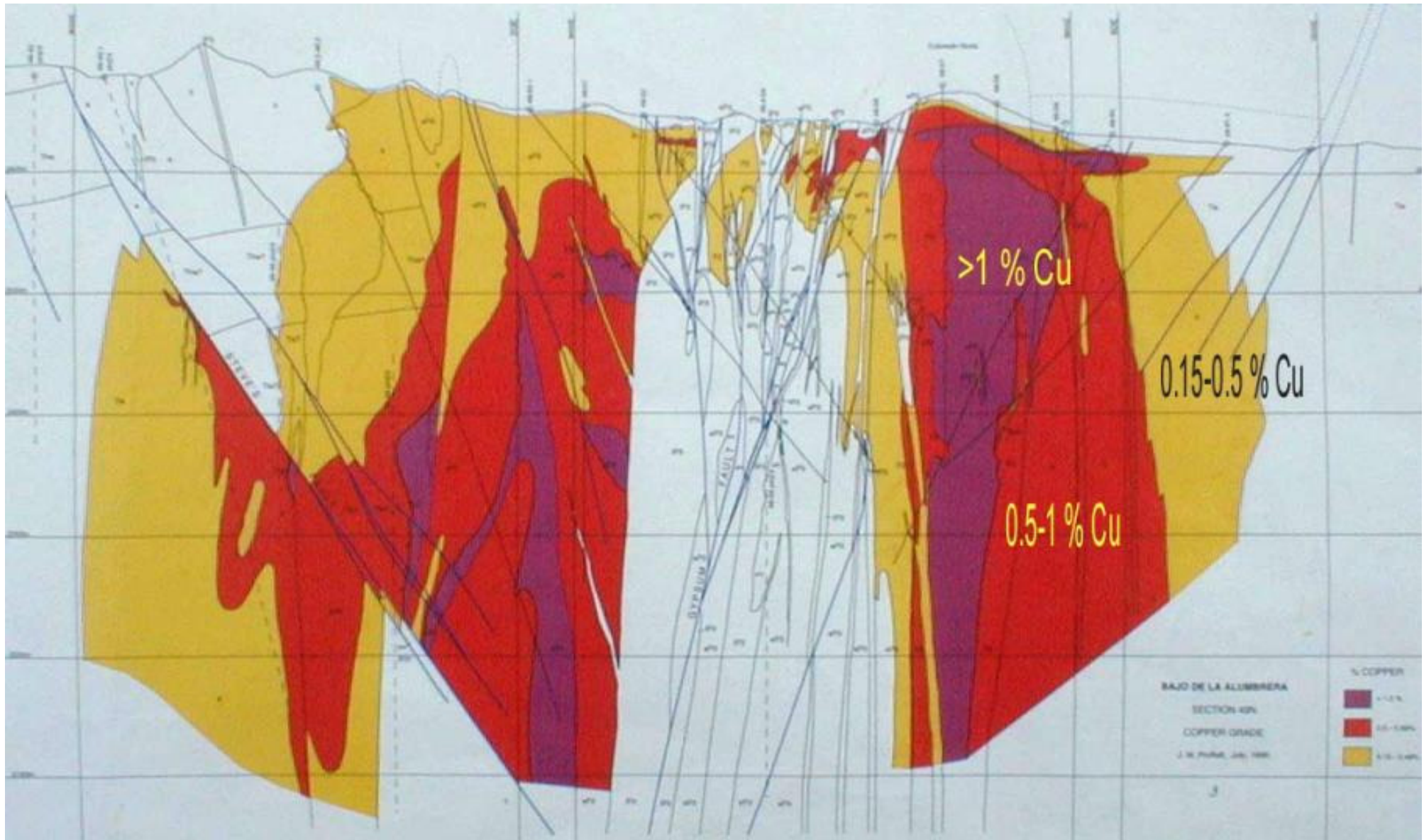
---



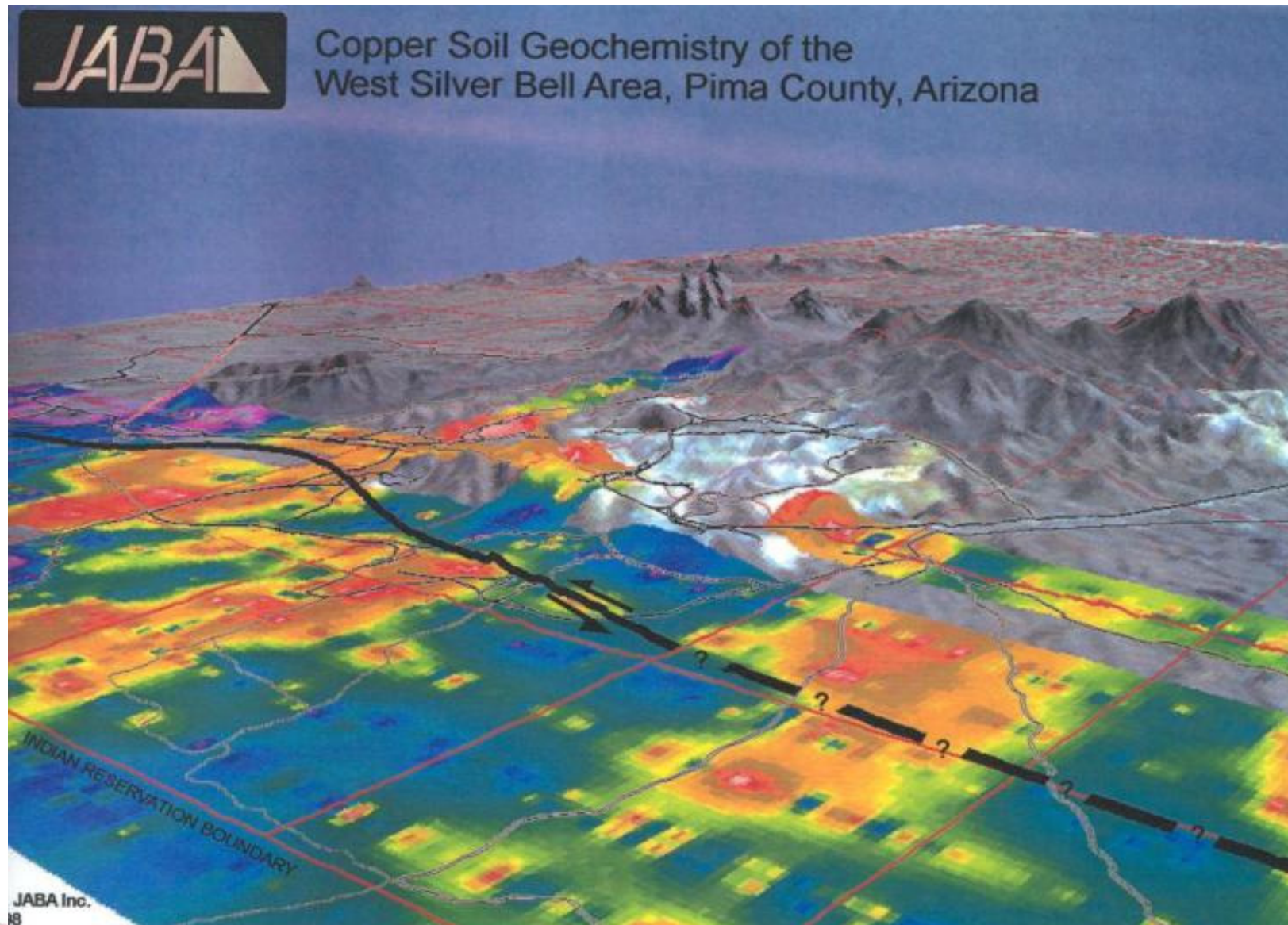
>1 % COBRE

0.5-1 % COBRE

0.15-0.5 % COBRE



# Distribución geoquímica de Cu: geoquímica de exploración



---

# Métodos de prospección y exploración

---

## Geofísica (aérea)

- Levantamientos aeromagnéticos
- Levantamientos electromagnéticos
- Levantamientos radiométricos
- Levantamientos de percepción remota

## Geofísica (terrestre)

- Gravedad
- Magnetismo
- Radiometría
- Sísmica
- Resistividad
- Potencial
- Polarización inducida

---

# Geofísica

---

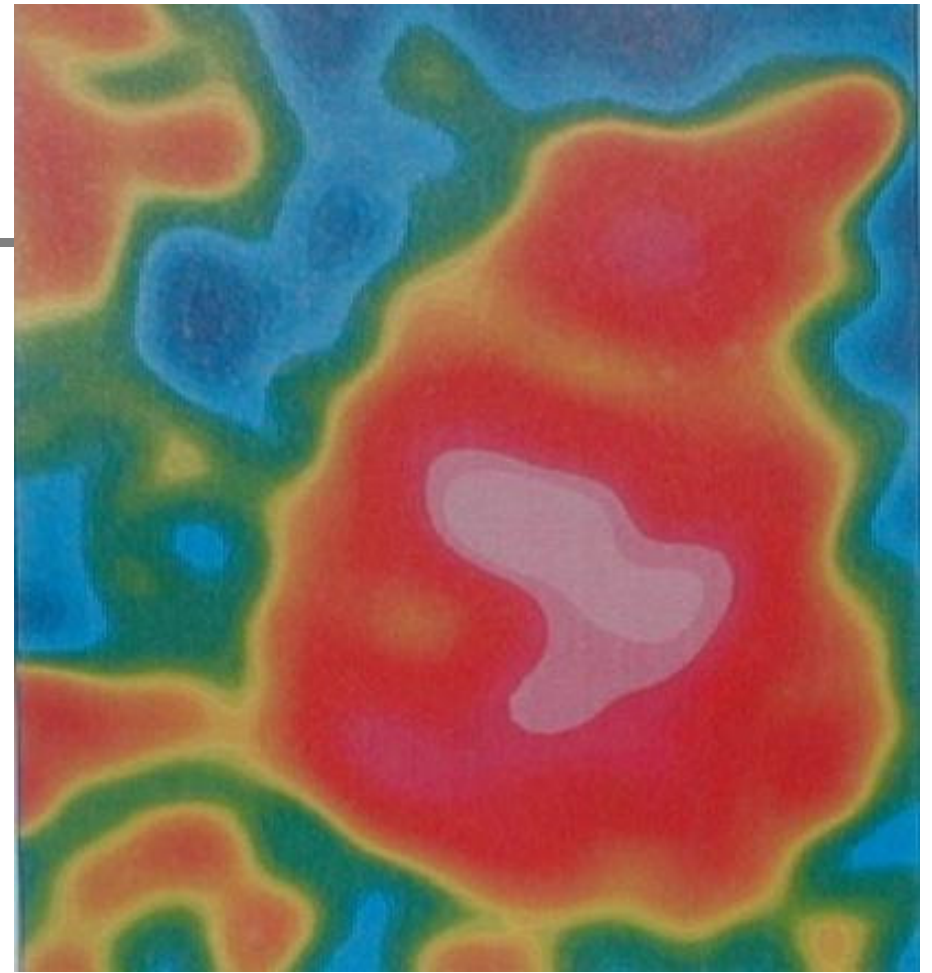
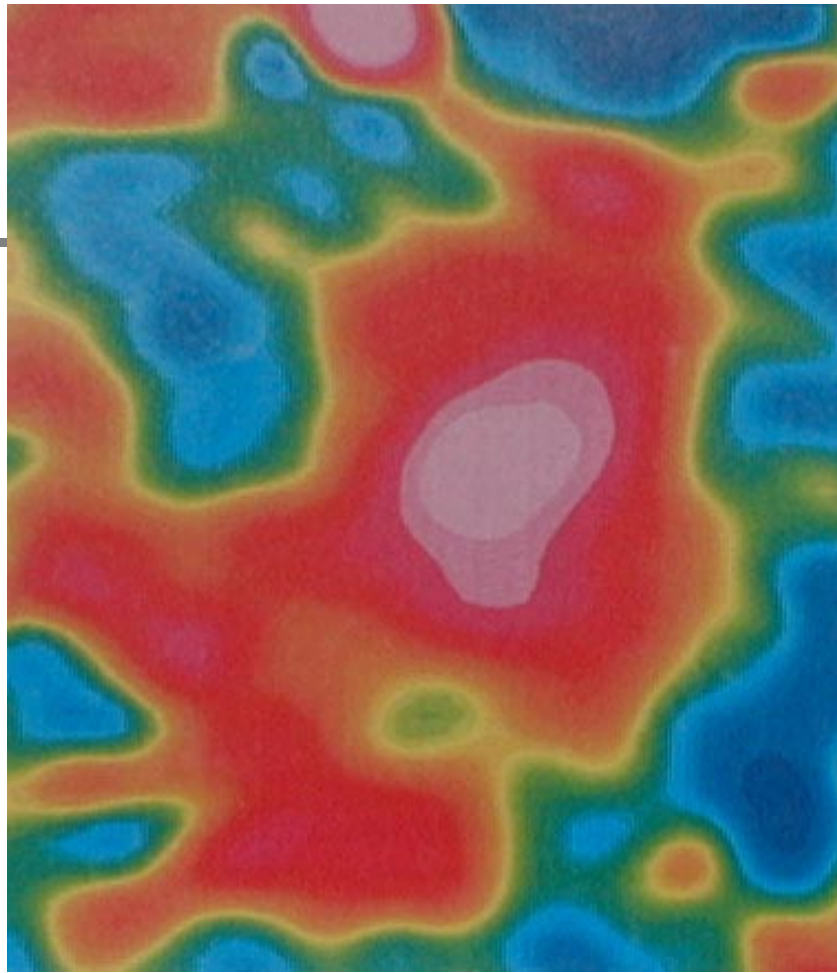
- Geofísica: mide y permite interpretar las propiedades físicas de la tierra (y otros cuerpos).
- Se puede aplicar:
  - En superficie
  - A través de pozos perforados
  - Desde el aire
  - Mediante instrumentación satelital
- Se basa en encontrar un contraste entre el fondo y la mineralización
- El método geofísico utilizado dependerá del contraste que se busque
- Tipos:
  - Eléctrica
  - Electromagnética
  - Magnética
  - Gravimétrica
  - Radiométrica
  - Sísmica
  - Térmica



# EXPLORACIÓN MINERA

Antes de las actividades de terreno...

VUELOS AEROMAGNÉTICOS  
HIPERESPECTRALES, TEM, ETC.



AEROMAGNETISMO – ANOMALÍA GEOFÍSICA - CONDUCTIVIDAD

---

# Métodos de prospección y exploración

---

## Muestreo

- Canales, zanjas
- Perforación rotatoria
- Perforación con recuperación de testigo
- Levantamiento de galería o pique de exploración



---

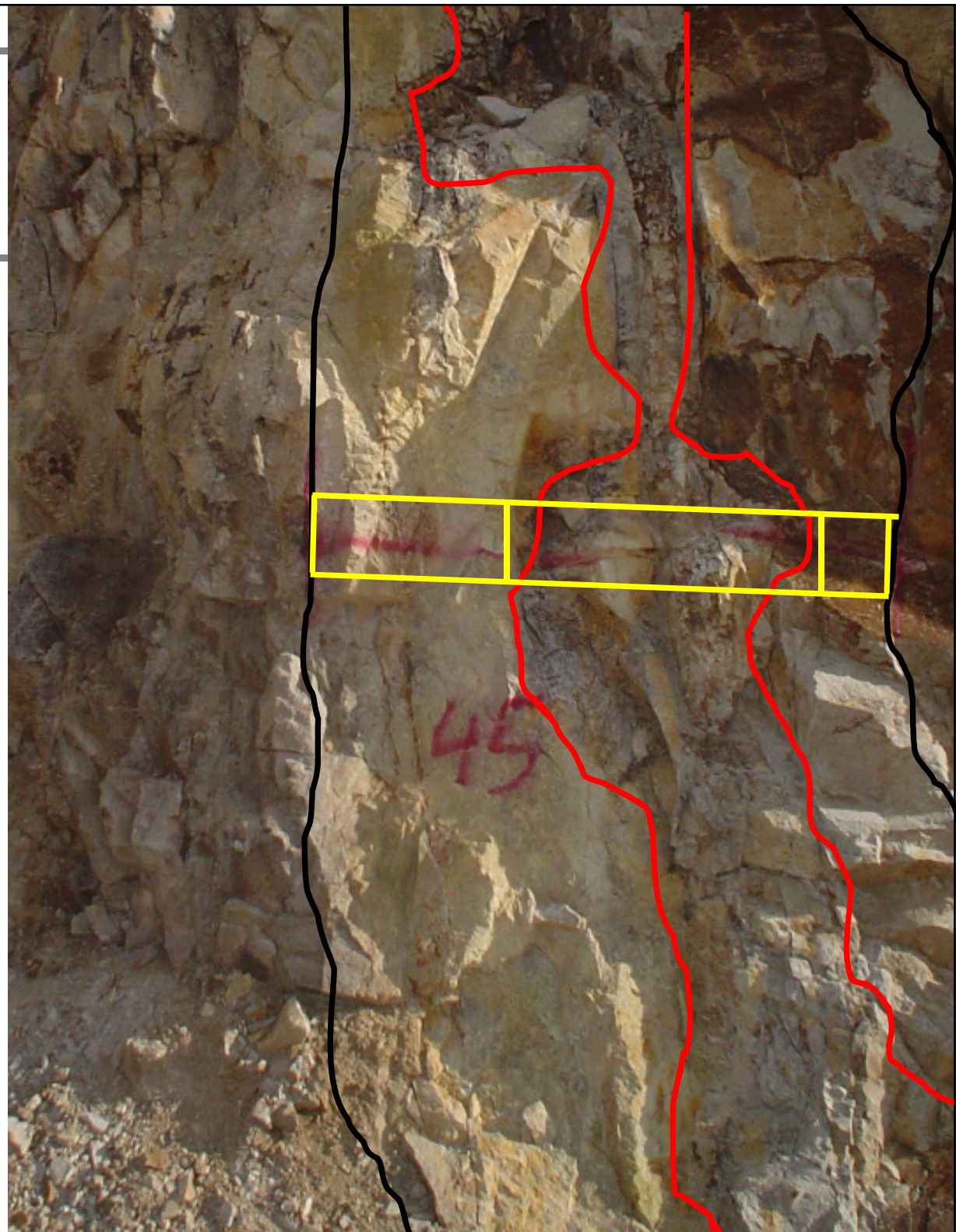
# Muestras Dirigidas de Afloramientos

---



# Muestreos Dirigidos de Afloramientos

- Muestra perpendicular a estructura (potencia completa).
- Se muestrea más allá de la veta para asegurarse de que se muestreó el contenido total.
- Acumulación (ley x potencia) permanece constante.



---

# Muestreo de canales

---



---

# Muestreo de canales

---



---

# Muestreo de canales

---



---

# Muestreo de caminos y trincheras

---

- Muestreo de exploración en trincheras / caminos hechas con bulldozer



---

# Muestreo de caminos y trincheras

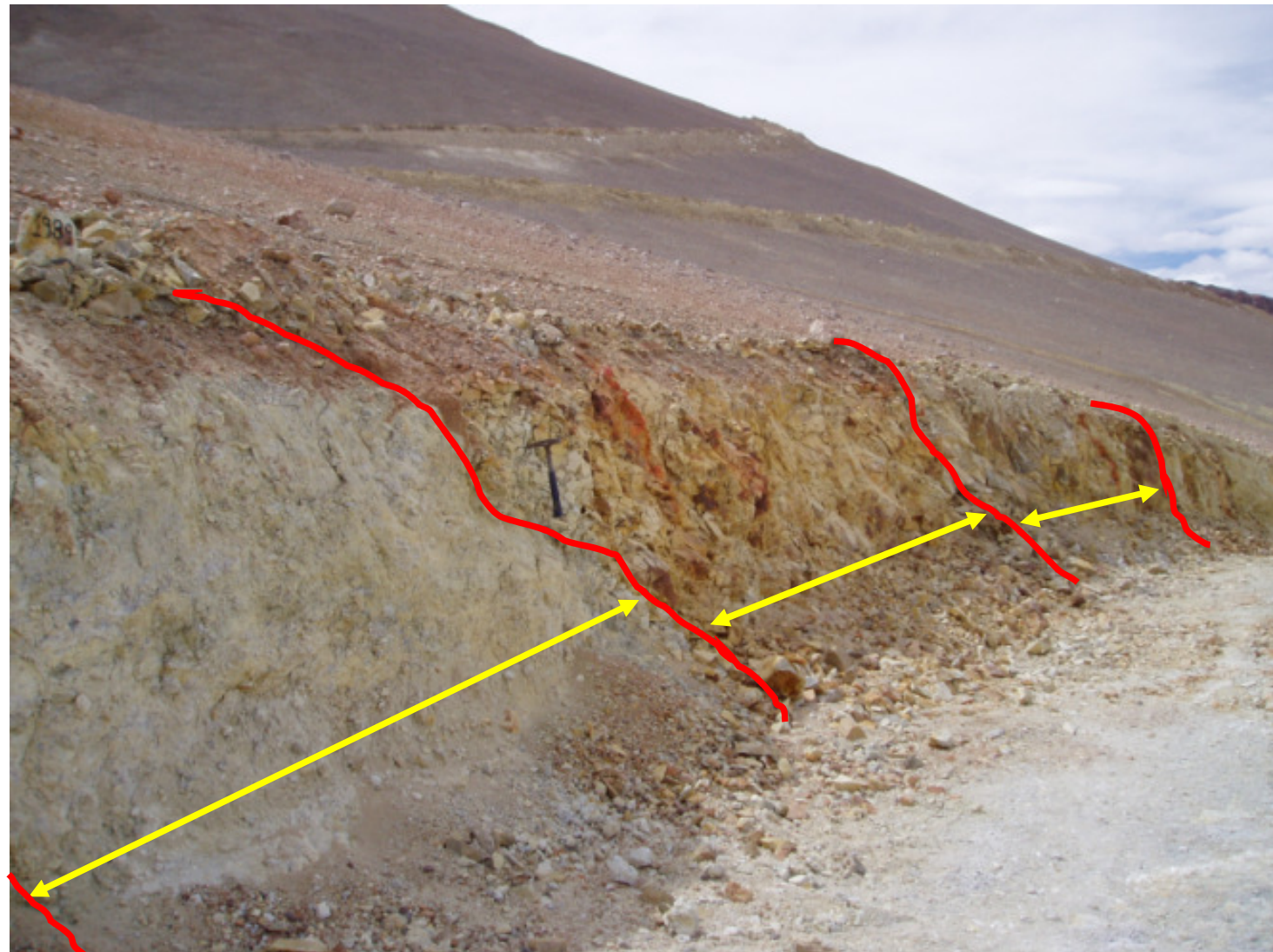
---

- Muestreo según cambio de alteración



# Muestreo de caminos y trincheras

- Muestreo según cambio de alteración
- Largo de muestras entre 5 y 10 m.
- Peso de muestras ~ 5kg.





---

# Muestreo de caminos y trincheras

---

- Trincheras cortan estructuras perpendicularmente



# Muestreo de exploración (DDH)

- Laterita de Níquel en Brasil
- Buena recuperación en terreno arcilloso



# Muestreo de exploración (DDH) – testigos



# Muestreo de exploración (DDH)

- Perforadora de Diamantina (DDH) con recuperación de testigo
- Dirigido a cortar estructuras (sondajes inclinados en estructuras verticales)
- Rendimiento:  
~ 40 - 80 m/día



# Muestreo de exploración (DDH)

- Recuperación de testigo
- Facilita interpretación geológica
- Más caro ~ US\$150 / m
- Poca recuperación cerca del collar en terreno fracturado



---

# Muestreo de exploración (AR)

---

- Sonda de “aire reverso”
- Muestra de mayor peso (30-40 kg/m)
- Mayor riesgo de contaminación y pérdidas



---

# Muestreo de exploración (AR)

---

- Recuperación de detritos
- Más barato ~ US\$50 / m
- Usados en in-fill
- Rendimiento: ~ 50 – 150 m/día



---

# Aspectos de la geología

---



---

# Relevancia

---

- La comprensión de los procesos que forman yacimientos es fundamental en la exploración
- Se clasifican los yacimientos en función del ambiente de formación y sus características:
  - Pórfidos (ver láminas siguientes a modo de ejemplo)
  - Skarns
  - Epitermales
  - Carlin
  - Estrato Ligados de Cu
  - Óxidos de Fe-Cu-Au
  - Sulfuros Masivos Volcanogénicos (VMS)
  - Tipo Mississippi Valley (MVT)
  - Metales Base en Rocas Sedimentarias
  - Supérgenos y exóticos
  - Sedimentarios

---

# Clasificación

---

- Genéticamente:
  - Primarios: Formados directamente desde magmas
  - Secundarios: alterados a través de meteorización química o mecánica
  - Metamórficos: formados a partir de otras rocas y minerales al someterse a altas temperaturas y presiones
- Relación con roca de caja:
  - Mineralización epigenética: La que ha sido introducida con posterioridad a la formación de su roca de caja o roca huésped. Ej. una veta.
  - Mineralización singenética: La que se forma o deposita simultáneamente con sus rocas huéspedes. Ej. depósitos de placeres, cuerpos de sulfuros masivos de origen exhalativo, calizas, etc.

---

# Pórfidos

---

- Los depósitos del tipo **pórfido cuprífero** comprenden yacimientos de gran volumen de mineralización primaria de sulfuros de cobre-hierro y hierro, en general hospedados y directamente asociados a cuerpos intrusivos porfíricos, pero en ningún caso estrictamente restringidos a roca intrusiva.
- Depósitos Epigenéticos: mineralización de sulfuros hipógenos (primarios) introducidos en las rocas.
- Estos yacimientos están asociados a arcos magmáticos de márgenes continentales y a magmatismo calcoalcalino de composición intermedia.
- La roca huésped es típicamente granodiorita, cuarzo-monzonita y pórfido andesítico, asociado a sistemas intrusivos multifaséticos y comunmente relacionado con etapas tardías de la evolución magmática.

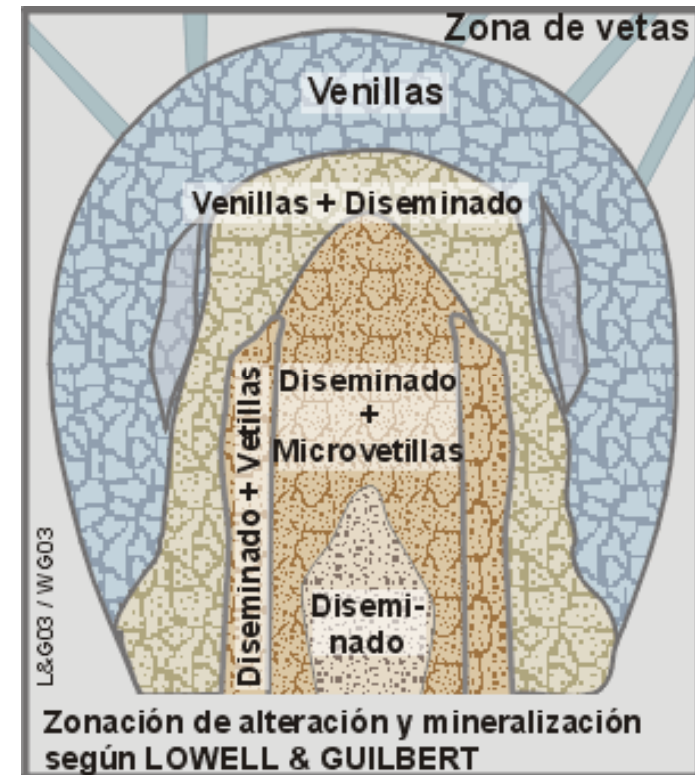
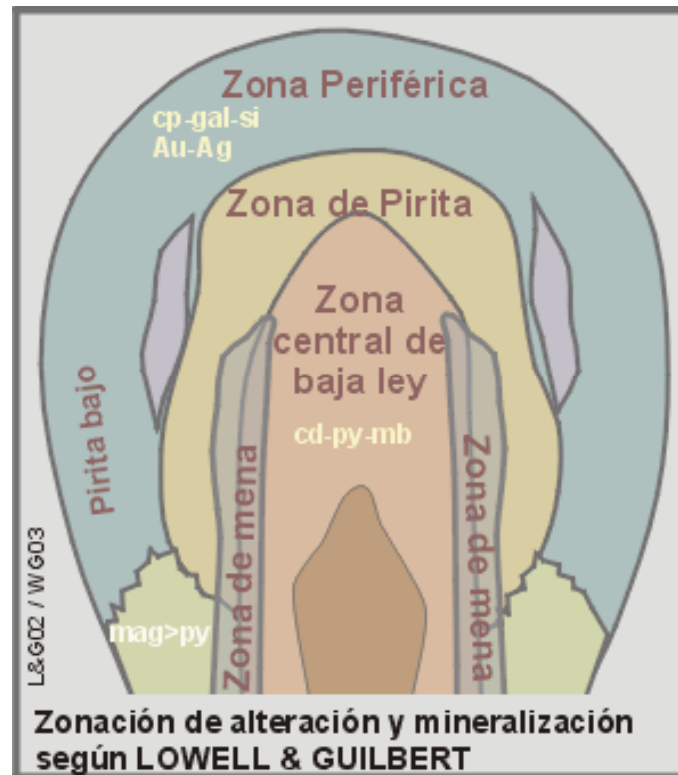
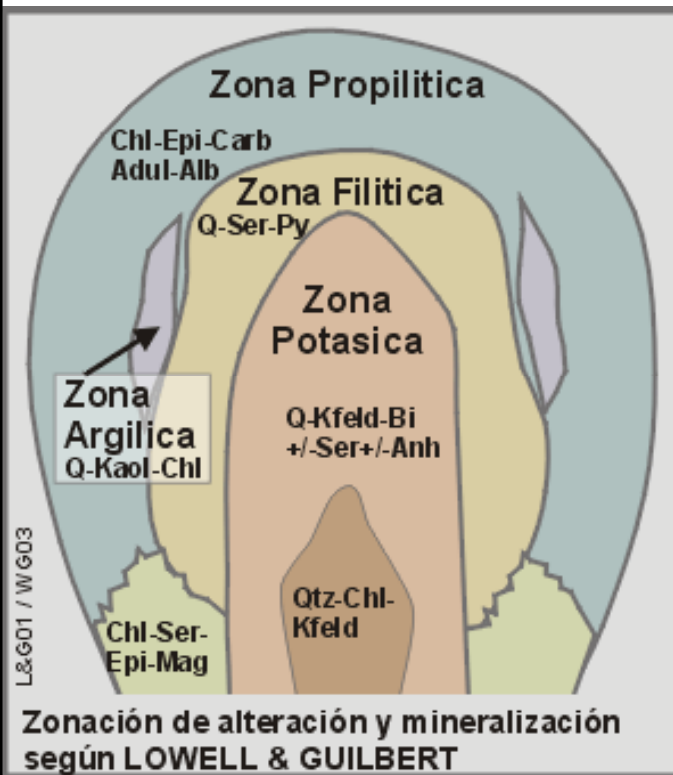
---

# Pórfidos

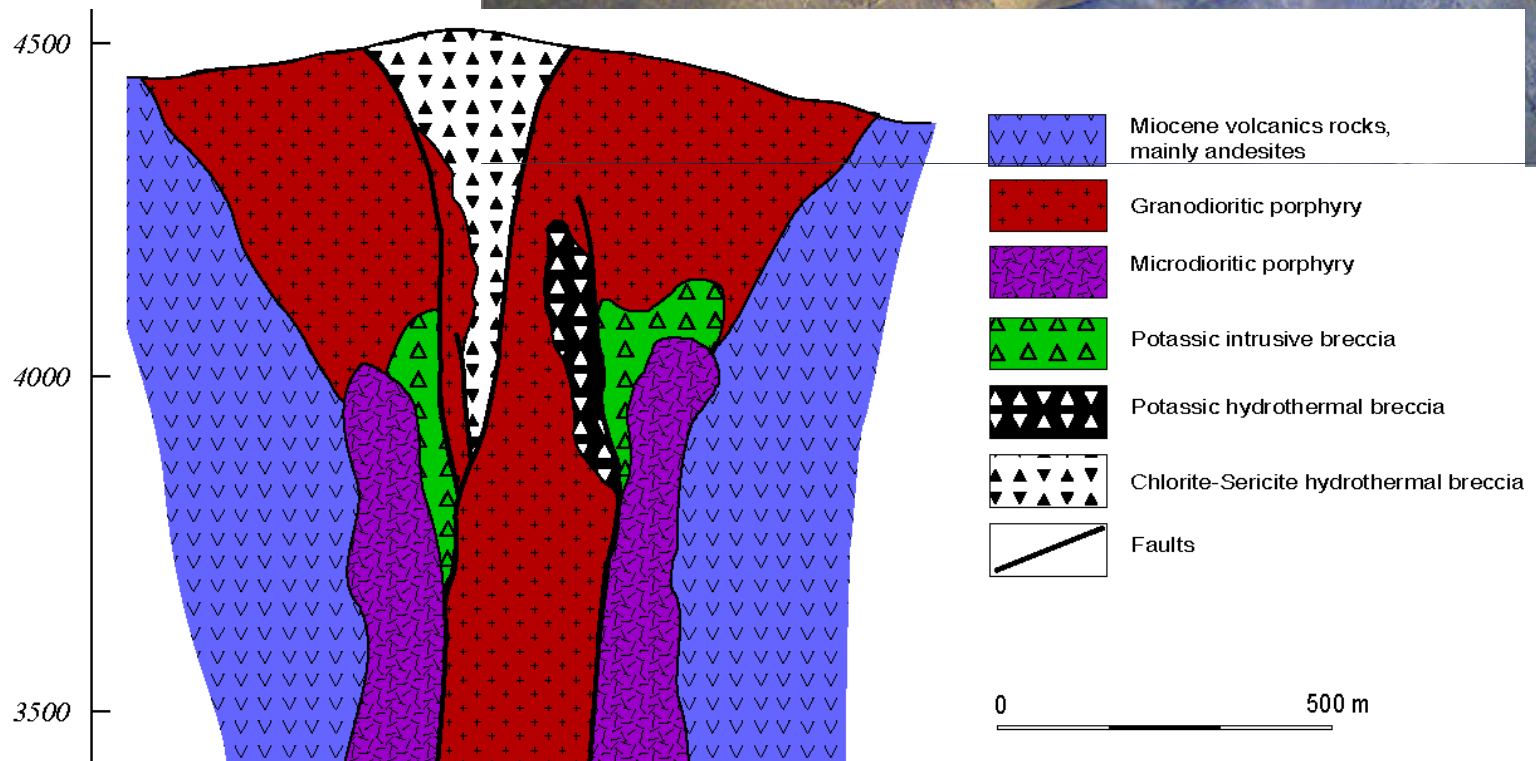
---

- Alteración hidrotermal penetrativa asociada: aproximadamente centri-simétrica (concéntrica) dentro y alrededor del complejo intrusivo.
- La mineralización ocurre en forma diseminada, en vetillas y enjambres de vetillas (stockwork), en columnas de brecha: sulfuros primarios de cobre y molibdeno dentro de los halos de alteración hidrotermal; en el intrusivo y/o rocas encajadoras.
- Amplios sistemas de fracturas que tienden a estar centrados en la porción apical de uno o más cuerpos intrusivos y sus rocas de caja adyacentes.
- Los cuerpos de pórfido cuprífero tienden a ser grandes (cientos a miles de metros de diámetro), de forma concéntrica a elongada, con contornos regulares a irregulares en planta.
- En secciones verticales estos yacimientos tienen forma tubular o de embudo (muela), con ejes casi verticales.
- Normalmente se observa mayor diseminación horizontal que vertical, hasta 6 Km<sup>2</sup>.

# Modelo de alteración y mineralización de Lowell y Gilbert, 1970



# Pórfido Cu-Au Cerro Casale



*Geologic cross section of the Cerro Casale porphyry gold deposit.*

Gaby: Mineralización Oxidada





Gaby: Afloramiento de descubrimiento  
(Lagarto)





Chuquicamata: Vista general del rajo

# Chuquicamata: Falla Oeste

