

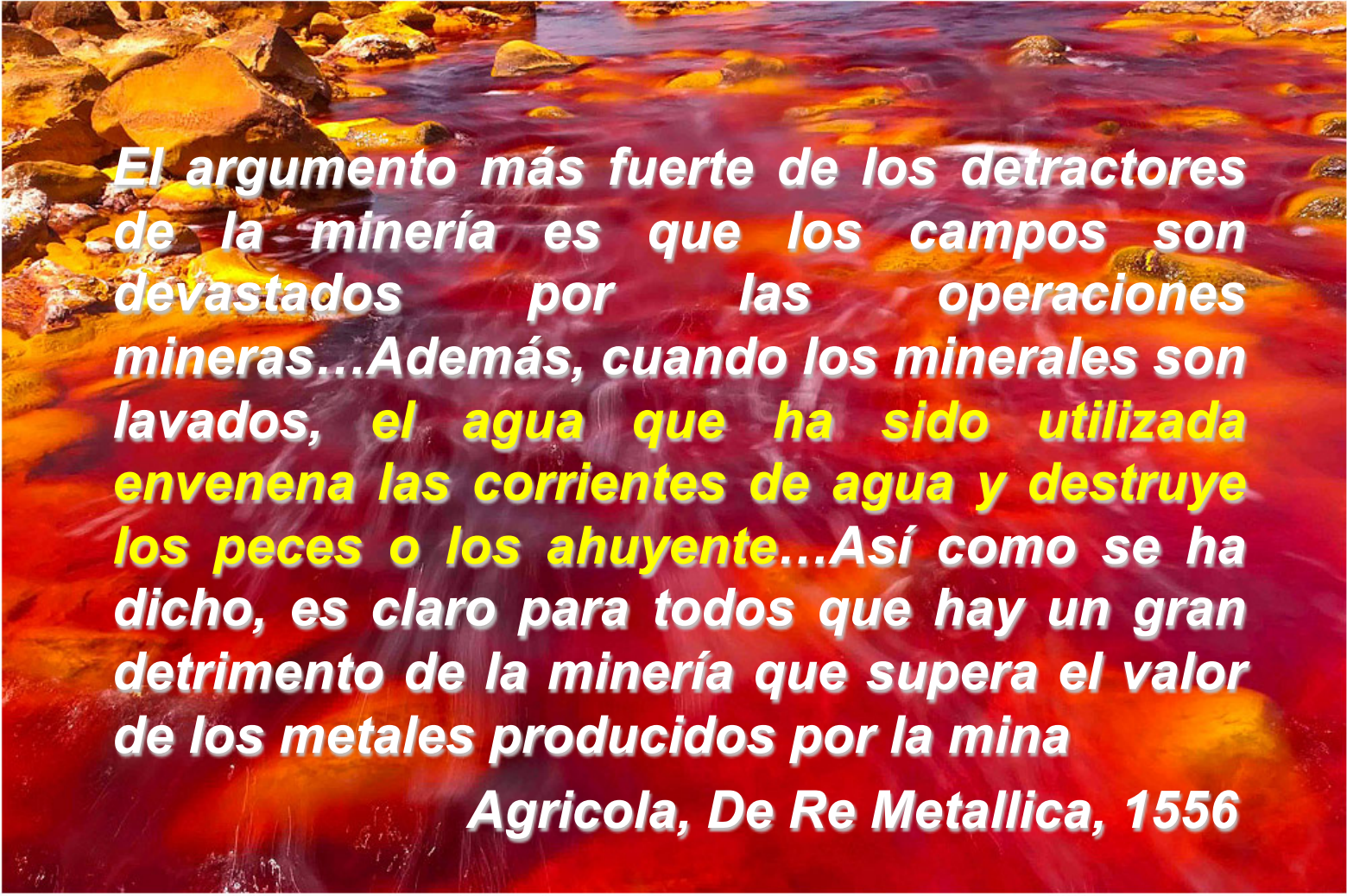


# Drenaje Ácido de Minas (AMD)

**Hidrogeología Aplicada a la Minería y Medio Ambiente**

**Módulo 7: Contaminación de Recursos Hídricos**

**Dr. Manuel A. Caraballo**



*El argumento más fuerte de los detractores de la minería es que los campos son devastados por las operaciones mineras...Además, cuando los minerales son lavados, el agua que ha sido utilizada envenena las corrientes de agua y destruye los peces o los ahuyente...Así como se ha dicho, es claro para todos que hay un gran detrimento de la minería que supera el valor de los metales producidos por la mina*

*Agricola, De Re Metallica, 1556*

JULIO SEGURA  
PHOTOGRAPHY



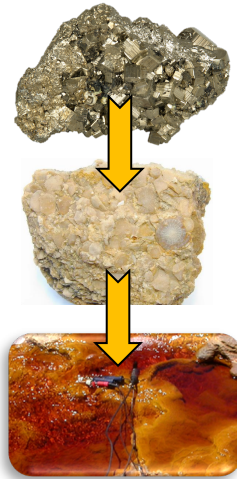
# DRENAJE ÁCIDO DE MINA (AMD)



➤ El drenaje ácido de mina se genera a partir de la **disolución oxidativa** de **sulfuros**, principalmente pirita.

➤ Esta problemática ambiental muestra una amplísima incidencia en todo el mundo con **más de 21500 km de ríos afectados** teniendo tan sólo en cuenta **USA, UK y España**.

➤ Estas aguas muestran una hidroquímica peculiar caracterizada por una **elevada concentración** de **metales y sulfato** disuelto así como una **elevada acidez y bajo pH**.

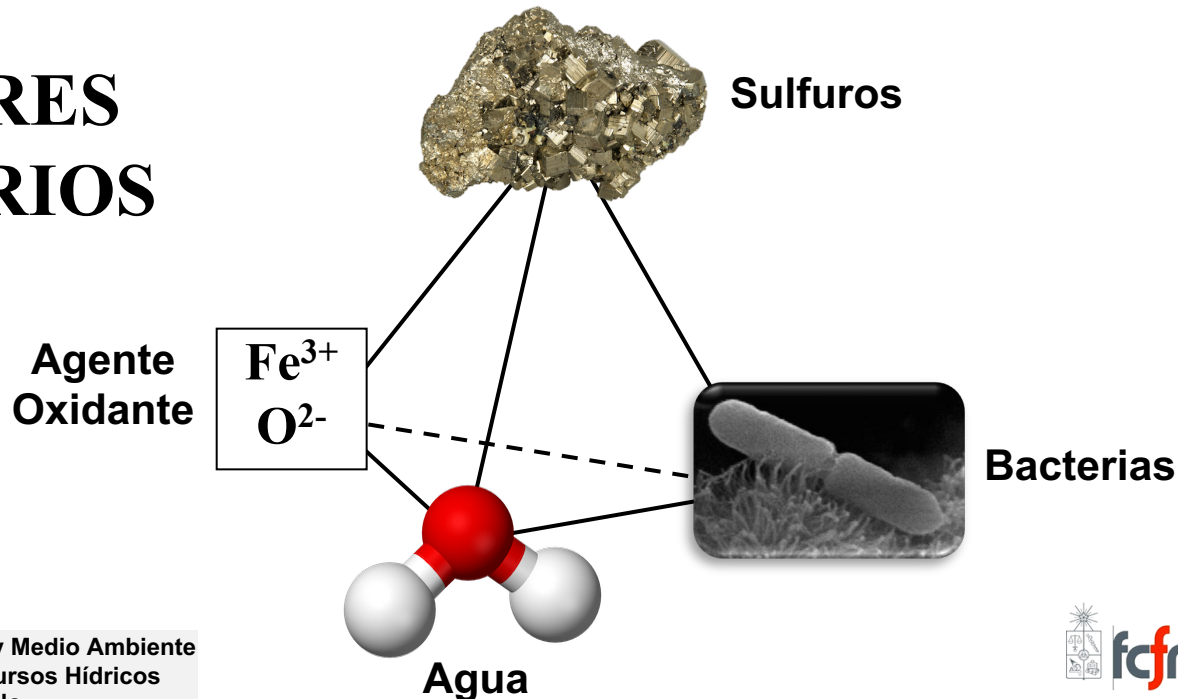


Determinan la cantidad de ácido que se puede generar en un ambiente determinado

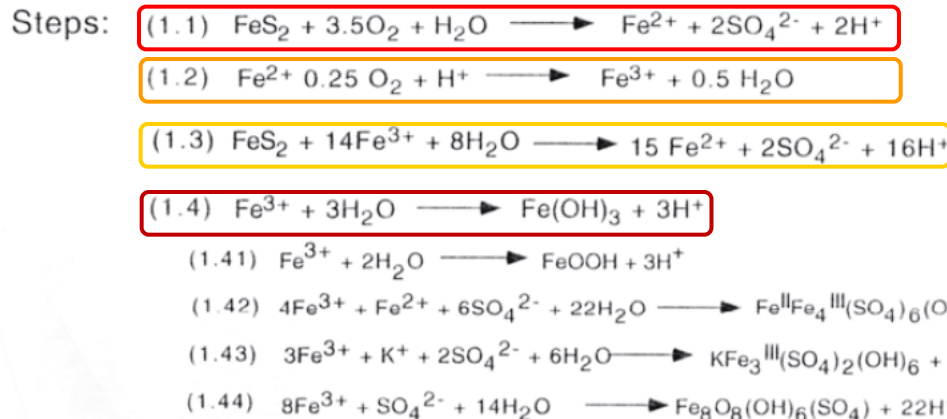
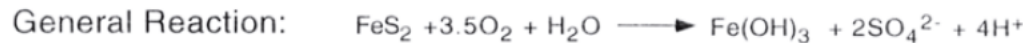
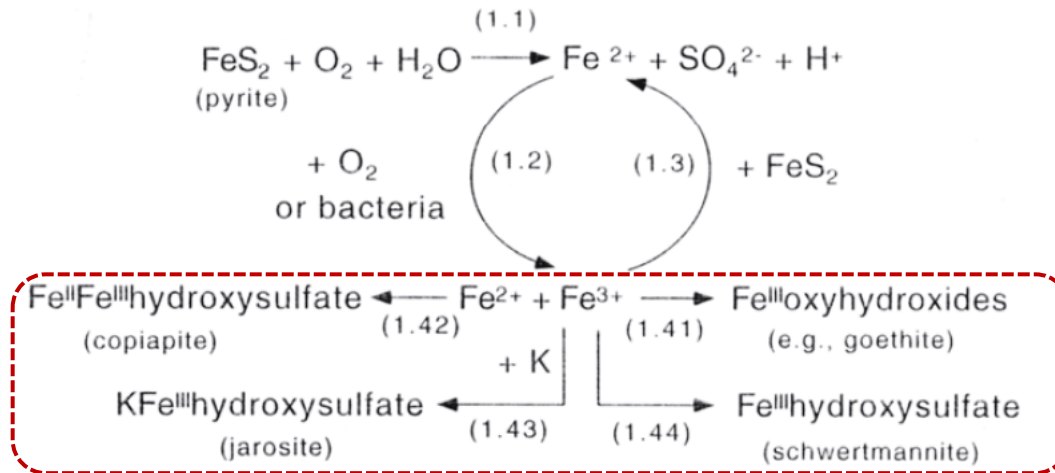
Determinan la cantidad de ácido que puede ser neutralizada naturalmente en un ambiente determinado

Determinan la velocidad con la cual se pueden producir la generación y el transporte de las soluciones ácidas

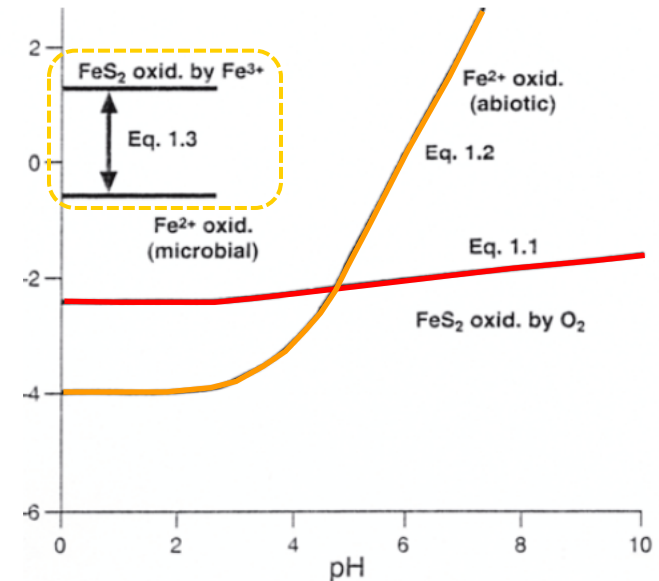
## FACTORES PRIMARIOS





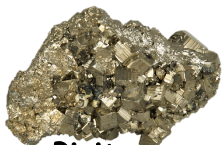


**Figure 3.** Schematic diagram showing the “steps” in pyrite oxidation and possible secondary Fe minerals that may form as weathering products (modified from Rose and Cravotta 1998).

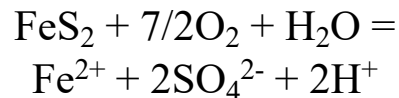


**Figure 4.** Comparison of rate constants for pyrite oxidation by O<sub>2</sub> (Eqn. 1.1 in Fig. 3) and Fe<sup>3+</sup> (Eqn. 1.3 in Fig. 3) and the abiotic (Eqn. 1.2 in Fig. 3) and biotic oxidation of Fe<sup>2+</sup> (modified from Nordstrom 1982a).

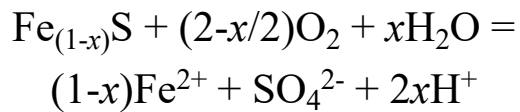
## OXIDACIÓN DE SULFUROS



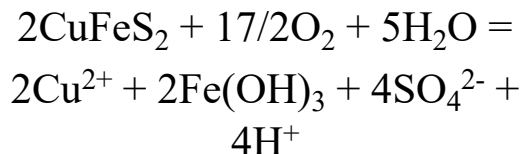
Pirita



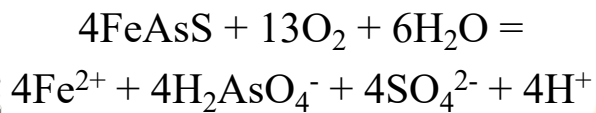
Pirrotina



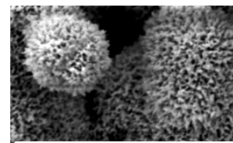
Calcopirita



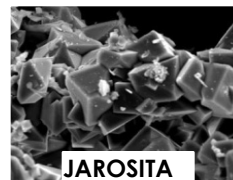
Arsenopirita



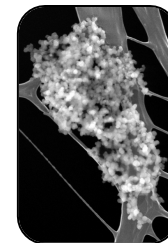
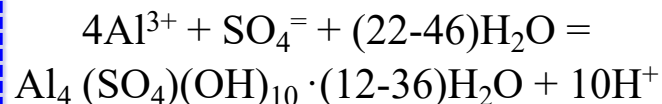
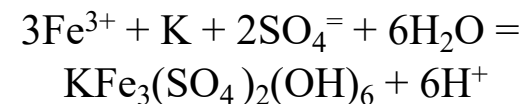
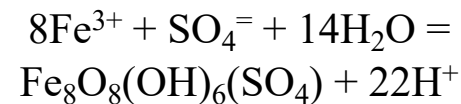
## HIDRÓLISIS



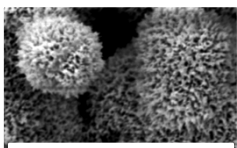
SCHWERTMANINITA



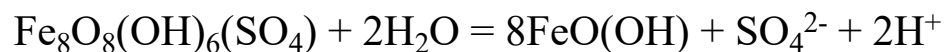
JAROSITA



## TRANSFORMACIÓN MINERAL

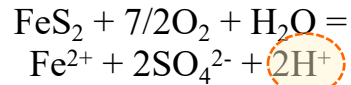


SCHWERTMANINITA

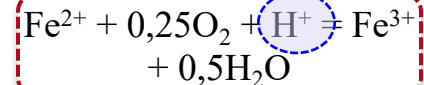


GOETHITA

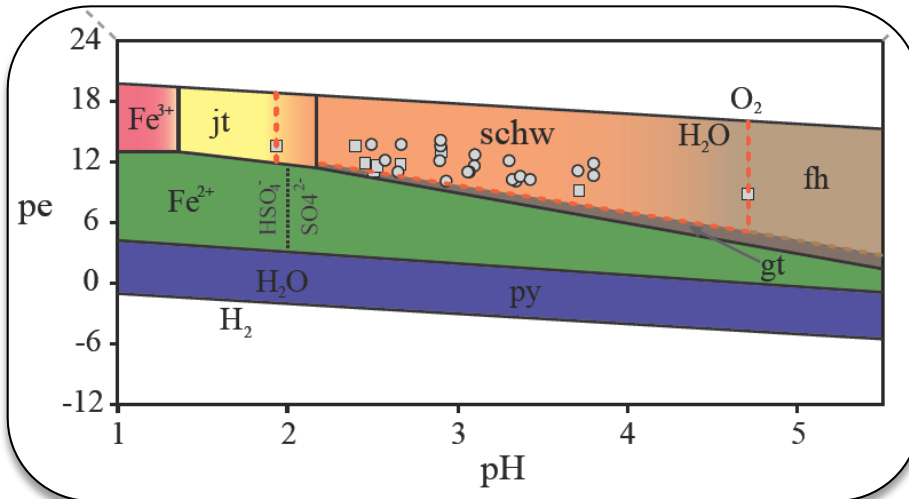




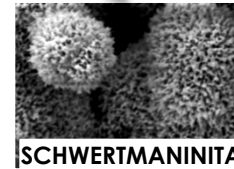
pH



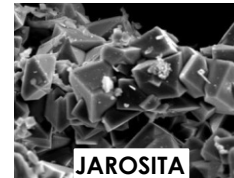
pH



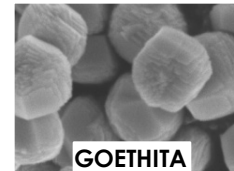
Caraballo et al., (2013) Chemical Geology. Metastability, nanocrystallinity and pseudo-solid solution effects on the understanding of schwertmannite solubility.



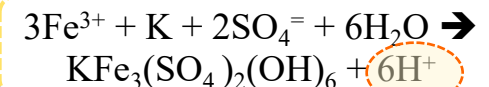
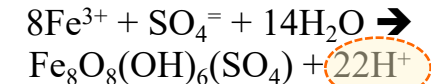
SCHWERTMANINITA



JAROSITA



GOETHITA



pH

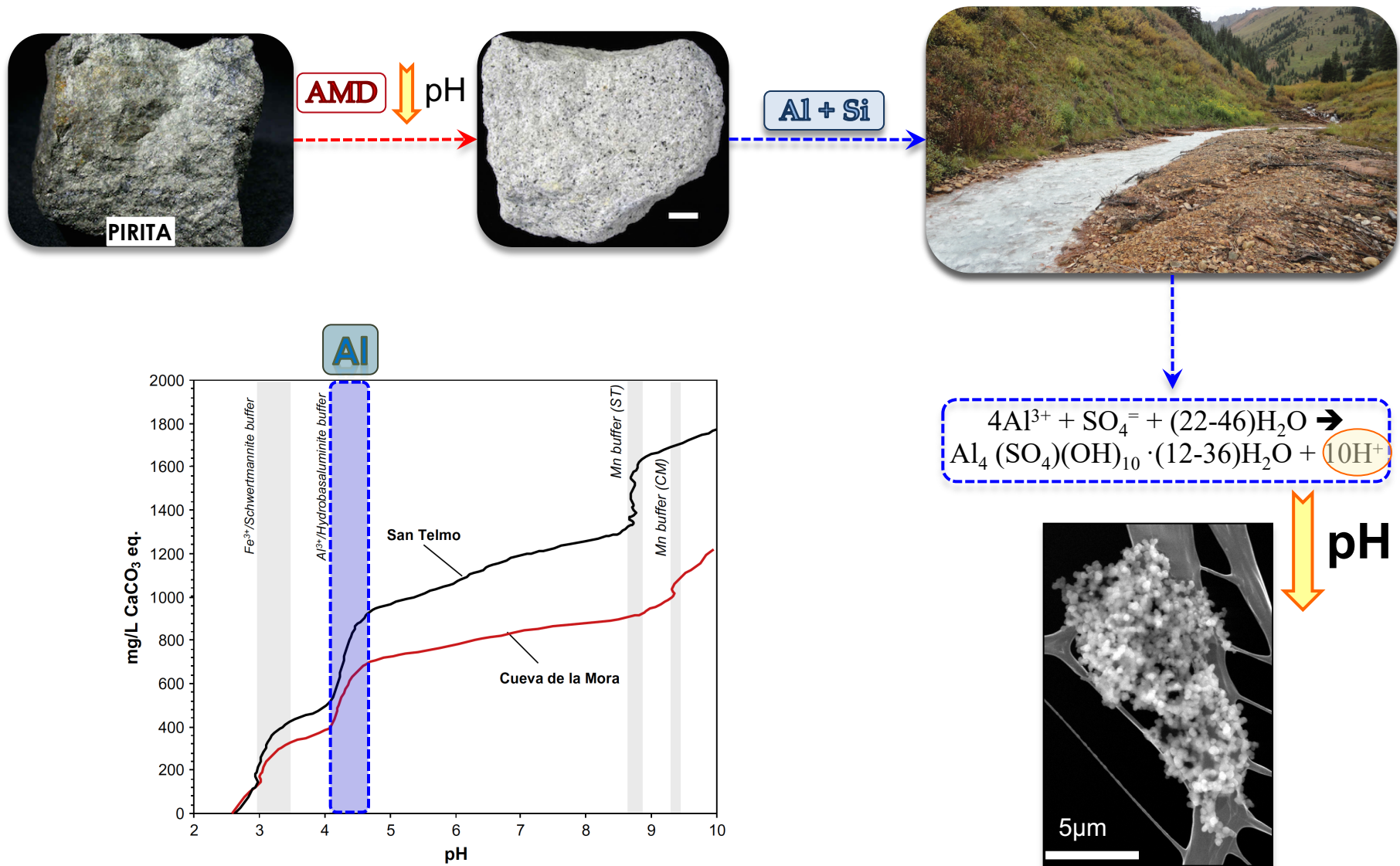
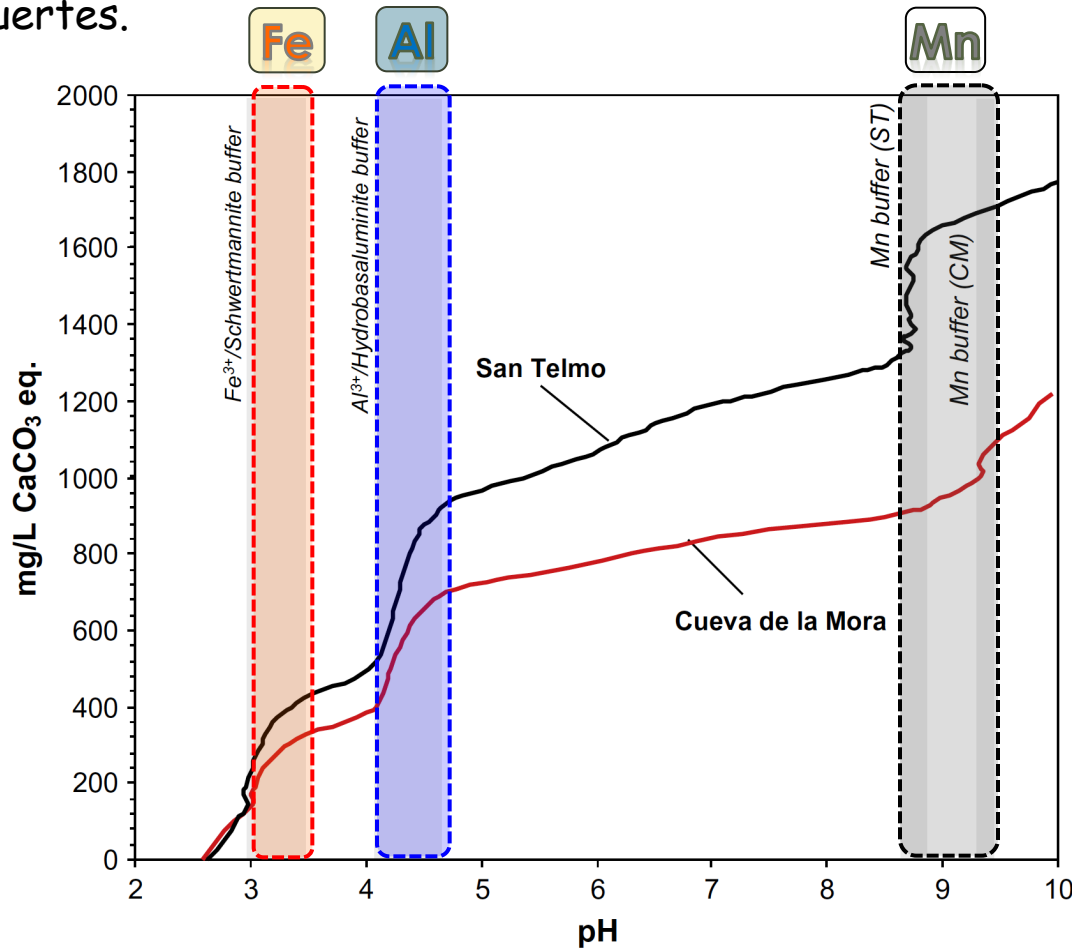


Fig. 3. Titration curves obtained during neutralization of waters from the two acidic mine pit lakes, with NaOH 0.1 M.

➤ **Tampón químico** (buffer): es la mezcla en concentraciones relativamente elevadas de un ácido débil y su base conjugada. Tiene la propiedad de **mantener estable el pH** de una **disolución** frente a la adición de cantidades relativamente pequeñas de ácidos o bases fuertes.



➤ Algunos **metales** típicamente disueltos en aguas contaminadas por drenaje ácido de mina (i.e., Fe, Al y Mn) tienen la **capacidad** de **amortiguar** posibles **incrementos** en el **pH** del sistema.

➤ Esta **pseudo-capacidad de tamponamiento** del AMD se debe a la **precipitación** de varias **fases minerales**, por lo que vendrá controlado por la solubilidad de éstas en el sistema.

Fig. 3. Titration curves obtained during neutralization of waters from the two acidic mine pit lakes, with NaOH 0.1 M.



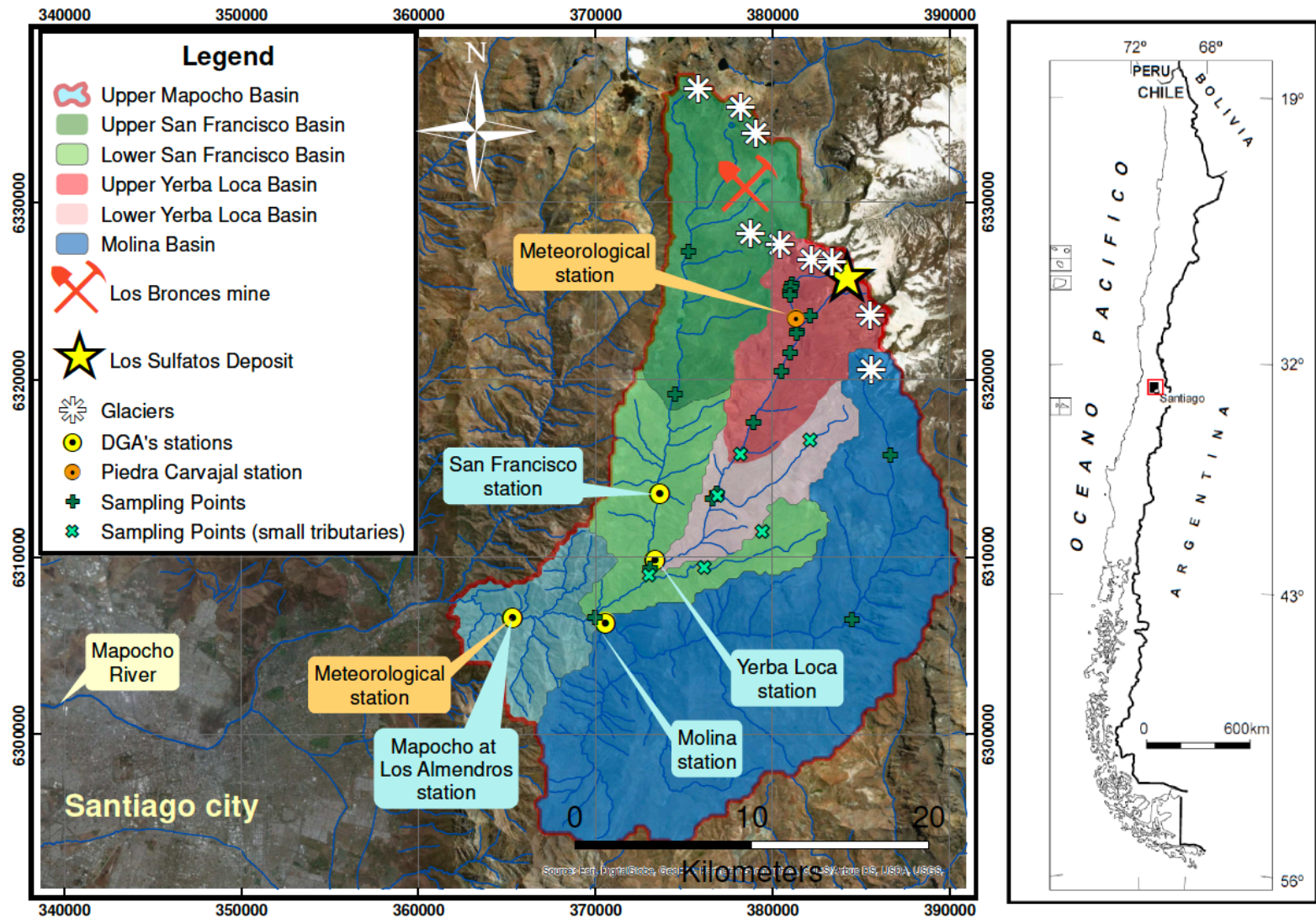
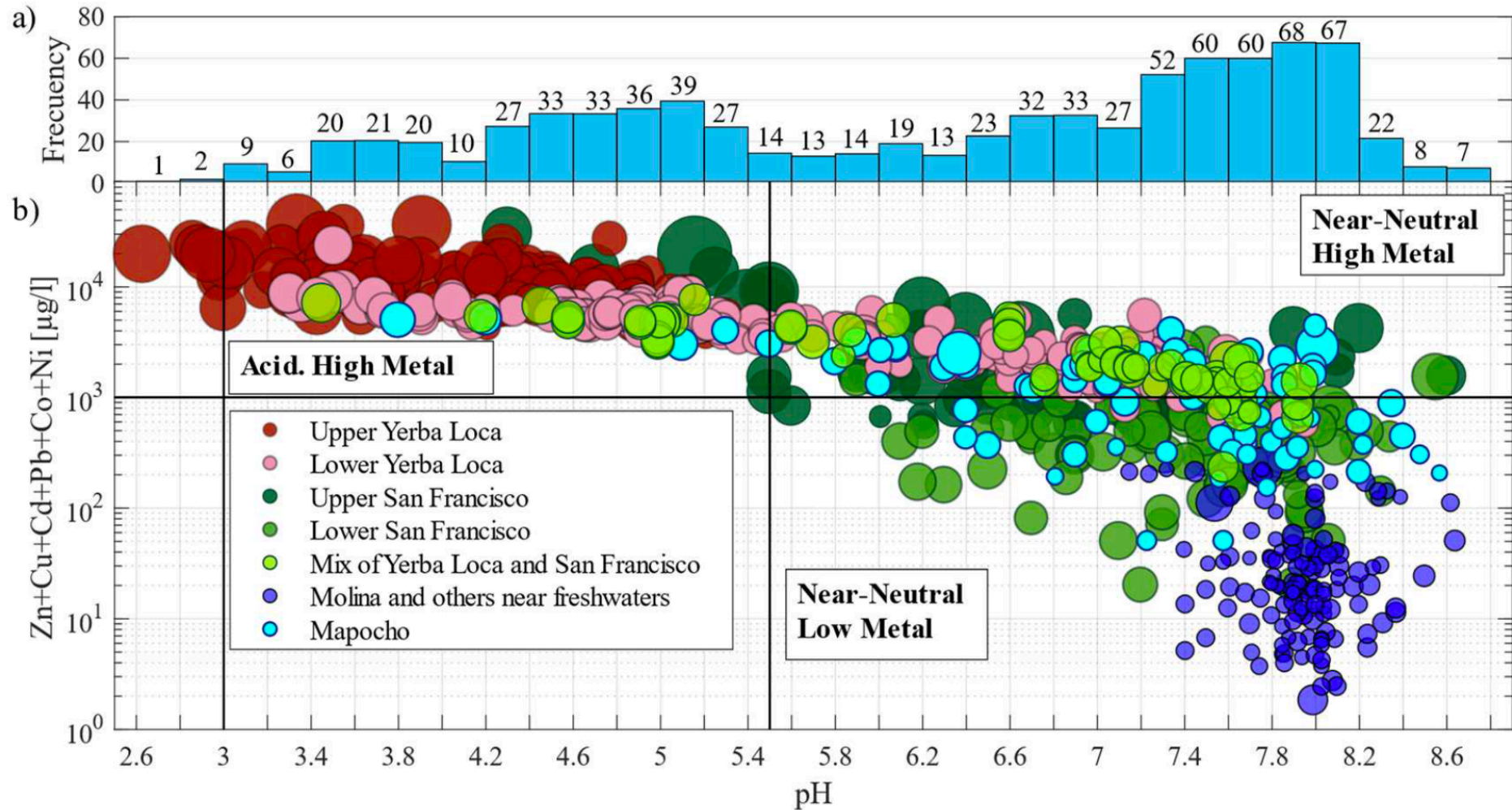
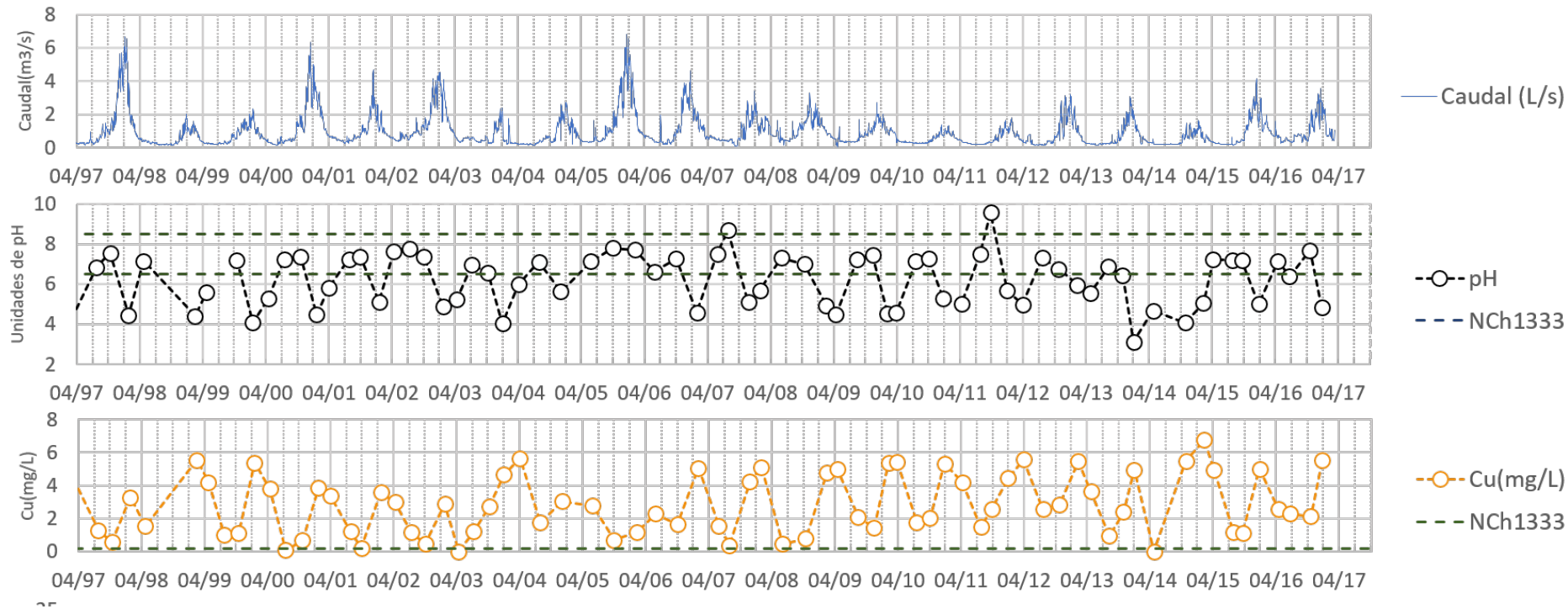


Fig. 1. The upper Mapocho river basin location map, indicating sub-basins, main rivers, main glaciers, DGA' stations, sampling points and the meteorological DGA's station at Piedra Carvajal.

## MUY DIVERSA CALIDAD DE AGUAS EN LAS SUBCUENCAS QUE GENERAN EL MAPOCHO EN SU CABERA



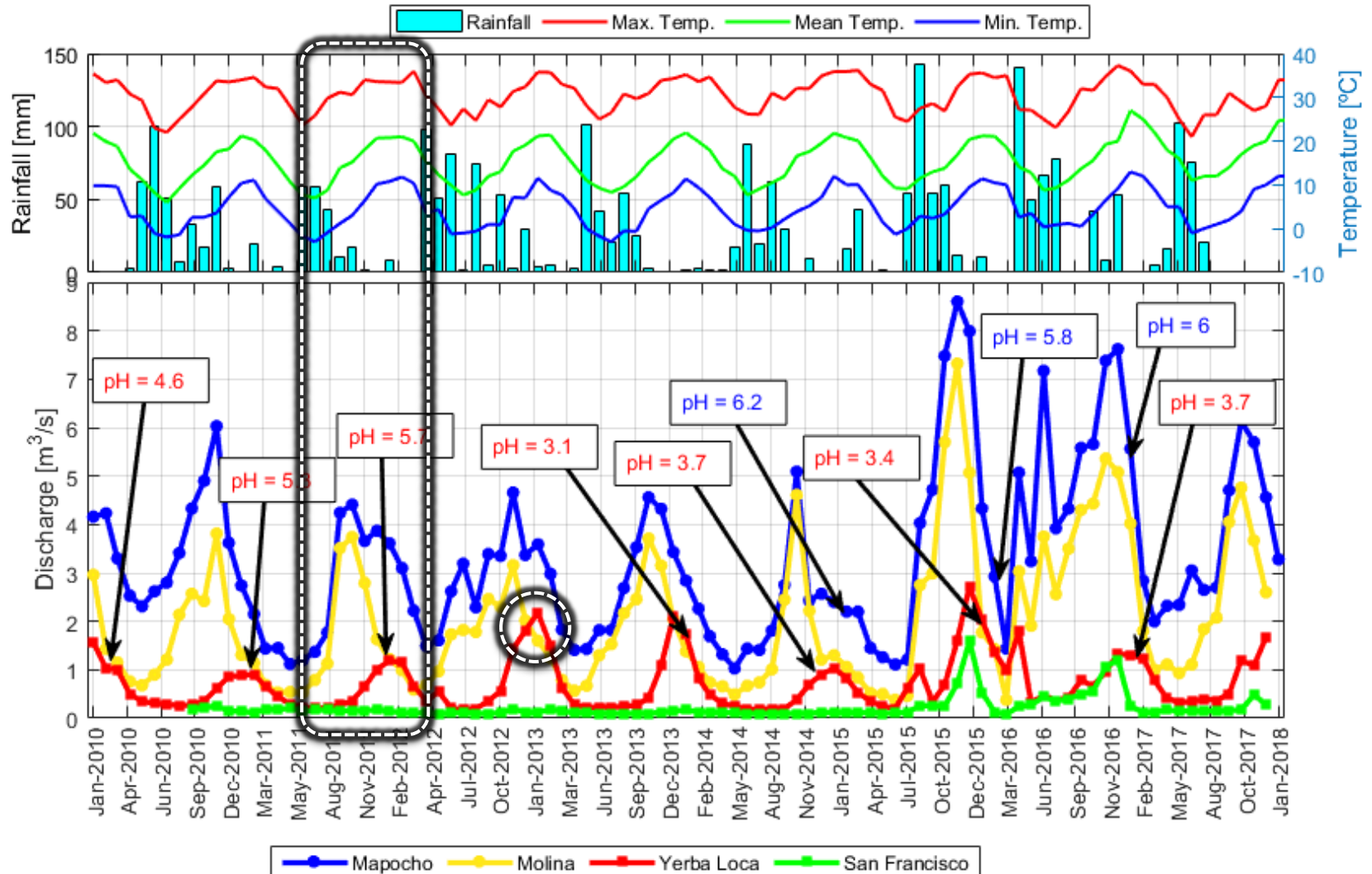
## Variaciones estacionales en el pH y concentración de metales dependiente de la variación estacional del caudal del río



↑ CAUDAL EN VERANO  
↑ CONCENTRACIÓN METÁLICA  
↓ pH



## Variaciones interanuales en el pH y concentración de metales dependiente de la variación estacional del cuadal de los ríos



*Table 1. Hydrogeochemical background of the different sub-basins comprising the Mapocho upper Basin. 95<sup>th</sup> percentiles are shown as representative statistical values of the upper thresholds naturally observed at the basins. Notice that pH and DO values correspond to 5<sup>th</sup> percentiles shown the lower thresholds.*

|                 |       | YERBA LOCA |            | SAN FRANCISCO | MOLINA | MAPOCHO    |            |
|-----------------|-------|------------|------------|---------------|--------|------------|------------|
|                 |       | Dry Season | Wet Season | Annual        | Annual | Dry Season | Wet Season |
| pH              | -     | 3.5        | 5.2        | 6.2           | 7.2    | 4.2        | 6.7        |
| EC              | μS/cm | 716        | 506        | 936           | 391    | 500        | 331        |
| DO              | mg/L  | 5.1        | 6.1        | 5.5           | 8.5    | 9.2        | 7.5        |
| Cl              | mg/L  | 21         | 14         | 95            | 11     | 29         | 30         |
| NO <sub>3</sub> | mg/L  | 1.72       | 0.78       | 3.54          | 0.91   | 2.11       | 2.9        |
| SO <sub>4</sub> | mg/L  | 319        | 218        | 280           | 32     | 175        | 96         |
| Al              | mg/L  | 16.1       | 6.4        | 2.6           | 4.5    | 11.1       | 9.4        |
| Cu              | mg/L  | 7.6        | 5.5        | 1.2           | 0.04   | 3.8        | 0.87       |
| Fe              | mg/L  | 20         | 3.4        | 2.6           | 7.2    | 14.1       | 10.3       |
| Mn              | mg/L  | 1.4        | 0.73       | 0.77          | 0.19   | 0.8        | 0.33       |
| Zn              | mg/L  | 0.41       | 0.2        | 0.32          | 0.03   | 0.24       | 0.1        |
| As              | μg/L  | 14         | 7.7        | 12            | 3.9    | 11         | 5.1        |
| Cr              | μg/L  | 8.8        | 3.4        | 8             | 5      | 4.7        | 1.5        |
| Ni              | μg/L  | 42         | 20         | 11            | 2      | 20         | 7          |
| Pb              | μg/L  | 32         | 10         | 18            | 16     | 16         | 18         |

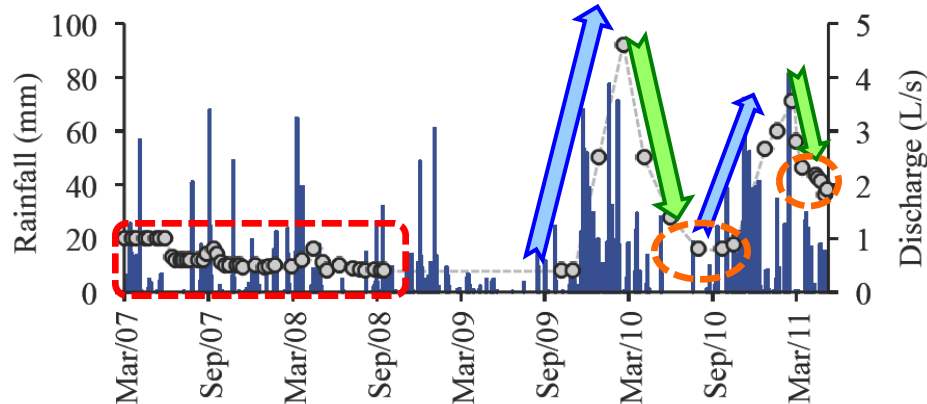
EC, specific conductance; DO, dissolved oxygen;

Valenzuela et al., (2011) Submitted to Water Research. A hydrogeochemical approach to improve environmental water quality standards and management in the overlap between high mountainous natural protected areas and copper mining activities (Mapocho river upper basin, Santiago, Chile)

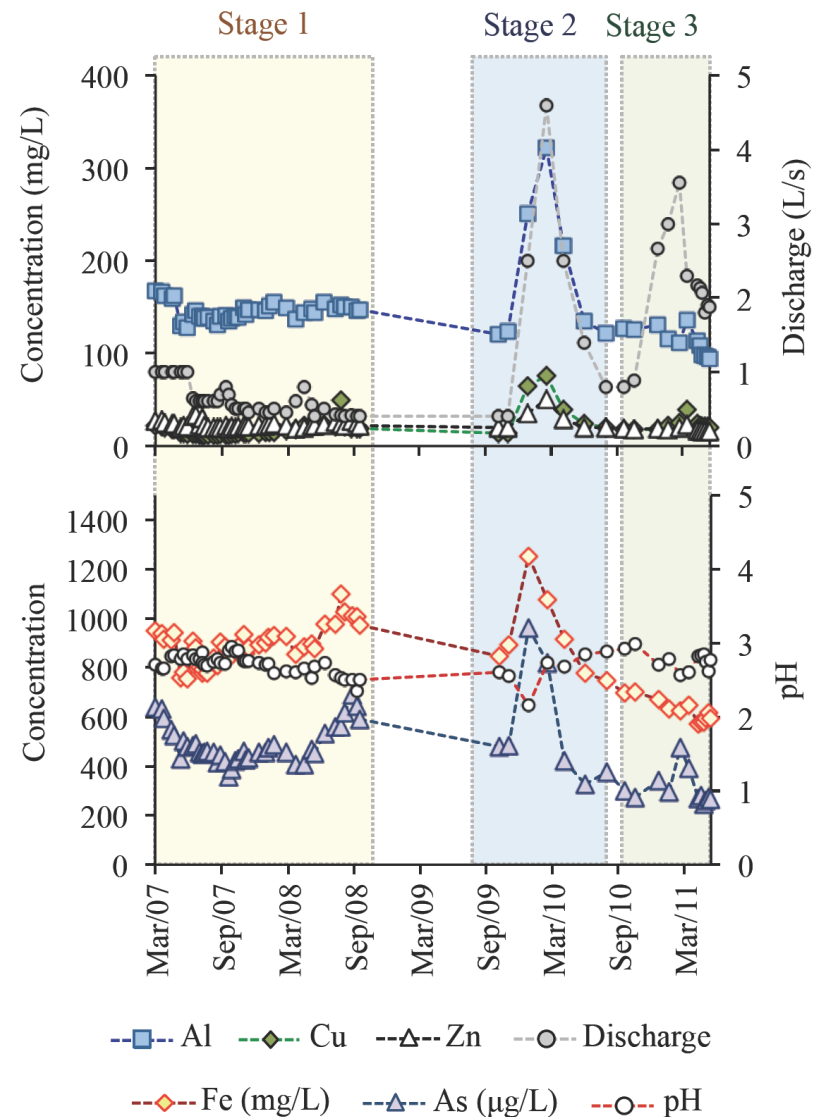


Manuel A. Caraballo et al., 2016. Long term fluctuations of groundwater mine pollution in a sulfide mining district with dry Mediterranean climate: Implications for water resources management and remediation. *Science of the Total Environment*, 539, 427-435

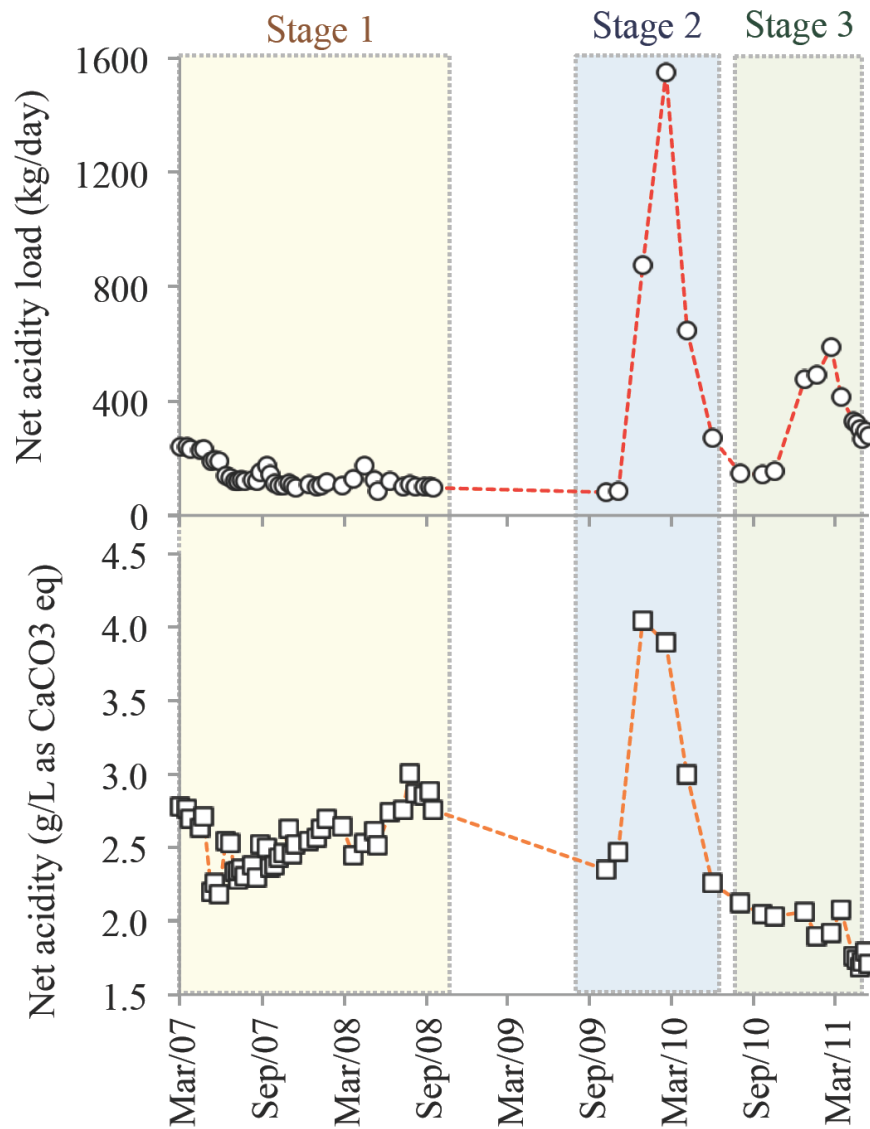




- Caudal estable en años poco lluviosos y con lluvias bien distribuidas a lo largo del año
- Importante aumento del caudal en años más lluviosos y con gran concentración de las lluvias en períodos cortos
- Tiempo de retención hidráulica estimado para las galerías de Mina Esperanza en torno a 15 días para grandes avenidas.
- Recuperación dispar del caudal de estabilida



Manuel A. Caraballo et al., 2016. Long term fluctuations of groundwater mine pollution in a sulfide mining district with dry Mediterranean climate: Implications for water resources management and remediation. *Science of the Total Environment*, 539, 427-435



$$NAL = NA \cdot Q$$

$$NA = 50.045 \cdot (3 \cdot c_{Al} + 2 \cdot c_{Fe} + 2 \cdot c_{Mn} + 2 \cdot c_{Zn} + 10^{-pH}) - alk$$

Manuel A. Caraballo et al., 2016. Long term fluctuations of groundwater mine pollution in a sulfide mining district with dry Mediterranean climate: Implications for water resources management and remediation. *Science of the Total Environment*, 539, 427-435