

# BACTERIAS ACIDOFILAS DE LA RIOJA Y SU APLICACION EN EXPLORACION Y REMEDIACION EN LA INDUSTRIA MINERA

ESTUDIO DE CASOS



VICENTE CALBO



**BACTERIAS ACIDOFILAS DE LA RIOJA Y SU APLICACIÓN EN  
EXPLOTACION Y REMEDIACION EN LA INDUSTRIA MINERA  
ESTUDIO DE CASOS**

**VICENTE CALBO**

**MIGUEL ANGEL MAS**

**ALICIA AZUCENA LEIVA**

**RUBEN CEFERINO DANIELE**



Bacterias acidofilas de La Rioja y su aplicación en explotación y remediación en la industria minera : estudio de casos / Vicente Calbo ... [et al.]. - 1a ed. - La Rioja : Suyay, 2023.  
Libro digital, PDF

Archivo Digital: online  
ISBN 978-987-82832-2-7

1. Microbiología. 2. Geología. 3. Minería. I. Calbo, Vicente.  
CDD 549.0982

ISBN 978-987-82832-2-7



## **PROLOGO DE LOS AUTORES**

En este libro se publican sendos informes de proyectos de investigación desarrollados entre 2019 y 2021 en el Instituto de Investigaciones Mineras de la Universidad Nacional de La Rioja.

En su momento fueron parcialmente presentados en eventos académicos pero no llegaron a publicarse en forma integral.

Por corresponder a la misma disciplina, se los publica en esta oportunidad. Pedimos indulgencia al lector por la extemporaneidad, pero creemos que la información todavía puede resultar valiosa.



## **INDICE**

PARTE 1	Pag. 1
BACTERIAS GENERADORAS DE DRENAJE ACIDO EN LA RIOJA	Pag. 1
1 RESUMEN	Pag. 1
2 INTRODUCCION	Pag. 2
3- ANALISIS Y SELECCION DE LOS YACIMIENTOS Y AREAS	Pag. 5
4- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	Pag. 7
5- MINAS ESTUDIADAS	Pag. 13
5.1- MINA EL ORO	Pag. 14
5.2- CORDILLERA FRONTAL	Pag. 19
5.3- AREA PEÑAS NEGRAS	Pag. 20
5.4- DISTRITO MINERO NEVADOS DEL FAMATINA	Pag. 21
5.5- MINA LA MEJICANA	Pag. 22
5.6- MINA KING TUT	Pag. 27
5.7- LOS COLORADOS	Pag. 32
5.8- MINA HELVECIA	Pag. 34
5.9- SECTOR SIERRA DE LAS MINAS	Pag. 37
5.10- DISTRITO LAS CALLANAS	Pag.38
5.11- MINA GEORGETTE	Pag. 39
6- CONCLUSIONES	Pag 41
7- BIBLIOGRAFIA	Pag. 42
SEGUNDA PARTE	Pag. 44
REDUCCIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL EN UNA MINA CERRADA	Pag. 44
1- INTRODUCCIÓN	Pag. 44
2- MARCO TEORICO	Pag. 44
2.1- URANIO	Pag. 45
2.1.1- Historia	Pag. 45
2.1.2- Propiedades químicas	Pag. 45
2.1.3- Geología y mineralogía	Pag. 47

2.1.4- Tratamiento del Uranio	Pag. 50
2.2- LIXIVIACIÓN BACTERIANA	Pag. 52
2.2.1 - Las Bacterias del Proceso	Pag. 54
2.2.2- Fundamentos de la Lixiviación Bacteriana	Pag- 54
3- ESTADO ACTUAL DE LA OPERACIÓN	Pag. 58
3.1- RESUMEN	Pag. 59
3.2- EL YACIMIENTO DE URANIO LOS COLORADOS	Pag. 59
3.3- EXPLOTACION DE LA MINA	Pag. 61
3.4- TRATAMIENTO DEL MINERAL	Pag. 61
3.5- CIERRE DE LA OPERACIÓN	Pag. 62
3.5.1- Estado del Pit	Pag. 63
3.5.2- Las pilas	Pag. 65
4- TRABAJOS REALIZADOS	Pag. 67
4.1 GEOLOGIA GENERAL	Pag. 67
4.2- ANALISIS GEOAMBIENTAL DEL AREA DE LOS COLORADOS	Pag. 85
4.3- MUESTREO, AISLAMIENTO Y PURIFICACION	Pag. 89
4.4- MUESTREO Y MINERALOGIA	Pag. 100
4.2.1- Muestra Los Colorados	Pag. 100
4.2.2- Muestra La Mejicana	Pag. 104
4.5 ENSAYOS DE BIOLIXIVIACION	Pag. 106
4.5.1 Propuesta de Mitigación	Pag. 106
4.5.2 Metodología	Pag. 107
4.5.3 Ciclos de lixiviación	Pag. 108
4.5.4 Determinaciones	Pag. 108
4.5.5 Experiencias	Pag. 108
5 -CONCLUSIONES	Pag. 110
6- BIBLIOGRAFIA	Pag. 114

# **PRIMERA PARTE**

## **BACTERIAS GENERADORAS DE DRENAJE ACIDO EN LA RIOJA**

### **1- RESUMEN**

El objetivo del estudio fue determinar la presencia de microorganismos tales como *Acidithiobacillus thiooxidans* y *ferrooxidans*, en áreas mineras de La Rioja.

Este tipo de bacterias, presenta una fuerte acción de oxidación sobre los minerales sulfurados y sus metales, generando  $H_2SO_4$  y  $(SO_4)_3Fe_2$ , componentes fundamentales del drenaje ácido.

Se revisaron los sectores mineros más representativos de la minería provincial, específicamente los que presentan las condiciones adecuadas para el desarrollo de este tipo de microorganismos.

Se estudiaron las siguientes áreas: Cordillera Frontal, Minas King Tut y El Oro, Grupo Minero Cerro Negro, Nevados del Famatina, Sierra de Las Minas y Ulapes, áreas Guandacol y Los Colorados.

Se extrajeron muestras líquidas de cada sector, se acondicionaron en ambiente a 30°C. La introducción del  $O_2$  y el  $CO_2$  fue por mesa agitadora. La presencia de los *Acidithiobacillus thiooxidans* y *ferrooxidans*, fue determinada utilizando los medios 9 K+S<sup>o</sup> y T&K, respectivamente y la purificación se realizó utilizando el método de Siembra en Placa.

En los estudios realizados se encontraron dos prospectos que presentaron resultados positivos, correspondientes a la Mina El Oro y Mina La Mejicana, con fuerte drenaje ácido (pH = 2,5) y presencia de metales pesados en solución.



## 2- INTRODUCCION

El objetivo de este estudio fue determinar, en las minas de la Rioja, la presencia de microorganismos tales como *Acidithiobacillus thiooxidans* y *ferrooxidans*, que presentan una fuerte acción de oxidación sobre los minerales y los metales contenidos.

Se revisaron los sectores mineros más representativos de la minería provincial y específicamente, los lugares que presentan las condiciones adecuadas para el desarrollo de este tipo de microorganismos.

Entre las principales áreas de interés, seleccionamos la Cordillera Frontal, con varios proyectos en etapas de Prospección-Exploración, Se seleccionó el sector de Peñas Negras. También se estudió la Mina King Tut, que presenta abundante agua en sus galerías, en la que los principales metales son el oro, cobalto, níquel, plata y bismuto, del distrito Minero Valle Hermoso, Departamento Gral. Sarmiento.

El Distrito Nevados del Famatina, contiene metales tales como oro, plata y cobre. Este distrito se ubica en la Sierra del Famatina. La Mina El Oro, es literalmente atravesada por el río del mismo nombre, los principales metales son el oro, cobre y hierro. El Grupo Minero Cerro Negro, presenta mineralización de plata, plomo, zinc, y hierro (Georgette, La Peregrina, etc).. ( Mina Offir, La Mejicana, Quebrada ancha y Montey) .

El Distrito Minero de Sierra de Las Minas y Ulapes, es otro sector importante incluido en este proyecto ( Mina Bella Francia ). El área Guandacol - Mina Helvecia Forma parte de una serie de manifestaciones polimetálicas que contienen oro, plata. Plomo, zinc, etc y que se extienden hacia el sur (provincia de San Juan).

El área Los Colorados, ubicada en las cercanías de Patquia, mereció nuestra atención por las explotaciones de uranio realizadas entre 1991 y 1995.

La elección de las minas antes mencionadas se fundamenta principalmente, en el hecho que se ubican cerca de ríos y arroyos y tienen desarrolladas labores, las que están actualmente abandonadas, y por ellas se producen filtraciones, en algunos casos temporales. Sumado a esto el tipo de mineralización, sulfuros polimetálicos y óxidos, condiciones estas que favorecen el desarrollo de la actividad bacteriana autóctona.

Para el aislamiento y el estudio de los diversos tipos de microorganismos que existen en la naturaleza, se utilizó el método de Winogradsky y Beijerinck quienes desarrollaron la técnica, del *Cultivo de Enriquecimiento*. Esta es en esencia, una aplicación a micro escala del principio de la selección natural. Es posible mantener el predominio de la primera forma que se desarrolla, mediante la transferencia repetida de la población mixta a medio fresco de la misma composición, a intervalos de tiempo cortos.

Los medios de enriquecimiento líquido, utilizados fueron Medio 9 K – S<sup>0</sup> descrito por Silverman y Lundgren, para *Acidithiobacillus thiooxidans* y el Medio T y K – Fe<sup>+2</sup> descrito por Touvinen y Kelly, para *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Estos tienden a seleccionar microorganismos de más elevada tasa de crecimiento entre todos los miembros de una población inoculada. Además la selectividad de un cultivo, no solo, está determinada por la composición del medio, sino también por otros factores como la temperatura, pH, fuerza iónica, fuente de luz, aireación etc.

El tiempo en el cual se realizó la transferencia, fue función de los valores obtenidos en la medición del pH y Eh, indicadores indirectos del crecimiento de los microorganismos en las condiciones establecidas. Con la medición a intervalos de tiempo programados de estas variables, se controló el crecimiento de las bacterias que se deseaban aislar.

La primera de estas variables se usó para medir el crecimiento de *los T. thiooxidans* y la segunda para los *T. ferrooxidans*, además debido a la oxidación del ion ferroso se observó un cambio de color a rojo anaranjado en los frascos con los *T. ferrooxidans*.

Por último, se pudo verificar la presencia de estos microorganismos por la observación en el microscopio de las muestras ensayadas .

La termolización del área de crecimiento de las bacterias, se realizó con una estufa interconectada con un sistema de regulación automática de la temperatura. El sistema se ajustó para mantener la temperatura en 30 °C, condición propicia para el desarrollo de los cultivos.

La introducción del O<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> se logró agitando mediante la utilización de la mesa agitadora.

Cabe destacar que una característica importante de los microorganismos, es su gran capacidad de variación de la función fisiológica, en función al medio en el que se desarrollan. Por ello, puede estimarse que los cambios producidos en el medio, por el crecimiento de los microorganismos, a lo largo del tiempo, pueden producir transformaciones fisiológicas en los mismos.



**Río El Oro: coloración típica producida por la jarosita presente en las aguas con drenaje ácido**

Surge entonces, la necesidad del uso de cultivos puros, para el estudio de los microorganismos. Definiéndose, como cultivo puro, a aquel que contiene una sola clase de organismo.

La técnica de aislamiento utilizada en este trabajo, es la desarrollada por Koch, quien ideó un método en el cual a un medio líquido de composición química conocida, se le agrega una sustancia clara solidificante. Esta técnica, se denomina *Método de Siembra en Placa*. El solidificante usado fue el agar, el cual para fundir requiere de una temperatura de 100 °C aproximadamente.

En los estudios realizados se encontraron solo dos prospectos que presentaron resultados positivos; corresponden a la Mina El Oro y Mina La mejicana, ubicadas en las Sierras de Famatina.

### 3- ANALISIS Y SELECCION DE LOS YACIMIENTOS Y AREAS INCLUIDOS EN EL ESTUDIO.

La elección de la minas antes mencionadas se fundamenta principalmente en que se ubican cerca de ríos y arroyos, que tienen desarrolladas labores, las que están actualmente abandonadas, y que por ellas se producen filtraciones, en algunos casos temporales. Sumado a esto, el tipo de mineralización, sulfuros polimetálicos y óxidos, condiciones propicias que favorecen el desarrollo de la actividad bacteriana autóctona.

Entre las principales áreas de interés se seleccionaron:

Cordillera Frontal, con varios proyectos en etapas de prospección exploración, ubicada al noroeste de Jagüe, zona central del área, limitando con Chile. Debido a la gran extensión, se seleccionó para este proyecto el sector de Peñas Negras.

Mina King Tut, que presenta abundante agua en sus galerías, en la que los principales metales son el oro y cobalto; el níquel, la plata y el bismuto como minerales secundarios. Ubicada en el faldeo norte del Cerro El Salto, pendiente occidental de la Sierra del Famatina, correspondiente al Distrito Minero Valle Hermoso.

En el Distrito Nevados del Famatina, los principales metales son oro, plata y cobre. Este distrito se ubica en el flanco oriental de la Sierra del Famatina, a 35 km al oeste - noroeste de la ciudad de Chilecito. En este distrito se encuentran varios yacimientos, algunos de ellos fueron trabajados en la misma época que se explotó la mina La Mejicana. Este es el caso de la Mina Offir, que se encuentra a unos 15 km de La Mejicana.

Quebrada ancha y Montey, tienen mineralizaciones similares a las anteriores. Se seleccionó la Mina la Mejicana que presenta abundante agua en sus labores y especialmente en nivel 3, nivel 5 y el socavón Banco Nación.

Mina El Oro, resultó de interés ya que es literalmente atravesada por el río del mismo nombre, los principales metales son el oro, cobre y hierro. Esta mina registra explotaciones discontinuas desde el siglo pasado (1883).

El área, Grupo Minero Cerro Negro, presenta mineralización de plata, plomo, zinc, y hierro. Está integrado por los siguientes yacimientos: Georgette, Plata I, Zacarías, Santo Domingo, La Peregrina, Desmonte, Fortuna, La Viuda, La Cortadera, y otros. Este grupo se comenzó a explotar en 1767. Se ubica en el flanco oriental de la Sierra de Famatina, a 30 km al oeste de la ciudad de Chilecito.

El Distrito Minero de Sierra de Las Minas y Ulapes, es otro sector importante incluido en este proyecto. Estas Sierras se encuentran en el sur de la provincia conformando un antiguo distrito minero conjuntamente con las Sierras de Ulapes, en este distrito es muy escasa la presencia de agua. Del sector se selecciono la Mina Bella Francia, una de las pocas minas que presenta agua en sus labores.

Area Guandacol, Mina Helvecia se encuentra a 250 km al sudoeste de la Ciudad de La Rioja en el límite con la provincia de San Juan. Forma parte de una serie de manifestaciones polimetálicas que contienen oro, plata, plomo, zinc, etc y que se extienden hacia el sur (provincia de San Juan). El Bolsón, El Halcón, Corte Grande, Santa Rita, son otros de los yacimientos de la zona. La actividad en estas ha sido esporádica con el objetivo principal de extraer baritina y galena.

Las labores tienen poca extensión lateral y presentan agua en el fondo de sus labores.

El Área Los Colorados, ubicado en las cercanías de Patquía, mereció nuestra atención por las explotaciones de uranio realizadas entre 1991 y 1995. La explotación, actualmente abandonada, está acumulando agua meteórica y se la consideró por una eventual presencia de bioactividad.

#### 4- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

##### Descripción de los Ensayos de Aislación

Antes de iniciar los ensayos de aislamiento en medio líquido, se acondicionó la temperatura del lugar de trabajo, con una estufa interconectada con un sistema de regulación automática de temperatura; el sistema se ajustó para mantener la temperatura en 30 °C, condición propicia para el desarrollo de los cultivos.

Asimismo, de acuerdo a los requerimientos de fuente de energía y de carbono, la introducción del O<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> se logró agitando, mediante la utilización de la mesa agitadora.

El pechímetro se calibró utilizando buffer con pH 4, teniendo en cuenta la escala de pH a las que se realizan las experiencias.

##### Procedimiento Experimental.

Materiales de vidrio, equipos, medios de cultivo y soluciones utilizadas.

Para la realización de las experiencias de aislamiento de bacterias de las aguas de las minas muestreadas, el material de vidrio es el que se detalla a continuación: erlenmeyers, frascos con tapa esmerilada, matraces, placas de vidrio, porta y cubre objeto, termómetro, etc.

También se utilizaron los siguientes equipos: balanza electrónica, balanza de precisión, peachímetro, microscopio, mesa agitadora, estufa.

Solución de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 10 N para ajustar el pH.

Medios líquidos: 9 K –  $\text{S}^0$ , descrito por Silverman y Lundgren, cuya composición es Solución (a):  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \sim 3$  gr,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \sim 0,5$  gr,  $\text{K}_2\text{HPO}_2 \sim 0,5$  gr,  $\text{KCl} \sim 0,1$  gr,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \sim 0,01$  gr, en 1000 ml de agua destilada. Solución (b):  $\text{S}^0 \sim 1$  gr por cada alícuota de 100 ml de medio 9K. El pH se ajusta a 2,5.

T y K –  $\text{Fe}^{+2}$ , descrito por Touvinen y Kelly, cuya composición es Solución (a):  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \sim 1$  gr,  $\text{K}_2\text{HPO}_4 \sim 0,1$  gr,  $\text{MgSO}_4 \sim 1$  gr, en 800 ml. Solución (b):  $\text{FeSO}_4 \sim 33,4$  gr, en 200 ml. El pH se ajusta a 2.

En todos los casos se trabajó con reactivos de grado analítico de pureza.

### Metodología de trabajo.

Las experiencias de aislación y purificación se realizaron siguiendo la metodología de trabajo que a continuación se describe:

Selección del material de vidrio a utilizar, medios de cultivo y solución para ajustar pH; acondicionamiento del lugar de trabajo.

Medición del pH natural de las muestras tomadas.

En cada erlenmeyer en donde se desarrollaran los A. Thiooxidans, se coloca 30 ml de medio de cultivo 9K -  $\text{S}^0$  + 0,3 grs de  $\text{S}^0$  + 10 ml de muestra.

En cada erlenmeyer en donde se desarrollaran los A. Thiooxidans, se coloca 20 ml de medio de cultivo T y K -  $\text{Fe}^{+2}$  + 10 ml de  $\text{FeSO}_4$  + 10 ml de muestra.

Se mide el pH y luego se lo ajusta con la solución de ácido sulfúrico, de acuerdo a los pHs establecidos para cada tipo de bacteria.

Posteriormente, los erlenmeyers son colocados en la mesa agitadora, dándose comienzo a la experiencia.

Para el desarrollo de las mismas, la temperatura ambiente que debe estar aproximadamente en 30 °C.

Posteriormente cada 24 hs. se tomaron mediciones de pH y Eh como controlantes del crecimiento de las bacterias.

Cada erlenmeyer, se tapó con una cubierta de espuma de poliuretano asegurada con una banda elástica, para permitir el paso del aire al interior del frasco y de este modo proveer oxígeno y dióxido de carbono al cultivo.

Antes de dar comienzo a la agitación, se midió la concentración del ion hidrógeno (pH) y el potencial eléctrico (Eh) inicial de cada frasco; posteriormente, con la medición a intervalos establecidos, de estas variables, se controló el crecimiento de las bacterias que se deseaban aislar.

La primera de estas variables se usó para medir el crecimiento de los *A. thiooxidans* y la segunda para los *A. ferrooxidans*, además debido a la oxidación del ion ferroso se observó un cambio de color a rojo anaranjado en los frascos con los *A. ferrooxidans*.

Para obtener cultivos con *A. thiooxidans* y *A. ferrooxidans*, es decir lograr el predominio de éstos organismos (aislamientos) en el medio utilizado, se realizaron transferencias repetidas de la población bacteriana a medio fresco, a intervalos de tiempo cortos.

El tiempo en el cual se realizó la transferencia, fue función de los valores obtenidos en la medición del pH y Eh; indicadores indirectos éstos del crecimiento de los microorganismos en las condiciones establecidas.



Por último, se pudo verificar la presencia de estos microorganismos por la observación en el microscopio de las muestras ensayadas.

### Descripción de los Ensayos de Purificación de las Bacterias

Para la purificación existen varias técnicas, pero la de más común utilización es la desarrollada por Koch, quien ideó un método en el cual a un medio líquido de composición química conocida, se le agrega una sustancia clara solidificante; de este modo serían fácilmente visible las colonias que se forman. Como consecuencia, la variación en el medio líquido base, permitiría responder a los diversos requerimientos nutricionales de los diferentes grupos de organismos.

Esta técnica, se denominó Método de Siembra en Placa. El solidificante comúnmente usado es el agar, el cual para fundir requiere de una temperatura de 100 °C aproximadamente y, por lo tanto permanece sólido a través de la escala de temperaturas a las que se cultivan los organismos. En algunos tipos de organismos, se reemplaza el agar por agarosa,

### Procedimiento Experimental.

Materiales de vidrio, equipos, medios de cultivo y soluciones utilizadas.

Material de vidrio: placas de Petri, tubos de ensayo, pipetas 1 ml, 2 ml, 5 ml, 10 ml, erlenmeyers, 250 ml, 500 ml, 1000 ml, vasos de precipitados, 200 ml, 400 ml.

Los equipos utilizados fueron: balanza electrónica, peachímetro, estufa para cultivo, estufa para secado y esterilización, autoclave para esterilización de soluciones.

Reactivos, soluciones y medios de cultivos.

Reactivos:  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4$ , Agar, Agarosa, todos de grado analítico de pureza.

Soluciones:  $\text{H}_2\text{SO}_4$  dilución 10 N y  $\text{HCl}$  1 N para ajustar el pH, agua acidulada con sulfúrico a  $\text{pH}=1,8$ .

Medios de cultivos: ATTC – 238 para *Acidithiobacillus Thiooxidans*. Composición, Solución A:  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ~ 0,1 gr,  $\text{MgCl}_2$  ~ 0,1 gr,  $\text{CaCl}_2$  ~ 0,1 gr,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  ~ 3,0 gr, diluidos en 700 ml. Solución B:  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ~ 5 gr, diluidos en 150 ml. Solución C: Agar ~ 15 gr, diluidos en 150 ml. El pH se ajusta en 4,2 con ácido clorhídrico 1 N.

T y K – Agarosa para *Thiobacillus Ferrooxidans*. Composición, Solución A:  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  ~ 1,0 gr,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ~ 1,0 gr,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  ~ 0,1 gr, diluidos en 800 ml. Solución B:  $\text{FeSO}_4$  ~ 33,4 gr, diluidos en 200 ml. Solución C: Agarosa ~ 9 gr. Por cada 1000 ml de volumen final de la solución A+B. El pH se ajusta en 4,2 con ácido clorhídrico 1 N.

### Descripción de los ensayos.

Antes de describir la metodología aplicada en la purificación de bacterias, es importante acotar que se introdujeron algunas variantes en la técnica original. Una de las variantes, es que se usó agar de alta pureza en la preparación del medio T y K – Agarosa para los ferroxidans, por no disponerse de agarosa en el laboratorio. Asimismo, la otra variante es la utilización de la solución A del medio 9K en lugar de la solución A del medio ATTC – 238 para los thiooxidans, teniendo en cuenta que poseen básicamente los mismos nutrientes.

La técnica de purificación inicia con la esterilización del material de vidrio a usarse, en estufa a  $170\text{ }^\circ\text{C}$  durante 40 minutos.

En la preparación de las placas con medio ATTC – 238 (con la variante indicada en el párrafo inicial) para el cultivo de los thiooxidans, se tomaron 105 ml de la Solución A del medio 9K, 22,5 ml de la Solución B conteniendo 0,75 gr de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  y 22,5 ml de Solución C

conteniendo 2,25 gr de agar; cada una de estas soluciones se colocaron en un erlenmeyers.

Asimismo, para la preparación de las placas con medio T y K – Agarosa (con la variante indicada en el párrafo inicial) para el cultivo de los ferrooxidans, se tomaron 120 ml de la Solución A y 30 ml de la Solución B conteniendo 5,01 gr  $\text{FeSO}_4$ , y 1,35 gr de agar; cada una de estas soluciones se colocaron en un erlenmeyers.

Estos erlenmeyers que fueron rotulados según corresponda, se esterilizan en autoclave, a 1 atm de presión durante 15 minutos, como así también el agua acidulada a pH 1,8 para la preparación de las diluciones del cultivo en medio líquido.

Una vez finalizada la esterilización, y sin dejar que se solidifiquen las soluciones conteniendo el agar, en un frasco se mezclan las soluciones correspondientes al medio ATTC – 238 y en otro las soluciones correspondientes al medio T y K – Agarosa, y se homogeneizan.

A continuación se vierten en las placas, el contenido de los frascos, llenando las mismas hasta un tercio de su altura y dejando que solidifiquen a continuación. Después que ha tenido lugar la solidificación, se tapan y envuelven en papel para guardarlas en la heladera, hasta su utilización.

Después de preparado el material y los medios, se procede a sembrar. Para ello, primeramente se diluye en tubos, los cultivos aislados de las diferentes muestras tratadas. De cada erlenmeyer conteniendo los thiooxidans y los ferrooxidans, se toma un (1) mililitro de cultivo y se lo pasa a un tubo de ensayo conteniendo nueve (9) mililitros de agua acidulada; posteriormente, de esta dilución se toma un (1) mililitro y se lo pasa a un tubo de ensayo conteniendo nueve (9) mililitros de agua acidulada. Se continua así hasta alcanzar diluciones de  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$ .

Luego de alcanzadas las diluciones indicadas anteriormente para cada cultivo de thiooxidans y ferrooxidans, sobre la superficie del medio sólido

correspondiente se depositan con una pipeta una pequeña cantidad (0,1 ml) de muestra bacteriana y se distribuye extendiéndola con una varilla de vidrio curvada y esterilizada en llama de mechero. En esta operación se separan las bacterias sobre la superficie solidificada, de modo de lograr el desarrollo de colonias individuales a partir de una célula bacteriana.

La incubación de las placas se realiza a una temperatura de 30 °C, en una estufa de cultivo.

Cabe acotar que para mantener una atmósfera esterilizada, se trabajó dentro de un radio de 20 cm próximos a un mechero.

Al transcurrir aproximadamente diez días, puede observarse el desarrollo de pequeñas colonias, al finalizar los quince días aproximadamente, se tienen colonias definidas; éstas colonias a continuación serán llevadas a medio líquido y así tener un cultivo puro para su estudio.

Cuando la técnica se realiza adecuadamente, existen zonas en las placas en las que las colonias están lo bastante separadas, de modo que en el posterior paso a medio líquido, la inoculación corresponda a una colonia procedente de una célula bacteriana. Se supone que cada colonia aislada está formada por la descendencia de una sola célula, y es por consiguiente, un cultivo puro.

## 5- MINAS ESTUDIADAS

En este apartado se detallan los resultados obtenidos en cada mina seleccionada, haciendo una somera referencia a la ubicación, geología y mineralización.

## 5.1- MINA EL ORO:

### Introducción General

Los principales metales presentes son el oro, cobre, plata y hierro. Esta mina registra explotaciones discontinuas desde el siglo pasado (1883), en 1939 la empresa Aminas inicia sus actividades con tareas de exploración, instalación de una planta de concentración. La explotación se practicó a partir de 1941 hasta 1943, recuperándose por amalgamación el oro libre y por flotación se obtenían concentrados de cobre con oro y plata que se comercializaba en esas condiciones.

El mineral explotado es del orden de 70.000 ton con ley promedio de oro de 11,6 gr/ton. Lo producido suma un total de 1300 ton de concentrado con 310 kg de oro fino, 208 kg de plata y unas 100 ton de cobre fino. Luego se trabajó en forma interrumpida desde 1956 hasta 1965, periodo en el que se extraen unas 26.000 ton de mineral con ley media de oro de 12 gr/ton.

La planta de concentración tenía una capacidad para procesar 100 ton/día contaba con circuitos de amalgamación y flotación.

### Ubicación

La Mina El Oro se encuentra a 25 km de Chilecito en línea recta y se accede por un camino que pasa por Guanchín, marginando el Río El Oro, y desde el pie de la cuesta se sigue por un camino de cornisa hasta el yacimiento.

### Geología

El yacimiento se encuentra en el sistema morfoestructural del Famatina, siendo las unidades lito-estratigráficas las siguientes: Sedimentos metamórficos (horfels, cuarcitas de la Formación Negro Peinado), Granitos (aplita) de la

Formación Ñuñorco; Pórfido cuarcífero, Lamprófiros; Andesitas y dacitas, Sedimentos aluviales.

Los minerales presentes son: pirita, calcopirita aurífera, en una ganga de cuarzo siderita - especularita (80%). La forma del yacimiento es vetiforme, y presenta un elevado número de estructuras mineralizadas de las cuales cuatro son las más importantes veta María Berta, Clara y Kimberley.

### Muestreo

De los socavones de la mina se tomaron las siguientes muestras, cuyas identificaciones son:

Las muestras del Nivel 700, corresponden a agua estancada, las del Nivel 500 a agua circulante. A dichas muestras se les tomó el pH natural que se consigna en la tabla siguiente:

Denominación	Tomada de	PH natural
M1 – María Norte	Nivel 700	2,80
M2	Nivel 700	3,44
M3	Nivel 700	3,29
M4 - BM	Nivel 500	3,24
M5 – B320	Nivel 500	2,75
M6 - Lluvia	Nivel 500	3,05

Para el aislamiento de las bacterias se utilizaron las muestras M1, M4, M5 y M6, para identificar los erlenmeyers se utilizó la nomenclatura 1, 2, 3 y 4 y I, II, III y IV para los *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans*, respectivamente.

De los resultados que se muestran en las Tablas 1 T y 1 F, se observa que los erlenmeyers I y IV correspondientes a los *A. thiooxidans* y los erlenmeyers 1 y 4 de los *A. ferrooxidans*, han alcanzado valores de pH bajos y Eh altos, indicando un crecimiento importante de bacterias en el cultivo y por consiguiente una elevada población de los mismos.

Primera siembra de *A. thiooxidans*:

Variable de control de pH				
Días	Frasco I	Frasco II	Frasco III	Frasco IV
1	2,34	2,20	2,41	2,25
5	2,31	2,15	2,36	1,94
8	1,72	2,12	2,32	1,48
12	1,60	2,06	2,28	1,43
15	1,48	2,00	2,26	1,39
	1,43	1,92	2,21	1,35

Primera siembra de *A. ferrooxidans*:

Días	Frasco 1		Frasco 2		Frasco 3		Frasco 4	
	Eh	pH	Eh	pH	Eh	pH	Eh	Ph
1	325	2,04	313	2,09	3,14	1,90	310	1,99
5	372	2,06	368	2,15	363	2,05	370	2,17
8	375	2,08	370	2,17	367	2,06	429	2,20
12	415	2,20	374	2,17	382	2,10	520	2,25
15	550	2,25	384	2,29	390	2,14	603	2,29
19	640	2,30	391	2,25	392	2,20	629	2,35

Segunda Siembra de A. thiooxidans

Variable de control pH		
Días	Frasco I	Frasco IV
1	2,38	2,35
5	2,03	1,97
8	1,89	1,60
10	1,60	1,48
11	1,45	1,26
12	1,09	0,98

Segunda Siembra A. ferrooxidans

Días	Frasco 1		Frasco 4	
	Eh	pH	Eh	pH
1	340	2,03	336	2,05
5	403	2,11	411	2,09
8	487	2,19	475	2,14
10	515	2,22	499	2,17
11	570	2,25	562	2,20
12	655	2,36	640	2,31

Primer repique A. ferrooxidans

Variable de control pH		
Días	Frasco I	Frasco IV
1	2,42	2,40
4	1,69	1,55
5	1,38	1,33



Primer repique A. thiooxidans.

	Frasco 1		Frasco 2	
Días	Eh	pH	Eh	pH
1	360	2,05	377	2,01
4	467	2,14	503	2,12
5	598	2,25	601	2,22

Segundo Repique A. thiooxidans

Variable de control pH		
Días	Frasco I	Frasco IV
1	2,42	2,40
4	1,69	1,55
5	1,38	1,33

Segundo repique A. ferrooxidans.

	Frasco 1		Frasco 4	
Días	Eh	pH	Eh	pH
1	376	2,03	389	2,10
4	515	2,20	545	2,21
5	600	2,35	603	2,29

Se tomaron estos frascos para continuar con el aislamiento de los microorganismos, en la etapa de enriquecimiento, y posterior mantenimiento de las cepas por sucesivos repiques.

Por observaciones microscópicas, se determinó la presencia de bacterias del tipo bacillus, en las aguas de la mina El Oro.

Para la observación al microscopio se tomaron 3 ml de cultivo, de los frascos I y IV correspondientes a los *A. thiooxidans* y, de los frascos 1 y 4 correspondientes a los *A. ferrooxidans*. Los 3 ml de cada uno de los frascos, se colocaron en tubos de Khan, para luego centrifugar por un período de 3 a 5 minutos. Posteriormente, se colocó una pequeña cantidad en un porta objeto para después llevar al microscopio.

El mantenimiento de las cepas se realiza por repiques sucesivos en medio de cultivo fresco. Esta metodología de mantenimiento de las cepas aisladas, se sustituyó posteriormente por la utilización de columnas con mineral de la mina El Oro, en las que percolará medio de cultivo inoculado con dichas bacterias.

## 5.2- CORDILLERA FRONTAL

### Información General

En la Cordillera Frontal Riojana, colindante con Chile, existen áreas anómalas, y donde los recientes descubrimientos de prospectos epitermales de oro en Chile y hacia el sur de San Juan confirman la existencia de una faja donde se alojan depósitos como La Coipa, El Refugio, Pantanillo, Pepa, Marte y otros, denominada Faja de Maricunga, y los depósitos del Valle del Cura (San Juan), vinculados estrechamente con el área de La Rioja.

Geológicamente la región se destaca por un vulcanismo terciario y cuartario, predominantemente andesítico, que sobreyace o intruye a granitos y pórfidos de edad permotriásicos.

En las vulcanitas se observan zonas de intensa alteración hidrotermal, argílica y sericítica, asociados a filones de cuarzo, fajas silicificadas y stockworks, dentro de un fondo de alteración propilítica regional.

### 5.3- AREA PEÑAS NEGRAS

Del sector Cordillera Frontal, se seleccionó el Area Peñas Negras, más específicamente el lugar donde se encontraba explorando la Compañía Minera El Dorado.

Se realizó un reconocimiento y muestreo de la cuenca superior del Río Peñas Negras y sus tributarios principales, en la alta cordillera riojana.

Durante el recorrido de muestreo, se observaron alteraciones hidrotermales de tipo argilítico.

En la siguiente tabla, se listan las muestras tomadas en el sector y sus referencias.

Pto. N°	Nombre	Observaciones
1	HITO	Punto de Referencia
2	LASPEN	Muestra de Agua
3	CAMPN	Campamento Minero
4	QPN	Referencia
5	QPN1AG	Muestra de Agua
6	QPN2AG	Muestra de Agua
7	VICAG1	Muestra de Agua
8	VICROCK	Muestra de Roca (trincheras)
9	QALT	Referencia
10	QTAAG1	Muestra de Agua y Roca
11	QTAMB	Referencia
12	QCAMVJ	Muestra de Agua
13	TRIN	Muestra de Roca (trincheras)
14	PNNAG3	Muestra de Agua

Sobre las muestras tomadas en el sector Peñas Negras – Cordillera Frontal, el pH determinado osciló alrededor de 6,5 y 7.

Es de destacar que de ciertos tributarios del Río Peñas Negras se utiliza el agua para consumo humano.

En las muestras tomadas, no se practicaron ensayos para la determinación de actividad bacteriana. Esto se debió a que las condiciones encontradas, no eran las propicias para el desarrollo de las bacterias intervinientes en el proceso de biolixiviación. Estos organismos se caracterizan por ser acidófilos, mesófilos, quimioautótrofos.

En el sector el agua superficial circulante proviene de deshielos recientes, con PH próximo a la neutralidad y las zonas mineralizadas no están expuestas, ni en contacto con la misma. Así también, la temperatura ambiental, se encontraba alrededor de los 5 °C, situación que inhibe el crecimiento de las bacterias objeto de este estudio.

### Información General

Los metales de interés comercial de este Distrito Minero son el oro, la plata, el molibdeno y el cobre. Los primeros trabajos en el distrito comenzaron en la segunda mitad del siglo pasado. En 1903 se fundó la “Famatina Development Corporation”. En 1904 se instaló el cable carril y en 1905 el establecimiento metalúrgico Santa Florentina. La explotación duró hasta 1926.

### Ubicación

El distrito se ubica en el flanco oriental de la Sierra del Famatina, a 35 km. al oeste-noroeste de la ciudad de Chilecito. Siendo sus coordenadas geográficas las siguientes: Latitud 29° 05'00” – Longitud 67° 43'00”.

### Yacimientos del Distrito

En este distrito se encuentran varios yacimientos, algunos de los cuales fueron trabajados en la misma época que se explotó la mina La Mejicana. Es el caso de la Mina Offir, encontrándose a unos 15 km. de La Mejicana. Presenta una veta de una corrida de 125 m. y potencia variable de 0,20 a 0,40 m. con mineralización de bornita y galena. Al oro se lo identificó en testigos de perforaciones, siempre en forma de chispas diseminados en una ganga silicéa-sericítica-arcillosa.

Entre estos yacimientos se encuentran las vetas de la denominada Quebrada ancha, y Montey, con mineralización similar a las anteriores. Esta última tiene un laboreo (corta veta).

## 5.5- MINA LA MEJICANA

### Muestreo

En esta mina, se tomaron tres muestras del Nivel Banco Nación, a las que se denominaron Ma, Mb y Mc. De las mismas el pH natural es de 3,25, 3,67, 3,76 respectivamente.

Para el aislamiento de las bacterias se utilizaron las muestras Ma, Mb y Mc, para identificar los erlenmeyers correspondientes a los T. ferrooxidans se utilizó la nomenclatura 1, 2, 3 y 1b, 2b, 3b respectivamente para originales y duplicados; y I, II, III y Ib, IIb, IIIb para los A. thiooxidans.

De los resultados que se muestran en las Tablas 1 T y 1 F, se observó que los erlenmeyers Ib, IIb y IIIb correspondientes a los A. thiooxidans y los erlenmeyers 1, 3 y 1b de los A. ferrooxidans, alcanzaron valores de pH bajos y Eh altos, indicando un crecimiento importante de bacterias en el cultivo y por consiguiente una elevada población de los mismos.

Tabla 1 T

Variable de Control pH						
Días	Frasco I	Frasco II	Frasco III	Frasco Ib	Frasco IIb	Frasco IIIb
1	2,16	2,34	2,46	2,41	2,48	2,47
2						
3						
4						
5	2,06	2,26	2,40	2,33	2,40	2,41
6						
7						
8	1,93	2,03	2,11	2,04	1,99	1,99
9						
10						
11						
12	1,67	1,74	1,72	1,76	1,66	1,63
13						
14						
15						
16						
17						
18						•
19	1,64	1,64	1,55	1,54	1,50	1,54
20						

Variable de Control pH						
Días	Frasco I	Frasco II	Frasco III	Frasco Ib	Frasco IIb	Frasco IIIb
1	2,16	2,34	2,46	2,41	2,48	2,47
2						
3						
4						
5	2,06	2,26	2,40	2,33	2,40	2,41
6						
7						
8	1,93	2,03	2,11	2,04	1,99	1,99
9						
10						
11						
12	1,67	1,74	1,72	1,76	1,66	1,63
13						
14						
15						
16						
17						
18						•
19	1,64	1,64	1,55	1,54	1,50	1,54
20						

Tabla 1 F

Días	Frasco 1		Frasco 2		Frasco 3		Frasco 1b		Frasco 2b		Frasco 3b	
	Eh	pH	Eh	pH	Eh	pH	Eh	pH	Eh	pH	Eh	pH
1	327	1,91	317	1,95	321	2,00	318	1,95	310	1,94	317	1,98
2												
3												
4												
5	359	1,95	335	1,96	339	2,02	357	1,98	334	1,92	337	1,97
6												
7												
8	400	1,95	348	1,91	452	2,22	415	2,10	350	1,90	352	1,95
9												
10												
11												
12	487	1,96	354	1,91	521	2,27	515	2,12	351	1,87	360	1,95
13												

Días	Frasco 1		Frasco 2		Frasco 3		Frasco 1b		Frasco 2b		Frasco 3b	
	Eh	pH	Eh	pH	Eh	pH	Eh	pH	Eh	pH	Eh	pH
14												
15												
16												
17												
18												
19	502	2,05	356	1,93	600	2,28	580	2,18	356	1,87	360	1,97
20												

Segunda siembra *Acidithiobacillus thiooxidans*

Variable de Control pH			
Días	Frasco Ib	Frasco IIb	Frasco IIIb
1	1,90	1,80	1,80
2			
3			
4			
5	1,88	1,71	1,72
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12	1,71	1,63	1,60
13			

Segunda siembra Aciditibacillus ferrooxidans

Días	Frasco 1		Frasco 3		Frasco 1b	
	Eh	pH	Eh	pH	Eh	pH
1	384	2,02	383	1,99	384	2,02
2						
3						
4						
5	502	2,45	425	2,41	411	2,32
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12	575	2,48	586	2,45	566	2,36
13						

Primer repique Aciditibacillus thiooxidans

Días	Variable de Control pH		
	Frasco Ib	Frasco IIb	Frasco IIIb
1	1,85	1,88	1,87
2			
3			
4			
5	1,87	1,88	1,86
6			
7			
8	1,75	1,74	1,72
9			
10			
11			
12	1,55	1,56	1,54
13			



Primer repique Aciditibacillus ferrooxidans

Días	Frasco 1		Frasco 3		Frasco 1b	
	Eh	pH	Eh	pH	Eh	pH
1	392	2,20	406	2,32	400	2,16
2						
3						
4						
5	420	2,35	562	2,32	560	2,30
6						
7						
8	557	2,45	597	2,46	599	2,44
9						
10						
11						
12	599	2,41	601	2,43	600	2,41
13						

Segundo repique Aciditibacillus thiooxidans

Variable de Control			
Días	Frasco Ib	Frasco IIb	Frasco IIIb
1	1,90	1,92	1,92
2			
3	1,80	1,78	1,83
4			
5	1,73	1,67	1,77

Segundo repique Aciditibacillus ferrooxidans

Días	Frasco 1		Frasco 3		Frasco 1b	
	Eh	pH	Eh	pH	Eh	pH
1	415	2,06	387	2,05	423	2,08
2						
3	556	2,42	564	2,07	574	2,43
4						
5	589	2,46	601	2,40	599	2,43

Se tomaron estos frascos para continuar con el aislamiento de los microorganismos, en la etapa de enriquecimiento, y posterior tratamiento de las cepas por sucesivos repiques.

Por observaciones microscópicas, se determinó la presencia de bacterias del tipo Aciditibacillus en las aguas de la mina La Mejicana.

El mantenimiento de las cepas se realizó por repiques sucesivos en medio de cultivo fresco. Esta metodología de mantenimiento de las cepas aisladas, se sustituyó mas adelante por la utilización de columnas con mineral de la mina La Mejicana, en las que percola medio de cultivo inoculado con dichas bacterias.

## 5.6- MINA KING TUT

### Información General

Los principales metales presentes en los minerales son el oro, y cobalto como principales y níquel, plata y bismuto como minerales secundarios.

### Ubicación

El yacimiento se localiza en las estribaciones occidentales del sistema montañoso del Famatina, a una altura de 2588 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas geográficas 28'23'57"S y 67'56'08"W. En el departamento Vinchina, a aproximadamente 60 Km al Norte de esta localidad y a 390 Km. de la ciudad de La Rioja.

El acceso desde Vinchina es por huella minera hasta el río Valle Hermoso, por el que se continúa hasta la Quebrada El Salto, y de esta hasta llegar a la mina.

## Geología del Yacimiento y Mineralización

La forma del yacimiento es vetiforme indeterminada con una veta principal y guías menores. La veta principal es la veta King Tut, con rumbo N 120, buzamiento 67 al EN, con una corrida de 250-270 mts, potencia 0,80 en una profundidad estimada en 100 a 150 mts.

### Interior de la Mina King Tut

Las rocas presentes en el área del yacimiento son predominantemente del tipo Vulcanitas Porfídicas: de color gris verdoso con matriz afanítica y fenocristales de cuarzo, y, Metamorfitas: de origen marino, principalmente filitas de color verdoso con presencia de cuarcitas o areniscas silicificadas.

La mineralización referida a vetas y vetillas, presenta óxidos y sulfuros, la manifiesta oxidación de las rocas de caja, aun a cierta distancia de las "vetas", insinúan la presencia de un "stokwork".

Esta mineralización es la portadora de oro, minerales de cobalto, níquel y arseniuros complejos.

La mina "King Tut" tiene dos niveles horizontales, estos socavones se encuentran por arriba del nivel del río, construidos sobre la veta, en los cuales se realizó el muestreo de mineral húmedo (del techo de la labor) y recolección de agua estancada (en el piso) y en algunos sectores goteando del techo. Las que se acondicionaron debidamente para su traslado al laboratorio y análisis.

Los minerales presentes son: arsenopirita, pirita cobaltífera, cobaltina, pirita, pirrotina, marcasita, calcopirita, oro, bismuto nativo, bismutina y bornita. La arsenopirita cobaltífera y la pirita conforman el 90 % de la mena en ganga de cuarzo y pizarras estimada en 15 %. El tipo de mineralización es masiva y probablemente el oro en pizarra se presenta diseminado.

## Escombrera Mina King Tut

### Muestreo

El muestreo se realizó en sectores en donde la mina tiene presencia de agua y/o mineral húmedo.

Las muestras identificadas con MA 1,2 y 3, fueron recogidas en lugares con agua estancada y circulando en el piso de la labor. Las muestras MA 4,5 y 6, de mineral húmedo del techo de la labor, ambos grupos con posibilidad de tener presencia de bacterias.-

### Preparación de las Muestras

Una parte de las muestras de minerales MA 4, 5 y 6, se mezclaron formando una mezcla común, obteniéndose una muestra tal cual denominada M 1. A esta se le realizó un scraber, con solución acidulada con ácido sulfúrico, a pH 2.-

Se agito durante 30 minutos y luego se realizó la separación sólido líquido, por decantación . De este líquido sobrenadaste, se tomaron dos alícuotas identificadas como TTI y TFI, para ensayos de Aciditibacillus thiooxidans y ferroxidans.-

Dos porciones más de la muestra común identificadas como M2 y M3 fueron molidas a - 6 mm y -3 mm respectivamente, y se las sometió a un tratamiento similar a la muestra M I.-

Se separó el sólido del líquido y sobre este último se tomo dos alicuotas para cada ensayo, resultando:

M 2	Alicuota TT2 p/ensayo c/ thiobacillus thiooxidans Alicuota TF2 p/ensayo c/ thiobacillus ferrooxidans
M 3	Alicuota TT3 p/ensayo c/ thiobacillus thiooxidans Alicuota TF3 p/ensayo c/ thiobacillus ferrooxidans

Estos dos ensayos se realizaron por duplicado, teniéndose cuatro muestras (2 para A. thiooxidans y 2 para A. ferrooxidans).-

Las muestras de agua extraídas acusaron los siguientes valores de pH :

MUESTRA	PH
MA 1	7,2
MA 2	6,8
MA 3	7,0

Como las tres muestras aparentaban tener características similares, se tomaron partes iguales y se realizó una muestra común de agua de la que se prepararon dos alicuotas TT6 y TF6, para la determinación de bacterias.-

### Ensayos

Los ensayos se prepararon para determinar Acidithiobacillus thiooxidans de las muestras TT, 2, 3, 4, 5 y 6, y Acidithiobacillus ferrooxidans de las muestras TF, 2, 3, 4, 5, y 6.-

Las muestras fueron aciduladas con  $H_2SO_4$  hasta pH 2, se sembraron 10 ml de cada muestra en 100 ml del medio 9K, contenidos en frascos erlenmeyer de 250ml, como etapa de enriquecimiento y se incubaron a 30°C en una mesa agitadora (200 rpm). Además se adicionó  $FeSO_4$  (30mgr/lts) a las muestras TF y azufre sublimado en polvo a las muestras TT (3gr/lts). Los resultados se pueden apreciar en las tablas.

Si bien las muestras extraídas presentaron valores de pH cercanos a la neutralidad, condición desfavorable para la existencia de A. Ferrooxidans y A. Thiooxidans, se realizaron todos los ensayos de aislamiento ya que la fuerte oxidación de las labores y su mineralización indicaban la posible presencia de los microorganismos.

Eh Aciditibacillus Ferrooxidans

FECHA	3/9/1998 mv	7/9/1998 mv	9/9/1998 mv	11/9/1998 mv	15/9/1998 mv
Muestra N°1	369	355	347	344	348
Muestra N°2	369	351	346	348	352
Muestra N°3	370	354	351	355	355
Muestra N°4	382	357	352	361	357
Muestra N°5	382	363	354	365	361
Muestra N°6	370	329	325	337	337

pH Aciditibacillus Ferrooxidans

FECHA	3/9/1998 mv	7/9/1998 mv	9/9/1998 mv	11/9/1998 mv	15/9/1998 mv
Muestra N°1	1.83	1.76	1.65	1.63	1.65
Muestra N°2	1.86	1.82	1.74	1.72	1.72
Muestra N°3	1.87	1.81	1.72	1.67	1.64
Muestra N°4	1.84	1.78	1.68	1.65	1.64
Muestra N°5	1.78	1.72	1.66	1.66	1.62
Muestra N°6	1.83	1.76	1.72	1.74	1.74

pH Aciditibacillus Thiooxidans

FECHA	3/9/1998 mv	7/9/1998 mv	9/9/1998 mv	11/9/1998 mv	15/9/1998 mv
Muestra N°1	2.63	2.22	2.35	2.04	2.07
Muestra N2	2.58	2.36	2.45	2.28	2.3
Muestra N°3	2.58	2.33	2.38	2.11	2.1
Muestra N°4	2.59	2.41	2.47	2.3	2.31
Muestra N°5	2.42	2.28	2.34	2.2	2.2
Muestra N°6	2.88	2.67	2.71	2.51	2.49

## 5.7- LOS COLORADOS

La explotación minera de Los Colorados, Patquia, efectuada en la presente década, tuvo por objeto la obtención de concentrado de uranio para el mercado nacional. Los minerales económicos presentes en el yacimiento son Botwodita  $K(UO)(SiO OH) \cdot 5H_2O$ , Metaautunita  $Ca(UO)PO$  y Uranofano  $Ca(UO)(SiO OH)$ , acompañados por diversos metales pesados.

La explotación se realizó a cielo abierto, dada la superficialidad y afloramiento de la formación.

En 1996, la empresa que explotaba este yacimiento finaliza su labor extractiva, desmonta el campamento y la planta, se cierra el acceso a la mina y se cubren las pilas.

### Ubicación y Acceso

La explotación de uranio de Los colorados, se encuentra en el paraje del mismo nombre al que se accede por la Ruta nacional 74, ingresándose en el km. Lugar en el que se encuentra el establecimiento para captar el agua que abastece a Patquia. Este Punto se encuentra en los  $29^{\circ} 59,376'$  de latitud y  $67^{\circ} 03,377'$  de longitud.

### Los Colorados

La pilas de mineral lixiviado se encuentran a 2,5 km del acceso y el pit se encuentra hacia el sudeste, a 2 km de distancia de este punto.

El pit, abandonado, presenta un acceso peligroso ya que la pendiente y altura del talud y el estado de la roca no resultan compatibles. También puede considerarse precario el equilibrio en el lado occidental de la labor.

## Geología

El yacimiento se encuentra dentro de la formación Saladillo (Edad Carbónica), compuesta de sedimentitas clásticas continentales tales como areniscas, lutitas, conglomerados etc. Se presenta como un modelo típico Roll Front, con un frente reductor, un frente mineralizado y un frente oxidante.

La mineralización se presenta en paquetes de 5 a 12 metros con una corrida de más de 400 metros.

Las determinaciones mineralógicas dieron diferente resultado en los distintos horizontes pero en general aparecen abundante hematita-gohetita, escasa turmalina-rutilo y en cuanto al uranio, se encuentran sus minerales en forma de pátinas, relleno de fisuras y planos de debilidad en la forma de uranofano, boltwodita tyuyaminita, autunita y torbenita. También hay cobre presente como malaquita, azurita, calcopirita, bornita y calcocina, asociados a otras como pirita, calcita y fluorita. El cuarzo alcanza un 40% y la mica el 5%, en las muestras estudiadas.

Las anomalías radiactivas y de metales pesados presentes en las aguas subterráneas pueden ser detectadas en varios km alrededor del yacimiento, presentando valores que varían entre 1 y 120 ppb de uranio y de otros elementos tales como Mo, V, Cu, Pb, Zn y As.

Cuando estas soluciones de Uranio se encuentran con horizontes permeables que contienen materia carbonosa, petróleo, carbón, piritas, arcillas, calcitas u óxidos de hierro, son reducidas provocando su precipitación y deposición en las mismas.

## Muestreo y Resultados

Presencia de agua meteórica en el fondo de la explotación abandonada



Muestreo de agua en el pit.

La inactividad de la mina ocasionó que se acumulara el agua de lluvia, la que se infiltra y evapora con un régimen inferior al de los aportes. La presencia de agua es ya permanente por lo que se tomo una muestra para determinar si se daban las condiciones para la existencia de bioactividad relacionada con este proyecto.

Se tomaron muestras de agua las que presentaban indicios de vida. El punto muestreado presenta una posición de 30° 00,08' de latitud y 67° 04,357' de longitud.

El agua muestreada registra un pH de 7,32, 8,4 mgr/l de oxígeno disuelto y un Eh de 183,6 mv. En estas condiciones no es posible el desarrollo de T. thiooxidans y T. Ferrooxidans.

## 5.8- MINA HELVECIA

Con centro en la Mina Helvecia, encontramos esta área que cubre una superficie de 200 Has y que presenta una rica mineralización de Pb Zn Ag y Ba.

### Información General y Ubicación

El área se ubica unos 22 Km en línea recta al oeste de la localidad de Guandacol, en el ambiente geológico de Precordillera y a una altitud media de 2.700 m s.n.m.

El relieve de la región se caracteriza por grandes elevaciones como el Cerro Urcuschum (3.321 m) que es el principal accidente orográfico del cateo y profundas quebradas con laderas de pronunciada pendiente. Se trata de un relieve rejuvenecido, en el que el drenaje retrocedente trabaja activamente recortando una escabrosa morfología especialmente en las calizas y areniscas.

En la zona de la mina no hay agua de superficie, siendo también muy escasa en las labores más profundas.

## Geología

El ámbito geológico regional corresponde a la cuenca geo-sinclinal desarrollada durante el paleozoico, iniciándose la secuencia estratigráfica en el Ordovícico con la depositación de las calizas de la F. San Juan, las lutitas Gualcamayo y el conglomerado Las Vacas.

## Mineralización

Los principales minerales primarios encontrados en la mena son: blenda, galena y baritina y en orden decreciente en abundancia: pirita, calcopirita, tetraedrita, pechblenda, calcita y cuarzo. Estos han sido sin duda la principal mena de zinc explotada en este yacimiento.

Las especies más abundantes son Smithsonita y Hemimorfita que en conjunto son denominadas por los mineros "calaminas". Tienen frecuentemente formas arriñonadas y de costras, con colores variados amarillo ambar-pardo rojizos y verdes en el caso del carbonato y grises claros a oscuros el silicato. Además se determinó Auricalcita de color celeste claro, intimamente mezclada con Hidrozincita de color blanco.

## Mineralización Primaria

Brodtkorb propone tres tipos de mineralizaciones primarias, singenéticas, asociadas a diferentes sucesos geológicos y en estrecha relación con eventos geomorfológicos y climáticos. En sentido geocronológico son los siguientes:

(1) TIPO I: Se presenta en las calizas de la F. San Juan.

(2)TIPO II: Es la mineralización que se presenta en la galería La Solitaria entre los 286 y 341 m. Se observan texturas sedimentarias primarias dadas por calcos de carga y precipitaciones coloidales de blenda.

(3)TIPO III: Está muy generalizado. Consta de baritina de grano grueso, espática, rodeada por nódulos de galena con escasa blenda y pirita.

La oxidación de los minerales ha sido intensa en toda el área, favorecida por la pendiente topográfica de los bancos y la ventana erosiva que dejó al descubierto un gran número de afloramientos.

La circulación de las aguas se vió favorecida por el contacto arenisca - calcáreo y la relativa impermeabilidad de este último.

La lixiviación de los minerales de zinc ha constituido depósitos secundarios (calaminas) de alto valor económico. Thebault distingue dos tipos principales de yacimientos:

Entre las labores subterráneas mas importantes podemos distinguir  
GRUPO BOLSON LA SOLITARIA

La mineralización principal es de zinc, bajo la forma de smithsonita, en lentes de pequeño porte (2 m a 5 m de diámetro y 0,50 m a 1,20 m de espesor) pero con cierta continuidad y conectados entre sí por venas mineralizadas. Generalmente se encuentran vinculadas a la brecha calcárea, que forma pilares estériles de 2 m a 3 m de espesor separando estas lentes.

Es de destacar que estas labores desde superficie hasta la galería principal, a pesar de su irregular disposición, constituyen un excelente perfil vertical al ir cortando todas la unidades litológicas presentes en la mina.

El muestreo de tres lentes arrojó los siguientes resultados:

Zn: 40 a 49 %

Pb: 0,2 a 0,4 %

Ag: 40 a 70 gr/tn  
Cd: 0,12 a 0,23 %

Se extrajeron muestras de agua de tres sectores diferentes y se midió el pH, Eh y oxígeno disuelto, in situ, arrojando los siguientes valores.

Muestra N°	pH	Eh (mv)	Oxígeno disuelto mg/l)
A	7,6	189,7	9,7
B	7,2	174,3	10,5
C	7,9	180,5	9,3

En estas condiciones de pH y Eh, se hace imposible el desarrollo de los microorganismos en estudio.

## 5.9- SECTOR SIERRA DE LAS MINAS

### Información General

Las sierras constituyen una unidad geográfica localizada en el extremo austral de la provincia de La Rioja y el límite N de la provincia de San Luis enmarcándose el sector de estudio entre las coordenadas Geográficas 31°30' y 31° 49' de latitud sur y 66°18' y 66°24' de longitud oeste, abarcando a los Dptos. Rosario Vera Peñaloza y San Martín, en La Rioja y Ayacucho, en San Luis.

### Geología Regional

Las Sierras de las Minas y Ulapes integran el sistema de Sierras Pampeanas, constituido en su mayor parte por rocas del basamento cristalino, sobre las que se apoyan en discordancia angular sedimentos paleozoicos continentales del Grupo Paganzo y sobre éstos y el basamento, otros sedimentos continentales de edad terciaria de los Estratos de Los Llanos y por último depósitos cuaternarios de origen eólico poco y nada consolidados.

El basamento, de edad precámbrica Superior y/o Paleozoica Inferior, está compuesto por rocas tonalíticas y granodioritas de la formación Chepes con sus tres facies: Normal, Migmatítica y Porfírica, el granito Las Asperzas con sus diques aplopegma-títicos y filones cuarzosos y la formación Migmatita Ulapes. La formación Chepes, con afloramientos continuos, constituyendo la mayor parte de la masa rocosa de la sierra; el granito intru-yéndola como un cuerpo estrecho y alargado de más de 20 Km de longitud, formando la dorsal de la sierra; y las migmatitas a su vez, también como una faja estrecha de unos 50 Km de largo, que aflora a lo largo del borde oriental de las sierras.

### Yacimientos Minerales

Los yacimientos de La Sierra de Las Minas consisten en vetas de cuarzo portadoras fundamentalmente de Au y minerales de Cu, Pb, Fe, Zn y Ag alojados en el basamento cristalino, subverticales, orientados según las alineaciones: N 30° a 75°E; N 45° a 75° W y N 85° W a E-W, coincidiendo con el mismo rumbo de los juegos de diaclasas principales. El diaclasamiento rumbo N-S, que concuerda con la foliación secundaria, está en relación con la mineralización, en los Distritos El Abra y Portezuelo de los Arces.

Los distritos mineros que encontramos dentro del área de la Sierra de Las Minas son los siguientes:

- A. "El Retamo"
- B. "San Isidro"
- C. "El Espinillo"
- D. "Las Callanas"
- E. "El Abra"
- F. "Portezuelo de los Arces"

#### 5.10- DISTRITO LAS CALLANAS - *Mina Bella Francia (Callana V)*

Se ubica a 5 Km al ENE de la localidad del Totoral, en las coordenadas geográficas 31° 41'24,4" S y 66° 21'34.4" W. Se trata de manifestaciones auríferas, emplazadas en la facie migmatítica, formada por granodioritas biotíticas y tonalitas, débilmente alteradas (en la muestra 2NL029 de la JICA se observa sericita mediante rayos X).

El sistema vetiforme presenta dos direcciones: uno N 30° a 50° W, inclinación 80° E. ancho variable de 1 m a 2 m, que incluye la zona de cizalla, con corrida estimada en 300 m y el otro E-W. Se comprobó una temperatura de homogenización de 171°C de promedio.

### Muestreo

Sobre la labor 3, se detectó agua, posiblemente de origen meteórico. Se tomaron muestras de agua y mineral.

Se realizaron determinaciones in situ de pH, Eh y oxígeno disuelto, arrojando los siguientes valores:

pH	8,2
Eh	199 mv
OD	7,8 mgr/l

Con estos valores, no es posible el desarrollo de los T. ferrooxidans y los T. thiooxidans, por lo que se descarta la presencia de los mismos.

### 5.11- MINA GEORGETTE – GRUPO MINERO CERRO NEGRO

La mina Georgette se encuentra en la vertiente oriental de la Sierra del Famatina, Departamento Chilecto, provincia de La Rioja y las coordenadas geográficas de la bocamina principal son aproximadamente 29° 03' 51" Latitud Sur y 67° 43' 09" Longitud Oeste.

Desde Chilecito a la mina puede accederse en vehículo hasta Santa Florentina, hacia el oeste, por 7 km de camino consolidado y desde ésta hacia el paraje denominado La Placeta, a través de 17 km de huella minera, bordeando el Río del Oro. Luego, el recorrido hasta la mina culmina con un ascenso de 2 hs. de duración a lomo de mula.

El campamento de la mina está por encima de los 3.600 m.s.n.m., cuenta con pequeños sumideros de agua en los alrededores.

## Geología Local

En el sector de estudio se reconocieron las formaciones geológicas que a continuación se describen

### Negro Peinado:

Este da el marco topográfico al sector y está constituida por un potente complejo metasedimentario de origen marino que presenta colores gris verdoso hasta negro. Se identificaron pizarras como las de mayor abundancia y metacuarcitas en forma subordinada.

Los estudios microscópicos permitieron determinar la presencia de sedimentitas que poseen variaciones en el grado de metamorfismo según el material original y las alteraciones producidas en la mineralogía.

De modo tal que hasta el momento se considera para el sector Georgette el juego de fracturas NE - NW como el responsable de la mineralización asociada a los cuerpos subvolcánicos.

Con posterioridad a los minerales citados, se depositaron en fina secuencia bandas milimétricas de siderita y blenda criptocristalina, con inclusiones esporádicas de galena, en cristales de hasta 80 micras. Cuarzo y baritina integran los restantes minerales de ganga. Cabe destacar la presencia abundante de baritina, reconocida en una estructura de rumbo NW.

Schalamuk et al, (1974), en su estudio sobre la vecina mina Peregrina, citan la misma mineralogía más la presencia de plata nativa, piritita, calcopiritita, especularita y cerargirita (plata cornea).

Ríos Gómez, 1.994, comenta que para el conjunto del distrito minero, la proporción de los minerales en cada estructura es variable. Cita entre otros, minerales argentíferos, argentita, sulfosales de Ag, y Ag y Cu.

Resumiendo, podemos decir que la mina Georgette, en el distrito Cerro Negro, es parte de un clásico sistema de vetas de Ag-Pb-Zn, periférico a las vetas de alta sulfuración de Cu-Au de La Mejicana. Las posibilidades de una explotación rentable de oro son muy bajas para este sector de pequeñas dimensiones, pero se considera útil la investigación regional de este tipo de modelo, para poder localizar estructuras de características; más, favorables, en la zona del Famatina.

El emplazamiento de las vetas, su mineralogía y texturas asociadas hacen suponer que se trata de un depósito epigenético hidrotermal que ha rellenado fracturas, de tipo epi a mesotermal, asignado al período terciario.

#### Muestreo y Resultados Obtenidos

Se extrajeron muestras de agua del fondo de sus labores, que presentaron los siguientes valores en las mediciones tomadas in situ:

PH 5,8

Eh 181,9 mv

Debido a que el pH dio un valor por debajo de 7, aunque elevado para la existencia de bacterias, se realizó todo el proceso de aislamiento. Los resultados obtenidos fueron negativos respecto de la presencia de microorganismos en las muestras estudiadas.

#### 6- CONCLUSIONES



En los estudios realizados se encontraron dos prospectos que presentaron resultados positivos. Estos corresponden a la mina El Oro y mina La Mejicana, ubicadas en la Sierra de Famatina.

Ambas minas presentan un fuerte drenare ácido (aguas con pH 2,5) y metales pesados en solución.

Los valores de algunos metales pesados encontrados a nivel de boca mina fueron:

Metal (mgr/l)	La Mejicana	El Oro
Cobre	348, 00	125,00
Cadmio	0,16	0,12
Zinc	126,00	157,00

## 7- BIBLIOGRAFIA

- ◆ Calbo V., Mas M. A., 1999. "Informe: Muestreo Los Colorados" (Estudio de Bioactividad Presente en las Minas Metalíferas de La Rioja).
- ◆ Dugan P. L. & Apel W. A. 1983. "Bacteria and acid drainage from coal refuse: inhibition by sodium lauryl sulfate and sodium benzoate. Appl. Environ. Microbiol. 46: 279-282.
- ◆ Garcia Jr. O. 1985. "Isolation and purification of *tiobacillus ferrooxidans* and *Aciditiobacillus thiooxidans* from some coal and uranium mines of brazil". Rev Microbiol., 22: 1-6.
- ◆ Garcia Jr. O. 1985. "Isolamento de linhagens de *tiobacillus ferrooxidans* and *Aciditiobacillus thiooxidans*" Anais da XII Reuniao Anual de Genética de Microorganismos, UFOP, Ouro Preto. M. G. , P. 26
- ◆ Loredó Pérez J., 1997. "Contaminación de Aguas" (Proyecto FOMEC 465).
- ◆ Lundgren D. G. & Tano T. 1978 "Structure function relationship of thio *bacillus*

relative to ferrous iron and sulfide oxidations. In: L. E. Murr, J. A. Brierley, A. E. Torma (Eds.). Metallurgical application of bacterial leaching and related phenomena, Academic Press, New York, P. 151-166

- ◆ Mas M A, Calbo V.1999. “Estado De Una Explotación Minera Abandonada - La Rioja”
- ◆ Morelli J.R. , Azcuy C.L., Hunicken M., Limarino C.O., Pensa M.V., 1984, “El Grupo Paganzo en Los Colorados de Patquia, La Rioja”.
- ◆ Ríos Gómez Julio, Características Geológicas y mineralógicas del distrito Cerro Negro – La Rioja.
- ◆ Schalamuk I y Otros, Mineralización del Distrito Minero Cerro Negro – Chilecito – La Rioja
- ◆ Silverman M. P. & Lundgren D. G. 1959. “Studies of the quemoautotrophic iron bacterium *ferrobacillus ferrooxidans*”, An improved medium and harvesting procedure for securing high cell yields. Jour. Bacteriol. 77: 642-647
- ◆ Touvinen O. H & Kelly D. P.1972. “Biology of *Aciditibacillus ferrooxidans* in relation to the microbiological leaching of sulphide ores”, Z. Allg. Microbiologie, 12: 311-346
- ◆ Wetten, Anibal F., Evaluación Geologicominera de la Mina Georgette.
- ◆ YAMIRI SEM - Informe Geológico Sector Sierra De Las Minas.
- ◆ YAMIRI SEM - Informe Geológico Mina Helvecia.

# SEGUNDA PARTE

## REDUCCIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL EN UNA MINA CERRADA

### 1- INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es el informe final del proyecto de investigación Reducción del Riesgo Ambiental en una Explotación de Uranio Abandonada, por Aplicación de Biolixiviación.

Contiene, en primer lugar el marco teórico, en el que se hace un análisis de los minerales de uranio en sí, de la lixiviación bacteriana y la justificación de su utilización como método de recuperación del uranio remanente en las pilas abandonadas.

También se analiza la forma de explotación de la mina Los Colorados y el tratamiento al que fue sometido el mineral.

Se incorpora un informe geológico y se desarrolla un informe crítico ambiental del estado de la explotación abandonada y el área de influencia

Se practicaron los estudios mineralógicos de muestras extraídas de la mina de uranio y de las escombreras de la mina La Mejicana, esto último con el objeto de utilizarlo como mineral portador de sulfuros primarios.

Finalmente se realizaron los ensayos pertinentes para evaluar la recuperabilidad del uranio residual y se proponen las medidas de mitigación del daño ambiental.

### 2- MARCO TEORICO

## 2.1- URANIO

### 2.1.1- Historia:

El elemento químico Uranio, fue descubierto en 1789 por M H Klaproth, mineralogista y químico alemán, quien lo bautizó con ese nombre en honor al descubridor del planeta Urano. Lo aisló a partir del mineral de Pechblenda, por reducción.

Desde su descubrimiento y durante 100 años, su única aplicación fue la coloración de vidrios y cerámicas .

En 1897 Beckerel descubre la radiactividad del uranio y el matrimonio Curie en 1898 profundiza los estudios. Desde entonces, el uranio ha adquirido constantemente importancia estratégica e industrial. El descubrimiento del isótopo U235, fue trascendental en el desarrollo del uranio.

La explotación de minerales de uranio fue creciendo desde fines de la segunda guerra mundial llega a 20.000 toneladas anuales, en la década del 80. La crisis del petróleo y el desarrollo de centrales dio otro impulso a la producción. Para la década del 90 la producción mundial alcanzaba las 38.000 toneladas anuales.

### 2.1.2- Propiedades químicas:

El uranio (P. atómico = 238,07), como elemento químico, está constituido por tres isótopos con número atómico 92 y masas respectivas de U238, U235 y U234. De ellos, el de masa 235 es el de mayor importancia, al experimentar fisión nuclear bajo la acción de neutrones lentos y el que le da propiedades radioactivas al uranio.

La proporción de los tres isótopos es distinta en el uranio de los diferentes compuestos; en la pechblenda es de 99,29, 0.71 y 0,005% respectivamente, por lo que los minerales y el uranio metálico son poco radioactivos.

En sus diferentes composiciones se presenta en varios grados de oxidación (II), (III), (IV), (V) y (VI). De todos ellos, los compuestos más importantes son los de valencia IV y VI, que forman parte de la mayoría de los minerales existentes en la naturaleza.

El fundamento básico de la hidrometalurgia del uranio se basa en el hecho de que los minerales con U (IV) o sea catión uranoso  $U^{4+}$ , son poco solubles en medio ácido y en medio alcalino, no así los minerales con U (VI). En la fig., se representa el comportamiento de ambos cationes según el diagrama de E-pH.

Cation  $U^{4+}$  es de color verde esmeralda. Por acción del oxígeno u otro oxidante, pasa a U (VI) como catión  $U^{6+}$ .

Existe cierta semejanza en el comportamiento de los cationes  $U^{4+}$  y el  $Th^{4+}$ , a tener en cuenta para la posible recuperación de este metal.

Cation  $U^{6+}$ . Debido a la gran acidez de este catión, a valores bajos de pH, realmente el que existe es el catión  $UO_2^{2+}$  y a valores más altos puede precipitar como  $UO_2(OH)_2$ .

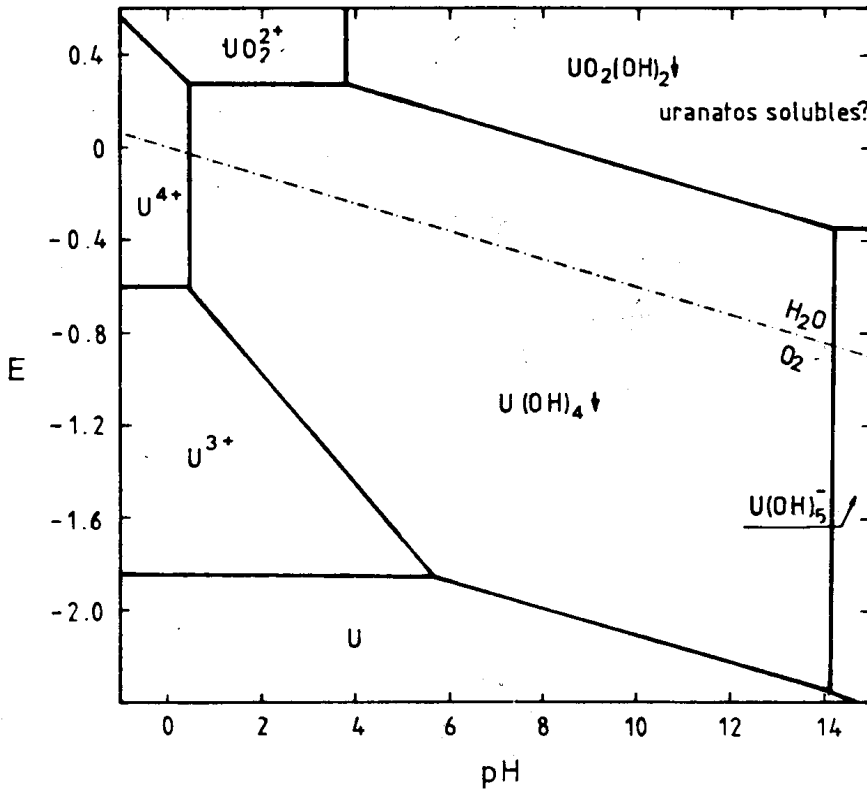
La estructura de este catión hexavalente es lineal, con un enlace U-O muy fuerte que le confiere una gran estabilidad. Posee dos propiedades importantes para la hidrometalurgia extractiva del uranio:

1- Formar complejos en solución acuosa con casi todos los aniones comunes, la mayoría inorgánicos. Estos complejos son solubles en agua y los formados por los aniones  $CO_3^{2-}$  y  $SO_4^{2-}$  son fuertemente retenidos por ciertas resinas, dando lugar al proceso de extracción por cambio iónico.

2- Solubilidad de algunos compuesto de uranilo ( $UO_2$ ) en disolventes orgánicos. Se piensa que esto es debido a la estructura lineal del catión, que está rodeado por seis oxígenos situados en su plano diametral al eje del ión y que pertenecen a seis moléculas de agua. Dichos oxígenos pueden ser sustituidos parcial o totalmente por otros grupos dadores de electrones, de j anión asociado o del disolvente orgánico, rodeando al ión uranilo de una atmósfera de características semiorgánicas que favorece su disolución en el medio orgánico. Es el

fundamento de la mineralurgia extractiva del uranio: extracción por compuestos organo-fosforados y extracción por soluciones en hidrocarburos de aminas de alto peso molecular.

En el siguiente diagrama E-pH se puede observar el comportamiento del ion uranio y su comportamiento hidrometalurgico.



### 2.1.3- Geología y mineralogía:

Según la IAEA, International Atomic Energy Agency, los tipos de yacimientos de uranio y su distribución es la siguiente:

Sedimentarios (areniscas)	44%
Hidrotermales (filones)	22%

Conglomerados	19%
Pizarras	8%
Otros	7%

### PROPIEDADES MICROSCOPICAS DE MINERALES DE URANIO

MINERAL	COLOR VISUAL	COLOR AL MICROSCOPIO	REFLECTANCIA % EN AIRE	REFLECCIONES INTERNAS	DUREZA (VHN) kg/mm <sup>2</sup>	OTRAS PROPIEDADES
Uraninita	Negro	Marrón – Gris	16,1	Marrón	792–813	Pulimento suave
Pechblenda	Negro	Marrón – Gris	16,0	Marrón	499–548	Textura coloforme
Cofinita	Negro	Gris	7,5 – 7,8	Marrón claro	230–302	–
Brannerita	Negro	Gris	15,1	Amarillo intenso	690	Con anatase
Davidita	Negro	Gris	17,2	Marrón claro	809–907	Con rutilo o ilmenita
Uranotorita	Negro	Gris	9,5 – 9,7*	Blanco	974–988*	Cristales tetragonales
Tucholita	Negro	Marrón – Gris	hasta 15	–	150–230* elástico	Anisotropía, dos fases
Carnotita	Amarillo	Amarillo–Gris	5,5 – 6,0*	Amarillo intenso	33–37* (25 g)	Granos finos. Pobre pulimento
Yuyamunita	Verde	Gris	5,1 – 5,2*	Verde intenso	37–44* (25 g)	Granos finos. Pobre pulimento
Kasolita	Marrón	Gris	10,6*	Marrón intenso	665* (100 g)	Poroso
Formalerita	Naranja	Amarillo–Gris	8,9 – 9,4*	Naranja–amarillo intenso	193–222* (25 g)	–
Vandendriechita	Amarillo ligero	Gris	6,1 – 6,2* ligero	Blanco a amarillo intenso	102–117* (25 g)	–
Sodyita	Amarillo	Gris oscuro	4,7 – 4,9*	Blanco a blanco amarillento	606–762* (100 g)	Pobre pulimento. Rajas
Beta–uranofano	Verde–amarillo	Gris	6,4 – 6,8*	Blanco intenso	96–115* (25 g)	Buen pulimento

## CLASIFICACION MINERALES DE URANIO

		FORMULA	% U	DUREZA	p.e.
<b>1. MINERALES CON URANIO TETRAVALENTE</b>					
- URANINITA - Pechblenda	OXIDO SIMPLE	UO <sub>2</sub>	46,5-88,2	5-6	7,5-10,9
- COFINITA	SILICATO	U (SiO <sub>4</sub> ) <sub>1-x</sub> · (OH) <sub>4x</sub>	40,9-60,2	5-6	2,2- 5,1
- URANOTORITA	SILICATO	(U,Th)O <sub>2</sub> · SiO <sub>2</sub>	45,9	2-3	3,5-3,8
<b>2. MINERALES CON URANIO HEXAVALENTE</b>					
<b>OXIDOS HIDRATADOS</b>					
- PARA Pechblenda	OXIDO DE U (U <sup>6+</sup> >U <sup>4+</sup> )	-	-	-	-
- GUMMITAS	UO <sub>3</sub> .n H <sub>2</sub> O	-	-	-	-
- SCHOEPITA	4.UO <sub>3</sub> . 9 H <sub>2</sub> O	-	-	-	-
<b>SALES DE URANIO HIDRATADAS</b>					
- CARNOTITA	VANADATO (hidrat)	K <sub>2</sub> (UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (VO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .3 H <sub>2</sub> O	52,8-55,0	1-2	4,7
- YUYAMUNITA	VANADATO (hidrat)	Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (VO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .5-8 H <sub>2</sub> O	49,4-54,1	3,3-4,3	2
- TORBERNITA	FOSFATO (hidrat)	Cu(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .12 H <sub>2</sub> O	47,1	2-2,5	3,2
- AUTUNITA	FOSFATO (hidrat)	Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .10-12 H <sub>2</sub> O	48,3-50,1	2-2,5	3,05-3,2
- SALEITA	FOSFATO (hidrat)	Mg(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .8-10 H <sub>2</sub> O	50,9-53,0	2-3	3,3
- URANOSPINITA	ARSENIATO (hidrat)	Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .10 H <sub>2</sub> O	45,9	2-3	3,5-3,8
- ABERNAYITA	ARSENIATO (hidrat)	K <sub>2</sub> (UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> . 6 H <sub>2</sub> O	45,8	-	3,7
<b>3. MINERALES DE URANIO REFRACTARIOS</b>					
- DAVIDITA	OXIDO MULTIPLE	A <sub>6</sub> B <sub>15</sub> (O,OH) <sub>36</sub> <sup>(1)</sup>	hasta 4,4	6	4,5
- BRANNERITA	OXIDO MULTIPLE	A B <sub>2</sub> O <sub>6</sub> <sup>(2)</sup>	26,5-43,6	4, 5-5	4,2-5,4
- ABSITA	OXIDO MULTIPLE	Variedad de la Brannerita <sup>(3)</sup>	-	-	-
- EUXENITA	OXIDO MULTIPLE	A B <sub>2</sub> O <sub>6</sub> <sup>(4)</sup>	0,6-12,45	5-6,5	4,8-5,9
- PRIORITA	OXIDO MULTIPLE	A B <sub>2</sub> O <sub>6</sub> <sup>(5)</sup>	0,4-3,4	5-6	4,8-5,0
- PIROCLORO	OXIDO MULTIPLE	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (0,OH,F.) <sup>(6)</sup>	1,4-17,1	5-5,5	4,2-6,4

(1) A = Fe<sup>2+</sup>, tierras raras, U, Ca, Zr, Th;

B = Ti, Fe<sup>3+</sup>, V, Cr

(2) A = Principalmente U, con Ca, Fe, Th. ;

B = Principalmente Ti y Fe

(3) A = Th, U, Ca, Fe, Y;

B = Ti

(4) A = Y, Ca, Ce, U, Th;

B = Nb, Ta, Ti, Cb

(5) A = Y, Er, Ca, Fe<sup>2+</sup>, Th;

B = Ti, Nb

(6) A = Principalmente Na y Ca, también;

B = Principalmente Nb, Ta y Ti, también Sn, Fe<sup>3+</sup>, W.

Fe<sup>2+</sup>, U<sup>4+</sup>, Sb<sup>3+</sup>, Pb, Th, Ce, Y.

Las reservas mundiales, según el orden de importancia, se encuentran en Estados Unidos, África del Sur y Central, Canadá, Australia y Francia, también hay reservas en Brasil y en nuestro país, Argentina.



La forma mas eficiente de determinar la mineralogía es en base a propiedades físicas y ópticas, combinadas con técnicas cuanti y cualitativas.

Los minerales de uranio se pueden clasificar según diversas características:

Según su composición química:

- I Oxidos simples.
- II Silicatos simples.
- III Oxidos hidratados.
- IV Oxidos múltiples.
- V Sales de uranio hidratadas.
- VI Asociaciones varias.

Según su formación geológica:

Minerales de uranio primarios con uranio tetravalente, (grupos I, II y III).

Minerales de uranio secundarios con uranio hexavalente, (grupos IV y V).

Según su aptitud al tratamiento hidrometalúrgico:

Minerales con uranio tetravalente, (grupos I y II)

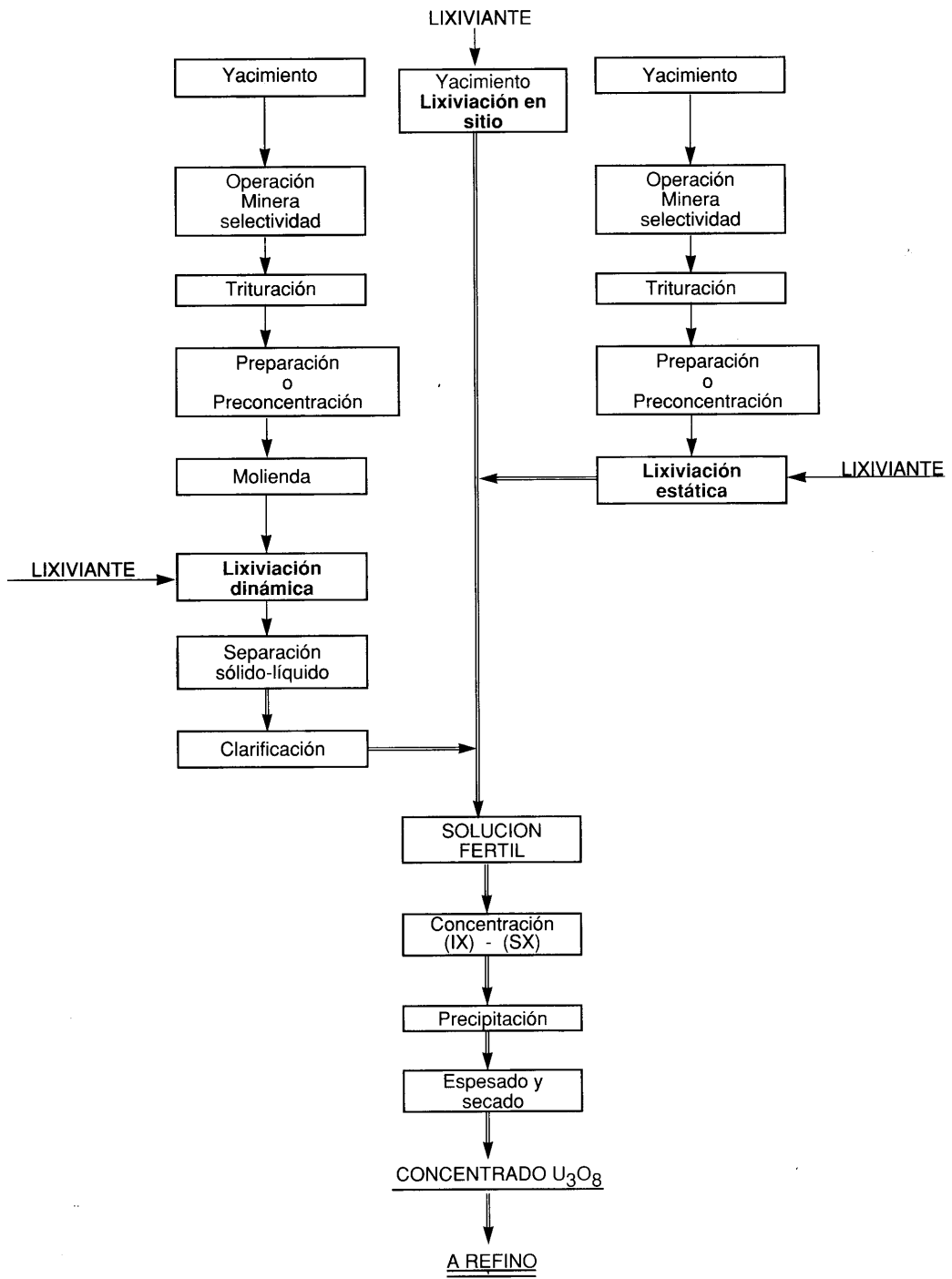
Minerales con uranio hexavalente, (grupos IV y V)

Minerales de uranio refractario, (grupo III)

Asociaciones varias.

#### 2.1.4- Tratamiento del Uranio:

El objeto de todos los procesos es producir un concentrado con un contenido superior al 90% de  $U_3O_8$ . Este producto se emplea como referencia comercial ya que para el uso como combustible deben alcanzarse muy altos grados de pureza en la refinación y lograr contenidos del orden de 3,5% del isótopo  $U_{235}$ . Sintetizando, el proceso comprende la concentración, generalmente en el yacimiento, y la refinación.



En los costos de producción de electricidad nuclear, tan solo un 6% corresponde a la producción de uranio natural, un 12% a la fabricación del combustible y el resto alrededor de; 71% son gastos de la central. Sin embargo, el uranio es el ingrediente esencial para alimentar los reactores.

Otro factor importante en los procesos de obtención del combustible nuclear es el largo periodo de los procesos de fabricación, desde su inicio en la extracción y tratamiento en la mina, hasta su inserción como elemento combustible en el núcleo del reactor. Este periodo suele ser de dos o tres años, por lo que las compañías eléctricas deben realizar sus pedidos con la suficiente antelación.

En general, un proceso de concentración sigue los pasos indicados en el esquema. Por supuesto cada mena tiene sus características particulares que influyen en el diseño del circuito.

## 2.2- LIXIVIACIÓN BACTERIANA

Entre los procesos alternativos para el tratamiento hidrometalúrgico del uranio, está la utilización de la biohidrometalúrgia o lixiviación bacteriana.

La potencialidad de este método deriva de una serie de factores económicos, entre los que podemos destacar: economía de los insumos utilizados en la lixiviación química o convencional (ácido y agentes oxidantes), simplicidad de las instalaciones (bajos costos de inversión y operativos), reducida mano de obra especializada en la operación, etc.

Actualmente la lixiviación bacteriana es aplicada a escala comercial para recuperar cobre y uranio, en varios países como Estados Unidos, Canadá, África de Sur, Rusia, Bulgaria, España, Chile, etc.

En particular, la oxidación bacteriana de los sulfuros, es ocasionada por la acción de microorganismos que evolucionaron en forma temprana sobre la

tierra. Estos organismos son conocidos como bacterias Quimiolitotráficas, ya que no utilizan materia orgánica, sino que toda la energía necesaria para su metabolismo la obtienen de la oxidación o reducción de compuestos inorgánicos y todo el carbono celular, de la fijación del anhídrido carbónico atmosférico. Así, en la escala evolutiva, estos organismos se desarrollaron mucho antes del advenimiento de formas superiores de vida vegetal y animal. Las especies más importantes son las *Aciditobacillus thiooxidans* y *ferrooxidans*.

El primer antecedente que se conoce, es el de la lixiviación de cobre realizada en España en el siglo XVII por la "Río Tinto Mines" aunque el mecanismo de oxidación que se producía no era comprendido.

La aplicación comercial de la lixiviación bacteriana en la industria minera, se ha restringido al cobre y al uranio. También este proceso de biooxidación se está desarrollando con éxito a escala piloto, dirigido a liberar los metales preciosos bloqueados dentro de las estructuras cristalinas de sulfuros minerales.

En este último caso, no es necesario oxidar el total de los sulfuros, a veces con una oxidación del 60% de los mismos se pueden obtener buenas recuperaciones de oro y plata.

Entre los factores que pueden afectar la actividad de las bacterias involucradas en la lixiviación de minerales mencionaremos la posible toxicidad a algunos de los metales liberados de las menas. Este efecto puede llevar a reducir la tasa de lixiviación siendo indeseable para un proceso industrial, pero beneficioso en la reducción de la contaminación de metales en las aguas de drenaje de las minas.

De los cationes metálicos que pueden ser liberados en drenajes de las minas, el mercurio, la plata y el cadmio son los más tóxicos para los microorganismos, estando la toxicidad influenciada por el estado Fisiológico de las bacterias, el estado químico de metal y el alcance de su interacción controlado por el medio ambiente.

Naturalmente existe variabilidad entre especies de *Aciditobacillus ferrooxidans*, por lo que es muy importante seleccionar las cepas más apropiadas

para obtener procesos de lixiviación controlados y para uso futuro en procesos industriales de lixiviación en biorreactores.

### 2.2.1 - Las Bacterias del Proceso

En el proceso de biolixiviación, son diversos los microorganismos que directamente o indirectamente participan en la degradación de minerales sulfurados y que se encuentran generalmente en las aguas de las minas.

Los principales géneros son "Aciditibacillus", "Sulfolobus", "Leptospirillum", y "Sulfobacillus". Las especies más importantes son Aciditibacillus ferrooxidans, aislada por Colmer et al en 1.950 y Aciditibacillus thiooxidans, aislada por Waksman y Joffe en 1.922.

Estos microorganismos no patógenos, se presentan como bacilos Gram negativos que poseen un flagelo polar que le confieren movimiento. Son aerobios estrictos que obtienen la energía para su desarrollo de la oxidación del ion ferroso, azufre o formas reducidas de este para los primeros, mientras que los segundos solamente utilizan el azufre y sus formas reducidas, elementos de amplia distribución en este tipo de yacimientos. Ambos se caracterizan por desarrollarse en un rango de temperatura entre los 5 y 40°C., siendo 30°C. la temperatura óptima.

El pH óptimo de crecimiento es aproximadamente 2,0 aunque crecen en un rango de pH de 1,0 a 7,0. Otra característica fisiológica es la tolerancia a altas concentraciones de iones metálicos. Así por ejemplo el Aciditibacillus ferrooxidans permanece activo en soluciones con contenidos de cobre y uranio tan elevados como 55 g/l y 12 g/l, respectivamente.

De las dos especies, el A. ferrooxidans es el principal responsable de oxidar y solubilizar metales de rocas que contienen minerales sulfurados.

### 2.2.2- Fundamentos de la Lixiviación Bacteriana.

La lixiviación bacteriana resulta de un conjunto de reacciones químicas donde un mineral insoluble es oxidado y el metal de interés es liberado en solución.

A. ferrooxidans utiliza el  $\text{CO}_2$  como fuente de carbono y requiere una fuente de nitrógeno y de fósforo para su crecimiento y metabolismo. Obtiene su energía para su vida y metabolismo por la oxidación de sustancias inorgánicas (sulfuros metálicos,  $\text{S}^0$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{S}^{-2}$ ,  $\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$ ,  $\text{S}_4\text{O}_6^{-2}$ ), generando  $\text{Fe}^{+3}$  e ión sulfato como productos finales. Para explicarse la lixiviación de sulfuros por actividad bacteria], ésta se analiza por dos caminos diferentes:

a) Lixiviación directa:

Involucra la acción de las bacterias sobre la superficie de minerales sulfurados y sobre los componentes que son susceptibles de oxidar, causando una transferencia de electrones desde el hierro o azufre en la red cristalina hacia el oxígeno de la fase acuosa.

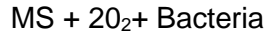
b) Lixiviación indirecta:

No procede por el ataque de la bacteria sobre la estructura atómica del mineral, si no, por la oxidación de  $\text{Fe}^{+2}$  acuoso en  $\text{Fe}^{+3}$ , que es un poderoso agente oxidante que actúa sobre los minerales sulfurados solubilizándolos en soluciones ácidas. En el caso indirecto, se habla de lixiviación bacteriamente asistida.

Ahora, en una solución ácida sin bacterias los iones  $\text{Fe}^{+2}$  están estables y la lixiviación con  $\text{Fe}^{+3}$  es lenta. Los A. ferrooxidans aceleran las reacciones de oxidación por un factor superior a 106 veces.

El mecanismo químico-biológico ocurre por ataque directo del microorganismo sobre la superficie del mineral a través de un sistema enzimático específico, e indirectamente por acción de productos formados por reacciones intermedias.

La reacción bioquímica teórica asociada al proceso es, para el mecanismo directo:

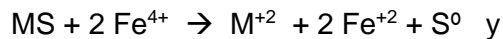


donde M es un metal divalente.

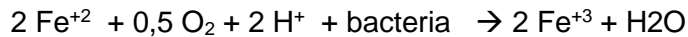


El mecanismo indirecto alcanza el ciclo  $Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3}$  a través de dos etapas:

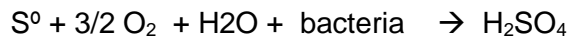
I- Interacción química del ion férrico con la superficie del mineral



II- Regeneración del ion férrico por la bacteria:



Además, el azufre formado en la reacción a) es oxidado a ácido sulfúrico por acción bacteriana:

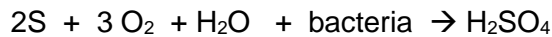
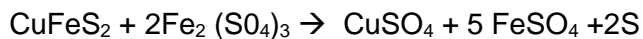
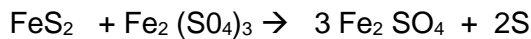
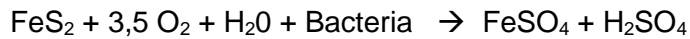


Generalmente los dos mecanismos están asociados, siendo la contribución de cada uno determinada por el tipo de mineral y por las condiciones físicas y químicas de lixiviación.

En la oxidación del ion ferroso, como así también de; azufre o sus formas reducidas, estos son utilizados por enzimas de la membrana celular que captan e ingresan electrones al interior de la célula, con la consecuente producción de energía (ATP) necesaria para los procesos metabólicos bacterianos.

De esta manera los sulfuros metálicos son atacados por el sulfato férrico y el ácido sulfúrico producidos por las bacterias. Esta acción es lenta y depende en gran medida de las condiciones ambientales como son el suministro de oxígeno, la temperatura y el pH.

Las reacciones químicas asociadas a este ataque bacteriano sobre un mineral sulfurado son:



Factores adversos al poblamiento:

La acción bacteriana manifiesta su mayor acción por la cantidad de bacterias poblando el sistema. Varios factores inhiben o decrecen su concentración:

Concentraciones altas de cationes (Ag<sup>+</sup>, Hg<sup>+</sup>, Mo<sup>+</sup>, Cd<sup>+</sup>, Cu<sup>+</sup>)

Ausencia de aire

Temperaturas mayores a 50°.

pH fuera del rango 1-7



Falta de humedad o fase acuosa

Falta de CO<sub>2</sub> y nutrientes

Las especies *A. ferrooxidans* y *thiooxidans* tienen ambiente favorable para su actividad y desarrollo de pH 1-5 y temperaturas de 20-45°C., deben contar además con nutrientes tales como fosfatos y compuestos nitrogenados. Hay microorganismos termofílicos que se desarrollan entre 45-80°C.

Para tomar una idea de la concentración poblacional de microorganismos autotróficos aeróbicos, en 1 cc. de solución de cobre obtenida, se han identificado un número de 10<sup>7</sup> - 10<sup>9</sup> bacterias. Considerando este alto número, respecto a la molécula a oxidar, es comprensible que el Fe<sup>+2</sup> sea oxidado miles de veces más rápido bioquímicamente que por oxidación química. Los *A. ferrooxidans* miden entre 0,7-1,2 μ y está dotado de movimientos, lo que permite trasladarse a través de la solución de un punto a otro sobre la superficie del sulfuro.

Variables lixiviación bacteriana

En la mayoría de los casos, las variables más importantes que afectan la lixiviación bacteriana son:

- a. Presencia y concentración de sulfuros.
- b. Superficie específica de mineral expuesta al contacto con aire y agua.
- c. Disponibilidad de oxígeno sobre la interfase mineral-solución.
- d. Humedad sobre los sulfuros.
- e. Consumo de ácido.
- f. Precipitación de sales férricas. La cinética de lixiviación bacteriana, está controlada por el proceso más lento de los siguientes: la velocidad de transferencia de oxígeno y la velocidad de la oxidación bacteriana del Fe<sup>2+</sup> a Fe<sup>3+</sup>.

### 3- ESTADO ACTUAL DE LA OPERACIÓN

### 3.1- RESUMEN:

La explotación minera en Los Colorados La Rioja, efectuada en la presente década, tuvo por objeto la obtención de concentrado de uranio para el mercado nacional (Argentina). Los minerales económicos presentes en el yacimiento son Botwodita  $K(UO)(SiO OH) \cdot 5H_2O$ , Metaautunita  $Ca(UO)PO$  y Uranofano  $Ca(UO)(SiO OH)$ , acompañados por diversos metales pesados.

La explotación se realizó a cielo abierto, dada la superficialidad y afloramiento de la formación. Debido a las características del mineral, el tratamiento se hizo por medio de lixiviación en pilas y la recuperación del uranio por precipitación del mismo en planta como di uranato de amonio  $(NH_4)_2U_2O_7$ . El producto final era un concentrado, ("Yellow Cake"), que era enviado a CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica – Argentina), en tambores precintados.

En 1996, la empresa que explotaba este yacimiento finaliza su labor extractiva, deja las pilas ácidas sin neutralizar, en el mismo lugar y comienza la etapa protección. Se desmonta el campamento y la planta, se cierra el acceso a la mina y se cubren las pilas.

Actualmente se observa un gran deterioro del área, presentando graves problemas ambientales en el pit y especialmente en las pilas.

### 3.2- EL YACIMIENTO DE URANIO LOS COLORADOS:

El yacimiento de uranio Los Colorados, está ubicado en las coordenadas  $30^\circ 00' 30''$  de latitud sur y  $67^\circ 03' 50''$  de longitud norte, en el sector más austral de la Sierra del Velazco.

De acuerdo a los antecedentes consultados, el yacimiento se encuentra dentro de la formación Saladillo (Edad Carbónica), compuesta de sedimentitas clásticas continentales tales como areniscas, lutitas, conglomerados etc.

El yacimiento se presenta como un modelo típico de Roll Front, con un frente reductor, un frente mineralizado y un frente oxidante.

La mineralización se presenta en paquetes de 5 a 12 metros con una corrida de más de 400 metros

Las determinaciones mineralógicas dieron diferente resultado en los distintos horizontes pero en general aparecen abundante hematita-goethita, escasa turmalina-rutilo y en cuanto al uranio, se encuentran sus minerales en forma de pátinas, relleno de fisuras y planos de debilidad en la forma de uranofano, boltwodita tyuyaminita, autunita y torbenita. También hay cobre presente como malaquita, azurita, calcopirita, bornita y calcocina, asociados a otras como pirita, calcita y fluorita. El cuarzo alcanza un 40% y la mica el 5%, en las muestras estudiadas.

Este tipo de yacimiento es formado por acción de las aguas subterráneas alcalinas, así el uranio es transportado en forma de carbonatos alcalinos de uranilo.

El ion uranilo se asocia a estos elementos formando complejos solubles en esta agua cuando el pH es superior a 7, siendo mayor la cantidad transportada a medida que aumenta la alcalinidad de estas soluciones.

Las anomalías radiactivas y de metales pesados presentes en las aguas subterráneas pueden ser detectadas en varios km alrededor del yacimiento, presentando valores que varían entre 1 y 120 ppb de uranio y de otros elementos tales como Mo, V, Cu, Pb, Zn y As.

Cuando estas soluciones de Uranio se encuentran con horizontes permeables que contienen materia carbonosa, petróleo, carbón, piritas, arcillas, calcitas u óxidos de hierro, son reducidas provocando su precipitación y deposición en las mismas.

Estas acumulaciones epigenéticas de uranio, van acompañadas generalmente con piritas, marcasitas, calcita, vanadio, selenio, molibdeno y otros, diseminados en una estructura o interface entre areniscas con capacidad reductora (grises o negros) y areniscas oxidadas (amarillo – anaranjadas).

### 3.3- EXPLOTACION DE LA MINA:

La extracción del mineral fue planeada utilizando un sistema de explotación a cielo abierto. La cantidad de material estéril a remover fue de 700.000 toneladas que se ubicaron en diferentes sectores aledaños a la mina.

Con esto se pretendía alumbrar y extraer 213.000 Ton de mineral con una ley media de 0,067% de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> y mineral marginal con leyes inferiores 0,25 Kg./Ton de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. la ley de corte de la explotación se estableció en 0,030% de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.

La explotación se realizó por bancos bajos, con altura de entre 2,5 y 3 metros. La geometría de los taludes del material estéril y del mineral fue estudiado cuidadosamente, debido a la inestabilidad que presentaba la roca. La estructura y litología del yacimiento no es favorable con taludes de gran ángulo. Los ensayos mecánicos realizados sobre la arenisca portadora del mineral acusaron los siguientes valores:  $P_c = 2,32 \text{ tn/m}^3$  ; velocidad sónica = 2835 m/seg; resistencia a la compresión simple = 182,96 Kg/cm<sup>2</sup> . Estos resultados indican que se está en presencia de una roca poco cohesiva, no apta para la ejecución de bancos altos y taludes de gran ángulo.

### 3.4- TRATAMIENTO DEL MINERAL:

Debido a las bajas leyes del mineral y a que este tipo de mineral de uranio se disuelve lentamente en soluciones de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a pH = 2,5, se optó por el tratamiento de lixiviación en pilas (Heap Leaching).

El uranio recuperado en los licores de la lixiviación se encontraba en la forma de polisulfatos de uranilo, alcanzando concentraciones de 300 mg/litro de uranio.

Esta solución rica ingresaba en la planta, al sector fijación en columnas cargadas con resinas de intercambio iónico (RIC), en donde se realizaba el intercambio entre un anión sulfato, por un anión uranilo.

Una vez saturadas las columnas, pasaban al sector elusión, desadsorción o stripping; sometidas a una solución de sulfato de amonio, obteniéndose finalmente una solución concentrada de sulfato de uranilo.

Esta solución era enviada al sector precipitación. Allí se la hacía reaccionar con amoníaco gaseoso anhidro, en un medio de pH controlado, con el objeto de precipitar el uranio bajo la forma de diuranato de amonio.

Posteriormente y después de varios lavados, para eliminar impurezas, el precipitado era filtrado obteniéndose una torta amarilla (yellow cake) con el 30% de humedad.

Luego este concentrado era secado hasta alcanzar valores de humedad por debajo del 3,5 %, envasado en tambores y enviado a la CNEA.

### 3.5- CIERRE DE LA OPERACIÓN:

En 1996, la empresa que explotaba este yacimiento finaliza su labor extractiva.

Las causas fueron diversas, pero los problemas más importantes se centraron en la recuperación del uranio en las pilas. El mineral sufría fuertes compactaciones impidiendo una adecuada percolación debido a corto circuitos, por donde se canalizaban las soluciones, quedando importantes sectores sin lixiviar.

La cantidad de material acidificado (PH=2,5) acumulado en las pilas alcanza una masa aproximada de 160.000 ton.

La Empresa explotadora por mandato de la CNEA recubrió estas pilas con material estéril, presentándose actualmente como una única sobre elevación.

El espesor medio del recubrimiento fue de un metro, resultando una gran pila unificada que cubre un área aproximada de 300 x 150 metros y una altura cercana a los 4 metros.

Sobre el sector este de la pila, en dirección a la desembocadura de una quebrada, se practicó una defensa con rocas a fin de evitar que la correntada erosione la pila.

Con respecto a la abertura provocada por la explotación, solamente se colocó un cartel en el camino de acceso con indicación de “Peligro de Derrumbes”

Todas las instalaciones de la planta fueron levantadas, dejando todo el perímetro abierto y sin alambrar, al acceso de animales y seres humanos.

### 3.5.1- Estado del Pit:



**Desprendimientos en el pit.**



**Agua en el pit**

Con respecto a la abertura dejada después de la explotación a cielo abierto se constató la inestabilidad de la roca debido a una inadecuada terminación e inclinación final de los taludes. En algunos sectores estos han quedado casi verticales con alturas variables que alcanzan máximos de 40 m, (en el fondo el pit, foto, el talud es prácticamente vertical con una altura aproximada de 30 m). Como consecuencia de esto se presentan varios sectores con derrumbes.

### 3.5.2- Las pilas:

En el sector de pilas de lixiviación, el caso es más preocupante aún, pues tenemos unos 160.000 ton de mineral, al que se le ha extraído muy poco uranio y metales pesados, presentando un pH residual aproximado de 3.



**Erosión en la Cubierta de la Pila.**

La cubierta de material estéril que originalmente tenía 1m de espesor, en la actualidad no presenta más de 40 cm en los sectores de más potencia.



Esta cubierta requiere mantenimiento periódico, ya que en la época estival (Diciembre-Marzo) suceden lluvias torrenciales, que producen erosión y generan canalizaciones que pueden llegar hasta el mineral.

En nuestras visitas se ha constatado, como se puede observar en las fotos, importantes canalizaciones en distintos sectores de la pila.

El área mas comprometida se encuentra en el borde noroeste de la pila en donde se han formado canalizaciones que la atraviesan, dos de ellas son de gran envergadura, con una pérdida significativa de mineral .



**Erosión en la Cubierta de la Pila:**

Una muestra del material de la pila en la parte expuesta ha dado los siguientes resultados en el análisis:

Cu = 27,0 g/t, Cd = 0,78 g/t, Zn = 0,14 %, Pb = 80,0 g/t Mo =60,0 g/t y U = 230 g/t.



**Erosión importante con pérdida de material de la pila.**

La defensa de rocas, realizada al este de la pila, también se encuentra debilitada y probablemente, si no se toman las precauciones del caso, para la próxima temporada estival el agua llegará a la pila, pudiendo dañarla severamente.

El hecho de que el agua de lluvia llegue a un mineral con gran contenido de ácido y metales pesados disueltos, repulpaándolo, produce la consecuente dilución y transporte hacia el cauce principal de un río seco colector. Este encamina las aguas hacia la zona pobladas de Patquía, lo que constituye un problema ambiental grave.

#### **4- TRABAJOS REALIZADOS:**

##### **4.1 GEOLOGIA GENERAL**

Marco geológico Regional del Cerro Los Colorados

## Introducción – Basamento pre-carbónico

El área de trabajo se encuentra ubicada en el ámbito de las Sierras Pampeanas Occidentales (Caminos, 1979), pero su evolución geológica está ligada también, al Sistema de Famatina (Rapela et al, 1999) ó Sierras Famatiniánas (Miró, 1999).

### Sierras Pampeanas Occidentales

La gran provincia geológica denominada por Stelzner (1873; cf. Ramos, 1999) “Sierras Pampeanas”, ha sido dividida por Caminos, (1979) Sierras Pampeanas Orientales y Occidentales, estando éstas últimas constituidas por el conjunto de sierras occidentales de las provincias de Catamarca, San Juan, San Luis, y La Rioja, entre ellas la Sierra de Velasco y Los Colorados.

El basamento de estas Sierras, es un orógeno eopaleozoico, caracterizado por la presencia de abundantes derivados metamórficos de calizas, dolomías, rocas calcosilicáticas e ígneas básicas y ultrabásicas (Dalla Salda et al., 1999), con una edad de metamorfismo ordovícica que alojan escasos cuerpos granitoides calcoalcalinos. La composición de estos intrusivos varía de gabros tholeiíticos a tonalitas y granodioritas asociadas a subducción, de edad cámbrica a ordovícica media y que culmina con granitos post-colisionales de edad ordovícica superior a devónica basal; existen también granitos apotectónicos que se emplazan en el carbonífero inferior (Ramos, 1999). Un rasgo principal de las Sierras Pampeanas Occidentales es la presencia de una importante faja ofiolítica de edad Grenville ( $\cong$  1050 Ma.; Miró, 1999). Estas rocas precámbricas corresponderían a arcos de islas intraoceánicos, que actualmente están preservados en facies de grado medio y representados por anfibolitas y gneises (Vujovich y Kay, 1996).

La estructura de las Sierras Pampeanas ha sido descrita por Gonzalez Bonorino (1950), que las considera como un sistema de bloques, limitados por fallas inversas, a las cuales las interpreta como fallas lístricas que se horizontalizan en la profundidad al encontrar transiciones frágil-dúctil dentro de la corteza; posteriormente Schlagintweit (1954, cf. Ramos, 1999) demuestra reactivaciones compresivas neotectónicas. Esta estructura actual, se originó a

partir del Mioceno inferior. La ubicación de las fallas ándicas está controlada mayoritariamente por líneas de debilidad previa y en muchos casos se ha constatado que muchas de ellas son inversión de fallas normales de diferente edad (cretácicas, triásicas, neopaleozoicas) o antiguas fajas miloníticas de edad precámbrica a eopaleozoica (Ramos, 1999)

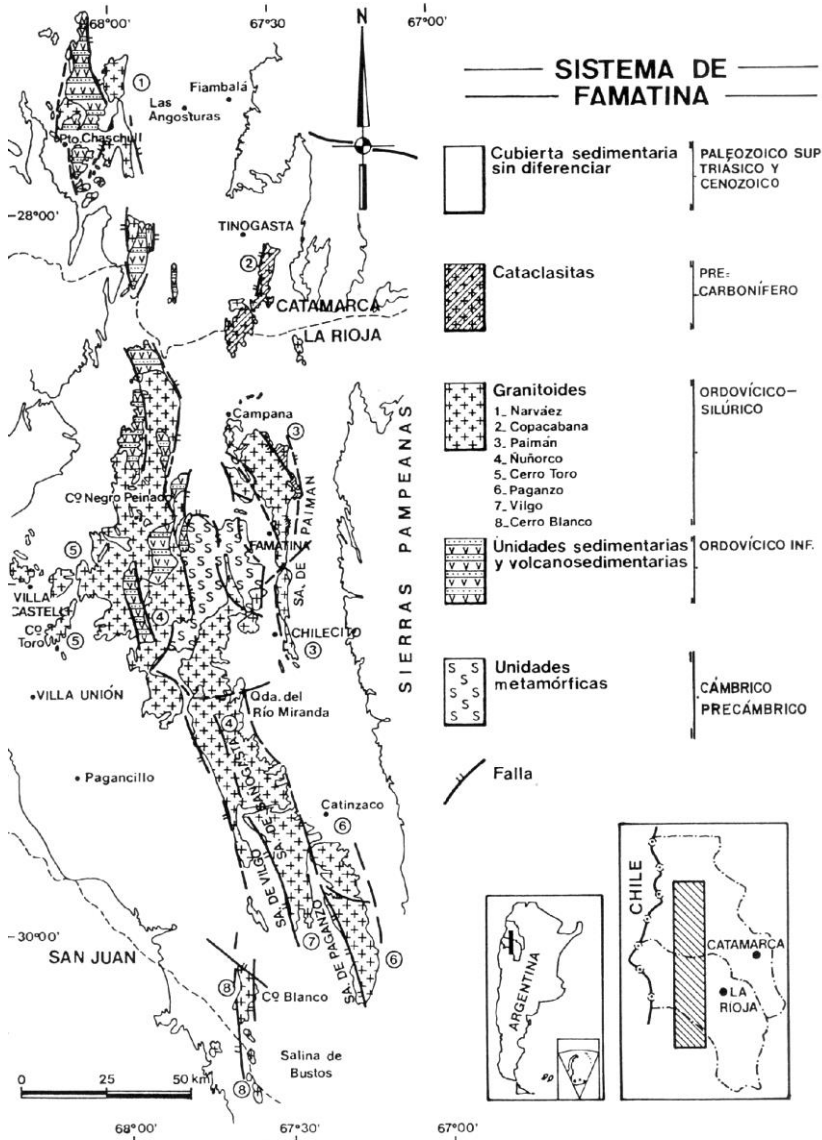
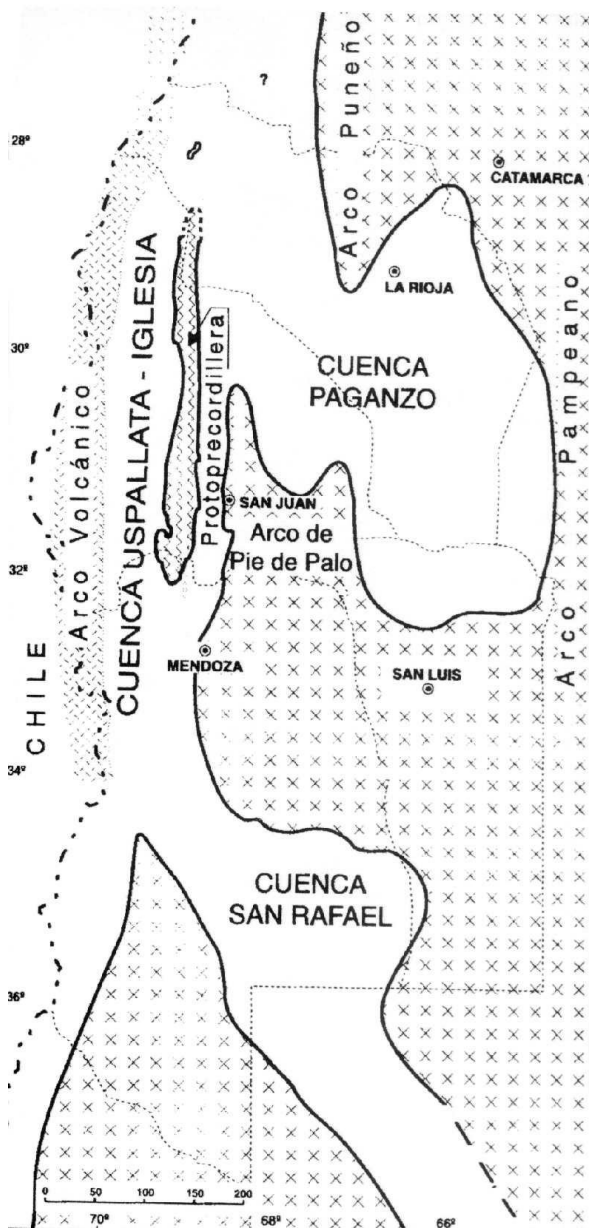


Fig. 1. Sierras Pampeanas Orientales y Occidentales y las provincias geológicas adyacentes. El recuadro, señala el área de trabajo (modificado de Ramos, 1999) Cuencas de neopaleozoicas riojanas y sanjuaninas



La distribución de las sedimentitas neopaleozoicas en el centro oeste de la república argentina, se conoce desde fines del siglo XIX y han sido objeto de innumerables contribuciones, desde que Bodembender (1911) realizó el primer estudio regional de la zona meridional de La Rioja y que fue el trabajo base para todos los subsiguientes. El otro hito en el estudio de la estratigrafía y la evolución geológica de estos depósitos, señalando las cuencas y subcuencas, fueron los trabajos de Azcuy y Morelli (1970 a y b); Salfity y Gorustovich, (1983), que definieron las características estructurales y estratigráficas del Grupo Paganzo y fueron disparadores para muchos otros trabajos y finalmente la aplicación de los nuevos conceptos sobre geotectónica y estratigrafía secuencial (López Gamundi et al., 1989; Fernandez Saveso et al., 1993; Fernandez Saveso y Tankard, 1995; Tankard et al., 1995; Williams, 1995, entre otros) sirvieron de cimientos para nuevas interpretaciones.

Fig. 2. Ubicación de las Cuencas Carbóníferas-Permicas del centro-oeste del país. Modificado de Azcuy et al. (1999). Evolución geotectónica y paleoclimática de las cuencas de neopaleozoicas riojanas y sanjuaninas

Sobre el basamento de Sierras Pampeanas, Sistema de Famatina, Precordillera, Cordillera Frontal y Bloque de San Rafael, se apoyan discordantemente o con paraconcordancia, las secuencias carbonífero-pérmicas del centro oeste argentino (figura 2), reconocidas como Cuenca de Paganzo, Uspallata-Iglesia y San Rafael (Azcué et al., 1999)

El área de estudio, pertenece a la Cuenca de Paganzo y sólo a la evolución de ésta nos referiremos en esta síntesis.

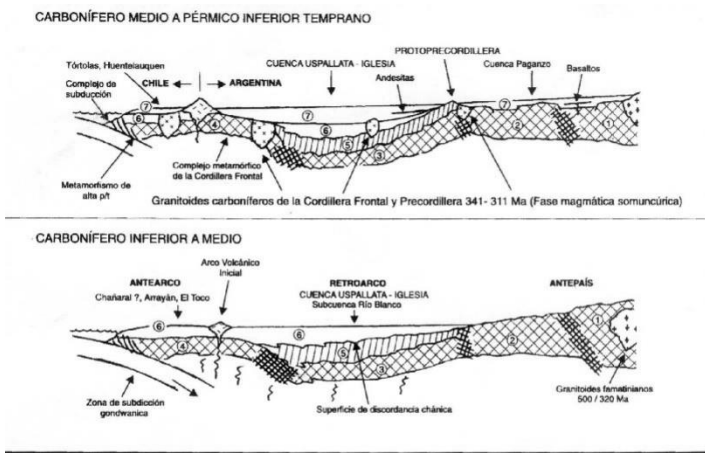
Figura 3. Cortes esquemáticos mostrando la evolución de las cuencas de Paganzo y Uspallata-Iglesia y los procesos magmáticos y tectónicos asociados (modificado de Caminos y Azcué, 1996)

Entre los 28° y 35° latitud sur, las sedimentitas del Grupo Paganzo y Uspallata-Iglesia se apoyan de este a oeste, sobre el basamento cristalino de las Sierras Pampeanas Orientales (edad: Paleozoico inferior a mesopaleozoico); Sierras Pampeanas Occidental. les (edad grenvillana (orógeno Grenville?); sedimentitas marinas cambro-devónicas plegadas de la Precordillera y por último sobre el Complejo Metamórfico de la Cordillera Frontal de Mendoza, de probable edad Proterozoico? (figura 3 a y b). Este sustrato ha sido denominado por Dalla Salda et al. (1992 y 1993) como Occidentalia y sería una porción grenvillana de Laurentia que habría colisionado con el margen de Gondwana, originando el Famatina y en la Sierras pampeanas el orógeno Famatiniano.

Los movimientos chánicos (durante el Devónico tardío), produjo el plegamiento y corrimiento de las sedimentitas eopaleozoicas de Precordillera y Cordillera Frontal, proseguido por un período de ascenso y erosión simultáneos, instalándose una nueva zona de subducción en el borde pacífico del continente,

dando así el inicio del ciclo Gondwánico (Azcuy et al. 1999); Astini (1996), supone un marco diferente para este momento, vinculando la acreción de Chilenia a la contracción sucedida en el Silúrico-Devónico y la fase Chánica a condiciones extensionales durante el inicio del ciclo Gondwánico y comienzo de la glaciación carbonífera. De esta manera se originan cuencas de antepaís (Cuenca de

Panganzo), retroarco (Cuenca de Uspallata-Iglesia y subcuenca Río Blanco) y antearco. Las Sierras Pampeanas (antepaís) permanecía como un área de relieve positivo y es por esa razón que no se han encontrado registro de sedimentación de edad carbonífera inferior en la Cuenca de Panganzo; mientras que la cuencas de retroarco recibían un gran aporte sedimentario de origen



REFERENCIAS FIGURA 3

- ① Sierras Pampeanas Orientales (Orogéno Famatiniano)
- ② Sierras Pampeanas Occidentales (Orogéno Grenville ?)
- ③ Basamento de la Precordillera
- ④ Chilenia
- ⑤ Sedimentos eopaleozoicos plegados por los movimientos chánicos
- ⑥ Sedimentos del Carbonífero Inferior
- ⑦ Sedimentos del Carbonífero Superior - Pérmico Inferior
- ▨ Probables zonas de sutura

continental y marino (Grupo Angualasto, figura 3a).

Hacia el comienzo del carbonífero tardío, se estructuró en el antepaís la Cuenca de Paganzo, mayoritariamente rellena de sedimentos continentales de edad carbonífera superior-pérmica (Grupo Paganzo), apoyándose en paraconcordancia o en discordancia sobre el sustrato de las Sierras Pampeanas, el Famatina y el borde oriental de la Precordillera (figura 3b); algunas efusiones basálticas en el antepaís (Paganzo) y andesíticas en el retroarco sugieren para este período un régimen distensivo. Durante el Pérmico inferior temprano, la fase orogénica San Rafael, produjo en el antepaís el fracturamiento en bloques y deformación suave en la cubierta sedimentaria (Azcuy et al, 1999). Estos movimientos diastróficos, han generado una paraconcordancia entre el basamento pre-carbonífero y las sedimentitas carboníferas superior-pérmicas y existe consenso generalizado en señalar que el límite Carbónífero superior – Pérmico, en la Cuenca de Paganzo es transicional (Azcuy y Morelli, 1970a; Azcuy et al, 1987a; Limarino, 1996, entre otros trabajos).



Figura 4. Sección paleogeográfica NO-SE de las Cuencas de Paganzo y Uspallata-Iglesia, entre los 29°30' y 31° latitud sur. Modificado de Fernández Seveso et al., 1993

### Cuenca de Paganzo -Amaná

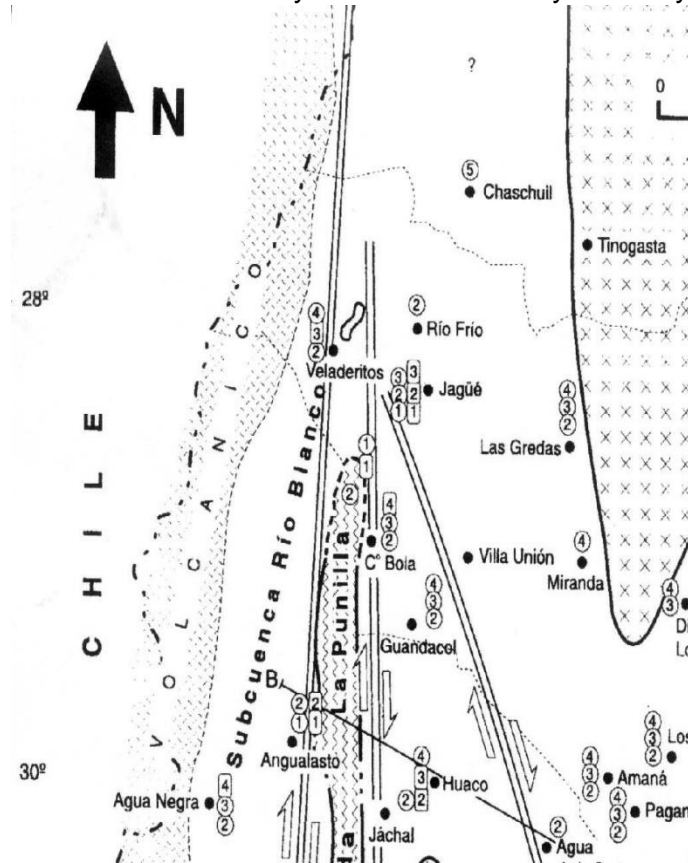
Los importantes episodios de glaciaciones/interglaciaciones registrados en todas las cuencas neopaleozoicas, cabe destacar que en el área de trabajo no se han encontrado evidencias de las mismas, reconociéndose en estas secuencias condiciones periglaciales (Azcuay et al., 1999). Estas condiciones glaciales, restringidas localmente, habrían requerido condiciones de humedad (aportada por el mar al oeste), altas paleolatitudes (aproximadamente 67° cf. Conti y Rapalini, 1993) y una topografía de altas cotas.

Finalmente, las características de estas cuencas neopaleozoicas y sus procesos de depositación estuvieron condicionados por los movimientos Chánicos, que reactivaron los antiguos lineamientos y suturas de los diferentes terranes que controlaron los depocentros, inicialmente aislados, y que fueron interpretados por Fernández Seveso y Tankard (1995), como cuencas pull-apart vinculadas a desplazamientos laterales dextrógiros a lo largo de las fallas corticales principales (figura 4)



## Límites y distribución de los depósitos

La cuenca Paganzo (Azcu y Morelli, 1970a; Salfity y Gorustovich, 1983; Azcu et al., 1987<sup>a</sup>), presenta una extensión aproximada de 150.000 km<sup>2</sup> y se halla ubicada entre los 27° y 33° de latitud Sur y los 65° y 69° de longitud Oeste. Sus

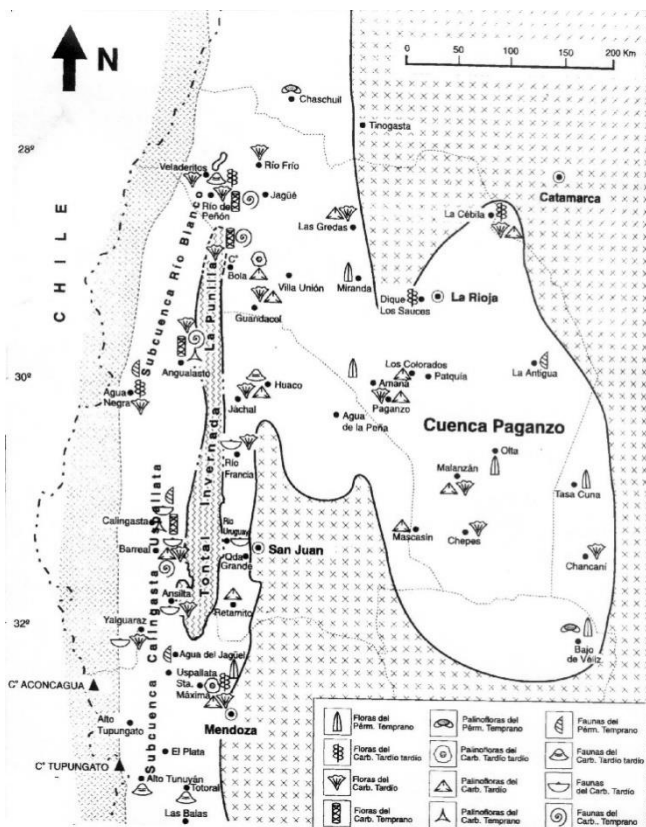


límites no sobrepasan el territorio nacional y ocupa la casi totalidad de las provincias de San Juan y La Rioja, el norte de Mendoza y San Luis, una limitada área occidental de Córdoba y la región suroccidental de Catamarca (Figura 4).

La cuenca limita al este con el arco Pampeano (Braccini 1961) y al nordeste con el arco de la Puna (Salfity, 1980). El límite austro-occidental está representado por el arco de Pie de Palo, y hacia el oeste por la Proto-precordillera

(conformada por los arcos de Tontal, Invernada, Volcán y porción meridional de La Punilla (figura 2 y 3)

En la valoración de estos límites dos áreas han sido motivo de discusión: la relación con la cuenca Chocoparanense a través de las salinas Grandes en el este. Y la vinculación con la región nororiental de la cuenca Uspallata—Iglesia. En el primer caso, de acuerdo a la interpretación sísmica realizada por Alvarez et al. (1990), se despejó definitivamente la duda de una posible conexión entre las cuencas Paganzo y Chacoparanense durante el Paleozoico superior.



En el caso del límite noroccidental, Azcuy y Morelli (1970b) definieron la cuenca Paganzo incluyendo en ella los depósitos marinos del Carbonífero superior de río del Peñón hasta la laguna Brava (Cuerda, 1948; Leanza, 1948; Borrello, 1955; Aceñolaza, 1969)). Este sector, en el que convergen cinco provincias geológicas con límites a veces imprecisos, fue denominado Bahía de Jagüé, con su borde norte expedito (Azcuy y Morelli, 1970b). Por otra parte, en dicha región también confluyen importantes lineamientos tectónicos

cuya actividad contribuye negativamente en el reconocimiento de una separación.

La evaluación de este límite se sustenta principalmente en dos elementos: el reciente reconocimiento de capas del Carbonífero inferior en el flanco nororiental de la sierra de La Punilla (Fauqué et al., 1989; Cingolani et al., 1990; Morel et al., 1993; Carrizo y Azcuy, 1997; Carrizo, 1998) y b) el «hundimiento» del sector septentrional de esa sierra durante el Carbonífero, como lo certificó la distribución geográfica de los depósitos de esa edad, dispuestos en sucesión continua.

Ambas observaciones, sumadas a la distribución en la región del resto de los depósitos eocarboníferos, sugiere que éstos hallan su mejor ubicación en la subcuenca Río Blanco, sin descartar incluso la existencia de una cuenca separada de las aquí en consideración, para las secuencias de edad carbonífera

inferior. En el resto del límite occidental entre las cuencas Paganzo y Uspallata-Iglesia, la Protoprecordillera muestra discontinuidades locales que permiten, hacia el comienzo del Carbonífero tardío, algunas conexiones con los mares del oeste. Así, a ambos lados del límite, las dos cuencas consideradas presentan depósitos marinos y continentales, de edad carbonífera temprana en la cuenca Uspallata—Iglesia especialmente en la subcuenca Río Blanco, y carbonífera tardía en la cuenca Paganzo (Figura 5).

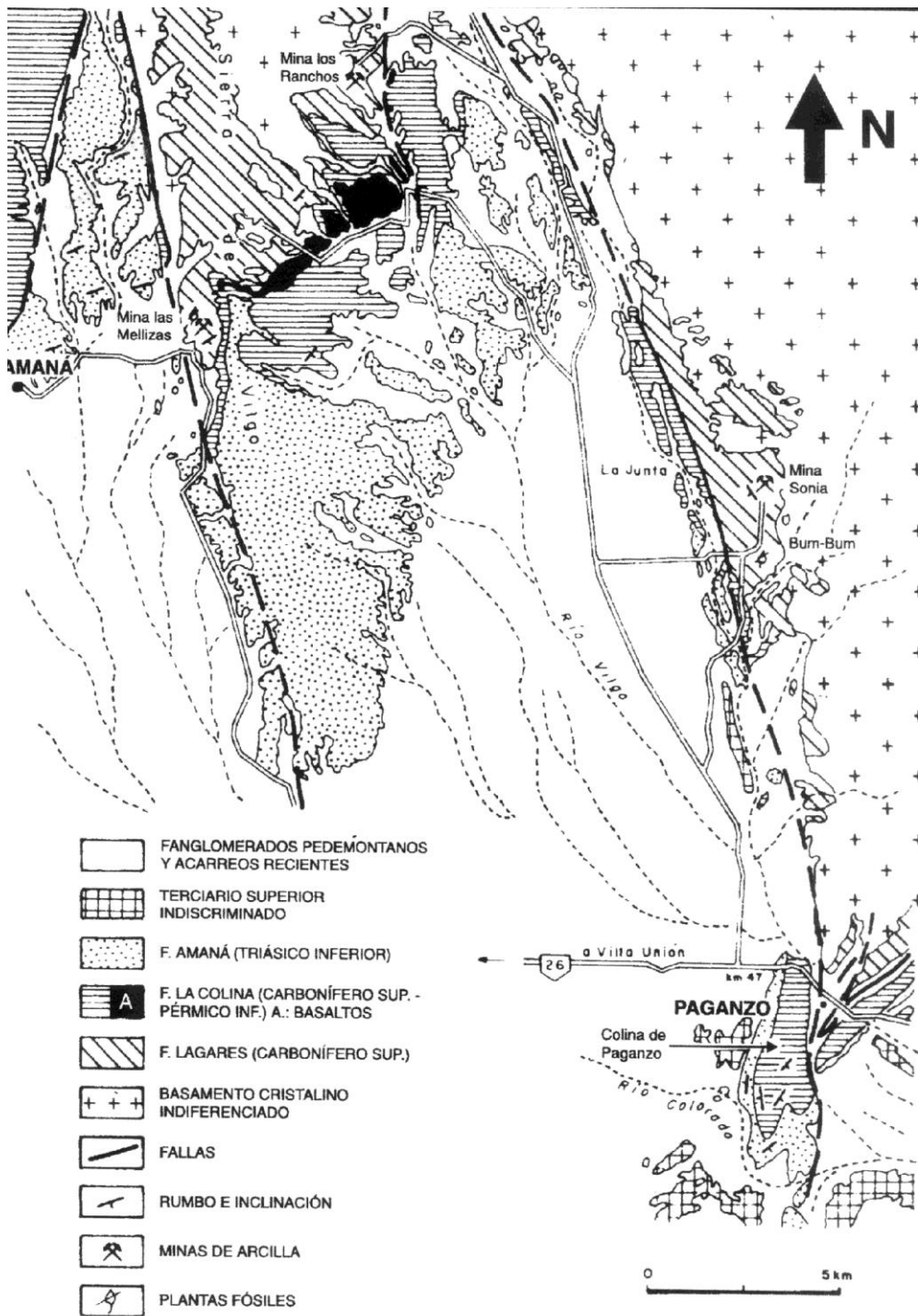
Asimismo, es necesario recalcar que en esta última cuenca los depósitos de origen marino son muy escasos y se hallan restringidos al borde oriental de la Precordillera.

## MARCO GEOLOGICO LOCAL

Los movimientos Chánicos de fines del Devónico y principios del Carbonífero modelaron las depresiones que conforman la Cuenca Paganzo (Azcué et al., 1987a) y dieron origen al piso estructural donde se alojaron los depósitos neopaleozoicos. Este sustrato incluye varios terranes (Ramos, 1988); y sumado a la actividad derivada de grandes lineamientos estructurales, ha generado diferentes depocentros (cf. Azcué et al, 1999 Figura 5).

El estilo estructural dominante en la cuenca, especialmente durante la depositación de las secuencias más jóvenes, es extensional. Podemos considerar dentro de la cuenca Paganzo dos grandes ámbitos, separados por los arcos de Famatina-Sañagasta y Valle Fértil - De La Huerta. El oriental, de comportamiento más rígido, se extiende hacia el este hasta el borde occidental del arco Pampeano en él los depósitos neopaleozoicos son menos potentes y se apoyan sobre un basamento de rocas ígneo-metamórficas. El occidental, más angosto, limita al oeste con la Protoprecordillera y se desarrolla en áreas de mayor movilidad; sus depósitos son más espesos y su piso está constituido por rocas del margen occidental del basamento Pampeano, Famatina y por estratos del Paleozoico inferior por precordillerano (Figuras 5 y 6; Azcué et al., 1999).

En este trabajo, sólo limitaremos el estudio a ámbito oriental, que es el que contiene a las estratos portadores de Uranio que han sido explotados.



## Estratigrafía general de la Cuenca

Los depósitos esencialmente terrígenos que rellenaron la cuenca Paganzo fueron originalmente separados por Bodembender(1911) en tres «pisos» atribuidos por el autor al Carbonífero, Pérmico y Triásico respectivamente. Posteriormente, fueron reunidos por Azcuy y Morelli (1970a) y Azcuy et al. (1979) en el Grupo Paganzo, en el cual distinguieron una sección I (inferior) de areniscas y pelitas con niveles de carbón atribuida al Carbonífero superior, y otra sección II (superior) de capas rojas esencialmente referida al Pérmico inferior y concordante con la anterior.

El Grupo está compuesto por un elevado número de formaciones, en parte debido a la discontinuidad de los afloramientos que aparecen en paleovalles glaciales y en valles intermontanos, estando el estratotipo (Azcuy y Morelli, 1970a) en la localidad homónima (Figura 8). Thompson y Mitchell, (1972) dataron las coladas basálticas intercaladas en la base de los estratos rojo basales y éstas arrojaron una edad de  $292-295 \pm 6$  Ma, lo que las ubica en el más tardío Carbonífero tardío (Azcuy et al., 1999)

Azcuy et al. (1999), señalan que las diferentes Formaciones que componen este Grupo son parte de las 4 supersecuencias (Guandacol, Tupe y Patquía – De La Cuesta inferior y Patquía – De La Cuesta superior), delimitadas por Seveso et al (1990, 1993) que representan un período de 70 Ma., desde el Carbonífero temprano al Pérmico tardío y que se encuentran expuestas en su totalidad en el Cerro Guandacol en la Sierra de Maz.

### Características de las Supersecuencias presentes en la Cuenca Paganzo

1. La Supersecuencia Guandacol, no aflora en el área de estudio, posee un espesor reconocido de 1825 metros, se apoya sobre rocas del Paleozoico inferior y del basamento Pampeano y está compuesta exclusivamente de sedimentitas marinas. Está formada por cuatro secuencias que indican procesos genéticos recurrentes y se caracterizan por ser granodecrecientes desde gravas (depósitos de talud a fan deltas) a pelitas (flujos turbidíticos), en un momento tectónico de transtensión-

transpresión, que originaron desplazamientos laterales-oblicuos (cf. Fernandez Seveso et al, 1993)

La distribución areal de esta supersecuencia es local y se halla condicionada por márgenes activos y por abruptos paleorelieves, pudiendose considerar como límite este le lineamiento Valle Fértil. Posee evidencias de glaciación en todo su espesor y su contenido fosilífero indican una edad para esta supersecuencia del Carbonífero superior bajo (Azcuay *et al*, 1999)

2. La *Supersecuencia Tupe*, aflora parcialmente en el área de estudio, posee un espesor máximo de 1285 metros y se apoya mediante una paraconcordancia sobre la Supersecuencia Guandacol y traslapa sobre le basamento de Sierras Pampeanas. Está conformada por cuatro secuencias, T1, T2, T3 y T4. La primera de estas secuencias, son depósitos dispersos porque ocuparon las áreas más deprimidas del paleorelieve con paleoambientes de sedimentación netamente marinos a transicionales (fan deltas). T2; T3 y T4 son secuencias con una fuerte disposición progradacional y muestran la mayor variedad de paleoambientes de depositación. En el ámbito oriental de la cuenca (comarcas de Paganzo-Amaná; Malazan-Olta y Mascasín-Chepes), esta secuencia traslapa sobre los granitoides del basamento y se compone de facies lacustres con evidencias de procesos glaciarios y fluviales. La Formación Lagares (o Saladillo), que aflora en el área de estudio, está incluida dentro de esta secuencia de edad Carbonífero tardío (Menedez y Azcuay, 1973). Las secuencias T3 y T4 representan el máximo traslape de la Supersecuencia Tupe y en el ámbito oriental de la cuenca se presenta como sistemas fluviales entrelazados proximales y cubre los remanentes de las dorsales, unificando las áreas de depositación en el Carbonífero tardío (Luna et al., 1990). T4, cubre toda el área y alcanza una gran expansión traslapando sobre el basamento cristalino; con sedimentación continental con evidencia de procesos glaciares a periglaciares. La paleoflora contenida en esta secuencia permite asignarle una edad Pérmica temprana (Azcuay et al., 1999)

3. La *Supersecuencia Patquía-De La Cuesta* , tiene un espesor medido de 1380 m. y ha sido dividida en dos secuencias: Inferior y Superior,

la primera está compuesta por 3 cortejos sedimentarios y la segunda por cuatro cortejos (Azcuay et al., 1999) . La secuencia inferior apoya en paraconcordancia sobre la Supersecuencia Tupe, cubre toda la cuenca y representa la continentalización total de la misma para culminar con un extenso campo eólico (Fernandez Seveso et al, 1993). En el primer cortejo de esta secuencia inferior, se encuentran efusiones basálticas con edades de 292-295 + 6 Ma (Thompson y Mitchell, 1972), en las comarcas de Paganzo-Amaná y Sierra de Maz. Esta dataciones y la presencia de *Euryphyllum whittianun* le otorgan una edad Pérmico temprana. En el segundo cortejo, está comprendida la Formación La Colina que porta restos de glossopterídeas atribuidas al Pérmico temprano por Limarino y Césari (1983). El tercer cortejo representa una aridización máxima y señalan una fase árida en el centro oeste de la Cuenca de Paganzo durante el Pérmico medio a tardío (Azcuay et al., 1999).

La secuencia superior, está casi totalmente expuesta al norte de la cuenca, en la provincia de Catamarca; y se compone de cortejos transgresivos –regresivos, con sedimentación fluvial, lacustre y de barreal; señalando una marcada aridización hacia el tope de la secuencia.

### Geología del Cerro Los Colorados

#### I) ESTRATIGRAFIA

- Basamento

El basamento, no aflora en el Cerro Los Colorados, encontrándose aproximadamente a 80 m. de profundidad, según las perforaciones realizadas por la Comisión Nacional de Energía Atómica (Salinas, 1977).

- Paleozoico

En el Cerro Los Colorados, afloran sedimentitas carbónicas pérmicas, correspondientes al sector oriental de la Cuenca Paganzo-Amaná (ver *Estratigrafía general de la Cuenca, en este capítulo*). Las formaciones aflorantes son: Formación Lagares y Formación La Colina.

- a) Formación Lagares (Menéndez y Azcuy, 1969; Sinonimia: Formación Saladillo)

La Formación Lagares aflora discordantemente sobre el basamento cristalino de las de las Sierras de Sañogasta; Sierra del Molle; Sierra de Vilgo, Sierra de Paganzo; pertenecientes al Sistema de Famatina y del extremo sur de la Sierra de Velasco; perteneciente a las Sierras Pampeanas Occidentales.

Morelli *et al.* (1984) y Azcuy *et al.* (1987), señalan que esta Unidad comienza con una sucesión sedimentaria que corresponde a abanicos aluviales; sistemas fluviales proximales de baja sinuosidad (fanglomerados; ortoconglomerados polimícticos y areniscas gruesas); seguidos por depósitos lacustres (areniscas finas y pelitas carbonosas), para culminar con sabulitas; areniscas finas y pelitas carbonosas que interpretan como depósitos de sistemas fluviales meandriformes y planicies de inundación.

La edad de esta Unidad es carbónica tardía (Menéndez y Azcuy, 1973) y su posición estratigráfica dentro del contexto de la cuenca ya ha sido tratado en *Estratigrafía general de la Cuenca, en este capítulo* y es la portadora del Uranio que ha sido explotado en la Mina Los Colorados

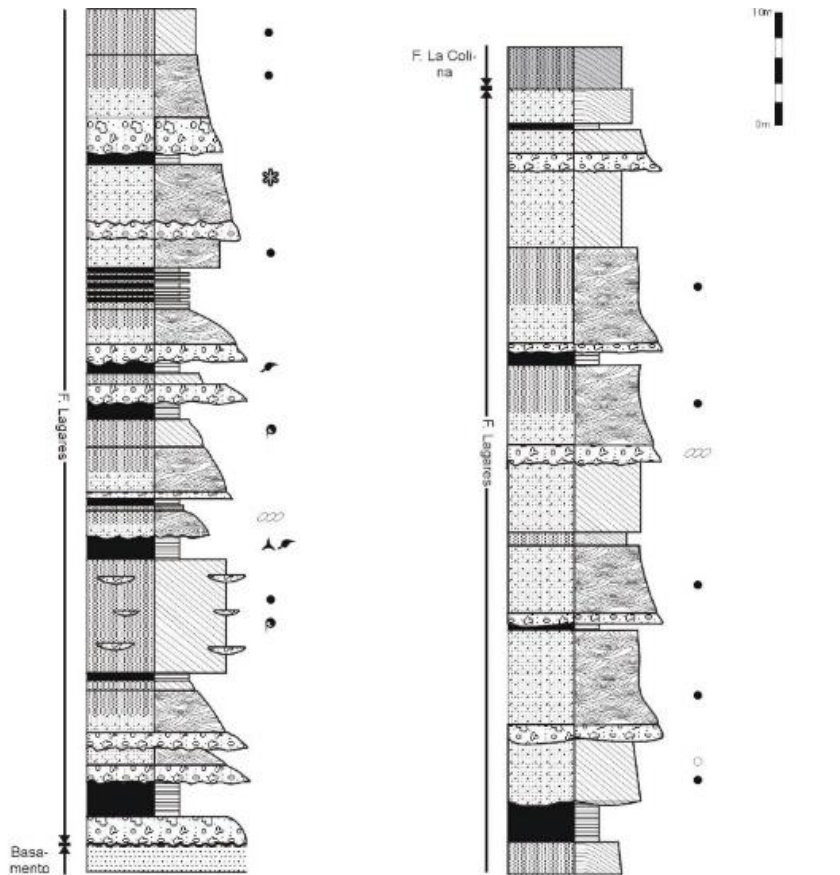
Sierra (1992), realiza un estudio de carácter sedimentológico de esta unidad en el Cerro Los Colorados y determina que la secuencia expuesta en esta localidad corresponde a un sistema fluvial entrelazado de baja sinuosidad con morfología interna divagante o meandriforme.

Azcuy *et al.*, (1999), señala que durante la depositación de la secuencia T2, de la Supersecuencia Tupe (Fernández Seveso *et al.*, 1993), la tendencia climática reinante durante la depositación fue húmedo y frío (glacial a interglacial) y que tectónicamente la cuenca estaba sometida a esfuerzos tensionales.



b) Formación La Colina (Menéndez y Azcuy, 1969)

En discordancia regional (Amos y Zardini, 1962; Caminos, 1979) ó con contacto transicional (Azcuy y Morelli, 1970 a; Caminos, 1979; Sierra, 1992), se apoya sobre la Formación Lagares, con su color rojizos con tonalidades moradas, que la caracteriza.



**Referencias**

- |                          |                                   |                                |
|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Conglomerados            | Laminación entrecruzada planar    | Concreción de óxidos de Hierro |
| Areniscas sabulíticas    | Laminación tangencial simple      | Concreción de sílice           |
| Areniscas finas a medias | Explotación de Uranio             |                                |
| Pelitas                  | Explotación de lutitas carbonosas |                                |
| Laminación paralela      | Lutitas carbonosas                |                                |
| Laminación en artesa     | Concreción de carbonatos          |                                |

Los depósitos en el área de estudio, representan un conjunto de areniscas bien seleccionadas con estructuras tractivas de pequeña y gran escala, que fueron interpretadas por Sierra (1992) como depósitos eólicos, que responden al máximo de aridización y señala un fase árida en el centro oeste de la cuenca de Paganzo.

Limarino y Cesari (1983), le otorgaron una edad pérmica temprano su posición estratigráfica dentro del contexto de la cuenca ya ha sido tratado en *Estratigrafía general de la Cuenca*, en este capítulo. Las sedimentitas de esta Formación son infértiles en Uranio.

- Cenozoico

Sobre el basamento y los sedimentos paleozoicos, se apoyan en discordancia tectónica los depósitos de edad terciaria, denominados por Caminos (1979) como Estratos Calchaqueños; Estratos Araucanos y Estaratos de Los Llanos (= Calchaquense y Araucanense) ó Formación Calchaquí y Araucana, respectivamente.

Estas sedimentitas, pertenecen a

## II) CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES DEL CERRO LOS COLORADOS

En general la tectónica responde al fallamiento regional de las Sierras pampeanas, que originó estructuras en bloques limitados por fallas inversas (Gonzalez Bonorino, 1950), que originó movimientos diferenciales, resultando unos elevados, como el extremo sur de la Sierra de Velasco y otros deprimidos como los valles interserranos donde se ha depositado el relleno de la Cuenca de Paganzo.

Las fallas son de plano subvertical, con dos orientaciones predominantes: N-S y NO-SE; en la Sierra de Vilgo se puede observar el primer lineamiento, mientras que el segundo es observable en el área de trabajo.

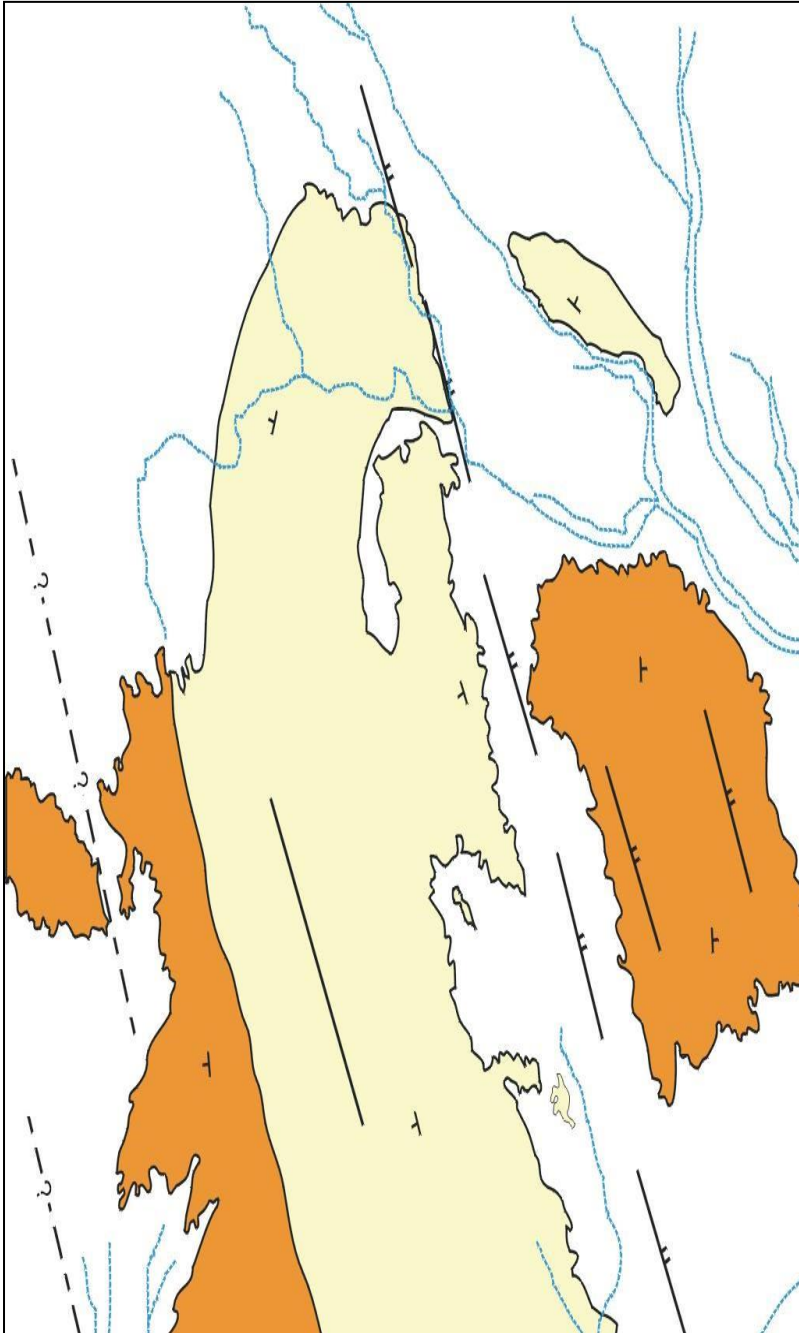


Fig. X. Mapa de los principales rasgos estructurales (modificado de Sierra, 1992)

Localmente la zona está afectada por un plegamiento braquianticlinal, con su eje con rumbo N 325°, el flanco derecho buza entre 12° y 18° al O-SO y el flanco izquierdo 30° al E-NE, aunque éste es difícil de apreciar en el campo, porque está cortado por una serie de fracturas tensionales casi paralelas al eje del plegamiento (Rb N 325°). Estas fracturas produjeron fallas directas, con caídas de bloques por gravedad, sin desplazamiento de rumbo, pero con rechazos de hasta 30 metros (cf. Sierra, 1992). El pliegue cierra al NO con un buzamiento de 21°, y aunque el origen del plegamiento no está determinado, Salinas (1977) sostiene que se debe a una estructura dómica falsa, debido a una apófisis granítica del basamento.

Se observó un importante juego de diaclasas con dos direcciones predominantes: N 50° y N 319°.

## 4.2- ANALISIS GEOAMBIENTAL DEL AREA DE LOS COLORADOS

### GEOMORFOLOGIA DE LOS COLORADOS

En el área de influencia de la mina Los Colorados se distinguen sierras, sierras bajas o lomadas, valles, bajadas aluviales pedemontanas, planicies fluvioeólicas, barreales y médanos.

1. Las sierras están representadas por la sierra de Velasco, sierra de La Cañada – Paganzo, de Vilgo, sierra Baja de Los Portezuelos y las Sierras de Los Llanos y Malanzán.

La sierra de Velasco tiene su cumbre más alta en el cerro Melao (4.257 m.s.n.m.) en la latitud 28°51'. Al norte y sur de este cerro decrece su altitud, frente a Catinzaco se separa del cordón del Velasco, un cordón montañoso de unos 1.200 a 1.500 m de altura integrado de norte a sur por las sierras La Chilca, Los Caballos y Los Colorados.

La sierra de Famatina al sur de la cuesta de Miranda, toma el nombre de sierra de Sañogasta, la que desciende gradualmente de norte a sur, alcanzando a la latitud de Vichigasta 3.240 m.s.n.m. (Áspero de Aicuña).

A la altura del paralelo 30°, esta sierra se divide en las sierras de Vilgo y Paganzo. Una tercera ramificación al poniente, sierra del cerro Blanco o sierra Baja de los Portezuelos, puede considerarse como una derivación de la sierra de Vilgo. A la latitud de la ruta nacional N° 150, las tres sierras aparecen como unidades separadas. La sierra de Vilgo presenta una altura entre 1.800 y 2.000 m.s.n.m. La sierra de Paganzo no sobrepasa los 1.500 a 1.900 m.s.n.m.

La sierra Baja de los Portezuelos presenta su punto de altura máximo en el Mogote Colorado con 2.226 m.s.n.m.

La sierra de Malanzán alcanza una altura de 1.902 m.s.n.m. en el sector Mogote de Los Quesillos, punto que forma parte de la divisoria de agua occidental de la cuenca. La sierra de Los Llanos posee una altura de 1624 m.s.n.m. Las vertientes orientales de las sierras son más escarpadas que las occidentales (más tendidas) y están cortadas por profundas quebradas.

2. Las sierras bajas o lomadas están constituidas por las lomas de las Salinas, loma Blanca, loma Negra, lomas de Amaná, sierra de La Punta, colina de Paganzo, lomas disectadas y sierra de Los colorados. Están constituidas por sedimentitas carbónicas, permotriásicas (muchas veces asociadas a rocas basálticas que se dispone como diques, filones capas y coladas) y/o terciarias. Constituyen la proyección sur o se adosan a las sierras más importantes.

3. El valle Antinaco – Los Colorados es un típico valle intermontano que se ubica entre la sierra de Velasco al naciente y las sierras de Famatina, Sañogasta, Vilgo y Paganzo al poniente, se extiende desde la latitud de Pituil, hasta la de Paganzo sobre una distancia de 180 km (Sosic, 1971). La pendiente longitudinal del valle es 0,3 %.

La red hidrográfica del valle Antinaco – Los colorados pertenece al tipo de cuenca cerrada, siendo su colector principal el río Grande, el escurrimiento superficial se compone de un derrame permanente y otro aluvial, de alimentación

fluvio – nival. La llanura aluvial está constituida por sedimentos limo arcillosos. Comprende áreas de barreal en la parte norte hasta la latitud de Nonogasta, de allí hacia el sur, pasan estos materiales transicionalmente a depósitos de playa alcalina y, a partir de Los colorados, de playa salina (Sosic, 1971).

En el extremo sur del valle Antinaco – Los Colorados, el río Grande bordea por el oeste y sur la sierra de Los Colorados tomando el nombre de río Los Mogotes. El río Los Mogotes recibe al río Casas Viejas del sudoeste que drena el sector sudeste de la sierra de Paganzo y a cursos que drenan la sierra de Los colorados y el sector de la mina para luego desaguar en Los Desagües Los colorados.

Desde el punto de vista del agua subterránea el complejo acuífero del valle Antinaco Los Colorados descarga mediante vertientes en el relleno aluvial, en el Terciario, como también en los Estratos de Paganzo. Las vertientes de Agua del Medio y de Los Mogotes Colorados arrojan aguas del relleno aluvial, las de Patquía Viejo, Mollaco, Guayapa y La Chilca son del Terciario y las del Saladillo de Los Mogotes Colorados, Agua de la Sal y otras del área de la Cueva del Chacho, son vertientes que emiten agua de los “Estratos de Paganzo” (Sosic, 1971). También se puede citar como descarga la que se realiza por evaporación originando costras de sales en la zona del salitral y la que se efectúa por medio de freatófitas.

4. Las bajadas aluviales pedemontanas se han desarrollado a partir de los frentes montañosos de las sierras y lomadas mencionadas por coalescencia lateral de conos aluviales recientes. La parte proximal y media de las bajadas, están constituidas por depósitos gruesos a finos dejados por ríos actuales que descienden de las sierras y la parte distal, constituida por depósitos mas finos.

En algunas bajadas, como las correspondientes al valle Antinaco Los Colorados, que descienden de la sierra de Famatina y sierra de Velasco, se diferencian algunos abanicos aluviales de espectacular desarrollo. Al este de la sierra del Velasco, cabe destacar el cono aluvial del río Los Sauces.

También se distinguen próximos a los frentes montañosos relictos de niveles de glacia.

Las bajadas aluviales pedemontanas, en general constituyen zonas de subafloramientos y de reducido espesor de la cubierta cuaternaria (Leiva, 1997). Los subafloramientos sobre las que se han desarrollado las bajadas, son sedimentitas del Carbonífero, Pérmico, Triásico y Terciario.

5. La planicie fluvioeólica está representada por las zonas llanas ubicadas a continuación de las llanuras aluviales pedemontanas, constituidas por sedimentos de origen aluvial retrabajados por el viento.

6. Barreales: a partir de la sierra de Velazco, valle Antinaco – Los Colorados, sierra de La Cañada – Paganzo, de Vilgo, sierra Baja de Los Portezuelos y de las Sierras de Los Llanos y Malanzán se ha desarrollado una importante red de drenaje que circula obedeciendo en algunos sectores a la pendiente regional y en otros controlada por factores estructurales, buscando el nivel de base regional representado por la Salina La Antigua. La presencia aparente de un umbral estructural en el subsuelo, prolongación norte de las sierras de los Llanos y campos de médanos, impiden que esto suceda y provocan el derrame de toda la red colectora en los Desagües de Los Colorados y los bajos de Santa Rosa constituyendo una zona de barreales con sedimentos finos retrabajados por el viento y concentración de sales.

La zona más baja es la que recibe nuevos depósitos de material fino, estando casi siempre desprovista de vegetación. Fuera de las líneas de avenamiento es posible encontrar vegetación a halófila (Gómez J.C., Calella H.F., Corzo R:R: y Reynoso A.A., 1993).

7. Médanos: se trata de acumulaciones de arenas localizadas en las proximidades de Aguango, en el flanco sudeste de la sierra de Velazco y al este de los Desagües de Los Colorados entre estos y la Salina La Antigua.

Son campos de dunas que alcanzan alturas entre 10 – 70 metros con pasillos de 50-200m aproximadamente (Gómez J.C., Calella H.F., Corzo R:R: y Reynoso A.A., 1993). Según Sayago, 1981, serían formas heredadas de condiciones climáticas más áridas, afectadas por el escurrimiento superficial y estabilizadas por la vegetación.

### 4.3- MUESTREO, AISLAMIENTO Y PURIFICACION

#### Aislamiento de Bacterias

Para el aislamiento y el estudio de los diversos tipos de microorganismos que existen en la naturaleza, Winogradsky y Beijerinck desarrollaron la técnica, denominada *Cultivo de Enriquecimiento*. Es en esencia, una aplicación a micro escala del principio de la selección natural.

Se prepara un medio de cultivo de una composición química determinada, se inocula con una población microbiana mixta y luego se observa que clase de microorganismo adquiere el predominio. Esto se debe a su capacidad de crecer más rápidamente que cualquiera de los otros microorganismos presentes en el inóculo. Como resultado del crecimiento de un tipo de microorganismos, la composición del medio cambia y, después de un cierto tiempo, las condiciones ya no permiten el desarrollo del tipo originalmente predominante. El medio ambiente favorece ahora al crecimiento de otro tipo de microorganismo, que va reemplazando gradualmente a la primera forma predominante en el cultivo.

Es posible mantener el predominio de la primera forma que se desarrolla, mediante la transferencia repetida de la población mixta a medio fresco de la misma composición, a intervalos de tiempo cortos.

Es decir que un medio de cultivo es adecuado para el crecimiento de un tipo de microorganismo específico y esto es en cierto modo selectivo para el mismo. Por lo tanto, los medios de enriquecimiento líquido, tienden a seleccionar microorganismos de más elevada tasa de crecimiento entre todos los miembros de una población inoculada. La selectividad de un cultivo, no solo, está determinada por la composición del medio, sino también por otros factores como la temperatura, pH, fuerza iónica, fuente de luz, aireación.

- Elementos y Equipos Utilizados en el Desarrollo de las Experiencias



- Material de vidrio:

Erlenmeyers	250 ml
Matraces	100 ml, 1000 ml
Pipetas	1 ml, 2 ml, 5 ml, 10 ml
Frascos boca ancha	1000 ml
Probetas	50 ml, 100 ml
Vasos de precipitado	200 ml, 400 ml

- Equipos:

Balanza electrónica	0,1 gr precisión
Balanza electrónica	0,0001 gr de precisión
Peachímetro	pH, Eh
Estufa	para secado y esterilización
Estufa	para termolización
Termómetro	
Mesa agitadora	200 rpm

- Reactivos, Soluciones y Medios de Cultivo

- Reactivos:

$(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , Azufre elemental,  $\text{FeSO}_4$ , todos de grado analítico de pureza.

- Soluciones:

$\text{H}_2\text{SO}_4$ , dilución 10N para ajustar el pH.

- Medios de cultivo:

Medio 9 K – S<sup>0</sup> descrito por Silverman y Lundgren, para *Aciditibacillus thiooxidans*.

Composición:

Solución A

(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3 gr
MgSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	0,5 gr
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0,5 gr
KCl	0,1 gr
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,01 gr
Diluidos en 1000 ml	

Se agregó azufre elemental en una relación de 1 gr cada 100 ml de la solución A.

El pH se ajustó a 2,5 con ácido sulfúrico 10 N.

Medio T y K – Fe<sup>+2</sup> descrito por Touvinen y Kelly, para *Aciditibacillus ferrooxidans*.

Composición:

Solución A

(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 gr
MgSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	0,1 gr
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0,1 gr
Diluidos en 800 ml.	

*Solución B*

FeSO <sub>4</sub>	33,4 gr
-------------------	---------

Diluido en 200 ml.

El pH se ajustó a 2 con ácido sulfúrico 10 N.

- Muestreo:

Las bacterias a utilizar en este proceso fueron extraídas de muestras de agua tomadas en diferentes puntos del yacimiento de La Mejicana, el 13 de octubre de 2000, por las becarias Mariana Nuñez y Mariana Uria, acompañadas de un investigador principal.

El agua se obtuvo del Socavón Banco Nación y en el exterior en cauces que salen de la mina.

Las muestras de interior y exterior indicaron:

	Muestra interior	muestra exterior
PH	2,5	3,0
Eh	397mv	325,5mv
O disuelto	2,3mg/l	4,8mg/l
Temperatura	10°C	10,7°C

- Descripción de los Ensayos

El acondicionamiento del lugar de trabajo, esto es, la termolización de área de crecimiento de las bacterias, se realizó con una estufa de cuarzo, interconectada con un sistema de regulación automática de la temperatura. El sistema se ajustó para mantener la temperatura en 30 °C, condición propicia para el desarrollo de los cultivos.

La introducción del  $O_2$  y el  $CO_2$  se logró agitando mediante la utilización de la mesa agitadora.



Foto 2: Mesa agitadora en ambiente termolizado.

El peachímetro se calibró utilizando buffer con pH4, teniendo en cuenta la escala de pH a las que se realizan las experiencias.

El material de vidrio a usar, fue limpiado y esterilizado en una estufa, a una temperatura de  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 40 minutos aproximadamente. Esto permitió que el material de vidrio estuviera libre de microorganismos vivos.

- Preparación de soluciones y culturas:

Preparación de la Solución de Acido Sulfúrico:

Esta se prepara con una dilución 10N, para ello se toman 25,3 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 98% de pureza y se coloca en un matraz de 1 00 ml, se enrasa hasta el aforo correspondiente a este volumen.

#### Preparación del Medio de Cultivo:

Las sales se pesaron de acuerdo a la cantidad requerida según el medio de cultivo que se preparó, y se colocaron cada una en un erlenmeyer, se agregaron 50 ml de agua destilada y se agitaron hasta obtener la solubilización total. Después de solubilizadas totalmente las sales, se mezclaron en un matraz, de 1000 ml, y se agregó agua destilada hasta alcanzar el aforo correspondiente. En el caso del medio T y K, se agrega agua de modo de llegar a un volumen total de 800 ml. También para la preparación de este último medio fue necesario preparar una solución de sulfato ferroso, de acuerdo a lo indicado en el párrafo correspondiente al medio T y K  $\text{Fe}^{+2}$ . El pH se ajustó al correspondiente en cada caso.

Las muestras de agua tomadas, se mantuvieron en la heladera a una temperatura aproximada de 5 °C hasta su utilización. Las mismas se identificaron claramente para su posterior manipulación y control. Con anterioridad a su uso se retiraron de la heladera y se dejaron reposar hasta que alcanzaron la temperatura ambiente.

#### Siembra

##### Acidithiobacillus thiooxidans

En erlenmeyers de 250 ml se coloca 30 ml de medio 9 K + 0,3 gr de  $\text{S}^0$  + 10 ml de muestra.

##### Acidithiobacillus ferrooxidans

En erlenmeyers de 250 ml se colocaron 20 ml de medio T y K + 10 gr de  $\text{FeSO}_4$  + 10 ml de muestra.

Cada erlenmeyer, se tapó con una cubierta de espuma de poliuretano asegurada con una banda elástica, para permitir el paso del aire al interior del frasco y de este modo proveer oxígeno y dióxido de carbono al cultivo.

Antes de dar comienzo a la agitación, se midió la concentración del ion hidrógeno (pH y el potencial Eh) inicial de cada frasco; posteriormente, con la medición a intervalos establecidos, de estas variables, se controló el crecimiento de las bacterias que se deseaban aislar.

La primera de estas variables se usó para medir el crecimiento de *los T. thiooxidans* y la segunda para los *T. ferrooxidans*, además debido a la oxidación del ion ferroso se observó un cambio de color a rojo anaranjado en los frascos con los *T. ferrooxidans*.

Para obtener cultivos con *T. thiooxidans* y *T. ferrooxidans*, es decir lograr el predominio de éstos organismos (aislamientos) en el medio utilizado, se realizaron transferencias repetidas de la población bacteriana a medio fresco, a intervalos de tiempo cortos.

El tiempo en el cual se realizó la transferencia, fue función de los valores obtenidos en la medición del pH y Eh; indicadores indirectos éstos del crecimiento de los microorganismos en las condiciones establecidas.

#### – Purificación de las Bacterias

Inicialmente, los investigadores, habían desarrollado medios de cultivo líquidos, sencillos y transparentes, de composición química conocida, para el crecimiento selectivo de microorganismos. Como se mencionó, la técnica de Cultivo de Enriquecimiento, desarrollada por Winogradsky y Beijerinck, que consistía en la aplicación a micro escala del principio de selección natural,

permitía el desarrollo de diferentes tipos de organismos, de acuerdo al medio de cultivo utilizado, de manera selectiva.

Cabe destacar que una característica importante de los microorganismos, es su gran capacidad de variación de la función fisiológica, en función al medio en el que se desarrollan. Por ello, puede estimarse que los cambios producidos en el medio, por el crecimiento de los microorganismos, a lo largo del tiempo, pueden producir transformaciones fisiológicas en los mismos.

Surge entonces, la necesidad del uso de cultivos puros, para el estudio de los microorganismos. Definiéndose, como cultivo puro, a aquel que contiene una sola clase de organismo.

Para lograr este objetivo se introduce la técnica de cultivo de microorganismos en medios sólidos.

Existen varias técnicas, pero la de más común utilización es la desarrollada por Koch, quien ideó un método en el cual a un medio líquido de composición química conocida, se le agrega una sustancia clara solidificante; de este modo serían fácilmente visible las colonias que se formasen.

Como consecuencia, la variación en el medio líquido base, permitiría responder a los diversos requerimientos nutricionales de los diferentes grupos de organismos.

Esta técnica, se denominó *Método de Siembra en Placa*. El solidificante comúnmente usado es el agar, el cual para fundir requiere de una temperatura de 100 °C aproximadamente y, por lo tanto permanece sólido a través de la escala de temperaturas a las que se cultivan las bacterias. En algunos tipos de organismos, se reemplaza el agar por agarosa,

- Elementos y Equipos Empleados en el Desarrollo de las Experiencias

Material de vidrio:

Placas de Petri	
Tubos de ensayo Pipetas	1 ml, 2 ml, 5 ml, 10 ml
Erlenmeyers	250 ml, 500 ml, 1000 ml
Vasos de precipitación	200 ml, 400 ml

Equipos:

Balanza electrónica	0,1 gr precisión
Balanza electrónica	0,0001 gr de precisión
Peachímetro	pH, Eh

Estufa para cultivo

Estufa para secado y esterilización de material de vidrio

Autoclave para esterilización de soluciones

- Ractivos, Soluciones y Medios de Cultivo.

Reactivos:

NH<sub>4</sub>Cl, MgCl<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> . . 5H<sub>2</sub>O, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.7 H<sub>2</sub>O, Fe SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>HP0<sub>4</sub>, Agar, Agarosa, todos de grado analítico de pureza.

Soluciones:

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, dilución 10N y HCl 1N para ajustar el pH, agua acidulada con sulfúrico a pH = 1,8.

Medios de Cultivo:

ATTC - 238 para *Aciditibacillus thiooxidans*.



Composición:

Solución A

NH <sub>4</sub> Cl	0,13 gr
MgCl	0,1 gr
CaCl <sub>2</sub>	0,1 gr
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	3 gr
Diluidos en 700 ml	

Solución B:

NaS <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . 5H <sub>2</sub> O	0,1 gr
Diluido en 150 ml	

El pH se ajusta a 4,2 con ácido clorhídrico 1 N.

T y K - Agarosa para *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Composición:

Solución A

NH <sub>4</sub> Cl	1 gr
MgSO <sub>4</sub> .7 H <sub>2</sub> O	1 gr
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0,1 gra
Diluidos en 800 ml.	

Solución B

Fe SO <sub>4</sub>	33,4 gr
Diluido en 200 ml.	

Solución C

Agarosa 9 gr por cada 1000 ml de volumen final de la solución A + B.

La técnica de purificación se inició con la esterilización del material de vidrio a usarse, en estufa a 70 C durante 40 minutos

En la preparación de las placas con medio ATTC - 238 , para el cultivo de los *T. thiooxidans*, se tomaron 105 ml de la Solución A del medio 9 K, 22,5 ml de la Solución B conteniendo 0,75 gr de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , y 22,5 ml de Solución C conteniendo 2,25 gr de agar; cada una de estas soluciones se colocó en un erlenmeyer.

Asimismo, para la preparación de las placas con medio T y K, para el cultivo de los ferrooxidans, se tomaron 120 ml de la Solución A y 30 ml de la Solución B conteniendo 5,01 gr de  $\text{FeSO}_4$ , Y 1,35 gr de agar; cada una de estas soluciones se colocaron en un erlenmeyer.

Estos erlenmeyer que fueron anteriormente rotulados, se esterilizaron en autoclave, a 1 atm de presión durante 15 minutos, como así también el agua acidulada a pH 1,8 para la preparación de las diluciones del cultivo en medio líquido,

Una vez finalizada la esterilización, y sin dejar que se solidifiquen las soluciones conteniendo agar, en un frasco se mezclaron las soluciones correspondientes al medio ATTC - 238 y en otro las soluciones correspondientes al medio T y K - Agarosa, y se homogeneizaron. Luego se vertieron en las placas, el contenido de los frascos, llenado las mismas hasta un tercio de su altura y dejando que solidifiquen a continuación. Cuando ha tenido lugar la solidificación se taparon y envolvieron en papel para guardarlas en la heladera, hasta su utilización.

Después de preparado el material y los medios, se procedió a sembrar. Para ello, primeramente se diluyó en tubos, los cultivos aislados de las diferentes muestras tratadas. De cada erlenmeyer conteniendo los *A. thiooxidans* y los *A. ferrooxidans*, se tomó 1 ml de cultivo y se lo pasó a un tubo de ensayo con 9 ml de agua acidulada; de ésta dilución se toma 1 ml y se lo pasa a un tubo de ensayo

con 9 ml de agua acidulada, se continuó así hasta alcanzar diluciones de  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$ .

Luego de alcanzadas las diluciones indicadas anteriormente para cada cultivo de thiooxidans y ferrooxidans, sobre la superficie del medio sólido correspondiente se depositan con una pipeta una pequeña cantidad (0,1 ml) de muestra bacteriana y se distribuye extendiéndola con una varilla de vidrio curvada esterilizada en la llama del mechero. En esta operación se separan las bacterias sobre la superficie solidificada, de modo de lograr el desarrollo de colonias individuales a partir de una célula bacteriana.

La incubación de las placas se realiza a una temperatura de 30 °C, en una estufa de cultivo.

Al transcurrir aproximadamente diez días, pudo observarse el desarrollo de pequeñas colonias, al finalizar los quince días aproximadamente, se tuvieron colonias definidas. A continuación una colonia fue llevada a medio líquido, obteniéndose así un cultivo puro para su aplicación y estudio.

Cuando la técnica se realiza adecuadamente, existen zonas en las placas en las que las colonias están lo bastante separadas, de modo que en el posterior paso a medio líquido, la inoculación corresponda a una colonia procedente de una célula bacteriana. Se supone que cada colonia aislada está formada por la descendencia de una sola célula, y es por consiguiente, un cultivo puro.

De esta forma se obtuvieron las cepas puras para ser utilizados en los ensayos de lixiviación.

#### 4.4- MUESTREO Y MINERALOGIA:

##### 4.2.1- Muestra Los Colorados

Se realizó un muestreo sistemático de la pila unificada, según su eje y cada 30 mts. Las muestras se unificaron y se procedió a su cuarteo.

Posteriormente se tomo una fracción y se procedió a la determinación de las especies mineralógicas.

La muestra está constituida principalmente por cuarzo (94.7%) acompañada de óxidos de hierro, goetita y hematita (5.3%). Los estudios de difracción de rayos X y microscopía electrónica con microanálisis permitieron determinar además de los minerales ya mencionados la presencia en escasa proporción de muscovita, yeso, feldespatos, circón, rutilo, apatita, monacita, calcita, piritita y óxidos de manganeso.

Los minerales de uranio detectados mediante microscopía electrónica utilizando contraste de composición fueron: uranio con titanio, uranio con silicio, y uranio con aluminio/silicio/calcio. Solamente el 14.3% de los minerales de uranio esta libre. Se encuentran ligados, en forma simple, un 28.6%. El resto 57.2% esta encapsulado en material alterado (feldespato o caolinita) el cual estaría disponible para lixiviar en diferentes proporciones según el grado de acondicionamiento o atricionamiento de la muestra.

El un análisis de tamaño en seco dió el siguiente resultado:

Clase Granulométrica mm	Directo %	Pasante %
+ 0.420	74.9	25.1
+ 0.210	11.6	13.5
+ 0.105	6.2	7.3
+ 0.074	1.9	5.4
+ 0.044	1.7	3.7
- 0.044	3.7	
Total	100.0	

El análisis cuantitativo mediante microscopía óptica por reflexión fue realizado en la clase granulométrica +0.210 mm. El mismo se utilizó para estimar el porcentaje global de los minerales mayoritarios y minoritarios en la muestra según el siguiente resultado:

Mineral	Libre %	Ligado %
Cuarzo	81.4	13.3
Óxidos de Hierro (Goetita y Hematita)	0.3	5.0

Los estudios de difracción de rayos X permitieron determinar los constituyentes principales, cuarzo, acompañado en escasa proporción por caolinita, muscovita, yeso y feldespato. La Figura muestra el difractograma obtenido.

Los estudios de microscopía electrónica con microanálisis dispersivo en energía se realizaron en una sección pulida de la clase granulométrica +0.210 mm. Los minerales en escasa proporción que acompañan a los ya mencionados son: circón, rutilo, apatita, monacita, pirita, calcita, y óxidos de manganeso.

Los minerales de uranio se pueden agrupar en 3 especies con las siguientes composiciones características.

Especie	Composición					Mineral
	UO <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	TiO <sub>2</sub> %	
A	85.0				15.0	No identificado
B	76.0	24.0				Cofinita (?) USiO <sub>4</sub> (OH) <sub>4</sub>
C	27.1	11.0	30.2	14.7		No identificado

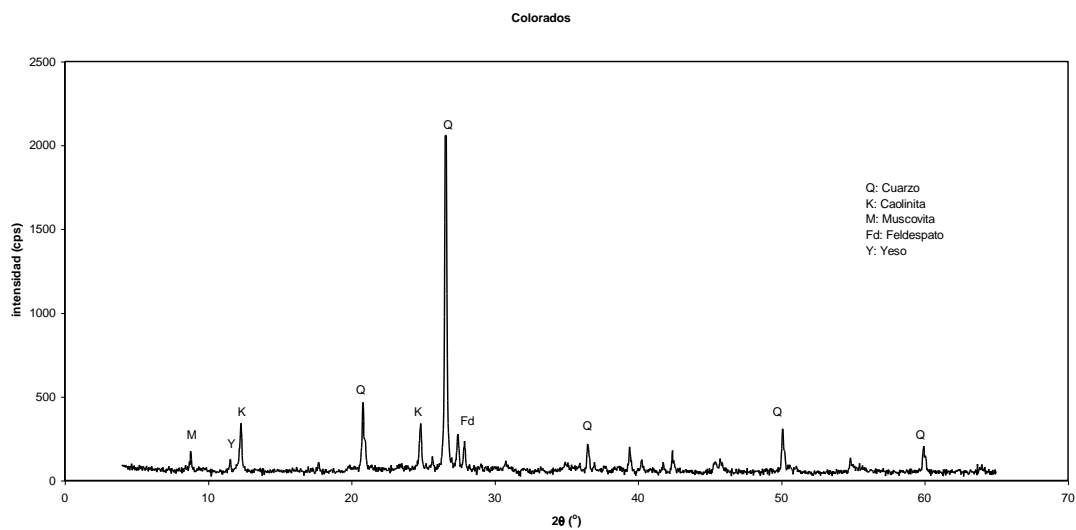
Las minerales de uranio se encuentran ligados o encapsulados con cuarzo, feldespatos de potasio y posiblemente caolinita. La forma de presentarse puede ser resumida en la siguiente tabla.

Especie	Abundancia %	Libre %	Ligado %	Encapsulado, %	
				alterado *1	compacto *2
U con Ti	28.6		14.3	14.3	
U con Si	57.2	14.3	14.3	28.6	
U con Al/Si/Ca	14.3			14.3	

Nota:

\*1 Feldespato de potasio y caolinita

\*2 Cuarzo



**Difractograma**

#### 4.2.2- Muestra La Mejicana:

Debido a que los ensayos de lixiviación se han programado con la muestra de un sulfuro, en este caso escombreras de La Mejicana, para que las bacterias inoculadas tengan su fuente de energía asegurada y generen el ácido sulfúrico y sulfato férrico necesarios para realizar la lixiviación, se incluye a continuación la mineralogía de las mismas.

La muestra denominada “Mejicana” está constituida principalmente de cuarzo (41.6%), pirita (54.4%) y enargita (4%). El porcentaje de enargita libre alcanza el 75%. Los estudios de difracción de rayos X y microscopía electrónica con microanálisis permitieron determinar además de los minerales ya mencionados la presencia en escasa proporción de muscovita, caolinita, feldespatos, circón, calcopirita, bornita, molibdenita, alunita y rutilo.

No se detectó presencia de minerales de uranio.

Se realizó un análisis de tamaño en seco con el siguiente resultado:

Clase Granulométrica mm	Directo %	Pasante %
+ 0.420	74.4	25.6
+ 0.210	9.6	16.0
+ 0.105	6.6	9.4
+ 0.074	3.7	5.7
+ 0.044	3.3	2.4
- 0.044	2.4	
Total	100.0	

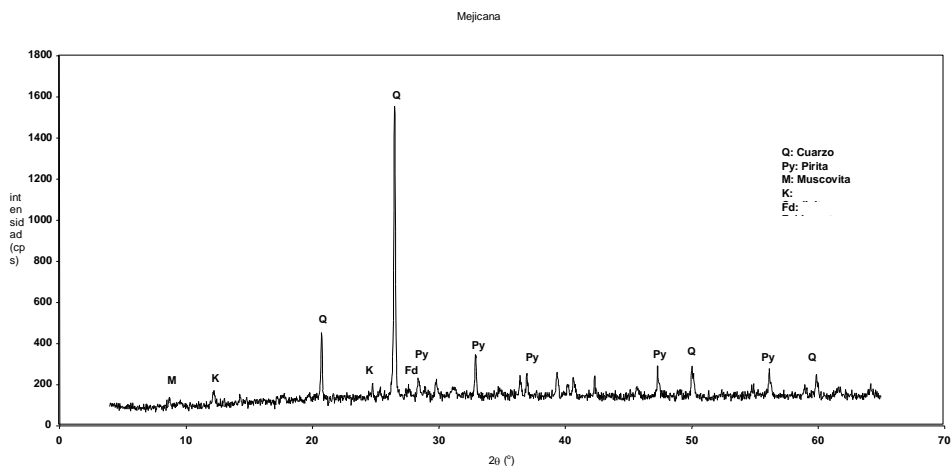
El análisis cuantitativo mediante microscopía óptica por reflexión fue realizado en la clase granulométrica +0.210 mm. El mismo se utilizó para estimar el porcentaje global de los minerales mayoritarios y minoritario en la muestra según el siguiente resultado:

Mineral	Libre %	Ligado %
Cuarzo	29.4	12.2
Pirita	35.6	18.8
Enargita	3.0	1.0

Los estudios de difracción de rayos X permitieron determinar los constituyentes principales, cuarzo y pirita, acompañados en escasa proporción por caolinita, muscovita y feldespato. La Figura 1 muestra el difractograma obtenido.

Los estudios de microscopía electrónica con microanálisis dispersivo en energía se realizaron utilizando contraste de composición obtenido por formación de la imagen con los electrones retrodifundidos correspondientes a una sección pulida de la clase granulométrica +0.210 mm. La imagen así formada presenta fases claras correspondientes a especies de número atómico elevado mientras las fases oscuras corresponden a especies con número atómico bajo. Los minerales en escasa proporción que acompañan a los ya mencionados son: circón, calcopirita, bornita, molibdenita, rutilo y alunita.

Los métodos de microscopía óptica, microscopio estereoscópico y microscopio por luz reflejada, difracción de rayos X y microscopía electrónica no permitieron determinar la presencia de minerales de uranio.



Difractograma

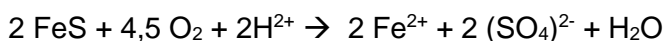


## 4.5 ENSAYOS DE BIOLIXIVIACION

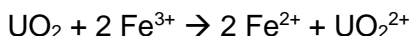
### 4.5.1 Propuesta de Mitigación

El equipo de trabajo analizo la posibilidad de aplicar lixiviación bacteriana indirecta en la recuperación del uranio contenido en las pilas, con el objetivo de desactivar las mismas dejando un residuo con bajo contenido de uranio y bajo impacto ambiental. Para la aplicación de biolixiviación se requieren bacterias y mineral de sustrato (sulfuros). Como estos no se encuentran en Los Colorados, debe recurrirse a bacterias y mineral de otra procedencia, en nuestro caso aplicamos los procedentes de la Mina la Mejicana

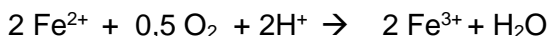
Para esto se utilizo la bacteria *Acidithiobacillus Ferrooxidans*, oxidante del Fe, que asiste a la lixiviación del uranio por oxidación asociada a los sulfuros que contienen  $\text{Fe}^{2+}$  (específicamente pirita y enargita), presentes en las escombreras de la Mina La Mejicana. Estos sulfuros de Fe, por acción bacteriana pasan a  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ . (Vourinen, et al., 1985)



el ion  $\text{Fe}^{3+}$  actúa sobre el  $\text{U}^{4+}$ , oxidándolo a  $\text{U}^{6+}$



Como sabemos el  $\text{Fe}^{2+}$  pasa a  $\text{Fe}^{3+}$ , dando un electrón al sistema, energía que es utilizada por la bacteria en su metabolismo (Torma, 1986)



La bacteria regenera el agente químico (por oxidación del  $\text{Fe}^{2+}$ ), lixivante y mantiene el potencial redox alto, que es lo que se necesita en un sistema de lixiviación de uranio.

En el presente trabajo fue ensayado el material de las pilas de lixiviación abandonadas de la Mina Los Colorados, La Rioja (Mas y Calbo. 1999), con solución ácida de  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  seguida por una etapa separada de oxidación bacteriana del Fe y regeneración previa del  $\text{Fe}^{3+}$  para su reutilización como licor de lixiviación del mineral de uranio. Tanto el Fe como el Uranio en solución, fueron determinados para evaluar el comportamiento del sistema.

#### 4.5.2 Metodología

Las muestras minerales fueron obtenidas de las pilas abandonadas de la mina de Uranio Los Colorados, descritas anteriormente, cerca de la localidad de Patquia, La Rioja.

La mineralogía de la muestra (ver mineralogía, descrita anteriormente) indico estar constituida principalmente por cuarzo (94.7%) acompañada de óxidos de hierro, goetita y hematita (5.3%). Los minerales de uranio detectados fueron: uranio con titanio, uranio con silicio, y uranio con aluminio/silicio/calcio. Las especies detectadas son boltwodita, metaautunita, uranofano y cofinita. Solamente el 14.3% de los minerales de uranio esta libre. Se encuentran ligados, en forma simple, un 28.6%. El resto 57.2% esta encapsulado en material alterado (feldespato o caolinita) el cual estaría disponible para lixiviar en diferentes proporciones según el grado de acondicionamiento o atricionamiento de la muestra. Las muestras fueron reducidas de tamaño a  $-150 \mu$ , el contenido de Uranio, en promedio, fue de 230 ppm.

La muestra extraída de las escombreras de La Mejicana (que provee el sustrato para las bacterias), está constituida principalmente de cuarzo (41.6%), pirita (54.4%) y enargita (4%). El porcentaje de enargita libre alcanza el 75%. En escasa proporción tenemos muscovita, caolinita, feldespatos, circón, calcopirita, bornita, molibdenita, alunita y rutilo. No se detectó presencia de minerales de uranio. Una fracción de esta muestra fue reducida a  $-270 \mu$  para ser usada como sustrato en la aplicación bacteriana.

#### 4.5.3 Ciclos de lixiviación

En el primer ciclo de lixiviación se utilizó una solución de  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , conteniendo 5 mg/l de Fe, ajustada a pH 2, denominada solución B.

En el segundo ciclo de lixiviación se utilizó una solución similar, denominada solución C ajustando también al pH a 2.

Ambos ciclos fueron ejecutados en frascos agitados a 300 rpm y con 30 % de porcentaje de sólidos en peso.

La solución A: constituida por el Medio T y K sin  $\text{Fe}^{2+}$  descrito por Touvinen y Kelly (1974), para *Acidithiobacillus ferrooxidans*, y 10 % en volumen de inóculo de una cepa aislada y purificada de las aguas de la mina La Mejicana (Mas et al 1999).

La solución B: contiene  $\text{Fe}^{3+}$  producido por la oxidación bacteriana de la pirita y otros minerales presentes en el material portador de sulfuros, proveniente de la mina La Mejicana, con un contenido de ion férrico de 5 mgr/l.

La solución C: contiene  $\text{Fe}^{3+}$  producido por la reoxidación bacteriana del  $\text{Fe}^{2+}$  disuelto proveniente de la lixiviación del uranio, con un contenido promedio de ion férrico de 4,2 mgr/l.

#### 4.5.4 Determinaciones

El uranio fue determinado por espectrofotometría; las determinaciones del Fe, tanto del Fe total como de  $\text{Fe}^{2+}$ , se realizó por titulación con dicromato de potasio. La determinación de  $\text{Fe}^{3+}$  por la diferencia del  $\text{Fe}^{2+}$  con el Fe total.

#### 4.5.5 Experiencias

Se realizó un muestreo del material portador de pirita de las escombreras de la mina la mejicana el que se acondicionó a -270 mallas.

Se preparo una pulpa con este material al 20 % de sólidos en peso , con medio T & K (Touvinien y Kelly, 1974) y 10 % en volumen de inóculo de un cepa pura de *Acidithiobacillus Ferrooxidans*, aisladas y purificadas de las aguas de la mina La Mejicana (Mas et al 1999.) y se ajustó el pH a 1,5 .

Después de cuatro semanas de ataque bacteriano en un ambiente termolizado a 30°C y con agitación periódica, se obtuvo una cantidad adecuada del ion férrico (5 mgr/litro) para ser aplicado a la lixiviación del uranio.

Por filtrado se separó la solución (solución B). A los sólidos se los repulpó al 20% de sólidos mediante agregado de la solución A, para continuar con la biooxidación de la pirita y tener líquido lixivante B para reponer.

Las muestras extraídas de las pilas abandonadas del proceso de lixiviación del uranio de Los Colorados se las secó y redujo de tamaño a - 150#, y se preparó una suspensión con un porcentaje sólidos del 30%, mediante el agregado de solución B. Los ensayos de agitación se realizaron en frascos, a 300 rpm, con pH ajustado a 2, durante 24 hs. Después de este tiempo prácticamente todo el  $Fe^{3+}$ , paso a  $Fe^{2+}$ , finalizando así el ciclo I de lixiviación.

Luego se sometió a la pulpa a una separación sólido-líquido, mediante filtración y se determinó el uranio y las especies de Fe .

A las solución resultante se le agregó 30% de volumen de solución A, se colocó en frascos agitados a 300 rpm, a 30°C, durante 24 horas. De esta forma el  $Fe^{2+}$  disuelto por biooxidación pasó a  $Fe^{3+}$ , obteniendo 4,2 mg/l de Fe en solución.

El sólido remanente del ciclo I, se lo repulpa con las soluciones lixiviantes C y B y se inicia el ciclo II de lixiviación durante un tiempo de 24 horas, a pH 2 y en frascos agitados a 300 rpm igual que en el ciclo I. Al final del segundo ciclo se realizó la separación de sólido y líquido, practicando las determinaciones químicas del uranio,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  y Fe total.

El proceso se explica en el flujograma siguiente y los valores obtenidos en la tabla 2.

MUESTRA MINERAL	ENSAYOS	SOLUBILIZACIÓN DE URANIO					
		CICLO I			CICLO II		
		pH	Mgr/l	%	pH	mgr/l	%
LOS COLORADOS	I	1,8	145,8	63,4	1,8	191,8	83,4
	II	2,1	144,4	62,8	1,9	182,1	79,2
	III	1,7	159,4	69,3	1,6	178,9	77,8
	IV	1,9	153,4	66,7	1,8	181,9	79,1
	V	1,9	141,4	61,5	1,9	174,3	75,8
	VI	1,6	149,3	64,9	1,6	191,6	83,3
	VII	1,8	144,4	62,8	1,7	192,6	83,7

## 5 -CONCLUSIONES

1. La sierra Los colorados, en cuyo ámbito se encuentra la mina Los Colorados, forma parte de una gran cuenca endorreica que tiene por nivel de base los desagües de Los Colorados y Bajos de Santa Rosa, en cuyas proximidades se encuentra Patquía.
2. Esta zona de desagües está constituida por sedimentos finos de origen fluvio eólico con presencia de sales y es un área de agradación.
3. El efecto del agua de las lluvias está degradando y deteriorando severamente las pilas de la mina, arrastrando parte de este mineral acidulado con contenidos de metales pesados y uranio hacia el río Los Mogotes y zona de barreales de los desagües de Los Colorados.



4. Además, la zona de Los Mogotes Los Colorados constituye una de las áreas de descarga del agua subterránea del valle Antinaco Los Colorados.

5- En la tabla 1, se pueden ver los resultados obtenidos de las siete experiencias realizadas y los ciclos I y II. En el primer ciclo solo en un ensayo hay un aumento significativo del pH (supera 2), esto indicaría la presencia aleatoria de un mineral consumidor de ácido. En el segundo ciclo el pH en general se mantiene o sufre un leve descenso.

6- La pérdida de Fe en el primer ciclo se debe probablemente a la formación de precipitados como la jarosita o la presencia de compuestos complejos del Fe.

7- En el ciclo I se obtiene, en promedio para los 7 ensayos, una recuperación del 64,49%.

8- En el ciclo II la misma alcanza el 80,32%. Es decir que en el residuo que deja este tratamiento, queda con un tenor de uranio del orden del 20% de la ley inicial de la pila (45 ppm), concentración que puede ser considerada de un nivel ambientalmente adecuado.

9- El área de los Desagües de Los Colorados constituye una zona de alta vulnerabilidad a la contaminación ante las colas de la mina no tratadas, con el consecuente peligro al medio circundante. Resulta conveniente aplicar este proceso a nivel de escala piloto para determinar si se pueden mantener o mejorar los grados de recuperación obtenidos para el uranio. De llegarse al tratamiento industrial de las pilas, el nuevo residuo sólido además debe ser desactivado por alcalinización hasta la neutralización, y reubicado en un lugar ambientalmente de riesgo mínimo.

10- medidas de mitigación que se debieran tomar en forma inmediata:

Entre las medidas de mitigación que se proponen y que se debieran implementar lo antes posible tenemos, entre otras:

1) *Restaurar la topografía del área de la mina a fin de:*

- a) Eliminar la peligrosidad de derrumbes espontáneos del *pit* dejado por la explotación minera.
- b) Rellenar el área a efecto de impedir que las aguas meteóricas se acumulen en el fondo de la excavación.

2) *Sobre las pilas:*

- a) Realizar desvíos y canalizaciones a fin de evitar que las aguas ingresen al sector de pilas.
- b) Neutralizar el pH del mineral de las pilas llevándolo a valores en los que no se produzca la disolución de los metales pesados.
- c) Recomponer el recubrimiento con el material estéril, del espesor original de las pilas y mantenerlo periódicamente.

3) *Sobre toda el área:*

- a) Alambrar el sector a fin de cerrar el ingreso de animales y seres humanos, al menos provisoriamente, colocando carteles con leyendas que alerten de los riesgos si se ingresa.
- b) Realizar un estudio de Impacto Ambiental, con el objeto de determinar la pluma de la contaminación, con uranio y metales pesados, sobre los ríos y aguas subterráneas.
- c) Realizar un monitoreo sobre las aguas superficiales y subterráneas.-

diciembre 2001

La Rioja,



## 6- BIBLIOGRAFIA-

ADDISON – WESLEY PUBLISHING COMPANY INC. Uranium Ore Processing (1958)

Arden, T.V. "The Analysis and Recovery of Uranium from Low Grade Ores". British Report AERE-R 2862 (Mayo 1959)

Burriel Marti, F. y otros. Química Analítica Cualitativa (1983).

*Calbo V., Mas M. A., 1999. "Informe: Muestreo Los Colorados" (Proyecto "Estudio de Bioactividad Presente en las Minas Metalíferas de La Rioja).*

Gómez J.C., Calella H.F., Corzo R: R: Y Reynoso A.A., 1993 Mapa de las Subregiones de Vegetación y Suelo del Chaco Arido de La Rioja. G.T.Z. La Rioja.

Hagni, Richard. Ore Microscopy of Uranium Minerals (1981). Department of Geology and Geophysics University of Missouri- Rolla

I.A.E.A.-Viena. Significance of Mineralogy in the Developments of Flowssheets for Processing Uranium Ores (1980).

JUNTA DE ENERGIA NUCLEAR (CIEMAT) Capacitación en el Tratamiento de Minerales de Uranio. (Curso Interregional, 1983)

Laxen, P.A. Factors in the Dissolution of Uranium from South African Ores and Observations on the Nature of the Undissolved Uranium. Unit Processes in Hydrometallurgy. Edits. Milton E. Wadsworth and Franklin T. Devis. Gordon and Breach Science Publishers, New York (1964).

Laxen, P.A. Leachins Fundamentals. The Dissolution of Uranium Minerals from South African Ores in Acid Solution. Report PEL-121. Vol. 5, Atomic Energy Board. Pretoria (Sudafrica)

Leiva, A. 1999 "Identificación y Evaluación de Fuentes de Agua Localidad Amaná".

-Loredo Perez J., 1997. "Contaminación de Aguas" (Proyecto FOMEC 465).

Mas, M. & V. Calbo. 1999. Estado de una explotación minera abandonada - La Rioja. PRODEA - Ambiental 99 - UNSJ. pag. 145

Mas, M.; R. C. Danielle; R. Becerra; V. Calbo , 1994. Caracterización de las bacterias aisladas de la mina La Mejicana. Primer Congreso de Actividades Mineras: Pag. 189 – 202.

Mas, M.; V. Calbo; E Balmaceda; N. Carrizo; L. Tsakoumagkos & H. Hunicken. 1999. Estudio de bioactividad presente en las minas de La Rioja. Informe Final, Publicación Interna UNLaR. pag 24- 29

Merrit, R. C. "The Extractive Metallurgy of Uranium" Colorado School of Mines Research Institute (1971)

*Morelly J.R. , Azcuy C.L., Hunicken M. , Limarino C.O., Pensa M.V., 1984, "El Grupo Paganzo en Los Colorados de Patquia, La Rioja".* Provincia de La Rioja – Programa Desarrollo de Pequeñas Comunidades. Consejo Federal de Inversiones.

Sayago, J.M. 1981. Morfogénesis de los barreales y su relación con el deterioro del paisaje en el valle de Catamarca. Acta Geológica Lilloana XV:3. Facultad de Ciencias Naturales . Universidad Nacional de Tucumán.

Sosic, M. 1971 Descripción Hidrogeológica del Valle Antinaco – Los colorados, provincia de La Rioja. D.N.G.M. boletín N° 123:7-54 Buenos Aires

Torma, A.E., 1986. Kinethics of Pirite and Ferrous Iron Oxidation by Aciditiobacillus Ferrooxidans. Proceeding of the Second Annual General Meeting of BIOMINET. R.G.L. McCready, ed., CANMET Special Publication SP85-6, Canadian Publishing Center, Ottawa, 1986. Pag 3-24.

Touvinien, O. H. & D. P. Kelly, 1974. Use of microorganisms for the recovery of metals. *International Metallurgical Reviews*, 19 pag 179.

Touvinien, O. H.; Vourinen, A. & P. Hiltunen. 1983. Solubilization of phosphate, uranium and iron apatite and uranium, containing rock samples in synthetic and microbiologically produced acid leach solutions. *EUR Journal Appl. Microbiology and Biotechnology* 17: Pag. 327 – 333.

Vourinen, A.; P. Hiltunen & O. H. Touvinien. 1985. Speciation of ferrous and ferric iron associated with the indirect bacterial leaching of uranium ore materials. *Journal Ferment Technology*, vol 63 N° 4, Pag. 337-342.

