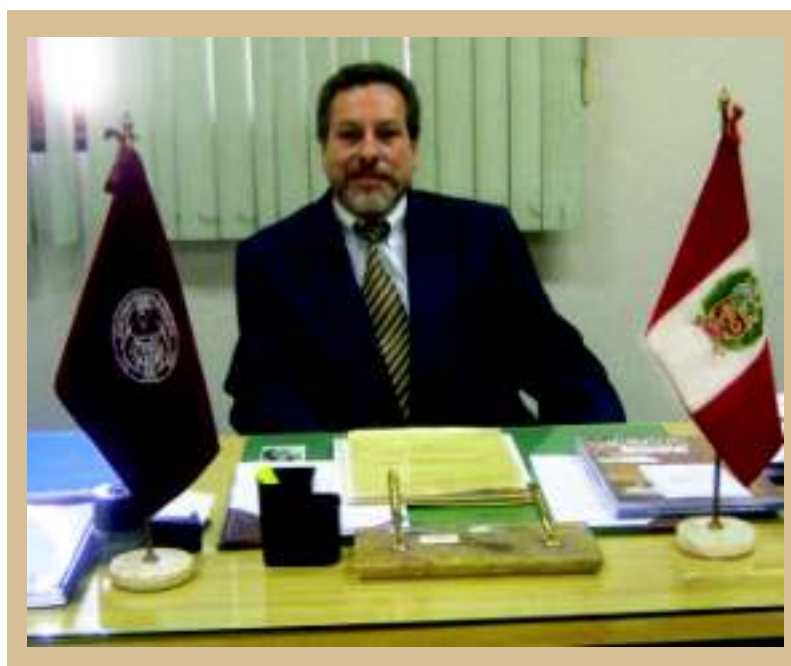


# LOS LXX AÑOS DE LA FIA



## ENTREVISTA AL Dr. JORGE PEZUA VIVANCO

*“Desde que inicié mi periodo como Decano (a. i) en julio del año pasado, en mi calidad de profesor principal con más antigüedad, he puesto total empeño en reorganizar la FIA y buscar el equilibrio financiero que toda facultad requiere” sostuvo el Dr. Jorge Pezua Decano de la FIA, en la entrevista realizada por los 70 años de creación de la Facultad.*

***¿En que situación encontró usted esta facultad y que cambios se han logrado?***

El Principal problema era económico, existía un desbalance en los ingresos y egresos, desigualdad en el pago del personal, deudas contraídas en periodos anteriores, por ejemplo, con el alquiler del local de posgrado; existía una total desigualdad en los pagos del personal administrativo y docente, este desbalance económico se reflejó en la infraestructura de nuestra facultad, la falta de equipos en los laboratorios, el mal estado de estos, problemas en los servicios higiénico, tuberías en mal estado y una serie de problemas que hemos podido solucionar.

Con respecto al desbalance económico, se ha logrado mejorar y equilibrar los sueldos de nuestros trabajadores todos, ya sean nombrados y contratados según la actividad que desempeñen. No hemos permitido que se asignen cargos adicionales y se remunere por estos cargos, como se venía haciendo desde hace un tiempo.

Hoy en día nadie gana más de lo establecido, estamos tratando de poner en azul nuestras cuentas en rojo.

Con respecto a la infraestructura de nuestra facultad

es una paradoja pues uno de nuestros peores problemas es el mal estado de los servicios higiénicos que ya han sido reparados. Nuestros equipos han sido modernizados, estamos ingresando al campo del Internet de banda ancha que permitirá a nuestros alumnos participar en un evento o conferencia como si fuera asistente, ya que estarán interconectados.

Nuestra facultad brinda servicio de consultoría a diferentes empresas de gran importancia por medio de los convenios, la facultad de Ingeniería Ambiental de la UNI, por ser una de las mejores en el área de la ingeniería sanitaria y seguridad industrial, coloca a sus profesores y alumnos de los últimos ciclos para que participen en la supervisión de proyectos de estas empresas, esto estaría beneficiando no sólo a nuestros estudiantes sino también a nuestros egresados.

Hoy en día los alumnos de la escuela de higiene y seguridad industrial, a partir del octavo ciclo ya no suelen asistir, pues la mayoría esta trabajando o practicando en las empresas, debido al Decreto Ley que obliga a todas las empresas a contar con un dpto. de seguridad industrial que se ocupe de la protección del trabajador, de aquellas condiciones

inadecuadas del ambiente que lo rodea y que ponen en riesgo su bienestar y salud física y mental, así como la protección del entorno al centro laboral.

***Al tocar usted el tema de las escuelas que existen en su facultad, me llamó mucho la atención la falta de una escuela de Ingeniería Ambiental propiamente dicha, como lo tienen otras universidades ¿ Se ha pensado hacer algo al respecto?***

Bueno, en verdad esa es una deficiencia que debemos de corregir y ya se ha conversado al respecto y buscado una solución pronta al problema. Lo que pasa es que la Facultad de Ingeniería Ambiental se inició con la escuela de Ingeniería Sanitaria a partir de 1937, ya en 1973 se crea la especialidad de Ingeniería de Higiene y Seguridad Industrial, así que las asignaturas que se dictaban eran netamente de ambas escuelas y se dejaron de lado los cursos netamente de Ingeniería Ambiental, si bien es cierto en nuestra facultad se dictan estos cursos pero son electivos, esperamos que con el tiempo se hagan obligatorios.

Es complicado formar ahora una escuela de ingeniería ambiental pues como una nueva carrera necesita de una nueva infraestructura que requeriría de una mayor inversión. Lo que sí haremos será incluir una especialización en Ingeniería Ambiental para nuestros egresados, donde se desarrollará en un año cursos netamente de esta área.

***Con respecto a los alumnos que culminarán su carrera, ¿que porcentaje de ellos se titulan y en que modalidad?***

Bueno, nuestros alumnos como en la mayoría de las facultades optan por el examen de suficiencia mediante el curso de actualización (75 %). Ahora vemos con mas entusiasmo a nuestros alumnos que incluso antes de que concluyan sus estudios ya se les aprecia interesados en este curso.

El porcentaje de titulación por la modalidad de tesis es mínimo (10 %) y no necesariamente por la falta de inclinación a la investigación, sino por la falta de dinero, una investigación exige mucho dinero, que los alumnos no pueden costear y de los pocos que se titulan con esta modalidad la mayoría son financiados por las empresas en las que laboran.

***Con respecto al tema de la gratuidad de la enseñanza, ¿que opina usted?***

Considero que debería haber una gratuidad relativa (de acuerdo a posibilidades económicas de cada estudiante) hay alumnos que pertenecen a una condición económica buena que están en la capacidad de pagar una pensión aceptable, debemos tener presente que el porcentaje que nos da el estado es limitado y si existen estudiantes en la capacidad de contribuir con la facultad mediante sus pensiones lo deberían de hacer, claro que para ello es indispensable una previa investigación.

### **Sus palabras de despedida Dr. Pezua**

La Facultad de Ingeniería Ambiental ha contribuido y seguirá contribuyendo con la intervención de sus egresados en las múltiples obras de gran envergadura, ocupando estos cargos importantes en el Perú y en organismos internacionales. Los docentes de esta facultad les dan a nuestros alumnos calidad en la enseñanza; puedo decir que ahora tienen una facultad con una mejor infraestructura, con equipos modernos de alta tecnología. Confiamos en que, el próximo decano encuentre avances y los continúe para el bien de nuestros estudiantes.



# AUDIENCIA NACIONAL A FAVOR DEL MEDIO AMBIENTE

Ana Rosa Gonzales Villacorta  
Periodista ADUNI

El Gran Teatro de la UNI fue el escenario perfecto donde se realizó la “Audiencia Nacional Ambiental y de Desarrollo Sostenible” organizada por el diario El Comercio, el viernes 23 de marzo de 2007.

Este evento inaugurado por el decano (a.i) de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la UNI, Jorge Pezua Vivanco, congregó a más de 500 personas entre profesionales, especialistas, estudiantes y público en general quienes dieron su punto de vista sobre la problemática ambiental que afecta, de diferentes formas al país y que debe ser enfrentada de una vez por todas. En esta audiencia se trataron temas como el calentamiento global, el cambio climático, la deforestación, la paulatina pérdida de nuestros glaciares y la contaminación.



El presidente del Consejo Nacional del Ambiente (CONAM), Manuel Bernales Alvarado, principal expositor en esta audiencia, consideró que el Perú así como el resto del mundo está enfrentando serios problemas ambientales, a raíz de ello señaló "El ambiente es el territorio nacional con otro nombre. ¿Acaso hay algo distinto entre ambiente y territorio? Entre ambos puede establecerse una sinonimia y, si es así, entonces el ambiente es el elemento esencial del Estado, pues no existe Estado sin territorio". Hizo una comparación entre la pérdida de grandes capas de hielo en el continente antártico como consecuencia del calentamiento global y la pérdida de glaciares que ha sufrido el Perú en los últimos 25 años. Según refirió el Presidente del CONAM esta cifra representa el equivalente del agua que consume la ciudad de Lima durante diez años. Además, sostuvo que uno de los factores que hacen al país más vulnerable a los cambios climáticos es la existencia de 80 pisos ecológicos. Las consecuencias de cualquier cambio en uno de esos pisos se sentirán en el resto.

Las consecuencias y los daños que sufre el Perú al igual que el resto del mundo ya son cuantiosas, nuestro país ya perdió 1,5 millones de hectáreas de bosques por efecto de la deforestación (región Lambayeque). Además se ha analizado que entre 1990 y el 2000 aumentaron más de seis veces las emergencias por peligros naturales.

Ante estos graves problemas, el CONAM, según señaló Bernales no puede hacer nada ya que la autoridad está maniatada por la multiplicidad de responsabilidades ambientales en el orden local, sectorial y regional que otorga la legislación. Esto impide realizar una labor fiscalizadora y sancionadora de este organismo. Manifestó también que es necesario tener una genuina autoridad ambiental, por ello, no se podrá enfrentar con éxito un TLC si no se protege antes nuestros recursos.

En lo que respecta a biodiversidad y comercio, Bernales cree que aún existe en el Perú el Programa de Promoción de Biocomercio, que impulsa y apoya la generación de bionegocios, hay un enorme reto frente al cambio climático, ya que si se mantiene la situación actual, en los próximos 50 años no se podrá alcanzar la seguridad alimentaria, y por ello no se logrará erradicar la desnutrición infantil.

Para finalizar su participación, el Presidente del CONAM, precisó que la construcción de la ciudadanía ambiental se debe dar desde el trabajo, la escuela, el hogar y la universidad, formando valores, generando solidaridad y capacidad para la participación.

Este evento contó también con la participación de destacadas personalidades como el investigador Santiago Antunez De Mayolo (hijo) quien se refirió a los problemas definidos en el país “El Niño, con sus costosas consecuencias, La Niña y el Noto. Este último se origina en los volcanes submarinos que calientan las aguas del mar. Estas características agravan las condiciones climáticas". También estuvieron presentes Cesar Morales Arnao (Callejón de Huaylas) y el Jefe de la Política Ecológica coronel Juan Miguel Tirado, quien manifestó la necesidad de un órgano que sancione y fiscalice a fin de que la labor policial no se vea disminuida o mermada por vacíos legales.

La Audiencia concluyó con las palabras de clausura del congresista presidente de la Comisión de Pueblos Amazónicos y Afroperuanos, Medio Ambiente y Ecología, Carlos Cánepa la Cotera, quien agradeció al diario El Comercio, en especial al Dr. Francisco Miro Quesada Rada, editor de Relaciones Comunitarias de El Comercio, por el notable interés en organizar la audiencia y al Rector de la UNI Roberto Morales por su apoyo y colaboración en la realización de este trascendental evento.

# OPERACIÓN Y RECRECIMIENTO DE RELAVERA No. 4 DE LA U.E.A. ORCOPAMPA DE LA COMPAÑÍA DE MINAS BUENAVENTURA S.A.A

## ANTECEDENTES

La Unidad Económica Administrativa Orcopampa de Cía. de Minas Buenaventura S.A.A., se ubica en el distrito de Orcopampa, Provincia de Castilla, Departamento de Arequipa. Actualmente procesa 1200 TMSD y su producto final son barras doré (Au 75%, Ag 20%), el mineral aurífero de cabeza ingresa a la operación de beneficio con una ley promedio de 19.0 g/TM obteniéndose una recuperación del 96%.

La planta de procesos cuenta con las operaciones de chancado, molienda- clasificación, gravimetría centrífuga, espesado, cianuración con carbón, cianuración de concentrados gravimétricos, desorción- electrodeposición, Merrill Crowe, fundición, destrucción de cianuro y disposición de relaves.

Actualmente contamos con el depósito de relaves No. 4, el mismo que se encuentra en proceso de recrecimiento. Se estima que con el ritmo actual de tratamiento, el depósito de relaves tiene una vida útil de 7 años.

## DESCRIPCIÓN DEL PROCESAMIENTO DE MINERAL

Las actividades de procesamiento de mineral, incluye el chancado, molienda, gravimetría, lixiviación, electrodeposición, precipitación y fundición.

**Sección Chancado:** Consta de tres etapas: El chancado primario reduce el mineral proveniente de mina a menos de 3" este producto es almacenado en la tolva pulmón. Esta tolva alimenta a la chancadora secundaria en donde el mineral se reduce a +/-1", este producto es transportado hacia una zaranda que trabaja en circuito cerrado con la chancadora terciaria. El fino de esta zaranda de menos de 3/4" es almacenado en la tolva de finos y el grueso es el que pasa a la chancadora terciaria.

**Sección Molienda:** Aquí se inicia el proceso de cianuración del mineral. Esta sección cuenta con tres molinos: Un molino de barras (molienda primaria) y dos de bolas (molienda secundaria y terciaria). Durante este proceso se adiciona cianuro en la molienda terciaria y cal en la molienda primaria.

El producto de la molienda terciaria pasa a un hidrociclón, donde el underflow vuelve a una remolienda y el overflow con un porcentaje de malla - 200 pasa a la sección de espesado. Esta sección esta totalmente automatizada y los parámetros operativos son controlados mediante una PC.

**Sección Gravimetría:** Parte de la pulpa de descarga de la molienda primaria y secundaria alimentan al



Vista panorámica del depósito de relaves 4, al fondo el pueblo de Orcopampa

concentrador gravimétrico Falcon, de donde se obtienen concentrados de alta ley de oro.

**Sección de espesamiento.** La pulpa que proviene del overflow de los ciclones es tamizada en una zaranda 4' x 12' cuya función es la de separar los desechos que vienen acompañando al mineral (madera molida, plásticos, etc.). En el espesador 70' x 16', se adiciona floculante aniónico con la finalidad de aumentar la velocidad de sedimentación.

El rebose del espesador cargado de valores se envía por gravedad a las pozas de solución rica y de ahí hacia el proceso de Merrill Crowe, el underflow del espesador es bombeado al tanque N°01 de carbón in leach.

**Sección Carbón in leach.** Aquí se completa el proceso de disolución de oro con cianuro. La cianuración se lleva a cabo en 6 tanques de 35' x 35', con un tiempo de residencia total de 72 horas, la oxigenación de la pulpa se lleva a cabo mediante la insuflación de oxígeno. Los tanques están en gradiente por lo que el flujo de pulpa se traslada por reboce de tanque a tanque y para evitar el paso del carbón junto con la pulpa se cuenta con tamices a la salida de cada tanque. El carbón se traslada en sentido contrario a la pulpa, esto hace que el carbón se vaya cargando de oro presente en la solución hasta llegar al tanque N° 1 en donde se realiza la cosecha del carbón cargado. La reposición de este carbón previamente desorbido, lavado y regenerado ingresa al tanque N° 6

**Cianuración de concentrados gravimétricos.** En esta etapa se procesa el concentrado obtenido por gravimetría mediante cianuración intensiva en tanques de cianuración Pachuca. El concentrado gravimétrico es recepcionado en la planta de cianuración, donde es muestreado y pesado.



**Detalle del depósito de relaves 4, se puede apreciar la geomembrana instalada y la zona de bombeo hacia la operación de beneficio**

Este concentrado alimenta mediante una faja a un Molino de Bolas donde se realiza una molienda en circuito cerrado con un ciclón hasta obtener una granulometría >95% malla 200. La pulpa es depositada en un tanque Pachuca para su cianuración.

Luego de 24 horas esta pulpa es filtrada para la obtención de la solución rica que es depositada en un tanque de 50 m<sup>3</sup>, de aquí es bombeada hacia un filtro prensa y finalmente la solución clarificada obtenida es enviada hacia el tanque de 100 m<sup>3</sup> del proceso Merrill Crowe.

Los sólidos filtrados son recirculados hacia el mismo tanque de cianuración para continuar la extracción de oro y plata. Este ciclo (cianuración-filtrado-recirculado) se realiza 03 veces luego del cual los sólidos cianurados son enviados al proceso CIL. La recuperación en esta etapa es de 98.5 % para el oro y 62.5 % para la plata.

**Sección Desorción y electro deposición.** Mediante el proceso de desorción se extrae el oro y la plata adsorbido en el carbón, resultando una solución cargada en oro y plata que son recuperados por electro deposición.

El carbón cargado del tanque CIL Nro. 01 es bombeado hacia la Zaranda de Cosecha, la pulpa regresa al tanque 01 y el carbón es transferido por gravedad a la Tolva de Recepción de Carbón Cargado. Este carbón es transferido hacia la torre de desorción (stripper).

**Sección Merrill Crowe.** En esta etapa se recuperan el oro y la plata de la solución rica clarificada mediante la precipitación con polvo de zinc. La solución rica del overflow del espesador 70'x16' alimenta a un tanque de 100 m<sup>3</sup> donde se junta con la solución rica clarificada de la cianuración de concentrados gravimétricos, de este tanque se bombea hacia el proceso Merrill Crowe.

Esta solución rica con una turbidez promedio de 10 NTU pasa a través de un clarificador donde se retiene

los sólidos presentes en la solución, la solución resultante tiene una turbidez inferior a 1 NTU y va hacia una torre de vacío para la desoxigenación. A la solución clarificada y desoxigenada se le agrega zinc en polvo, ocurriendo la precipitación del oro, plata e impurezas.

**Sección Fundición.** En esta etapa se recupera el oro y plata de los precipitados obtenidos por electro deposición y precipitación con polvo de zinc.

Se cuenta con un sistema de recuperación del mercurio compuesto por una retorta, donde se seca y se calcina el precipitado a una temperatura de 700 °C. Los gases y vapores generados son inducidos a pasar a través de dos condensadores y un filtro de carbón mediante una ligera presión de vacío. Los vapores de mercurio son condensados y recuperados en un tanque receptor donde se almacena el mercurio hasta su cosecha.

El precipitado calcinado se mezcla con fundentes. La fundición se realiza mediante un horno basculante usando un crisol de carburo de silicio, por cada colada se obtiene una barra de 31 kg.

Las leyes promedio del bullión son de 21.0 % para la plata y 75.0 % para el oro.

**Dstrucción de cianuro.** El relave es conducida al tanque de destrucción de cianuro donde se mezcla con ácido caro's (mezcla de ácido sulfúrico al 98% + peróxido de hidrogeno al 50%), La reacción de destrucción del cianuro con ácido caro's es instantánea siendo esta una reacción rápida y exotérmica.

Tanto las secciones de Molienda, Espesado, Carbon Inleach, Merrill Crowe y Destrucción de Cianuro se encuentran totalmente automatizados y los parámetros operacionales son controlados a través de una PC

#### **RECRECIMIENTO DE LA RELAVERA No. 4**

Es una estructura del tipo aguas abajo. Ha sido conformada totalmente con material de préstamo y construida en dos etapas. La primera etapa tuvo una capacidad de 3 186 000 metros cúbicos y el dique fue diseñado con una altura de 18 m. En la base tiene una capa de material de baja permeabilidad (arcilla) donde se asienta una geomembrana de 1.5 mm de espesor de HDPE.

Esta relavera tiene un sistema de drenes en el fondo para capturar filtraciones y controlar el nivel freático. La capa de drenaje está conformada por material granular y tuberías perforadas CPT de 100 mm de diámetro, la cual ha sido conectada con los drenes existentes instalados en el piso del reservorio. La descarga del sistema de subdreneaje es dirigida al tanque de monitoreo de aguas. El agua recolectada en el tanque es monitoreado periódicamente y recirculada hacia el depósito de relaves mediante un sistema de bombas de agua.

Para el diseño de la relavera se consideró variables como evaporación, el agua retenida en el relave, la cantidad mínima de agua en el embalse y las no filtraciones para asegurar el “Efluente Cero” (No hay descarga de efluentes al ambiente).

Para la construcción de la segunda etapa, se tomó en cuenta el incremento de la capacidad de almacenamiento en 1 173 700 metro cúbicos. Los trabajos de recrecimiento han considerado el aumento de la altura del dique en cinco metros, que permite incrementar la vida del depósito para siete años de almacenamiento, al ritmo de producción actual.

El proyecto de Recrecimiento de la relavera N° 4, fue elaborado por las Empresas Buenaventura Ingenieros S.A. (BISA) y Knight Piesold. Este recrecimiento ha utilizado el material generado por la operación minera de la Mina Chipmo (que es generador de acidez) y que ha sido convenientemente encapsulado con material de baja permeabilidad (arcilla), el cual funcionará como una barrera, evitando el ingreso del oxígeno y la infiltración del agua. De esta forma se aprovecha como material de préstamo un residual de la operación al que se le dan las adecuadas condiciones de manejo técnico y ambiental.

Dentro de los parámetros de construcción se ha tomado en cuenta el análisis de estabilidad del depósito frente a

eventos sísmicos y a los esfuerzos que se generarán por el agua y la pulpa depositada.

Con la finalidad de evaluar permanentemente la calidad del agua subterránea, se han instalado piezómetros en el cuerpo del dique lo que permitirá corroborar el adecuado sistema de impermeabilización de esta relavera. El dique de la presa en su etapa final tendrá una altura máxima de 23,4 m. Se ha considerado taludes de 1.9H:1V tanto aguas arriba como aguas abajo del dique del depósito, y un ancho de 4,5 metros en la coronación.

Finalmente, como medida de control ante el uso del cianuro, el relave que antes de ser dispuesto en la relavera N° 4, es tratado con Ácido Caro (mezcla estequiométrica de peróxido de hidrógeno y ácido sulfúrico) con la finalidad de destruir el cianuro remanente de la lixiviación que se encuentra en la pulpa de desecho. El uso del Ácido Caro, en la destrucción de cianuro, asegura que el agua sobrenadante presente en la relavera N° 4, sea inocua.

#### Controles de la Calidad de construcción

Para asegurar la calidad de la construcción, la empresa Knight Piésold (KP), estableció los siguientes controles de calidad (QC) se están llevando a cabo con la universidad de Arequipa (UNSA), con la presencia de Bureau Veritas, verificando que se cumpla las

#### Resultados del análisis de Estabilidad

Caso	Factor de Seguridad	Aceleración “Yield”	Factor de Seguridad Minera Requerida	Observaciones	Figura N°
Análisis Estático Falla Circular	1.4	-	1.4	Estable	7
Análisis Pseudoestático Falla Circular	0.8	0.15	1.0	Deformación < 15 cm	8
Análisis Estático Circular Falla profunda	1.6	-	1.5	Estable	9
Análisis Pseudoestático Circular Falla profunda	0.9	0.22	1.0	Deformación < 1 cm	10
Análisis Estático Falla bloque	1.9	-	1.5	Estable	11
Análisis Pseudoestático Falla bloque	1.2	-	1.2	Estable	12



Instalación de pinos en la zona de influencia del depósito de relaves 4

especificaciones técnicas y planos de diseño.

- Control de los materiales que se usan en la construcción de la presa
- Ubicación de canteras
- Ensayos de laboratorio
- Alturas de las capas de compactación
- Material no saturado y libre de materiales ajenos

La determinación de la napa freática en el cuerpo del dique ha sido estimada utilizando el programa de cálculo SEEP/W. Para dicho análisis se ha considerado la situación extrema en la cual se asume la rotura de la geomembrana colocada en el talud aguas arriba del dique.

### Análisis de estabilidad

Basados en las propiedades de los materiales, configuración de los taludes y ubicación de la napa freática se ha ejecutado el análisis de estabilidad para una sección crítica, usando el software SLOPE/W®. SLOPE/W® es un programa que determina estados de equilibrio límite. Tiene la capacidad de analizar superficies circulares de fallas, o en general, cualquier tipo de falla que se le especifique mediante diferentes métodos de análisis, incluyendo los métodos de dovelas de Bishop modificado, Janbu simplificado, Spencer y Morgenstern & Price. El método de Spencer ha sido empleado para analizar superficies de falla circulares; y para determinar fallas críticas en bloque.

De acuerdo a lo mostrado en resumen de los resultados del análisis de Estabilidad, los resultados se encuentran dentro de los criterios de diseño y se consideran aceptables bajo condiciones estáticas. Cabe señalar que para la configuración actual del depósito, el talud 1.9H:1V es considerado como el máximo

permisible.

Con respecto a la estabilidad del dique del depósito ante la aplicación de cargas sísmicas, los factores de seguridad para una falla circular superficial son inferiores a 1.0. Sin embargo, los desplazamientos que se generan son menores a 15 cm en la cresta y en el talud aguas abajo del dique. Este potencial de deformación es considerado bajo a moderado y no afectará la estabilidad del depósito ni ocasionará daños en la geomembrana.

Para las secciones que experimentan fallas profundas a través del desmonte de Chipmo y a través de la geomembrana (falla en bloque), los factores de seguridad se presentan aceptables y no comprometen el sistema de revestimiento de la geomembrana colocado en el talud aguas arriba del dique y parte de la cresta del dique.

### Conclusiones:

La Relavera N° 4 de la U.E.A. Orcopampa de Cía. de Minas Buenaventura S.A.A., tal como lo han evaluado los técnicos especialistas, representa una obra de ingeniería que da confianza, técnica y ambiental, a la operación minero metalúrgica de la U.E.A. Orcopampa, por el correcto diseño, por la magnitud de su infraestructura y por la técnica de construcción seguida.

**“Este es un ejemplo más de lo que profesionales peruanos pueden realizar en operaciones mineras del país, dentro del marco de la legislación Ambiental vigente. La Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., en el marco del cumplimiento de su política de seguridad y medio ambiente, reafirma su compromiso con el desarrollo sostenible de las poblaciones que habitan en el área de influencia de sus operaciones”.**



Vista panorámica desde el sector oeste del depósito de relaves 4, apreciándose el dique renovado

# DESARROLLO DE UN ENTORNO DE SIMULACIÓN ORIENTADO A LA ESTÁTICA Y DINÁMICA MOLECULAR DE PELÍCULAS DELGADAS

Boris Aguilar Huacan, José Flores Canales, Javier Gómez Benavides  
Ing. Zoila Córdova Hernández, D.Sc. Alberto Coronado Matutti  
Facultad de Ingeniería Mecánica, UNI

## RESUMEN

*Durante las dos últimas décadas la nanotecnología computacional ha experimentado un enorme avance. Las películas delgadas es necesario entender el comportamiento atómico en el proceso de su fabricación. En el presente trabajo se aplica la Estática y Dinámica molecular para calcular las energías de activación de diferentes procesos y observar la dinámica de aglomerados de átomos sobre películas delgadas de cobre.*

## INTRODUCCION

Gracias al incremento en la capacidad computacional, la simulación de procesos juega hoy un papel muy importante en diversos campos. Por ejemplo, antes de la fabricación en masa de autos o componentes electrónicos, se realiza una completa simulación del proceso bajo diversas condiciones. También se debe resaltar que la simulación permite observar muchos detalles difícilmente obtenibles experimentalmente.

Por otro lado, en los últimos años, la nanotecnología ha experimentado un enorme avance y ha tomado las ventajas que le ofrece la simulación para estudiar detalladamente sistemas en escalas de tiempo y espacio muy pequeños [1].

Particularmente, el estudio del crecimiento de películas delgadas ha tomado gran importancia ya que dichas superficies, lejos de ser planas, presentan patrones que pueden ser utilizados como plantillas para la fabricación en masa de diversas nanoestructuras, como por ejemplo, los nanoalambres [2]. La simulación de este tipo de procesos juega un papel fundamental en la comprensión de la dinámica del crecimiento de nanoestructuras [3].

Existen diversos métodos para simular el comportamiento de sistemas a escala nanométrica, entre ellos podemos mencionar los métodos Ab Initio, que están basados en la mecánica cuántica [4], los métodos MonteCarlo basados en probabilidades [5], y finalmente la dinámica molecular [6, 7] que está basada en la mecánica clásica Newtoniana. Todos los métodos mencionados requieren de un gran poder computacional debido a la cantidad de ecuaciones que se requiere resolver en sistemas con miles y hasta millones de átomos. Para paliar esta limitación se vienen utilizando supercomputadoras y programas paralelizados que permiten simular sistemas mucho más complejos, que incluyan una mayor cantidad de átomos y que abarquen escalas de tiempo mucho mayores [8].

En el presente trabajo se aplicaron los métodos de estática y dinámica molecular para calcular las energías requeridas por diversos procesos de difusión y observar la dinámica de pequeños aglomerados de átomos difundiendo sobre superficies de cobre.

## DESARROLLO DEL TRABAJO

El proceso de deposición de átomos en el crecimiento de películas delgadas requiere de un entorno de simulación para entender los diferentes fenómenos que determinan la forma y estructura final obtenidas. Algunos aspectos de estos procesos también pueden ser determinados mediante diversas técnicas experimentales tales como los microscopios AFM, STM, etc. Sin embargo usando técnicas de simulación como la estática y dinámica molecular, se puede obtener un mayor detalle de los procesos de difusión bajo diversas condiciones. La configuración básica usada en el presente trabajo se muestra en la figura 1

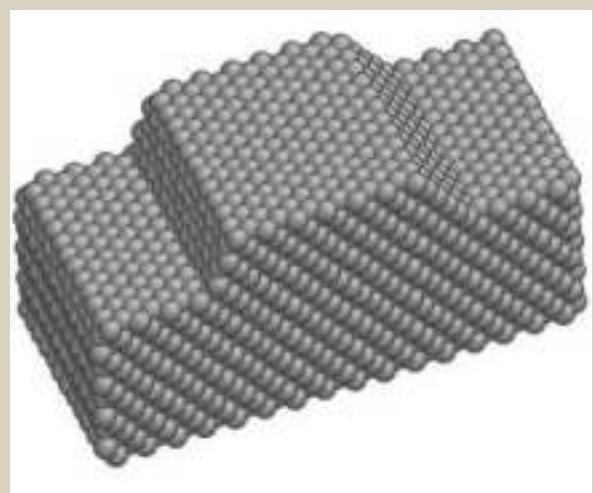


Figura 1. Configuración de átomos de la película delgada. La faceta izquierda tiene orientación {111} y la derecha {100}

Para la simulación de los procesos de difusión y para el cálculo de las energías necesarias para que los átomos (o aglomerados) se muevan de un estado a otro (energía de activación) se utilizan dos métodos, descritos a continuación.

### Dinámica molecular

El método de la dinámica molecular fue originalmente desarrollado en la década de los 50s. Durante los años 70s, con el incremento del poder computacional, se han podido simular sistemas más complejos como películas delgadas y proteínas [9]. En este método, la evolución en el tiempo de un conjunto de átomos es determinada mediante la integración de sus ecuaciones de movimiento basadas en las leyes de la mecánica clásica, es decir la segunda ley de Newton.

$$F_i = m_i a_i \quad (1)$$

Para cada átomo en un sistema constituido por átomos. Una parte importante de la dinámica molecular es la determinación de las fuerzas interatómicas que vienen dadas por la derivada de una función potencial  $V(r_1, \dots, r_n)$  que varía con respecto a la posición de cada átomo del sistema. Es decir existe un valor determinado de potencial para cada configuración. Las fuerzas por tanto se calculan mediante:

$$F_i = -\nabla V_i(r_1, \dots, r_n) \quad (2)$$

Esto implica que el sistema es conservativo. Existe una gran variedad de potenciales interatómicos que fueron desarrollados para diversos tipos de elementos. En nuestro caso estudiamos películas delgadas de cobre. Se debe tener en cuenta las posiciones relativas de los núcleos y también el efecto de la nube de electrones. El potencial utilizado para la simulación de este metal es el EAM (Embedded Atom Method) [10], el cual tiene la siguiente forma:

$$V_{\text{tot}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{j \neq i} \phi(r_{ij}) + F(\rho_i) \right] \quad (3)$$

Donde  $\phi$  es un potencial interatómico que depende de las posiciones de los átomos y  $F$  es la energía embebida que representa la energía necesaria para embeber un átomo en una nube de electrones con una densidad  $\rho$ .

Una vez establecido el potencial interatómico  $V$ , y definidas las condiciones iniciales de posición y velocidad de cada átomo, se deben integrar las ecuaciones de Newton. Existen diversos métodos de integración, en este trabajo se utilizará el algoritmo Velocity-Verlet [11], que consiste en resolver las siguientes ecuaciones en diferencias:

$$\begin{aligned} r(t + \Delta t) &= r(t) + v(t)\Delta t + \frac{1}{2m} F(t)\Delta t^2 \\ F(t + \Delta t) &= -\nabla V(r(t + \Delta t)) \\ v(t + \Delta t) &= v(t) + \frac{1}{2m} (F(t) + F(t + \Delta t))\Delta t \end{aligned} \quad (4)$$

Donde  $r$  y  $v$  son la posición y velocidad de un átomo, respectivamente, y  $t$  es el paso de tiempo, el cual debe ser escogido cuidadosamente.

Las ecuaciones (4) se deben resolver para cada instante hasta un determinado tiempo de simulación (generalmente del orden de nano-segundos) y de esa forma se puede observar el comportamiento del sistema a partir de un estado inicial. Debe notarse que el cálculo de  $F$  también se realiza en cada instante y para cada uno de los átomos que forman el sistema. El diagrama de flujo de la dinámica molecular se muestra en la figura 2.



Figura 2.- Diagrama de flujo del programa de simulación

pretende ubicar un mínimo local energético, donde el sistema es más estable. Todo este proceso se lleva a cabo sin considerar el efecto oscilatorio de la temperatura en la posición de los átomos. Para la minimización se empleó el método de la Gradiente Conjuga.

El Nudged Elastic Band (NEB) [12] es un sofisticado método empleado para la identificación de la trayectoria de energía mínima (minimum energy path) entre dos configuraciones estables. La energía potencial máxima (punto ensilladura) a lo largo de dicha trayectoria es identificada como la energía de activación.

El NEB ha sido implementado con dos modificaciones recientemente desarrolladas: la estimación mejorada de la tangente y el climbing-image [13,14]. El algoritmo consiste en una banda elástica con N+1 imágenes que pueden ser denotadas por [R0, R1, R2, R3,...,RN], donde los estados inicial y final R0 y RN son fijos y están dados por la mínima energía de dichos estados. Las energías de las N-1 imágenes intermediarias son minimizadas mediante un algoritmo de optimización.

En este método la fuerza que actúa sobre una imagen es la suma de la fuerza del resorte que actúa a lo largo de la tangente local y la fuerza perpendicular a esta.

$$F_i = F_i^s \parallel - \nabla E(R_i) \perp$$

$$\nabla E(R_i) \perp = \nabla E(R_i) - \nabla E(R_i) \cdot \hat{\tau}_i$$

$$F_i^s \parallel = k(|R_{i+1} - R_i| - |R_i - R_{i-1}|) \hat{\tau}_i \quad (5)$$

Las ecuaciones (5) describen las fuerzas en la banda elástica, donde  $F_i$  es la suma de la fuerza tangente  $F_i^s \parallel$  y su perpendicular  $\nabla E(R_i) \perp$ ,  $E$  es la energía del sistema en función de las posiciones de los átomos,  $\hat{\tau}_i$  es la tangente local normalizada en la imagen  $i$  y  $k$  es la constante del resorte.

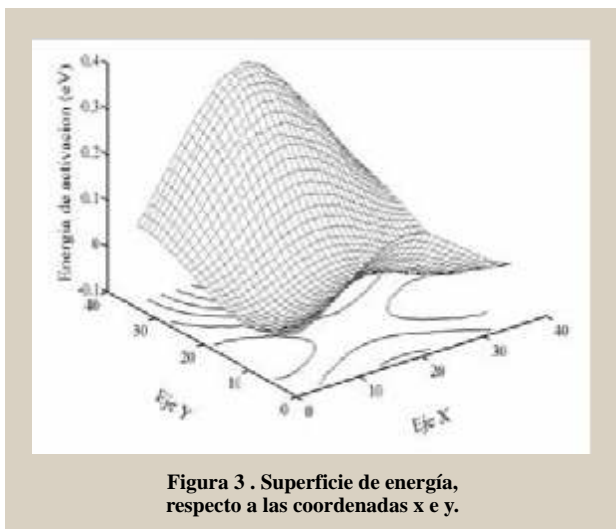


Figura 3. Superficie de energía, respecto a las coordenadas x e y.

La figura 3 muestra la energía potencial para la difusión de un átomo de cobre sobre una superficie Cu {111}. Esta superficie es consistente con resultados numéricos y experimentales obtenidos en otros estudios [15,16]. Aplicación de los métodos de simulación

Se utilizó el programa PARADYN [17] como base para las implementaciones realizadas. Este programa escrito en el lenguaje de programación FORTRAN contiene los algoritmos necesarios para simular mediante dinámica molecular sistemas metálicos, utilizando el potencial interatómico EAM. Al PARADYN se le añadieron las rutinas necesarias para el empleo del método NEB.

Con el objeto de modelar una superficie de Cu{111}, se construyó una celda de 12 capas y aproximadamente 6000 átomos, ver figura 1. Las posiciones de los átomos de las cuatro capas inferiores fueron mantenidas fijas para emular una estructura cristalina semi-infinita. Las restantes ocho capas fueron mantenidas sin ninguna restricción. Se colocaron las condiciones periódicas de frontera a lo largo del plano XY, las cuales permiten simular una superficie infinita. Finalmente aglomerados de diversos tamaños fueron colocados en la superficie para estudiar sus mecanismos de difusión.

Para que un grupo de átomos pase de una configuración a otra es indispensable que superen una barrera energética: la energía de activación. Esta energía de activación es obtenida en este trabajo utilizando el método NEB. Para validar estos resultados fueron llevadas a cabo simulaciones utilizando dinámica molecular a volumen y temperatura constantes con un paso de tiempo de 5 fs. Además, para esta validación, las cuatro capas inferiores fueron fijadas y los átomos de las cuatro capas siguientes fueron asociados al termostato Nose-Hoover. Este algoritmo permite controlar la temperatura del sistema mediante la aplicación de un "reservorio de calor". Por último, las cuatro capas restantes fueron colocadas sin ninguna restricción. En diversas simulaciones la trayectoria del centro de masa de los aglomerados fue monitoreada en función del tiempo.

Para obtener una comprobación de la energía de activación de los procesos de difusión observados, se procedió con el cálculo de los coeficientes de difusión. Los procesos de difusión simulados fueron divididos en sub-procesos de igual duración. Estos sub-procesos son divididos de tal manera que al menos el centro de masa se ha desplazado de acuerdo a los procedimientos de Soneda et. al. [18]. Se procedió con el cálculo del desplazamiento cuadrático total:

$$R^2 = \sum_j (r_j - r_{j-1})^2 \quad (5)$$

Donde  $r$  es la posición del centro de masa del

aglomerado y  $j$  especifica el número del sub-proceso. Los coeficientes de difusión fueron calculados como el promedio de todos los valores obtenidos en cada sub-proceso.

$$D = R^2 / 4 \quad (7)$$

Fueron calculados los coeficientes de difusión de simulaciones de 7 ns a temperaturas de 500, 550, 600 y 650 K. Finalmente los coeficientes de difusión obtenidos son ajustados a una curva de Arrhenius con el fin de obtener la energía de activación, cuyo valor debe ser similar al obtenido al dado por el NEB.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En nuestros estudios de difusión, comenzamos con el sistema más simple posible, un átomo (adatom) que se difunde sobre un sustrato metálico del tipo FCC{100}. Los adatoms se difunden por salto o intercambiando posiciones con átomos que forman la superficie. La figura 4 muestra la trayectoria de energía mínima para un adatom difundiéndose por salto y por intercambio.

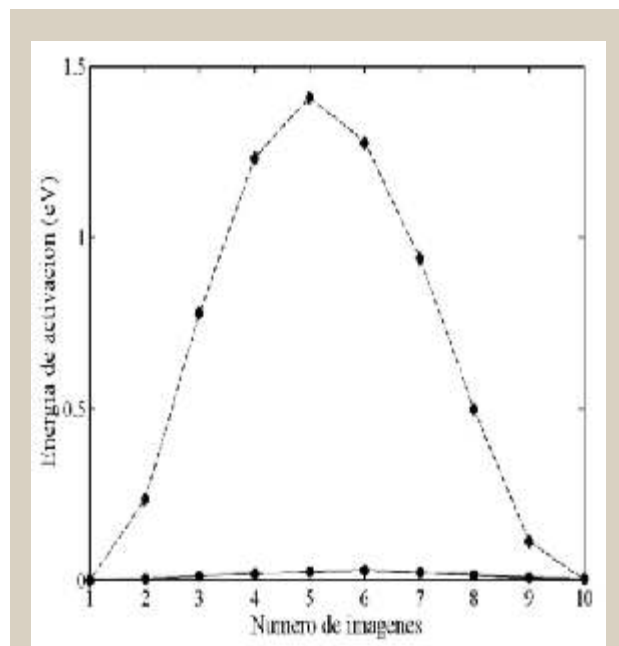


Figura 4. Gráfica de las energías respecto del número de imágenes en el mecanismo de salto (línea continua) e intercambio (línea discontinua) en una superficie de Cu{111}

Luego consideramos los mecanismos de difusión de aglomerados de Cu sobre una superficie Cu{111}. Nuestros resultados muestran que las energías de activación se incrementan casi proporcionalmente con el tamaño del aglomerado. Ver figura 5. Cabe resaltar también que para aglomerados de cuatro, seis, ocho y nueve átomos con una configuración de diamante, se presenta un mecanismo especial de doble rotación que hace que su barrera de difusión sea relativamente baja [19].

Ahora consideramos la difusión de aglomerados de átomos de Cu a través de facetas, desde una faceta {111} a otra {111} o {100}. Nuestros resultados [20] muestran que las barreras de difusión empiezan a ser independientes respecto del tamaño de la faceta para tres o más capas de átomos. Para aglomerados de más de tres átomos, las energías de activación se presentan similares, excepto para un aglomerado de siete átomos (heptamer), el cual presenta la mayor energía de activación. Los resultados de este estudio se presentan en la tabla 1. En todos los casos, un átomo del aglomerado prefiere cruzar las facetas mediante el mecanismo de intercambio y de uno por vez. Ver figuras 6 y 7.

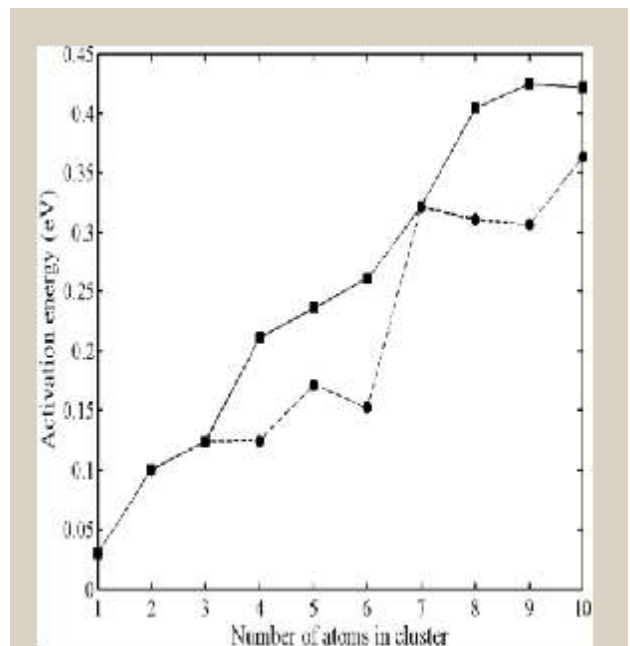


Figura 5. Energías de activación globales (línea continua) y mínimas energías de activación (línea discontinua) para mover el centro de masa de aglomerados de átomos (1 a 8 átomos).

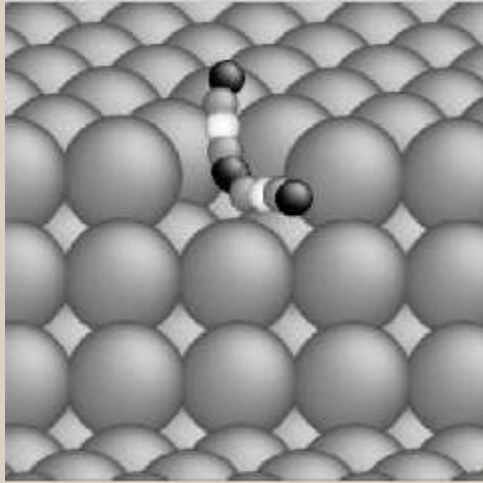


Figura 6. Difusión de un adatom de una faceta {111} a otra {100}. Un átomo de color negro toma el lugar de otro (intercambio).

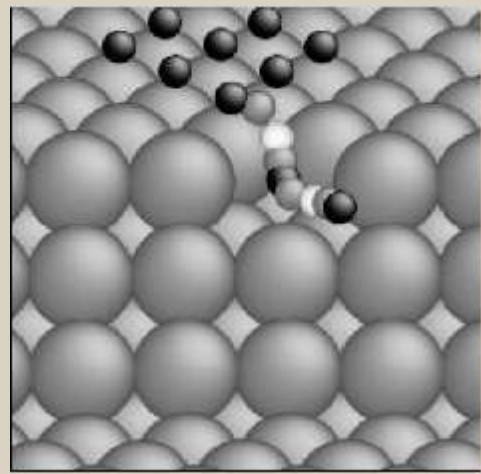


Figura 7. Difusión de un aglomerado de átomos (color negro) de una faceta {111} a otra {100}, un átomo por vez.

Cluster size	Processes	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5
adatom	{111} → {100}	0.32	0.41	0.40	0.39	0.39
	{111} → {100}	0.09	0.27	0.28	0.28	0.28
dimer	{111} → {100}	0.45	0.56	0.55	0.55	0.55
	{111} → {100}	0.17	0.50	0.52	0.52	0.52
trimer	{111} → {100}	0.50	0.64	0.63	0.63	0.63
	{111} → {100}	0.24	0.67	0.88	0.89	0.89
tetramer	{111} → {100}	0.60	0.75	0.74	0.74	0.74
	{111} → {100}	0.36	0.75	0.76	0.76	0.76
pentamer	{111} → {100}	0.61	0.74	0.74	0.73	0.73
	{111} → {100}	0.34	0.73	0.74	0.74	0.74
hexamer	{111} → {100}	0.61	0.74	0.73	0.73	0.73
	{111} → {100}	0.32	0.72	0.73	0.73	0.73
heptamer	{111} → {100}	0.87	1.02	1.02	1.01	1.01
	{111} → {100}	0.58	1.01	1.02	1.02	1.02
octamer	{111} → {100}	0.62	0.75	0.74	0.74	0.73
	{111} → {100}	0.34	0.72	0.73	0.73	0.73

Tabla 1. Energías de activación (eV) en función al número de capas N de la faceta

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En todos los procesos modelados, la energía es uno de los factores más importantes que establecen la evolución de la nanoestructura de las películas delgadas.

Con el progreso de la tecnología de los semiconductores, las dimensiones de las películas delgadas pueden ser tan pequeñas como 0.1 nm. Por lo tanto, la predicción de su estructura a nivel atómico es necesaria. Los resultados obtenidos con el entorno de simulación utilizado, es consistente con los resultados experimentales, lo cual nos permite una descripción de procesos de difusión imposibles de obtener en la actualidad, por medios experimentales.

Un entorno de simulación como el nuestro, permite realizar los cálculos energéticos involucrados en los procesos de difusión entre facetas, con resultados confiables y validados experimentalmente.

El empleo de computadoras en paralelo nos permitió reducir el tiempo de procesamiento para el cálculo de todas las posibles trayectorias de mínima energía, en sistemas metálicos de hasta miles de átomos.

Las barreras energéticas entre facetas obtenidas con el entorno de simulación permiten obtener un mayor conocimiento de los procesos asociados en el crecimiento de nano-estructuras de cobre.

Los casos de estudio descritos están orientados a ilustrar como el modelado y la simulación atómicamolecular contribuye exitosamente a la investigación científica en

nanotecnología. El entorno de simulación nos proporciona imágenes de resolución atómica, prediciendo interacciones no familiares y evaluando estrategias para el rediseño de materiales, invaluable para la ingeniería y la nanotecnología. Nuestro trabajo nos permite dilucidar nuevos retos en la investigación computacional: la simulación de sistemas biológicos, un campo poco estudiado en nuestro país utilizando las herramientas de modelado. La simulación molecular promete entonces, convertirse en una metodología clave para la investigación científica y el desarrollo de un nuevo y fructífero campo: la bionanotecnología, explorando eventos biológicos al nivel molecular y prediciendo el comportamiento mecánico de estructuras orgánicas. Así, proteínas, ácidos nucleicos, células y otras estructuras biológicas son estudiadas mediante las herramientas que nos proveen el modelado y la simulación computacional.

Nos encontramos en un momento histórico en la ciencia, donde nuevas áreas de investigación están floreciendo, y el uso de herramientas computacionales nos facilita la tarea científica.

Nuestro país deberá tomar acción urgente y necesaria para posicionarse como líder regional en estos fructíferos campos científicos, específicamente en investigación e ingeniería de los (bio-nano) materiales.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ercolessi, F. "A molecular dynamics primer" Spring College in Computational Physics, ICTP, Trieste, 1997.
- [2] Liu, S.J., Hanchen, H. and Woo C.H., "Schwoebel-Ehrlich Barrier: From Two to Three Dimensions", Applied Physics Letters 80, 3295–3297 (2002)
- [3] de Miguel, J.J. and Miranda R., "Atomic aspects in the epitaxial growth of metallic superlattices and nanostructures", Journal of Physics: Condensed Matters 14, R1063-R1097 (2002).
- [4] Martins, R.M., "Electronic Structure", Cambridge University Press, 2004.
- [5] Thijsen, J.M., "Computational Physics", Cambridge University Press, 2003.
- [6] Frenkel, D. and Smit, B., "Understanding Molecular Simulations", Academic Press, 2002.
- [7] Rapaport, D.C., "The Art of Molecular Dynamics Simulation, Second Edition", Cambridge University Press, 2005.
- [8] [www.research.ibm.com/bluegene/](http://www.research.ibm.com/bluegene/)
- [9] Adcock, S.A. and McCammon, A., "Molecular Dynamics: Survey of Methods for Simulating the Activity of Proteins" Chemical Review 106 1589-1615 (2006).
- [10] Foiles, S.M. and Adams, J.B., "Thermodynamic properties of fcc transition metals as calculated with the embedded-atom method", Physical Review B 40, 5909 (1989).
- [11] Leach, A.R., "Molecular Modelling Principles and Applications, Second Edition", Pearson Prentice Hall, 2001.
- [12] Jónsson, H., Mills, G. and Jacobsen K.W., "Classical and Quantum Dynamics in Condensed Phase Simulations", World Scientific, Singapore, 385, 1998.
- [13] Henkelman, G., Jónsson H., "Improvement tangent estimate in the nudged elastic band method for finding minimum energy paths and saddle point", Journal of Chemical Physics 113, 9978-9985 (2000).
- [14] Henkelman, G., Uberuaga, B., Jónsson, H., "A climbing image nudged elastic band method for finding saddle points and minimum energy paths", Journal of Chemical Physics 113, 9901-9904 (2000).
- [15] Wang, J., Huang, H., Cale, T., "Diffusion barriers on Cu surfaces and near steps", Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering 12, 1209-1225 (2004).
- [16] Repp, J., Meyer, G., Rieder, K., Hyldgaard, P., "Site determination and thermally assisted tunneling in homogeneous nucleation", Physics Review Letters 91, 206102 (2003).
- [17] Plimpton, S., Hendrickson, B., "Parallel Molecular Dynamics with the Embedded Atom Method", MRS proceedings 291, Pittsburgh, 37, 1993.
- [18] Gropp, W., Lusk, E., "Using MPI, Second Edition", The MIT Press, 1999.
- [19] Soneda, N., Diaz De La Rubia, T., "Migration kinetics and Isochronal Annealing Simulations of defects in Iron", Philosophy Magazine A, (2000).
- [20] Huacan, B., Flores, J., Coronado, A., Huang, H., "Atom diffusion of small Cu clusters across facet-facet barriers over Cu{111}surfaces" Submitted to: Modelling Simulation Mater. Sci. Eng.
- [21] Huacan, B., Flores, J., Coronado, A., Huang, H., "Double rotation mechanism in small Cu clusters concerted diffusion over Cu{111}surfaces", Submitted to: Surf. Science.

# REFLEXIONES SOBRE EL CÓMO FORMAMOS ARQUITECTOS: EVALUANDO EXPERIENCIAS

Arq. Miguel A. Vidal Valladolid  
Docente FAUA-UNI

Siendo nuestra Facultad de Arquitectura Urbanismo y Artes, la más antigua del país, lo que me llama enormemente la atención es el porqué no generamos ni promovimos refrescantes experiencias, fruto de evaluar precisamente esta extensa fuente del pasado. Debemos lamentar que el paso con el que caminan nuestras reflexiones anda algo desnivelado de nuestras frondosas experiencias como institución. La inercia y la resistencia al cambio, la más de las veces nos invade y paraliza frente al espíritu abierto y experimental que debería animarnos. Sólo con el fin de empezar algunas reflexiones, y lejos de abordar el amplio universo que significa nuestro acervo de experiencias, daré inicio escribiendo sobre dos temas que quizás puedan tener resonancia sobre otras Escuelas de Arquitectura. Un primer tema es el de la selección de los estudiantes a través del examen vocacional para el ingreso a nuestra facultad, y el segundo tema es el del diseño de la secuencia y ritmos de aprendizaje en los talleres de diseño arquitectónico.

## A) Experiencias desde un taller de formación temprana en arquitectura.

La permanente actitud de explorar y reflexionar sobre temas de didáctica para la formación arquitectónica, reflejada en investigaciones, publicaciones y participación en múltiples cursos y seminarios, nos ha llevado hoy a una nueva experiencia, como es la exploración sobre la enseñanza aprendizaje de la arquitectura dirigida a un segmento de estudiantes que oscila entre 13 y 17 años que hemos denominado **Taller de Formación Arquitectónica “TEMPRANA”**.

De hecho la forma de aproximarse a la enseñanza de la arquitectura en estudiantes tan jóvenes implica una reformulación metodológica que permita una adecuada lectura de las habilidades, aptitudes y vocación por la arquitectura, desarrollando simultáneamente las inteligencias creativas e imaginativas a través del juego intelectual y el descubrimiento.

El taller realizado durante 6 sesiones estuvo a cargo de los docentes Fredy Cervantes y quien escribe este artículo. Esta experiencia ha permitido, entre otras cosas, señalar que es posible presentar alternativas de



evaluación a la tradicional “prueba de aptitud vocacional”, que hasta ahora se viene aplicado a los postulantes de nuestra facultad, de modo tal, que se pueda evaluar aspectos no contemplados en una prueba escrita que sólo registra parte de las “aptitudes” que necesitamos leer en los postulantes, y no actitudes, habilidades, y sensibilidad por ejemplo. Es importante que la evaluación sea en lo posible cada vez más integral, y contemple aspectos multifactoriales y pertinentes a las competencias que requiere hoy un futuro estudiante de arquitectura en una universidad pública como es nuestra Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Artes.

Un nuevo instrumento metodológico como este nos permitiría medir de una manera más sistemática aspectos como: la comunicación (espontaneidad, decisión, voz); la elaboración (memoria, discernimiento, formación de conceptos, coherencia, pertinencia, resonancia, capacidad de síntesis); y referentes (conceptuales, elaborativos, lenguaje compositivo), áreas que fueron determinadas y elaboradas de manera conjunta, durante la experiencia de la Psicopedagoga Dra. Carmen German-Palacios, como parte del equipo del Taller de Diseño II en nuestra facultad.

## B) Secuencia y ritmos de aprendizaje en los Talleres de Diseño Arquitectónico

Desde que conocí la facultad y mucho tiempo atrás los



talleres de diseño se han dictado lunes, miércoles y viernes de 3 a 4 horas por fecha, lo cual resulta casi un axioma en la enseñanza en los talleres de diseño, que han sido reproducidos sin diferir mucho en las nuevas escuelas y facultades de arquitectura del país. Sin embargo, el no contemplar la repercusión de las secuencias y ritmos del aprendizaje en la enseñanza de la arquitectura no parece ser un problema solo nuestro, sino un problema más amplio y general que obvia su

relación con el rendimiento. Lo variado lo podemos apreciar con algunos ejemplos como: la facultad de arquitectura de Milán que desarrolla una secuencia más compacta de una vez por semana; la Universidad Católica de Chile que en 1987 eran 3 días consecutivos en la semana; La universidad Católica del Perú registra 4 horas los lunes y 4 horas los jueves, para el primer y segundo ciclo, mientras que del tercer al sexto los horarios son 8 horas los lunes y 3 horas los jueves; la universidad autónoma de México, considera los lunes 1 hora, los martes 3 horas, los miércoles 1 hora, los jueves 3 horas y los viernes 1 hora; y el Instituto de Arquitectura de Rostov en Rusia consideró para el curso de Taller de Diseño una distribución horaria de lunes, miércoles y viernes, 3 horas cada día. Después de observar estos ejemplos tenemos que preguntarnos que motiva esta divergencia de secuencias y ritmos; y además cómo encontrar una administración idónea de los ritmos y secuencia para nuestros talleres de diseño.

Los planes de estudio de nuestra facultad en sus inicios solo articulan cargas horarias con un criterio de distribución de horas, desligadas de su influencia sobre el rendimiento. La organización pedagógica y sílabo de los talleres de diseño según el plan de estudio de 1986-I no

contempla ni reflexiona sobre la secuencia o ritmos de aprendizaje y hereda el mismo horario del Plan de estudio de 1969. El esfuerzo por entender este aspecto del aprendizaje nos llevaría a capitalizar el esfuerzo docente y discente en energía, recursos y tiempo, mediante un adecuado diseño de las secuencias y ritmos del aprendizaje que sean pertinentes para cada taller.

La actual secuencia y ritmos de aprendizaje en los talleres no responden a un diseño que considere aspectos como la atención, concentración, procesamiento, asimilación, incubación y latencia entre otros; por el contrario alienta una lenta cohesión grupal y de interacción entre docentes y estudiantes. Además, de lo antes mencionado se suma el deficiente manejo del cansancio y una escasa o nula supervisión del proceso en aula. Por todo esto podemos afirmar que la pérdida del esfuerzo docente y discente en energía, recursos y tiempo, debido a un inadecuado diseño de las secuencias y ritmos del aprendizaje, incide en el insatisfactorio rendimiento del estudiante.

Hace algunos años realizamos una investigación en nuestra Facultad de Arquitectura sobre las secuencias y ritmos de aprendizaje en los talleres de diseño, formulando un estudio piloto que propone cambiar el diseño de la secuencia tradicional con la que se administra la enseñanza en los talleres de diseño, condensando la exposición del estudiante a las situaciones presenciales de taller, e incrementando la gama de recursos didácticos.

Este tema resulta actual y vigente en la problemática de los talleres de diseño en nuestra facultad, lamentablemente la discusión se desarrolla sin fundamentos consistentes, ni menos evaluaciones sobre el tema. Los cambios en los ritmos y secuencias tocan aspectos multifactoriales vinculados al rendimiento cualitativo y cuantitativo, como por ejemplo: el método de enseñanza, los niveles de complejidad del taller, los contenidos aptitudinales y actitudinales que se desean alcanzar, niveles de latencia que maneja el taller, entre otros. Sin embargo, esto no puede ser visto de una manera aislada, sino de una manera integral e interdisciplinaria que pasa por la reforma del plan de estudios en nuestra facultad, una reforma que debe estar construida sobre la base de evaluaciones de la experiencia existente, que permitan formulaciones consistentes, y cambios arbitrarios y coyunturales.

(1) Arquitecto egresado de la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Artes de la Universidad Nacional de Ingeniería (FAUA-UNI) y desde 1998 docente en la Facultad de Arquitectura de la UNI, actualmente Jefe de la Unidad de Extensión Cultural de la FAUA-UNI. Jefe del proyecto de investigación LA SECUENCIA Y RITMOS DE APRENDIZAJE EN LOS TALLERES DE DISEÑO ARQUITECTÓNICO realizado con el Instituto de Investigación de la Facultad de Arquitectura de la UNI (INIFAAU) iniciada en junio del 2004. Ha participado en el primer seminario Laboratorio FAUA de Psicopedagogía de la Arquitectura realizado entre agosto y diciembre del 2003.

Obtiene el premio "Rafael Marquina Bueno" en la X Biental del Colegio de Arquitectos del Perú. Presidente de la ONG "CEDEPAR AYLLU" (Centro de Desarrollo Participativo). Ha publicado el libro "Crisis tipológica en las iglesias de Lima en el siglo XX"; artículos en la revista LUCERO Vol. 17 de la Universidad de Berkeley, y en ARQUITEXTOS de la Universidad Ricardo Palma.

# EL CARÁCTER INTERMITENTE Y PERMANENTE DEL DRENAJE ACIDO DE MINAS (AMD) EN ZONAS SEMIÁRIDAS

Dr. Ing. Roberto Rodríguez. Facultad de Ciencias. Universidad de Girona. España. correo: roberto.rodriguez@udg.es  
Dr. Ing. Cristóbal García. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, Murcia España:  
Correo: cristóbal.garcia@upct.edu  
Ing. Efraín Castillo. FIGMM -. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima. Perú. Correo: e\_castillo\_a@yahoo.es

## Introducción

Se conoce como AMD las siglas de Acid Mine Drainage, término técnico utilizado en los países de habla inglesa. Hemos de señalar que el AMD tiene dos orígenes:

1. Natural
2. Antropogénico

El AMD natural esta asociado a aquellas zonas donde las aguas de infiltración circulan, lavan y drenan los productos de oxidación de los depósitos ricos en minerales de sulfuro. Uno de los ejemplos más estudiados es el caso de la Faja Pirítica Ibérica (FPI). Esta forma una franja de 230 Km de largo por unos 50 Km de ancho. Se extiende desde la provincia de Sevilla en España hasta la costa Oeste de Portugal. Con unas reservas del orden de 750 millones de toneladas de sulfuros. La FPI constituye una de las más importante regiones metalogénica del mundo. En ella está presente también el AMD antropogénico debido a la intensa actividad minera de más de 2500 años de historia (Figura 1).

El AMD de origen antropogénico esta asociado a las explotaciones mineras de los yacimientos de sulfuro y de carbón. En los yacimientos de minerales metálicos esta asociado a la oxidación de los diferentes tipos de sulfuros mientras que en los yacimientos de carbón se encuentra asociado mayoritariamente la oxidación de la pirita.

El objetivo del presente trabajo es mostrar los rasgos característicos del AMD en zonas mineras activas o abandonadas ubicadas en climas semiáridos.



## Formación y origen del AMD

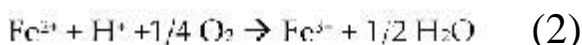
Cuando las rocas o residuos minero-metalúrgicos presentan en su composición minerales sulfurosos (como pirita, calcopirita, pirrotita, marcasita, galena, arsenopirita, etc.) son expuestas a la acción del aire (oxígeno) y del agua, comienza en sus superficies un complejo proceso de meteorización que engloba en su desarrollo fenómenos químicos, físicos y biológicos. El sulfuro metálico más frecuente y por lo tanto el más presente en las explotaciones y residuos mineros de los mencionados es la pirita ( $\text{FeS}_2$ ). De forma simplificada, la oxidación de la pirita se puede expresar como:



Como se puede observar en la ecuación (1), para oxidar pirita por este mecanismo es necesaria la presencia tanto de agua como de oxígeno y se generan

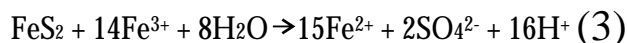
2 moles de protones por cada mol de pirita oxidado.

El  $\text{Fe}^{2+}$  liberado mediante la reacción (1) puede, a su vez, ser oxidado en presencia de oxígeno según muestra la reacción (2)



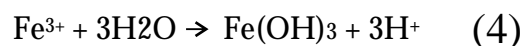
Esta reacción es bastante lenta en medios ácidos y requiere frecuentemente la presencia de bacterias oxidantes, de las cuales las más comunes son *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*.

El  $\text{Fe}^{3+}$  generado puede, a su vez, promover la oxidación de la pirita de acuerdo a la reacción (3)



Esta reacción es mucho más rápida que la reacción (1) pero está limitada por la regeneración de  $\text{Fe}^{3+}$  mediante la reacción (2) que, a su vez, depende de la presencia de bacterias (Nordstrom y Alpers, 1998).

Por otra parte, el  $\text{Fe}^{3+}$  puede precipitar en forma de hidróxido mediante reacciones de hidrólisis similares a la reacción (4) con lo que se genera aún más acidez.



La oxidación de otros sulfuros, como la pirrotina ( $\text{FeS}$ ), la galena ( $\text{PbS}$ ), la esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) o la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), se puede expresar de forma similar a la de la

pirita aunque es importante destacar que estos sulfuros minoritarios no siempre producen acidez por sí mismos, aunque pueden generar protones por la hidrólisis posterior de los metales liberados (Banks *et al.*, 1997).

Considerando lo anteriormente expuesto de una forma muy simplificada, la evolución del fenómeno de generación del AMD se puede resumir en los siguientes puntos:

Procesos de oxidación, que transforman los sulfuros en sulfatos con producción de ácido; estos procesos pueden ser químicos o "catalizados" por bacterias como *Thiobacillus Ferroxidans*, *T. Thiooxidans*, *T. Thioparus*, etc.

Reacciones secundarias entre los productos de las reacciones anteriores y los restantes minerales presentes en la roca; así, el ácido generado disuelve estos minerales liberando en solución metales pesados tales como plomo, cinc, cobre, arsénico, mercurio, cadmio, etc.

Disolución, transporte y arrastre de los productos de oxidación de los sulfuros por el agua de lluvia. La variedad de sulfatos que puede formarse es muy diversa entre los que se encuentran la delanterita, romerita, coquimbita, copiadita, etc. (Figura 2). En este caso una parte de estos elementos disueltos pasan a formar la escorrentía superficial, produciéndose un caudal líquido contaminante que se caracterizara por su acidez y por las altas concentraciones en sulfatos, metales pesados y elevada conductividad eléctrica. Mientras que una segunda parte pasa a formar parte del agua que percola o se infiltra a través de los residuos mineros, de las galerías de minas o pendientes de las cortas mineras y en menor medida la zona no saturada situada en la parte superior de las aguas subterráneas presentes en las áreas mineras.



Figura 2. Productos de oxidación de los sulfuros y grietas de desecación rellenas en la presas de residuos Ticapampa. Cuenca alta del Río Santa. Perú.

Así pues, la generación de AMD conlleva dos etapas o subprocesos:

1. El primero es el de producción y almacenamiento de los productos de oxidación (solutos), que esta afectado por agentes exteriores al foco contaminante como la temperatura, oxígeno presente, concentración y actividad bacteriana y por factores de composición intrínsecos. Ente los factores de composición están el tipo y contenido de sulfuros, elementos o minerales neutralizantes, superficie de exposición, granulometría de los residuos que determina la superficie reactiva, propiedades hidráulicas del residuos, etc.
2. El segundo es el de su posterior disolución de los productos de oxidación, su extracción y transporte por el agua, sin la cual no se produciría AMD. Un ejemplo de que el AMD solo se produce en presencia del agua lo podemos ver en las escombreras piríticas del desierto de Atacama en Chile. Este subproceso se rige por parámetros hidrológicos y estructurales como el volumen, intensidad y distribución temporal de la lluvia, tipo de circulación o drenaje, condiciones iniciales del foco, etc. La mayor o menor importancia de la producción de AMD dependerá según esto de la eficacia y sincronía de ambos subprocesos.

Los principales focos productores de AMD en las explotaciones mineras activas o abandonadas son:

1. Los drenajes de las minas subterráneas, por bombeo en las minas activas y por gravedad en las galerías de minas abandonadas,
2. La escorrentía de las cortas en la minería a cielo abierto y
3. Los lixiviados de los residuos metalúrgicos, las escombreras y residuos mineros. Este puede ser superficial, subterráneo o la combinación de ambos.
4. la mineralización existente en la zona de circulación de las aguas de infiltración que alimenta el flujo subterráneo.

### Particularidades del drenaje ácido de minas en clima semiárido

El drenaje ácido de minas en las zonas de clima semiárido se manifiesta fundamentalmente de tres formas principales:

1. Flujo superficial permanente de las aguas (ríos y drenajes de galerías mineras)
2. Flujo superficial intermitente de las aguas
3. Lagos mineros: a cielo abierto o subterráneos

**El AMD permanente** obedece a las zonas de causas

superficiales que reciben el drenaje de las galerías de minas, el vertido de los bombes de las minas activas (Figura 3), zonas donde el agua drena depósitos de sulfuros naturales (Figura 1) ó combinación de estas. Cuando en las zonas mineras se producen importantes precipitaciones normalmente en el agua de los cauces con AMD permanente se produce una variación de las propiedades físicas y químicas. Esta variación se refleja en una disminución de la concentración de las sales disueltas, normalmente elevación del pH y disminución de la conductividad eléctrica. Excepcionalmente esto puede variar si el curso es afectado por la incorporación de caudales de cuencas hidrográficas que presenten un carácter intermitente que incorporen una concentración elevada de sales, metales y pH muy ácido.

Figura 3. Drenaje ácido permanente en el Túnel Kingsmill con un caudal de 35.3 millones de m<sup>3</sup>/año.



Figura 3. Drenaje ácido permanente en el Túnel Kingsmill con un caudal de 35.3 millones de m<sup>3</sup>/año. Río Yauli, Perú.

Río Yauli, Perú.

**El AMD intermitente** se produce de acuerdo a los ciclos de precipitaciones. Normalmente solo se manifiestan cuando el volumen de precipitaciones es suficiente como para que se produzca escurrimiento superficial (Figura 4). Los ciclos de AMD se producen a través de los diferentes causas fluviales y están íntimamente ligados a las precipitaciones y su intensidad. En las zonas semiáridas el desarrollo de los AMD intermitentes esta favorecido por varias causas:

1. La ausencia de vegetación en la superficie de las acumulaciones de residuos lo que facilita los procesos físicos, químicos y biológicos de oxidación de los sulfuros al estar estos en contacto directo con el oxígeno y el agua presente en la atmósfera.
2. La existencia de un clima donde se producen pocos episodios de lluvia pero normalmente su desarrollo tiene lugar en cortos intervalos de tiempo y con gran intensidad.
3. La existencia de las acumulaciones de residuos en las cuencas hidrográficas y mayoritariamente en su cabecera facilita el

desarrollo de los procesos erosivos por el escurrimiento superficial. Este escurrimiento produce la eliminación de los materiales superficiales oxidados y la puesta en contacto con el agua y oxígeno de material fresco. El ciclo de humedecimiento, secado mojado y erosión de estos residuos en climas semiáridos se produce cuantas veces se desarrolla un proceso de precipitación importante. En la Sierra minera de Cartagena la Unión en Murcia España se ha podido comprobar que el AMD asociado al escurrimiento superficial tiene lugar para precipitaciones mayores de 20 litros por metro cuadrado.

4. La baja permeabilidad de los residuos debido a su fina granulometría facilita el escurrimiento superficial de las aguas meteóricas.
5. La acumulación de agua en la parte superior de las balsas o presa de residuos facilita la saturación de estos y su percolación en profundidad. El agua que penetra en los residuos es posteriormente evaporada, pues en las zonas semiáridas la evaporación es muy intensa, generalmente superior a los 1000 mm anuales. En los materiales finos el agua asciende por capilaridad, la cual en los lodos de flotación puede oscilar entre unos pocos centímetros hasta 20 metros o mas en dependencia de la fina granulometría. El agua que asciende es evaporada y con ello se produce la precipitación de las sales en la superficie de los residuos. Estos productos precipitados en la superficie son los que al producirse un nuevo evento de lluvia importante son disueltos por el agua, transportados e incorporados al escurrimiento superficial formando el AMD (Figura 4).

**Los lagos mineros permanentes:** estos se localizan en superficie y solo se forman en aquellas cortas o tajos a cielo abierto que se ha producido una intersección del nivel piezométrico o freático de las aguas subterráneas (Figura 5). Estas cortas actúan como una cuenca endorreica por lo que en ellas se acumulan también aguas de escurrimiento superficial. Debido a su carácter endorreico en menor medida se pueden formar lagos en cortas que no han alcanzado el nivel freático de las aguas subterráneas pero suele suceder en aquellas que presenten en su substrato y base materiales de baja permeabilidad hidráulica, de formarse normalmente suelen tener un carácter temporal.

También se pueden formar **lagos mineros temporales** en la superficie de las presas de residuos, sobre todo en lo que constituye la zona de decantación de los finos y el área de recuperación del agua durante el periodo de actividad de la balsa o presa de residuos (Figura 6). El hecho de que se acumulen en la zona de decantación es porque normalmente es la zona de más baja permeabilidad del depósito de residuos. En menor

medida se aprecia también acumulaciones de agua en pequeñas depresiones originadas por las actividades mineras, pero siempre de carácter temporal. Las mismas se distinguen por presentar un color rojo y químicamente se caracterizan por un pH ácido, alta conductividad eléctrica y un elevado contenido de sulfatos.

**Lagos subterráneos:** estos se forman en las galerías y pozos mineras que quedan incomunicados hidráulicamente con las aguas subterráneas o las zonas de descarga (Figura 7). También pueden ser lagos mineros con comunicación hidráulica intermitente que solo presentan flujo durante los intensos periodos de lluvia debido a la recarga que les llega de las aguas meteóricas infiltradas.

Como dato significativo se puede señalar que en las zonas de acumulación de aguas ácidas en la superficie del terreno con una elevada concentración de sales en disolución es frecuente observar el desarrollo de vegetación. Normalmente son plantas indicadoras de un medio altamente salino. En la figura 8 se aprecia la existencia de vegetación la cual esta representada mayoritariamente por la especie de “*P. australis*” y en menor medida “*L. Spartum*”.

#### Principales daños medioambientales del AMD

Cuando el AMD formado en los focos generadores alcanza las aguas limpias de la red hidrográfica las contamina en acidez, sulfatos y metales pesados. Sin embargo, el grado de acidez y las concentraciones en contaminantes de las aguas, río abajo, serán función de la envergadura del aporte contaminante de AMD recibido, así como del caudal diluyente que traiga el curso de agua. De igual forma, la infiltración de AMD puede contaminar suelos y aguas subterráneas y en menor medida el drenaje de las aguas subterráneas podría afectar las zonas de descarga. La contaminación de los suelos se produce mayoritariamente en el que se encuentra en la base de las escombreras y en las zonas de inundación y riveras de las cuencas hidrográficas de los ríos. También se pueden contaminar los sedimentos de bahías, estuarios y pantanos.

Los daños medioambientales producidos varían desde problemas de alteraciones subletales para algunos individuos de los ecosistemas afectados en los casos de polución muy débil hasta la desaparición de la fauna fluvial, así como la contaminación de las masas de agua. Estos recursos hídricos asociado a las masas de agua pierden su función ambiental al tornarse inservible el agua para el consumo de animales, plantas y los seres humanos, además no se pueden usar en la agricultura y la industria. La recuperación de estas masas de agua para un posible uso es necesaria la realización de tratamientos que devuelvan a esta agua las propiedades físico-químicas que permitan al hombre

poder hacer uso de esta con fines agrícolas o industrial.

Finalmente se puede señalar que de todas las causas de contaminación de las masas de aguas continentales asociadas a los cursos fluviales, lagos y pantanos, quizás el AMD sea una de la más grave, por su naturaleza, extensión y dificultad de resolución. Las masas de agua continentales afectados por este tipo de contaminación se caracterizan por:

1. su acidez (generalmente un bajo pH),
2. alto contenido en sulfatos,
3. elevada conductividad eléctrica
4. elevado contenido de sólidos disueltos
5. diferentes concentraciones de metales pesados en disolución o suspensión,
6. por el contenido metálico de sus sedimentos y precipitados que le confieren diferentes tonalidades (Figura 1)
7. en las corrientes de agua superficial de importante caudal puede haber turbidez de las aguas, la cual es mayor en los periodos de lluvia.

De los diferentes parámetros enumerados con anterioridad la conductividad eléctrica (CE) y la concentración de sulfatos en el agua son los dos mejores indicadores de la existencia de AMD. Se ha demostrado que la relación entre la CE y la concentración de sulfato es próxima a lineal (Rodríguez, 2002, García 2004, Rodríguez y García, 2006). Esto se debe a que el sulfato en zonas mineras es bastante conservativo y generalmente controla la conductividad eléctrica si en los residuos no ha existido otro aporte de cloro como puede ser el uso de agua de mar en los procesos de lavado y concentración del mineral. El pH y la concentración de metales son parámetros que presentan amplios rangos de variación pues son afectados por las condiciones geológicas y climáticas, fundamentalmente la lluvia.



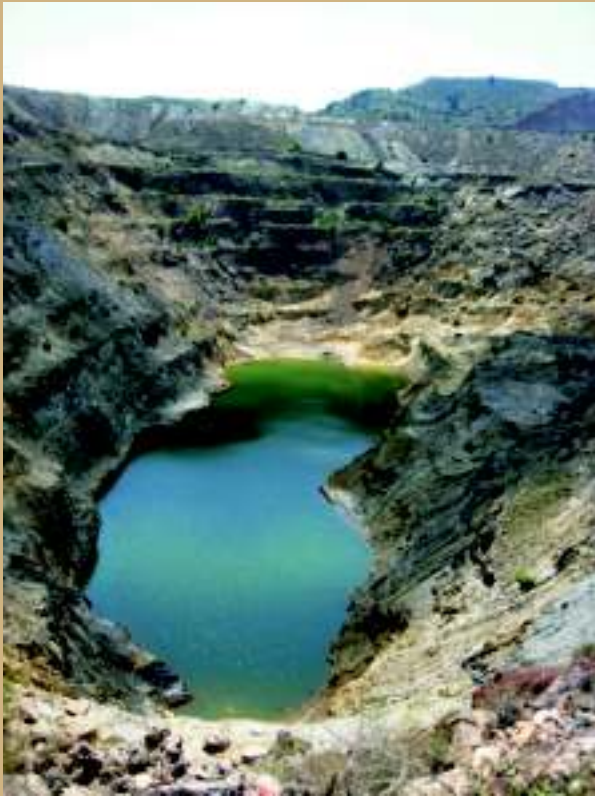


Figura 5. Lago minero en la corta los Blancos. Sierra Minera de Cartagena-La unión Murcia España.



y a la izquierda en la balsa Chahuapampa en la cuenca alta del Río Santa en Perú. Se pueden apreciar en ambas los productos de oxidación en tonalidades claras.

Figura 6. Acumulación de aguas ácidas en la parte superior de las presas de residuos a la derecha en una balsa en la sierra minera de Cartagena-La Unión



Figura 7. Lago minero subterráneo en la Mina Agrupa Vicenta. Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Murcia, España



**Figura 8.**  
Acumulación de aguas ácidas en la superficie de la presa de residuos y desarrollo de la vegetación.  
Sierra Minera de Cartagena La Unión. España.  
La colonización de la superficie por la vegetación es natural.

#### Referencias

- Banks, D., Younger, P.L., Arnesen, R.-T., Iversen, E.R. y Banks, S.B. 1997. Mine-water chemistry: the good, the bad and the ugly. *Environmental Geology*, 32(3): 157-174.
- García, C. 2004. Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España) Ph.D. Thesis, Technical University of Cartagena (Spain)
- Nordstrom, D.K. y Ball. J.W. 1985. Toxic element composition of acid mine waters from sulfide ore deposits. Volumen del 2º Simposio Internacional sobre Aguas de Mina, Granada, España, 749-758.
- Nordstrom, D.K. y Alpers, C.N. 1998. Geochemistry of acid mine waters. En: G.S. Plumlee y M.J. Logsdon (Eds.). *Reviews in Economic Geology*, vol. 7A (6): The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits. Part A: Processes, Techniques and Health Issues.
- Rodríguez, R. 2002b. Estudio Experimental de Flujo y Transporte de Cromo, Níquel y Manganeseo en Residuos de la Zona Minera de Moa (Cuba): Influencia del Comportamiento Hidromecánico online. Available from <http://www.tdcats.cesca.es/TDCat-0731102-084652/>.
- Rodríguez, R. y García, Á. (2006) Los Residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente. Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Pp 1-736.