



## **Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo**

Contrato Comisión Europea n. ASR/B7-3100/99/136

---

# **MONITOREO DE LA CONTAMINACIÓN MINERA Y DE MEDIO AMBIENTE DE LA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO**

**Informe de Misión del Experto Europeo  
Químico de Agua y Minería  
Dr. Enrico MARIUZ  
del 02 de octubre al 21 de noviembre del año 2004**

Nº de Referencia: **ASR/B7-3100/99/136**  
Nº Contable: **F54.2000.552442**  
Asunto: **Asistencia Técnica Europea**  
País: **Repúblicas de Argentina, Bolivia y Paraguay**  
Organismos de Tutela : **Comisión Europea**  
**Comisión Trinacional para el Desarrollo de la  
Cuenca del río Pilcomayo**

**Calle Ingavi E-156 -2º piso - Tarija - Bolivia**

## INDICE

1	PREMISA .....	5
2	OBJETIVOS DE LA MISIÓN DEL EXPERTO .....	6
3	INTRODUCCIÓN SOBRE LA CONTAMINACIÓN DEL RÍO PILCOMAYO Y SU CUENCA ALTA .....	7
3.1	PREÁMBULO .....	7
3.2	LA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO .....	7
3.3	POLUCIÓN DEL AGUA .....	8
3.4	LOS SEDIMENTOS .....	9
3.5	REDUCCIÓN DE LA PESCA .....	9
3.6	IMPACTO EN LA POBLACIÓN LOCAL .....	10
3.7	IMPACTO AMBIENTAL DE LA ACTIVIDAD PETROLERA .....	10
4	INTRODUCCIÓN SOBRE LA CONTAMINACIÓN .....	11
4.1	LA CONTAMINACIÓN .....	11
4.2	EVALUACIÓN DEL RIESGO: PERSISTENCIA, BIOACUMULACIÓN, TOXICIDAD. ....	11
4.3	MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE LA CUENCA.....	13
4.4	PROTOCOLO DE ACTUACIÓN PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LA CUENCA.....	13
5	LA MINERÍA EN POTOSÍ Y ALREDEDORES .....	14
5.1	INTRODUCCIÓN .....	14
5.2	INGENIOS.....	14
5.3	FUENTES DE CONTAMINACIÓN HÍDRICA .....	15
5.4	FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS .....	16
5.5	IMPACTO SOBRE LOS CAUDALES DE LOS RÍOS .....	16
5.6	IMPACTOS SOCIOECONÓMICOS .....	17
5.7	EL VERTIDO MINERO EN LOS CAUCES Y SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO .....	18
5.8	DIQUE DE LAGUNA PAMPA.....	18

5.9	LO QUE INFORMA LA PRENSA .....	20
6	LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINAS .....	22
6.1	DESMONTES.....	23
6.2	REMEDIACIÓN DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINA .....	23
6.3	TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINA.....	24
6.3.1	TRATAMIENTO BIOLÓGICO MIXTO .....	24
7	TECNOLOGÍAS APROPIADAS DE AGUA Y SANEAMIENTO .....	26
7.1	PROCESO DE PARTICIPACIÓN PÚBLICA .....	26
8	PILOTO I: HUMEDALES ARTIFICIALES PARA CLARIFICACIÓN Y FILTRACIÓN DEL AGUA EN SOTOMAYOR.....	27
8.1	INTRODUCCIÓN .....	27
8.2	MUESTREO DE LAS AGUAS.....	28
8.2.1	PARÁMETROS DE ANÁLISIS .....	28
8.3	ANÁLISIS DE AGUAS SUPERFICIALES DESTINADAS A LA PRODUCCIÓN DE AGUA DE RIEGO.....	29
8.3.1	RESULTADOS Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	30
8.4	LOS HUMEDALES.....	31
8.4.1	CONCEPTOS PARA EL DISEÑO.....	31
8.4.2	CUANTO REGAR.....	32
8.4.3	CANAL DE RIEGO .....	33
	MÉTODOS DE CLARIFICACIÓN Y FILTRACIÓN DEL AGUA EN SOTOMAYOR .....	34
8.5	ALMACENAMIENTO DEL AGUA .....	34
8.5.1	CONSTRUCCIÓN DE LOS TANQUES.....	34
	MÉTODOS DE FILTRACIÓN DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN SOTOMAYOR .....	36
8.6	FILTROS LENTOS DE ARENA .....	36
8.6.1	DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL FILTRO .....	37
	OPERACIONES .....	37
	OBSERVACIONES: .....	37
	MANTENIMIENTO DEL FILTRO .....	37
8.7	DESINFECCIÓN .....	38
8.8	PROCESO DE TRANSFERENCIA DE LA TECNOLOGÍA Y EDUCACIÓN SANITARIA .....	39
8.8.1	ESCALA INTERMEDIA .....	39
9	PILOTO 2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y ÁCIDAS .....	40
9.1	INTRODUCCIÓN .....	40

9.2	INGENIERÍA DEL PROYECTO .....	41
9.2.1	TOMA Y PRETRATAMIENTO.....	41
9.2.2	CALEFACCIÓN DE LAS AGUAS.....	41
9.2.3	INVERNADEROS .....	42
9.3	DATOS PRELIMINARES DE CÁLCULO DE LAS LAGUNAS ANAERÓBICAS ...	42
9.3.1	LAGUNA ANAERÓBICA PARA AGUAS RESIDUALES .....	43
9.3.2	LAGUNA ANAERÓBICA PARA AGUAS ÁCIDAS .....	43
	Algunas observaciones sobre la microbiología aplicada del Azufre.....	43
9.3.3	LAGUNA FACULTATIVA .....	44
9.3.4	LAGUNA AERÓBICA .....	44
10	MUESTREOS.....	46
10.1	EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN LOS SUELOS DE SOTOMAYOR	46
10.1.1	INTRODUCCIÓN.....	46
10.1.2	CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR AGUAS DE RIEGO .....	46
10.1.3	MATERIALES Y MÉTODOS .....	47
	Escenario de trabajo: muestreo .....	47
	Materiales para el muestreo.....	47
10.1.4	Parámetros de análisis.....	48
	Parámetros y métodos físicos (no indispensables) .....	48
	Parámetros y métodos químicos.....	48
	METALES TÓXICOS .....	48
10.2	EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS VEGETALES EN SOTOMAYOR .....	51
10.2.1	Escenario de trabajo: muestreo y análisis.....	51
10.2.2	INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS .....	51
10.3	EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN HIDROQUÍMICA DE LA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO .....	52
10.3.1	ANÁLISIS COMPLETA DE LAS AGUAS DEL RÍO PILCOMAYO (a efectuarse tres veces por año).....	53
10.3.2	ANÁLISIS DE RUTINA DE LAS AGUAS DEL RÍO PILCOMAYO (a efectuarse cada mes).....	54
10.3.3	PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE LAS AGUAS DEL RÍO PILCOMAYO (a efectuarse diariamente).....	55
10.3.4	VARIACIONES HIDROQUÍMICAS DE LAS AGUAS .....	57
10.3.5	PROCESAMIENTO DE DATOS.....	58
	Observaciones .....	58
11	RECOMENDACIONES .....	59
11.1	ACCIONES POSIBLES A IMPLEMENTAR POR EL PROYECTO .....	59
11.1.1	REMEDIACIÓN DE DESMONTES .....	59
11.1.2	MUESTREO DE LOS SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO .....	60
11.1.3	PROGRAMA DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN POTOSÍ .....	61
12	CONCLUSIONES.....	63

## PREMISA

La información recopilada para la elaboración del informe del componente de “*aguas y contaminación minera*” se basó en datos y documentos que suministró el Proyecto Pilcomayo, provenientes de informes de archivo además de una documentación técnica general y de contactos con instituciones públicas bolivianas como las prefecturas de Sucre y de Potosí y la Universidad Autónoma “Tomás Frías” de Potosí.

Se señala que se sostuvo una muy buena relación y apoyo con el personal técnico local e internacional del proyecto Pilcomayo, lo que ha facilitado el flujo de información “verbal” y de copias de documentos de evaluaciones de muestreo y análisis de tratamiento de las aguas del río Pilcomayo.

Se han considerado de una manera general las diversas problemáticas de la cuenca del río Pilcomayo que abarca los países de Argentina, Bolivia y Paraguay, con particular enfoque a las problemáticas en la parte alta y en particular la ciudad de Potosí, considerando las componentes colas de los ingenios, saneamiento de las aguas residuales, las aguas ácidas y sus efectos en la totalidad de la cuenca.

## OBJETIVOS DE LA MISIÓN DEL EXPERTO

De acuerdo a los términos de referencia de la misión del “*Experto en medio ambiente y contaminación minera*” se acordaron los objetivos de apoyar al proyecto de gestión de la cuenca del río Pilcomayo como:

- Planificación en la formulación del diagnóstico técnico y en la programación del Plan Operativo Global y Plan Operativo Anual y orientar la Unidad de Gestión de Proyecto en el desarrollo de las actividades futuras
- Apoyar en la definición de las actividades y definición del POA
- Contribuir en la identificación de los componentes e indicadores para el sistema de evaluación de impacto minero ambiental incluyendo los elementos esenciales a monitorear como indicadores biológicos, sedimentos, metales pesados en la cadena alimenticia...
- Identificar hipótesis que puedan influir en el desarrollo de las actividades y logro de los resultados previstos por el proyecto tratando de dar una lectura de los resultados conseguidos definiendo las temáticas a emprender y las técnicas útiles para solucionar en las distintas problemáticas
- Apoyar en el diseño del sistema de Seguimiento y Evaluación del proyecto. Favoreciendo a fijar la posición del Proyecto

La misión del experto en contaminación ambiental y minera se desarrolló en Bolivia desde el 3 de octubre al 19 de noviembre del año 2004 en la sede del Proyecto en Tarija.

La misión contuvo 2 visitas:

- Cuenca Alta (Bolivia): Potosí y Sucre desde el 13 al 17 de octubre. Visita a los ingenios mineros, universidad de Potosí, CIMA, dique de cola de Laguna Pampa y mina de Porco
- Cuenca Alta (Bolivia): Sotomayor (Sucre), La Paz desde el 24 al 29 de octubre: Visita a la comunidad agrícola de Sotomayor para evaluar la posibilidad de instalar humedales artificiales y otros pilotos de tratamiento de las aguas superficiales. En la ciudad de La Paz se sostuvieron reuniones con Comibol, Simbiosis, KFW, la Delegación Europea.

# INTRODUCCIÓN SOBRE LA CONTAMINACIÓN DEL RÍO PILCOMAYO Y SU CUENCA ALTA

## PREÁMBULO

Distintos artículos de periódicos bolivianos han sido publicados en los años pasados poniendo la atención sobre la contaminación del río Pilcomayo y de su entorno medio ambiente.

Algunos informes técnicos de la industria minera detallan los procesos de producción que permiten obtener concentrado de minerales con alto nivel en metales a partir de los minerales extraídos en las minas de la parte alta de la cuenca del río Pilcomayo. Informan que las aguas de proceso son normalmente descargadas en los ríos y canales que alimentan el Pilcomayo sin tratamiento adecuado.

A veces se producen incidentes como lo ocurrido la madrugada del miércoles 2 de agosto del año 2000, que afectó un área de tres kilómetros, llegando hasta el sector de Iroco, afectando cultivos y pastos nativos y la mayor parte de la pulpa se quedó sobre tierras. Se intentaron después las tareas de limpieza de la solución derramada del dique de colas de Itos por la perforación de una membrana, buscando evitar que los lodos y las aguas contenientes metales pesados y otros productos químicos llegaran al río Desaguadero pero el daño ya estaba hecho.

El episodio de la mina de Porco del 29 de agosto del año 1996 fue un desastre mayor<sup>1</sup>. Aproximadamente 235.000 toneladas de lodos tóxicos y 180 toneladas de plomo, cadmio, zinc, arsénico, cianuro de sodio... causaron una secuela de daños a la salud humana, a la fauna piscícola, a la ganadería y a la agricultura incrementando la contaminación del río Pilcomayo, con efectos que se extendieron en los territorios de Argentina y Paraguay. En la parte alta de la cuenca desde hace cinco siglos se produce una contaminación del medio ambiente por parte del sector minero: un verdadero estilicidio que parece hacer parte del paisaje en la indiferencia o impotencia de las autoridades que hasta ahora poco hicieron, una situación que se alimenta de la ignorancia sobre los temas de contaminación y de sus efectos dañinos a mediano o largo plazo y de intereses económicos de pocos que muchos pagan.

## LA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO<sup>2</sup>

Es parte de la cuenca del Plata, uno de los tres drenajes principales en Bolivia, El Pilcomayo atravesando cuatro departamentos, Oruro, Potosí, Chuquisaca y Tarija, limita al oeste con la cordillera de los Andes, al norte con la cuenca Amazónica, al este con el río Paraguay y al sur con la cuenca del río Bermejo. El área total de la cuenca del río Pilcomayo en Sudamérica es de 272.000 km<sup>2</sup> de los cuales 98.000 km<sup>2</sup> (36%) corresponden a Bolivia, el resto (64%) se distribuye entre Paraguay y Argentina.

---

<sup>1</sup> La revista "New Scientist", de Inglaterra, afirmó que se trataba del "peor desastre ambiental de América Latina" ("El Diario", 16-I-97). La prensa argentina calificó al hecho de "el Chernobyl boliviano" ("Los Tiempos", 22-10-96) que llegaron a un afluente del internacional río Pilcomayo.

<sup>2</sup> Comisión Técnica Nacional del Río Pilcomayo - Centro de Estudios Regionales de Tarija - AMBIO CHACO

El río Pilcomayo<sup>3</sup>. Tiene una longitud de cauce en Bolivia de 840 kilómetros y sus altitudes varían de 5.200 a 400 msnm.

Los datos registrados por la estación hidrológica de Villamontes sobre el río Pilcomayo demuestran que éste puede alcanzar una profundidad de 6,6 m y un ancho de 150 m. La misma estación consigna un caudal promedio anual del río en 203,14 m<sup>3</sup>/s con un promedio máximo anual de 387 m<sup>3</sup>/s y un mínimo anual de 99 m<sup>3</sup>/s.

Las actividades antropogénicas en la cuenca del río Pilcomayo generan distintos problemas dentro de los límites de este ecosistema ribereño, como se indica a continuación:

- Entradas al río causando contaminación del agua y del medio ambiente
- Decadencia del hábitat con cambios en los terrenos poblados de árboles, arbustos y matas. Transporte de sedimentos y migración del río hacia la cabecera de la cuenca baja, aguas arriba.
- La disminución en las poblaciones de peces

## POLUCIÓN DEL AGUA

La actividad minera es predominante en la parte oeste de la cuenca, especialmente en Potosí, entre la subcuenca del río San Juan del Oro y la del río Tumúsila, región en la que predominan las minas de estaño, plata, cinc, plomo.

Los centros mineros ubicados en la cuenca del Pilcomayo son problemáticos desde una perspectiva ambiental. Las actividades mineras descargan residuos minerales, así como contaminantes derivados del tratamiento, los cuales son vertidos a los sistemas de drenaje del río. De esta manera, los metales pesados lixiviados y los residuos minerales y químicos, productos del tratamiento, ingresan al sistema hidrológico del río causando la contaminación del mismo.

La movilidad limitada de metales pesados en aguas con pH con tendencia básica, como es el caso del Pilcomayo, previene que las concentraciones altas de metales avancen grandes distancias río abajo de las operaciones mineras. Sin embargo, la migración de estos contaminantes puede ocurrir a través de la bioconcentración y la biomagnificación en organismos acuáticos, por fenómenos de transporte de partículas en suspensión y por oxidación de los sulfuros depositados en el cauce.

Los desechos industriales y urbanos, las aguas ácidas de mina además de las colas de los ingenios, son las fuentes principales de contaminación que conducen a la contaminación biológica y química del río Pilcomayo en la cuenca alta. Las fuentes principales de estas entradas son las ciudades de Potosí y Sucre que contribuyen considerablemente a su contaminación por la descarga de basura y aguas servidas al río además de todos los ingenios mineros.

Si bien se trata de aliviar parcialmente este problema por el tratamiento primario de desechos industriales (diques de cola), no obstante, centros poblados más pequeños, todavía usan sistemáticamente el río para evacuar la materia no tratada.

---

<sup>3</sup> Contaminación de los ríos y los impactos de la actividad petrolera: Centro de Estudios Regionales de Tarija

## LOS SEDIMENTOS

El transporte de sedimentos es un fenómeno causado por la gran cantidad de materiales finos que son depositados en el cauce del río Pilcomayo originando la colmatación y taponamiento del mismo, estimándose que la producción actual de sedimentos está en el orden de los 50 millones de m<sup>3</sup> por año.

Hasta el año 1940, el río Pilcomayo llegaba a la zona de los grandes humedales denominados Esteros de Patiño en el Paraguay y Bañado Estrella en Argentina, a aproximadamente 320 Km al oeste de Asunción en línea recta. Desde el año 1944, el río dejó de desembocar en dichos esteros y empezó a retroceder, a un promedio de 7 Km por año.

La migración del río Pilcomayo ha aumentado en los últimos años por causas naturales relacionadas a la naturaleza de los suelos friables y al régimen de las lluvias y probablemente también a causa de la deforestación con fines de extracción de madera, habilitación de nuevas tierras para la agricultura y los cambios en los patrones de uso de la tierra en la cuenca, los que ocasionan el incremento de las entradas erosionales en su cauce. Su progresivo desecamiento es problemático, no solamente por razones ambientales, sino también por causas políticas, ya que sirve como límite fronterizo entre Argentina y Paraguay.

Trabajos recientes con imágenes de satélite han demostrado que el fenómeno de retroceso del río no se restringe exclusivamente a Paraguay y Argentina. El depósito de sedimentos tiene el potencial como para continuar hacia Bolivia, hasta alcanzar la localidad de Ibibobo, distante a 60 kilómetros en línea recta de la frontera con el Paraguay.

Una migración de esta magnitud tiene el potencial suficiente para crear cambios hidrológicos sustanciales. La topografía montañosa alrededor de Ibibobo es tal que el cauce del río Pilcomayo por esta localidad es sumamente estrecho y las posibles deposiciones de sedimentos podrían bloquear el paso del río por este desfiladero.

## REDUCCIÓN DE LA PESCA

En años recientes, el monitoreo de la captura del sábalo (*Prochilodus lineatus*, un pez migratorio) principal especie residente en el río Pilcomayo, ha demostrado una disminución constante en el volumen de la pesca. Según estadísticas se estima que en la gestión 1998 solo se alcanzó el 25 % de volumen de pesca con relación a cinco años atrás. Si bien la sobrepesca es una causa de esta disminución, hay otros factores contribuyentes. Los últimos años han presentado periodos de sequía relativos que dan como resultado un menor flujo del río, ocasionando a su vez que los peces adultos no pueden recibir el estímulo suficiente para migrar río arriba y engendrar. Este tipo de flujo del río también puede ser el resultado de los cambios en el uso de la tierra dentro de la cuenca del Pilcomayo.

La deforestación causa un mayor flujo de la precipitación por la superficie y menos infiltración hacia el suelo. Es este suministro del agua freática el que rellena el flujo del río en los meses secos. Adicionalmente, las actividades petroleras alrededor de Puerto Margarita, el sitio de generación del sábalo, pueden estar afectando a su población.

## IMPACTO EN LA POBLACIÓN LOCAL

El deterioro ambiental del río Pilcomayo, especialmente su contaminación con metales pesados, está ocasionando una serie de impactos económicos y sociales en las comunidades indígenas y campesinas ribereñas debido a que las estrategias de sobrevivencia de estas poblaciones están ligadas a la extracción de peces y al uso de sus aguas con fines domésticos. El consumo cotidiano de peces constituye la principal fuente de proteínas de estas poblaciones.

Durante cuatro meses al año las comunidades guaraníes y Weehenayek tienen como principal actividad económica la pesca artesanal, especialmente del sábalo.

Igualmente, la pesca es un rubro fundamental para la economía de la región del Chaco del departamento de Tarija. El sábalo es el pez de mayor captura en Bolivia constituyendo el 70% de todo el volumen comercializado en los principales mercados del país que incluyen los departamentos de Santa Cruz y La Paz.

Los municipios ribereños y el Estado también se benefician de la industria pesquera del sábalo a través de un impuesto que cobran por unidad extraída en su jurisdicción.

## IMPACTO AMBIENTAL DE LA ACTIVIDAD PETROLERA

El área chaqueña en Bolivia pertenece a la Provincia Geológica Chaco y a la Provincia Geológica Sub-andina constituyendo las áreas con mayor potencial hidrocarbúfero del país. En el Sub-andina Sur se realizaron las mayores actividades de exploración con aproximadamente 350 pozos, poseyendo actualmente una de las mayores producciones del país. En los últimos años las actividades de prospección y explotación de hidrocarburos en la región chaqueña se han dinamizado a partir de la concesión de campos a diversas empresas transnacionales en el marco del nuevo ordenamiento económico del país.

Uno de los efectos más devastadores de la industria petrolera es la contaminación de los ríos y quebradas, la que se produce a través del impacto propio de las operaciones de exploración (apertura de brechas que favorecen a los procesos erosivos, vaciado de combustibles, basuras y otros contaminantes en aguas subterráneas y superficiales) y mediante los derrames de petróleo y emanaciones de gas.

Un ejemplo de estos impactos ambientales es el caso del campo petrolero denominado "Los Monos", ubicado en una quebrada del mismo nombre en la serranía del Aguaragüe, que es afluente del río Pilcomayo. En enero del año 1999 las instituciones locales alertaron que uno de los pozos (N° 8) del área se encontraba descontrolado y que de forma continua filtraba petróleo y gas causando la extinción de toda forma de vida en una superficie de 10.000 m<sup>2</sup> alrededor del pozo afectado y en una longitud de 18 Km. a lo largo de la quebrada Los Monos hasta desembocar en el río Pilcomayo.

Según un informe de la Auditoría Ambiental de la empresa Chaco S.A. se impactó un volumen de suelo de aproximadamente 4.000 m<sup>3</sup> alrededor y bajo el pozo debido al petróleo infiltrado, además se detectó la existencia de fugas en los pozos N° 6 y N° 7. Además del riesgo potencial y puntual de incendios y explosiones, la contaminación está afectando el ecosistema del área. Igualmente con el producto de la actividad petrolera se incrementa el potencial de erosión debido a la remoción de la vegetación de extensas áreas y el impacto sobre la fauna se produce a través de la fragmentación de hábitats, interrupción de patrones de migración y pérdida de elementos del hábitat debido a las detonaciones propias de la actividad petrolera.

# INTRODUCCIÓN SOBRE LA CONTAMINACIÓN

## LA CONTAMINACIÓN

Se trata de un concepto variable, sujeto a la revisión permanente de la comunidad científica y la mayoría de autores coinciden en señalar a ésta como *"la situación creada por la presencia en el ambiente de sustancias o formas de energía en tal cantidad y con una duración tal de su acción, que son susceptibles de provocar efectos perjudiciales o de causar riesgos a la salud humana, daño a los recursos vivos y a los sistemas ecológicos, perjuicio a los bienes e infraestructuras y paisajes, o a interferir con los legítimos usos del entorno"*.

Según la OCDE<sup>4</sup>, la contaminación del medio por el hombre, directa o indirectamente, tiene lugar por la introducción de sustancias o energías en el entorno, produciendo efectos nocivos en la naturaleza así como poniendo en peligro la salud humana, dañando a los recursos vivos (animales y vegetales) o interfiriendo su disfrute u otros usos legítimos del entorno.

## EVALUACIÓN DEL RIESGO: PERSISTENCIA, BIOACUMULACIÓN, TOXICIDAD.

De los más de 100.000 compuestos sintéticos que se manejan en la industria y el comercio, cuya cifra se estima crecer en más de 1.000 nuevos cada año, un buen número de ellos presentan efectos secundarios, por lo que se les debe someter a tests y pruebas que permitan regular su uso. A estas sustancias hay que añadir elementos naturales movilizados en el medio ambiente por la intervención del hombre como es el caso de la industria minera. A veces nos encontramos con que varias de esas sustancias pueden estar presentes, intencionada o accidentalmente, provocando efectos dañinos muy por encima de la suma de sus respectivos efectos individuales.

En cada caso se han de valorar las características que permitan evaluar el riesgo que supone el uso de dichas sustancias, para lo cual se han de tener en cuenta los siguientes factores:

Estabilidad química de dichas sustancias ante los procesos de biodegradación, concluyendo que si no son degradados por medios biológicos, hablaremos de que tienen una alta persistencia en el medio, tal y como ocurre con los metales pesados y los minerales sulfurados.

En otros casos las sustancias podrían ser degradadas si se dieran las condiciones adecuadas. Así ocurre con la contaminación por hidrocarburos en los vertidos de petróleo, ya que las fracciones pesadas son altamente persistentes, fundamentalmente por su baja solubilidad en el agua, lo que limita la posibilidad de que los microorganismos puedan utilizarlas como sustrato y consecuentemente puedan degradarlas. Para facilitar la acción

---

<sup>4</sup> organisation for economic co-operation and development

bacteriana se incorporan aditivos a base de nitrógeno y fósforo necesarios para que se den las proporciones adecuadas de nutrientes (la relación ideal C:N:P es, aproximadamente, de 100:10:1). Si la contaminación por petróleo alcanza el suelo, puede ser necesaria además una cantidad extra de oxígeno, así como sustancias tensioactivas, para llevar a cabo el proceso de biodegradación.

El factor a tener en cuenta ante un posible contaminante es la **bioacumulación** ya que cuando este tipo de sustancias penetran en los seres vivos no son metabolizadas, observándose un efecto multiplicador en la concentración de contaminante (entre 3 y 10 veces el valor de referencia al subir un eslabón en la cadena trófica).

Por último, la cuantificación de la toxicidad se puede realizar indicando la concentración a partir de la cual se observa un determinado efecto en una cierta proporción de la población expuesta al ensayo.

Aunque la definición de contaminante afecta a un buen número de sustancias orgánicas e inorgánicas, los metales pesados llaman especialmente la atención por su alto potencial de riesgo para el entorno así como para la salud de las personas.

A tener en cuenta los metales pesados, Cd y Hg, fundamentalmente, además de Cr, Co, Cu, Mo, Ni, Pb, Sn, Ti, V, Zn también se incluyen otros elementos como Ag, As, Ba, Be, B, Sb, Se, Te, Tl y U. Entre sus propiedades más características se pueden citar las siguientes:

- La mayoría de ellos no tienen una función biológica conocida
- Se solubilizan más fácilmente en medio ácido
- Depositán en los sedimentos por precipitación (ya sea por un aumento / disminución del pH o por la formación de compuestos insolubles como carbonatos, fosfatos, sulfuros, etc.), adsorción, cambio iónico y formación de complejos
- Penetran en la cadena trófica a través de organismos filtrantes, acumulándose a veces como compuestos organo-metálicos en los tejidos grasos (tal es el caso del cadmio y del mercurio) y en otros casos como simples iones

Este grupo de compuestos constituye un serio riesgo para la cuenca del río Pilcomayo, por ser sustancias altamente persistentes, presentan elevados niveles de bioacumulación y unos de ellos alcanzan elevadísimas cotas de toxicidad. Los efectos ambientales que producen unos y otros dependen de su concentración y de su movilidad entre los tres medios posibles: atmósfera, hidrosfera y litosfera.

Mientras el agua moviliza a los contaminantes gracias a su capacidad de disolución y es capaz de movilizar incluso a los contaminantes menos solubles en ella, como ocurre con los hidrocarburos, el aire en cambio transporta la polución en fase sólida (partículas y aerosoles), líquida (nieblas) y gaseosa (vapores).

En cada etapa del transporte, la concentración puede alterarse por transferencia entre fases, dilución e incluso por reconcentración del contaminante.

De cualquier modo la dispersión facilita la dilución, pero traslada el problema a otras zonas virtualmente libres de contaminación (parte baja de la cuenca), por lo que debe hacernos pensar sobre el carácter global del problema ya que el transporte y reconcentración de un determinado contaminante puede afectar al entorno de zonas expresamente alejadas de los focos donde se realizaron los vertidos.

## MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE LA CUENCA

Cada vez más, se hace necesario que el tratamiento de la contaminación industrial y minera se plantee desde el inicio del proceso productivo, tratando de incorporar el residuo generado a dicho proceso, al objeto de conseguir una máxima rentabilidad con un mínimo impacto, en contra de otras visiones que postergan el tratamiento del residuo como algo secundario y después de haber completado el ciclo de producción.

En primer lugar la introducción de mejoras técnicas en el proceso de producción de los ingenios mineros, así como mediante la implementación de nuevos procesos industriales. En segundo lugar, reutilizar las materias primas de modo que éstas cumplan su función el máximo de veces posible por unidad de producto o servicio realizado. La reutilización para usos industriales del agua procedente de los diques de colas y estaciones depuradoras de aguas residuales (¡cuando estén disponibles!)

En tercer lugar, se trataría de reciclar los residuos o subproductos de ciertos procesos, utilizándolos como materias primas de otros, lo cual redundaría en el ahorro de recursos y la disminución de residuos.

Por último, insistir en la necesidad de que en el cálculo de costos de los procesos de producción, se contemplen partidas económicas relativas a los daños ambientales. Igualmente considerar la iniciativa pública en un sector en el que los recursos para identificación en tecnologías limpias vayan en aumento, ya sea mediante el desarrollo de estrategias que permitan desgravar impuestos a las empresas que utilicen tecnologías no contaminantes, o a través de la creación de empresas y servicios que cumplan los requisitos anteriormente expuestos, allí donde no pueda concurrir la iniciativa privada.

En fin se trataría de implementar medidas tendientes a que los procesos de producción sean cada vez más limpios y seguros para el medio ambiente.

## PROTOCOLO DE ACTUACIÓN PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LA CUENCA.

El control de la polución por parte de los Gobiernos, Organismos Oficiales o Agencias de Medio Ambiente implica seguir las pautas adecuadas para una solución eficaz del problema, resumiéndose el posible protocolo de actuación en los pasos que a continuación se describen:

- **Reconocimiento del problema.** Aunque parezca obvio, la mayoría de los problemas ambientales aceptados hoy como tales, generalmente desde fechas recientes, tienen un largo historial antes de que fuesen asumidos por la comunidad nacional e internacional.
- **Monitorización y control** para determinar la extensión del problema. Implantación de procedimientos de control y de mejoras tecnológicas.
- **Legislación para asegurar el control de los procedimientos implantados.** Es siempre necesario recurrir a normas y leyes nacionales e internacionales.
- **Monitorización para asegurar que el problema ha sido controlado.** Permite también mejorar la legislación establecida.

# LA MINERÍA EN POTOSÍ Y ALREDEDORES

## INTRODUCCIÓN

A pesar de una relativa riqueza del subsuelo del altiplano potosino, la minería ha sido y es una de las actividades fundamentales de la región desde el siglo XVI. Se pueden observar las obras de ingeniería hidráulica y minera en las ruinas que los españoles dejaron que se mezclan con las instalaciones más modernas de los ingenios en la ciudad de Potosí.

El Cerro Rico domina la ciudad y a sus minas y se impone desde todo punto de vista estando en Potosí. La mina Pailaviri es la mina más antigua de Potosí, en continuo trabajo desde 1545; allí se extraía la plata y ahora se explota también el zinc y el plomo. El cerro llegó a tener más de 5.000 bocaminas y socavones, muchísimos de ellos interconectados. Uno de los mayores obstáculos para abordar cualquier investigación sobre la minería en Potosí es la dificultad de definirla. El número de cooperativas mineras productoras de estaño, complejos poli metálicos de zinc, plata y plomo es grande y llegan a capacidades de producción que se aproximan a un millón de toneladas de minerales por año.

Promover el desarrollo de la industria minera mejorando técnicas y transformación de operaciones, es seguramente una gran oportunidad para el departamento de Potosí, sin olvidar todos los adelantos que se han hecho para la preservación del medio ambiente.

La explotación geológica-minera debe pasar a constituir en una política de Estado, implementándose de correspondientes instrumentos legales que incluyan reglas claras y que permitan la implementación de proyectos de largo plazo de protección del medio ambiente.

La empresa estatal COMIBOL enfrentó la crisis de 1985 reduciendo operaciones y entregando una gran parte de ellas al sector privado o a los mismos trabajadores que se organizaron en cooperativas. Actualmente no cuenta con operaciones propias y sus actividades se concentran en la administración de las concesiones arrendadas a empresas medianas y a cooperativas. La pequeña minería ha incrementado su participación en la producción de casi todos los minerales, con excepción del oro.

La minería cooperativista se clasifica entre cooperativas dedicadas a la explotación de minerales de zinc, plomo, plata. Las operaciones de las cooperativas aumentaron después de la crisis de 1985, esto como consecuencia de la reducción de las actividades de la COMIBOL, cuyas concesiones se arrendaron a los cooperativistas.

## INGENIOS

En el Cerro Rico de Potosí se explotan yacimientos de complejos plomo-zinc-plata por minería subterránea. La empresa privada Pailaviri y las 30 cooperativas pequeñas, que están arrendando el derecho de explotación de la Concesionaria estatal COMIBOL, extraen 1.300-1.800 toneladas de material por día. Las cooperativas realizan la mayoría de sus operaciones a mano y con la ayuda de explosivos, mientras que la empresa Pailaviri cuenta con equipamiento mecanizado.

El mineral extraído es procesado en 42 ingenios situados alrededor del área de la ciudad de Potosí, con una capacidad total instalada de aproximadamente 2.400 toneladas por día, de los cuales solamente 28 funcionan.



**Figura 1: Proceso de flotación en los ingenios**

**Dique de colas en Potosí**

Actualmente se supone que se procesan entre 1.300-1.600 toneladas por día. El mineral se tritura y se muele antes de concentrar los minerales de zinc con plata ( $ZnS/AgS$ ) y de plomo con plata ( $PbS/AgS$ ) por medio de la flotación. En la flotación se utiliza cianuro de sodio, entre otros químicos. Los minerales de estaño ( $SnO_2$ ) se pierden en las colas, porque su recuperación por medio de la flotación no es rentable.

Los ingenios están ubicados en el centro o en la periferia de la ciudad. La mayoría de ellos son de dimensiones pequeñas o medianas, con diferentes grados de tecnología y capacidad de producción. El proceso genera concentrados y residuos (colas). Los residuos provenientes del proceso siempre se han descargado en el río La Rivera y solamente después de los primeros días del mes de octubre del año 2004 se descargan en canales que llevan las colas al dique de Laguna Pampa.

El Río La Rivera después de su curso por la ciudad, recibe las aguas del Río Huaynamayu, Korimayu y Alja Mayu, todos son colectores de aguas residuales urbanas y parte de las colas. Los mismos se unen en el Río Tarapaya, el cual es un afluente del Río Pilcomayo.

## FUENTES DE CONTAMINACIÓN HÍDRICA

Las aguas de los cuatro ríos en Potosí son contaminadas diariamente por cuatro tipos de fuentes:

- **Aguas residuales del alcantarillado de la ciudad (aguas negras o de cloaca)**
- **Aguas ácidas de drenaje de las minas**
- **Aguas percoladas por las acumulaciones de colas en desmontes**
- **Efluentes de las colas de los ingenios, unos 1.300 -1800 toneladas/día**

Las aguas de drenaje de las minas y las aguas percoladas por las acumulaciones de colas son ácidas por causa de la oxidación y posterior disolución del sulfuro contenido en los minerales de las acumulaciones. Estas aguas están cargadas de metales pesados disueltos, principalmente, Zinc, Plomo, Cadmio... Estas fuentes aportan a la contaminación constante de los ríos, principalmente durante la época húmeda.

Al contrario del drenaje ácido de minas y colas, el efluente de las colas de los ingenios es alcalino, debido a la utilización de cal en la flotación para aumentar el pH y favorecer este

proceso. Además de una carga elevada de sólidos suspendidos, estas aguas residuales contienen metales pesados y los aditivos que se utilizan en la flotación.

Las colas de las plantas que son descargadas tienen un alto contenido de sólidos suspendidos, con un valor promedio de 21% en peso<sup>5</sup> aproximadamente. La densidad de pulpa, que corresponde al porcentaje de peso de sólidos en las colas es más baja, esto debido a la dilución de las mismas por las aguas de alcantarillas y por la sedimentación de las colas más gruesas a lo largo de los trechos con menor pendiente del río.

## FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS

Los suelos en el área de las minas y de la ciudad de Potosí son destruidos por la excavación de socavones en el Cerro Rico y por el uso a terrenos para desmontes y las acumulaciones de colas.

La carga de sólidos en los efluentes de los ingenios se sedimenta río abajo, donde la pendiente del cauce y la velocidad del flujo son menores. El agua de los ríos se utiliza para la irrigación de los cultivos colindantes a sus orillas. De esta manera los contaminantes son repartidos sobre los suelos fértiles.

Por la erosión eólica de las acumulaciones de colas, las partículas finas de estas acumulaciones son transportadas por la atmósfera y se depositan sobre los suelos.

## IMPACTO SOBRE LOS CAUDALES DE LOS RÍOS

El agua necesaria para el procesamiento de los minerales en los ingenios proviene de embalses situados en las altas cuencas de los cuatro ríos de la ciudad. Durante la época de lluvias, entre noviembre y abril, se retiene el agua de los ríos, disminuyendo sus caudales naturales. En época seca el agua almacenada se utiliza para los procesos en los ingenios.

Cuatro ríos atraviesan la ciudad de Potosí: los ríos Huaynamayu, Chectakala, Korimayu y La Rivera. Los ríos Huaynamayu y Chectakala confluyen con el río La Rivera en el centro de Potosí. Poco después de su curso por la ciudad, el río La Rivera recibe las aguas del río Korimayu. La mayoría de los ingenios se sitúan en las orillas del río La Rivera, en cuyas aguas desechan una parte de las colas de la flotación y las aguas negras.

Río abajo de la ciudad, el río La Rivera confluye con los ríos Hualampaya y Agua Dulce formando el río Tarapaya, el cual es un afluente del río Pilcomayo (sistema fluvial del río de la Plata). por lo tanto la contaminación de los cursos de agua de la ciudad de Potosí llega a tener alcance internacional.

El caudal permanente es una combinación de pulpa de colas, aguas servidas y drenaje ácido de mina, que se diluyen significativamente en la época de lluvias.

Al combinarse las aguas ácidas del drenaje de minas y de la percolación, cargadas con metales pesados disueltos, con las aguas alcalinas de los ingenios, se producen una reacción de neutralización, una oxidación-reducción y una parcial precipitación de algunos metales.

Los sólidos se sedimentan lentamente a lo largo del sistema Río La Rivera – Río Tarapaya – Río Pilcomayo. El cianuro liberado por los ingenios forma cianuro combinado o complejos con los metales pesados, muy solubles y de alto impacto medioambiental.

---

<sup>5</sup> proyecto de alcantarillado sanitario y recolección de colas – Potosí Fichtner –SID octubre 2002

La descarga de aguas servidas de la ciudad de Potosí y las sustancias orgánicas utilizadas en los ingenios aumentan la carga de contaminantes orgánicos de los ríos, medidos con el parámetro DOQ (demanda química de oxígeno)

Debido a la afluencia de otros ríos y de la sedimentación de la carga sólida, la contaminación del agua del sistema Río La Rivera – Río Tarapaya – Río Pilcomayo disminuye con la distancia de las fuentes de contaminación en el área de Potosí. Sin embargo, muestras de sedimentos tomadas en el río Pilcomayo a 180 kilómetros río abajo de Potosí (Puente Méndez) estaban seriamente contaminadas. Esto demuestra que los metales pesados contenidos en la carga sólida de los ríos son transportados a través de largas distancias.

## IMPACTOS SOCIOECONÓMICOS

Existen algunos estudios elaborados para determinar los impactos socioeconómicos de las operaciones mineras de los ingenios de Potosí.

Un primer trabajo fue realizado en el año 1995 (Hinojosa, Rosales). Se tomó en cuenta a 23 comunidades compuestas por 897 familias. Se dividió a las comunidades en cuatro grupos. El periodo de referencia del análisis fue de cinco años (1990-1995). La investigación aporta información sobre algunos efectos de la contaminación minera: migración, producción agrícola, ganado, sedimentación de colas en las tierras de cultivo y uso del agua (Hinojosa, Rosales).

Los miembros de las comunidades se identificaron como campesinos, dedicados principalmente al cultivo de las tierras y crianza de ganado. El análisis realizado es cualitativo y no ofrece información cuantitativa de los efectos. Los efectos más importantes se resumen a continuación:

En las regiones donde las aguas del Río La Rivera, Molino y Tarapaya se utilizan para irrigar los cultivos, se han reportado altos valores de mortandad de cultivos. Esto podría atribuirse a la alta concentración de cobre y zinc (fitotóxicos) así como cadmio, manganeso, zinc y boro. Al irrigarse los campos con agua de colas, los sólidos de las mismas se depositan en las tierras. Las lamas de las colas son muy dañinas para las tierras cultivadas, éstas destruyen la raíz y secan la planta.

Pese a no contar con datos sobre el número de enfermos tratados, los efectos en la salud no pueden ser pasados por alto. Especialmente los niños son afectados por irritaciones de la piel y sangrados al exponerse al agua. Casos de enfermedades estomacales y diarrea también han sido reportados (Hinojosa y Rosales).

Estos últimos están más relacionados con las aguas servidas que con la contaminación minera, cuyos efectos no han sido medidos aún en términos de casos reportados y analizados por contaminación de metales pesados. Por lo tanto existe una necesidad urgente de buscar una solución también al problema de aguas servidas de los efluentes urbanos.

Otro efecto se refiere al creciente proceso de migración producida en las comunidades, tanto permanente como temporal, llegando la migración permanente a alcanzar 80% de la población en seis comunidades. Sin embargo las causas de la migración son diversas, entre ellas causas estructurales como la pobreza extrema de estas regiones y también la contaminación del agua.

El sector agrícola parece ser el más afectado: el suelo muestra un acelerado proceso de erosión, el monto de nutrientes ha disminuido así como la productividad, lo que se observa en la dificultad de la planta para crecer, florecer y germinar. También se ha observado un proceso de desaparición de vegetación y fauna acuática en los cauces del río.

## EL VERTIDO MINERO EN LOS CAUCES Y SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO

El vertido de los lodos y colas procedentes de las minas de Potosí cubre una extensión elevada que necesita ser todavía evaluada. Comprendida entre las minas potosinas y las minas a lo largo de los otros afluentes en la cuenca alta del río Pilcomayo, esta extensión podría constituir un enorme reactor químico-biológico en el cual parte de los sulfuros lentamente se oxidan liberando los metales pesados<sup>6</sup> bajo forma iónica en las aguas. La oxidación de los sulfuros produce sulfatos de mayor solubilidad. Todos estos sulfatos son mucho más solubles que los sulfuros metálicos anteriormente señalados. Por lo que pueden ser fácilmente removidos por lavado con agua.

La composición química de los lodos vertidos fue investigada en trabajos del CIMA y resultó ser relativamente homogénea estando muy condicionada por la paragénesis de los yacimientos y por los procesos mineralúrgicos empleados en el beneficio del mineral. Los depósitos se caracterizan por tener una granulometría fina, se supone inferior a 100  $\mu\text{m}$ , ser eminentemente sulfuros y óxidos (Sn), con un porcentaje y con contenidos variables de Plomo, Zinc, Manganeso, Cadmio, Mercurio y otros metales por los cuales se necesita una atenta evaluación.

La permanencia de estos minerales activos en los suelos y en los sedimentos de los cauces constituye un peligro de contaminación medio ambiental y de salud pública. Una evaluación y comprensión de los procesos de oxidación / cesión de las capas mineralizadas es vital para limitar la contaminación de los suelos y aguas, especialmente en As, Pb, Cd, entre otros, como parecen corroborar ensayos realizados en las poblaciones a lo largo del río Pilcomayo.

De la literatura científica<sup>7</sup> se conoce como los elementos contaminantes se incorporen claramente en los primeros centímetros del suelo en función del tiempo. Los suelos con alto contenido en carbonato retienen y precipitan los elementos contaminantes en los primeros centímetros actuando de protección a los acuíferos de una posible contaminación.

## DIQUE DE LAGUNA PAMPA

En junio del año 2003, el Gobierno Nacional inauguró el Dique de Colas de Laguna Pampa. Transcurrieron 15 meses y cuatro inauguraciones, se arrojaron más de 400.000 toneladas de residuos sólidos a los ríos, antes de tener un sistema de recolección de colas de los ingenios eficaz...

El dique de Laguna Pampa hasta octubre 2004 recibió solamente el 30 por ciento de las aguas residuales e industriales y de manera transitoria. A partir del comienzo de octubre

---

<sup>6</sup> Se denomina metales pesados a aquellos elementos químicos que poseen un peso atómico comprendido entre 63.55 (Cu) y 200.59 (Hg), y que presentan un peso específico superior a 4,0 (g cm<sup>-3</sup>). Cabe destacar que en esta categoría entran prácticamente todos los elementos metálicos de interés económico, por tanto, de interés minero. Los metales pesados tienen distintos niveles de toxicidad según su especiación: forma iónica, complejos, compuestos orgánico-metálicos. Una sustancia tóxica es aquella que tiene un efecto adverso sobre la salud!

<sup>7</sup> El Cd, Cu y Zn se incrementan fundamentalmente en los primeros 27 días desde el vertido, pero mientras que el contenido Cd se multiplica por 1,3 entre los 90 y 450 días del vertido, el contenido en Cu y Zn se multiplica por 1,7. El incremento de Pb se vio algo más retrasado en el tiempo y ocurre fundamentalmente entre los 27 y 40 días del vertido, transcurrido un año la concentración se multiplica por 1,8. El As es el que presentaba un mayor incremento de contaminación en el tiempo; si bien, al igual que el Pb, presenta un fuerte incremento entre los 27 y 40 días del vertido, el mayor incremento lo presentaba transcurrido un año, multiplicándose por 3,5 su contenido.

2004 el dique de colas de Laguna Pampa entró en casi plena actividad recibiendo las colas de los ingenios.

Las obras de construcción de los canales que permiten trasladar hasta 700 litros por segundo de colas que producen estas plantas están casi completadas permitiendo a la totalidad de las aguas que producen los ingenios de la capital potosina confluir al dique de colas de Laguna Pampa.

Las características de la presa de Laguna Pampa según la fundación MEDMIN – CIMA de Potosí son las siguientes: área de 54.092 m<sup>2</sup>, volumen total 158.812 m<sup>3</sup> y con un volumen útil de 115.538 m<sup>3</sup> y un volumen utilizable de 134.999 m<sup>3</sup>. La construcción del dique fue realizada con arcilla compactada y los valores se refieren a la situación en junio 2004.

MEDMIN informa que la producción de colas como caudal es de 541 L/s a la entrada del dique y un caudal de 340 L/s a la salida. Estos datos de caudal son puntuales y por lo tanto no tienen un significado preciso.

Considerando una producción diaria de 1500 toneladas de minerales, se quedarían en el dique 692 m<sup>3</sup>/día de lodos (al 20% de agua y con peso específico de 2,6 T/m<sup>3</sup>) estimando un tiempo de vida del dique en seis - siete meses.



**Figura 2: El dique de laguna Pampa**

Las aguas recuperadas son vertidas directamente en el río Tarapaya.

El indicado dique representa el cumplimiento de los esfuerzos de las autoridades para que la totalidad de los ingenios que operan en la capital dejen de verter sus aguas en el río Tarapaya, afluente del río Pilcomayo.

Actualmente son 28 los ingenios mineros conectados con los canales que descargan las colas en laguna Pampa mientras que los restantes 8 deberían ser conectados al dique en las próximas semanas. Los ingenios que se encuentran por debajo del dique de colas laguna Pampa tendrían que bombear las aguas en el mismo dique de colas y actualmente están paralizadas todas las actividades productivas para no descargar al río.

El dique de colas laguna Pampa es una solución temporánea y limitada al problema, puesto que dentro de unos meses la laguna será completamente colmatada. Algunos trabajos de levantamiento del dique podrían avanzar el tiempo de colmatación de un año más, creando al mismo tiempo un riesgo potencial de desbordes de lodos en la vertiente que llega al pueblo de San Antonio.

Una solución planteada por las autoridades de la Prefectura y los principales ejecutivos de la Asociación de Ingenios Mineros de Potosí que podría resolver a medio plazo el problema de las colas es el proyecto de San Antonio con la construcción del dique de colas San Antonio y el parque de ingenios mineros.

La agencia de cooperación alemana (KFW) antes de financiar las obras requiere saber como y quien administrará el dique que debe ser construido en la zona de San Antonio. Se consolidó la adquisición de 39 hectáreas de terreno a través de un convenio que fue firmado recientemente con las autoridades y los comunarios de San Antonio para la transferencia de todas las actividades de ingenios.

Un dique de cola actúa como un tanque de sedimentación permitiendo de separar los sólidos sedimentables de las aguas que pueden ser recuperadas en los ingenios. Es importante observar que un dique de cola no reduce la concentración de los iones disueltos, por la mayoría introducidos con las aguas ácidas de mina y durante el beneficio en los ingenios, que son altamente impactantes en el medio ambiente

En el manejo de un dique de colas se trata de controlar el ingreso de las aguas (colas) y monitorear las aguas a la salida, el nivel de los sedimentos y eventuales perdidas e infiltraciones.

## LO QUE INFORMA LA PRENSA

Según El Diario<sup>8</sup> del 16 de enero de 2004, la contaminación del río Pilcomayo habría causado que niños del sector de Sotomayor se encuentren contaminados con restos de plomo en la sangre.

*...análisis realizados a 50 niños en esta zona, permitieron encontrar, en la totalidad de los menores plomo en la sangre y que sería como consecuencia de la contaminación de las aguas del río Pilcomayo con desechos de minerales.*

*...hay informes de niños con malformaciones, pero no sabemos si se debe a la contaminación del agua del Pilcomayo, eso es lo que tratamos de determinar, porque también hay malformaciones en niños de otras regiones que no consumen agua del río...*

*La autoridad política señaló que este tema es manejado con cuidado porque prevén hacer comparaciones con niños de otras regiones que no consumen agua del Pilcomayo, lo que permitirá ver si están o no contaminados...*

*...comunidades campesinas y etnias, tanto en los departamentos de Chuquisaca y Tarija, consumen diariamente agua del Pilcomayo, el río recibe unas 1.300 toneladas por día de desechos minerales que echan los ingenios de Potosí...*

*...la contaminación de las aguas del Pilcomayo ocasionaron la pérdida de 5.000 hectáreas cultivables en el Departamento de Chuquisaca, las tierras eran regadas con agua del río, lo que ocasionó la reacción de los agricultores que exigen pronta solución a un viejo problema...*

*...la producción agrícola de esas 5.000 hectáreas está contaminada y perdemos mercado, la gente está emigrando (...) Hay niños y animales enfermos...*

*...la autoridad estimó pérdidas económicas que sobrepasan los 30 millones de dólares como consecuencia de la contaminación del Pilcomayo...*


*..El primer paso es llegar a descontaminar el agua, pero todavía quedará el mayor problema que es descontaminar el suelo y tratar de compensar las pérdidas que se sufrieron...*

---

<sup>8</sup> <http://www.eldiario.net/La Paz - Bolivia>

*... se pierden de ser consumidos 1.800 millones de metros cúbicos de agua por año del río Pilcomayo, como consecuencia de que está contaminado por desechos de metales pesados...*

Investigaciones y estudios independientes deberían permitir entender si los hechos reportados son una realidad exagerada, “vox populi” o una preocupante situación real!



## LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINAS

Las operaciones en la mina subterránea generan dos tipos de aguas:

- las neutras, que nacen de las infiltraciones en el yacimiento sin encontrar las condiciones para originar el fenómeno de la acidificación
- drenaje ácido de la mina, que se origina al pasar el agua de infiltración por zonas mineralizadas en presencia de oxígeno y bacterias

Las aguas ácidas se generan cuando las aguas neutras entran en contacto con sulfuros produciéndose agua que posee niveles altos de acidez.

Las reacciones más aceptadas de la oxidación para la pirita<sup>9</sup> son:

- (1)  $\text{FeS}_2 + 7/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$
- (2)  $\text{Fe}^{2+} + 1/4 \text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 1/2 \text{H}_2\text{O}$
- (3)  $\text{Fe}^{3+} + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$
- (4)  $\text{FeS}_2 + 14 \text{Fe}^{3+} + 8 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 15 \text{Fe}^{2+} + 2 \text{SO}_4^{2-} + 16 \text{H}^+$

Que muestran como la presencia de minerales sulfurados (pirita en este caso) más agua y oxígeno produzcan iones de hierro  $^{2+}$  (hierro soluble) y ácido sulfúrico.

Las reacciones 1 y 2 son aceleradas por catálisis bacterial.

Bajo condiciones de pH no tan ácidas puede precipitarse el ión férrico en forma de oxihidróxido férrico (3) que actúa como oxidante y puede oxidar la pirita en ausencia de aire (auto catálisis), resultando la generación de más ácido e ión ferroso (4).



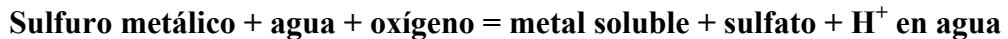
**Figura 3: Gotera de agua ácida de bocamina en Potosí**

<sup>9</sup> (Kleinmann et al. 1981)

## DESMONTES

Los relaves del procesamiento de depósitos de metales básicos, rocas del sistema de tajo abierto y rocas de desecho, contienen cantidades significativas de minerales sulfurosos tales como pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y la pirrotita ( $\text{FeS}$ ) y de otros sulfuros tales como la calcopirita ( $\text{CuFeS}$ ), arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), galena ( $\text{PbS}$ ) y esfalerita ( $\text{ZnS}$ ).

La reacción de estos sulfuros con agua y oxígeno ocurre de acuerdo a la reacción generalizada:



En los sulfuros se encuentran otros cationes de metales pesados como Hg, Sb, Mo, Co, Cd, Mn, Ni... y aniones como  $\text{PO}_4^{-2}$ ,  $\text{AsO}_4^{-2}$ ,  $\text{Cl}^{-1}$  en concentración variable que durante el proceso de oxidación son liberados como iones solubles.

Una solución típica de aguas ácidas de mina podría contener 2500 mg/l de sulfato, con varias concentraciones de un amplio rango de otros elementos. La composición es específica del emplazamiento. La velocidad de la producción de ácido depende de factores tales como la temperatura, el pH y el potencial redox de la solución en contacto con los minerales sulfurosos, así como de la mineralogía, el área superficial de la partícula de sulfuro y la actividad biológica.

De esta forma y dependiendo también del régimen de lluvias, los lixiviados o el drenaje del interior de las minas pasan a los arroyos y se produce la oxidación del hierro ferroso soluble a férrico. Un aumento de pH debido a fenómenos de dilución causa la precipitación del  $\text{Fe}^{3+}$  en el fondo del cauce mostrando la típica coloración roja de los óxidos-hidróxidos de hierro  $^{3+}$ .

Los cambios de pH y la presencia de metales pesados como el cobre, el zinc y el cadmio se mantienen en solución y como resultado se obtiene una disminución o hasta una desaparición de la fauna y flora o se simplifica en comparación con las condiciones normales, presentando un pH entre 2 y 3

En la superficie, el minado se concentra en el tajo abierto, donde se generan desmontes o mineral estéril como producto del desbroce que son enviados a los botaderos, acumulados en depósitos (stock piles) ubicados en distintos sectores en los alrededores de la ciudad de Potosí

Esos botaderos generan aguas ácidas por las precipitaciones e infiltraciones, las cuales se adjuntan a las aguas ácidas generadas al interior de las minas.

## REMEDIACIÓN DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINA

Las opciones tecnológicas para el control de drenaje de aguas ácidas son las siguientes:

- **Control de la fuente de emisión** en el que se evita el contacto del mineral tanto con agua, aire o bacterias, que son los factores iniciadores del proceso.
- **Control y captación de los escurrimientos** de agua: se analiza la hidrografía del sistema y se recolectan las aguas ácidas en un único drenaje hacia el sistema de tratamiento
- **Tratamiento químico del efluente** a la salida de la boca-mina: se diseña un esquema de tratamiento en el cual se emplean reactivos como la cal, caliza, soda, peróxido de

hidrógeno etc. La formación de muchos lodos implica la realización de un sistema de recolección y almacenamiento de los mismos en condiciones de seguridad.

El control de las fuentes es difícil de realizar en la situación medio ambiental de Potosí en la cual los procesos de acidificación de las aguas se han instaurados después de años. Tampoco es pensable cerrar las bocaminas para frenar la entrada del aire en la mina debido a la red de galerías y pozos entrelazados.

El tratamiento clásico se inicia recolectando y/o bombeando las aguas ácidas a un primer tanque donde se mezclarán con otras aguas y eventualmente con colas básicas de los ingenios para un primer proceso de neutralización.

El rebose pasará a un segundo tanque de mezclado donde se adiciona la lechada de cal que actúa como agente neutralizador. Se adiciona también un agente oxidante como el peróxido de hidrógeno o se hace burbujear aire con la doble función de oxidar el  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  y mezclar las soluciones.

La generación de lodos densos en un tercer tanque (sedimentador) contribuye a la co-precipitación de metales y se produce un efluente con menor concentración de iones metálicos.

Ulteriores tratamientos químicos podrían precipitar la totalidad de los iones de metales pesados en solución.

## TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINA

Se han realizado tanques (balsas) en anaerobia con el objeto de ensayar tratamientos que permitan el tratamiento de las aguas ácidas con bajo costo de mantenimiento y un uso limitado de productos químicos adicionales.

Las balsas anaerobias son el sistema pasivo de corrección para aguas con una alta acidez.

El proceso más importante que ocurre en la balsa anaerobia es la reducción de sulfatos.

Algunas bacterias en su proceso metabólico producen sulfuro de hidrógeno y bicarbonato y requieren además de los iones sulfato, materia orgánica en un ambiente anóxico. El sulfuro de hidrógeno generado reacciona y precipita la mayoría de los metales pesados que se encuentran en solución. Los iones bicarbonato se encargan de neutralizar la acidez que se produce en la reacción.

Un sustrato con piedra caliza contribuye a la producción de la alcalinidad del sistema. El sustrato además, debe contener materia orgánica para que puedan vivir las bacterias encargadas de la reducción de los sulfatos. Estas bacterias se aportan con los purines de cerdo o de otros animales. Entre los residuos orgánicos se incluyen: estiércol, melazas, residuos de fabricación de cerveza, suero deshidratado, almidón, y aguas residuales urbanas.


### *TRATAMIENTO BIOLÓGICO MIXTO*

Es aconsejable investigar sobre un sistema de tratamiento biológico mixto que podría permitir tratar conjuntamente las aguas residuales urbanas y las aguas ácidas de mina a condición de realizar una mezcla en la cual los elementos nutritivos de las bacterias reductoras, carbono, nitrógeno y fósforo provenientes de las aguas residuales urbanas se encuentren en la relación óptima: C:N:P: 110:7:1

La velocidad de reducción de los sulfatos es influenciada por la temperatura y se ralentiza para  $\text{pH} < 5,5$ , por ello, para que las bacterias sulfa-reductoras se establezcan en la balsa y

comiencen a producir alcalinidad, es necesario disponer un lecho de caliza que neutralice la acidez facilitando el desarrollo de las colonias de bacterias hasta que éstas sean autosuficientes

Una instalación piloto podría dar indicaciones útiles sobre estos dos procesos biológicos para solucionar el problema de las aguas ácidas y eventualmente de las aguas servidas urbanas.



## **TECNOLOGÍAS APROPIADAS DE AGUA Y SANEAMIENTO**

### **PROCESO DE PARTICIPACIÓN PÚBLICA**

La aceptación social de los proyectos pilotos es la premisa necesaria para el suceso de los mismos como resultado de consultas con las autoridades locales y la población.

Estas medidas son de obligatorio cumplimiento en la realización de los estudios y de los proyectos de medio ambiente, ya que la población es la principal afectada y la mejor conocedora del ambiente local. Con este fin se debe recabar la participación de los diversos canales institucionales a través de los cuales se expresan los intereses de la comunidad, como podrían ser los consejos populares.

Se dice que hay impacto ambiental cuando una actividad produce variación, favorable o desfavorable, en el medio ambiente.

Cualquiera sea el alcance y la extensión del proyecto éste debe pasar necesariamente por una serie de fases además de identificar, predecir, interpretar, valorar y comunicar el impacto ambiental que la ejecución de un proyecto acarreará sobre su entorno.

Se debe valorar y proporcionar la información de los probables efectos ambientales a los encargados de tomar decisiones, de forma tal que permita, de ser necesario, aprobar condicionadamente o denegar la ejecución de un proyecto, estableciendo los procedimientos adecuados a esos fines.

Se proponen a continuación dos instalaciones piloto a implementar en la parte alta de la cuenca del río Pilcomayo.

# **PILOTO I: HUMEDALES ARTIFICIALES PARA CLARIFICACIÓN Y FILTRACIÓN DEL AGUA EN SOTOMAYOR**

**OBJETO:** *se propone un piloto en el área de Sotomayor (departamento de Chuquisaca) con la finalidad principal de realizar humedales artificiales para obtener agua apta al consumo agrícola.*

## **INTRODUCCIÓN**

Un estudio detallado en la comunidad agrícola de Sotomayor alcanzaría como objetivos la evaluación del impacto del riego con aguas del río Pilcomayo en los suelos del área, una estimación del consumo de agua a nivel parcelario, el riesgo de contaminación del acuífero y protección de pozos, determinar la calidad bacteriológica y brindar agua para consumo agrícola, animal y humano.

Actualmente la comunidad agrícola de Sotomayor que consta de 550 familias con una población de alrededor 2600 habitantes utiliza las aguas crudas del río Pilcomayo transportadas por un canal artificial de tierra de alrededor tres Km de largo con un caudal que se puede estimar entre 40-80 L/s para regar cerca de 200 hectáreas de campos cultivados con hortalizas.

Estas aguas transportan una cierta cantidad de sólidos suspendidos, metales disueltos y una carga bacteriana debida a la contaminación del río por aguas residuales de las ciudades de Sucre y Potosí. Para detectar los colifecales existen diagnósticos microbiológicos, a través de cultivos de las aguas, así como se deberán efectuar los análisis de las mismas para determinar el contenido de metales pesados disueltos y en suspensión.

Existen métodos sencillos y prácticos para mejorar las condiciones físicas de las aguas de abastecimiento, es decir aquellas que sean aprovechables para suplir las necesidades del hábitat humano, que reducen o eliminan su contaminación, cuando no se dispone de agua potable de acueducto, de manantial o de pozo.

Por lo general, las aguas superficiales en la cuenca alta del río Pilcomayo tienen un nivel variable de contaminación por sólidos minerales suspendidos, iones disueltos y material orgánico de origen fecal. Por tal razón es necesario realizar un tratamiento al agua, comenzando por clarificar<sup>10</sup> cuando se encuentra turbia.

Los humedales artificiales brindan una oportunidad de pretratar las aguas disminuyendo los nutrientes y las bacterias provenientes de las aguas residuales, reduciendo la carga de los sólidos suspendidos y metales disueltos. Se obtendría de tal manera agua apta al consumo agrícola.

Un depósito de almacenamiento (reservorio) de uso doméstico o animal puede ser utilizado para el proceso de sedimentación natural o mediante productos floculantes. Este sistema de almacenamiento se podría usar para el pretratamiento del agua garantizando la remoción de la mayoría de sólidos suspendidos, metales disueltos y bacterias presentes en

---

<sup>10</sup> Proceso por el cual se remueven partículas suspendidas del agua turbia para hacerla clara.

el agua, siempre y cuando se efectúe una correcta floculación y sedimentación en el tanque de almacenamiento. Se obtendría de tal manera agua apta al consumo animal. Luego sería necesario filtrar<sup>11</sup> y desinfectar<sup>12</sup> para mejorar sus condiciones físicas, químicas y biológicas, obteniendo de esta forma agua apta para el consumo humano.

## MUESTREO DE LAS AGUAS

La frecuencia de los muestreos y del análisis de cada parámetro será establecida en función del desarrollo del programa del Piloto I, así como los métodos de medida, teniendo en cuenta, en particular, el volumen del agua recogida, la importancia de las tomas, y la variación estacional de la calidad de las aguas del río.

Se utilizarán las técnicas de muestreo de agua según establecido en el texto *Standard Methods for Examination of Water & Wastewater, 20 th 1998*, en particular a lo que se refiere a la sección de I-27: *Collection and preservation of the samples*

**IMPORTANTE:** los análisis de metales pesados se efectuarán en aguas **sin filtrar y también en aguas filtradas a 0,45  $\mu\text{m}$** <sup>13</sup> para diferenciar la contaminación debida a los iones disueltos y los iones totales (que resultan de la suma de los disueltos y de los sólidos en suspensión), después de ataque químico. Para esto se deberá disponer de un sistema de filtración de agua portátil a utilizar in situ.

El laboratorio encargado del muestreo deberá especificar la cantidad de muestra necesaria para el análisis, el número y la calidad de los frascos a utilizar (vidrio y polímeros orgánicos) para la misma muestra, sistemas de preservación<sup>14</sup> (*ácido nítrico a añadir*), de almacenamiento y transporte que resultan fundamentales para la obtención de parámetros válidos.

## PARÁMETROS DE ANÁLISIS

Para identificar los posibles contaminantes presentes en las aguas del río Pilcomayo es necesario efectuar una serie de ensayos físico- químico y bacteriológicos a la altura de la toma del canal artificial que deriva las aguas a Sotomayor.

Los parámetros básicos de muestreo son el pH, el potencial redox (Eh), la conductividad, la temperatura, la turbidez y el oxígeno disuelto.

Los parámetros de interés para este estudio, indicadores de contaminación química son cuatro: **Plomo, Zinc, Cadmio, Mercurio, Arsenico**

Los parámetros de interés para este estudio, indicadores de contaminación bacteriológica son **colifecales totales y escherichia colis**<sup>15</sup>

---

<sup>11</sup> La filtración es un proceso físico de purificación que consiste en pasar el agua a tratar a través de unas capas de material poroso con el fin de retener bacterias y partículas suspendidas en el líquido y proporcionar agua apta al consumo humano

<sup>12</sup> Destrucción o eliminación de microorganismos presentes en el agua, capaces de producir enfermedades.

<sup>13</sup> 0,20 – 0,45  $\mu\text{m}$  es el límite técnico aceptado entre material disuelto y material suspendido

<sup>14</sup> Las muestras para la turbidez se deben conservar en la oscuridad hasta 24 horas, refrigeradas a 4 °C. Para tiempos de almacenamientos más prolongados, la muestra se puede preservar con la adición de 1 g de cloruro mercuríco por litro (no es recomendable)

<sup>15</sup> Bacteria aerobia y facultativa anaerobia termo-tolerante del grupo de Colis. Escherichia coli se encuentra normalmente en el intestino grueso del hombre y de los animales. No suele ser capaz de multiplicarse fuera del intestino y tiene un periodo más largo de supervivencia fuera del intestino que organismos patógenos del mismo grupo. Por esa razón se usa

## ANÁLISIS DE AGUAS SUPERFICIALES DESTINADAS A LA PRODUCCIÓN DE AGUA DE RIEGO<sup>16</sup>

	<b>PARÁMETROS DE CAMPO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>INDICACIONES</b>
1	pH	unidades	agua sin filtrar
2	Conductividad	µs/cm	agua sin filtrar
3	Potencial redox (Eh)	mV	agua sin filtrar
4	Oxígeno disuelto	mg/L	agua sin filtrar
5	Temperatura	C°	agua sin filtrar
6	Turbidez	UNT	agua sin filtrar
	<b>Aniones</b>		
7	Nitratos – NO <sub>3</sub>	mg/L	agua filtrada
8	Fluoruros – F	mg/L	agua filtrada
9	Sulfatos - SO <sub>4</sub>	mg/L	agua filtrada
10	Cloruros – Cl	mg/L	agua filtrada
11	Cianuros – CN	µg/L	agua filtrada
12	Fosfatos – PO <sub>4</sub>	mg/L	agua filtrada
13	Carbonatos/bicarbonatos - CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> /HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	agua filtrada
	<b>CATIONES</b>	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
14	Hierro – Fe	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
15	Manganeso - Mn	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
16	Cobre – Cu	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
17	Zinc – Zn	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
18	Boro – B	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
19	Berilio – Be	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
20	Cobalto – Co	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
21	Níquel – Ni	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
22	Vanadio – V	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
23	Arsénico – As	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
24	Cadmio – Cd	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
25	Plata – Ag	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
26	Cromo total – Cr	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
27	Plomo – Pb	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
28	Selenio – Se	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
29	Mercurio – Hg	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
30	Bario – Ba	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
31	Calcio – Ca	mg/L	agua filtrada
32	Magnesio – Mg	mg/L	agua filtrada

como indicador de contaminación fecal. El recuento bacterial de Escherichia coli se emplea para indicar la calidad higiénica del agua

<sup>16</sup> Los parámetros indicados hacen parte de la Directiva 75/440/CEE del Consejo, del 16 de junio de 1975, Anexo 2, relativa a la calidad requerida para las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable en los Estados miembros. Se aconseja hacer referencia a la directiva en caso de la superación de los límites establecidos

33	Sodio – Na	mg/L	agua filtrada
34	Potasio – K	µg/L	agua filtrada
35	Amoniac - NH <sub>4</sub>	µg/L	agua filtrada
	<b>OTROS PARÁMETROS</b>		
36	Materiales totales en suspensión	mg/L	agua sin filtrar
37	Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	agua sin filtrar
38	Demanda biológica de oxígeno (DBO)*	mg/L	agua sin filtrar
39	Carbono orgánico total (COT)*	µg/L	agua sin filtrar
40	Oxidabilidad al permanganato*	mg/L	agua sin filtrar
41	Nitrógeno Kjeldahl - exceptuado NO <sub>3</sub>	µg/L	agua sin filtrar
42	Hidrocarburos disueltos o emulsionados (después de extracción por éter de petróleo)	µg/L	agua sin filtrar - en caso de contaminación de hidrocarburos
43	Plaguicidas-total (paratión, HCH, dieldrina...)	µg/L	agua sin filtrar - en caso de contaminación de pesticidas
44	Agentes tensoactivo(s) que reaccionan ante el azul de metileno - laury-sulfato )	mg/L	agua filtrada
45	Residuo fijo a 105 y 180 °C	mg/L	agua filtrada
	<b>PARÁMETROS BACTERIOLÓGICOS</b>		
46	Coliformes totales a 37 ° C	* /100 ml	agua sin filtrar - sin conservantes – a 4° C
47	Coliformes fecales	* /100 ml	agua sin filtrar - sin conservantes – a 4° C
48	Streptococos fecales	* /100 ml	agua sin filtrar - sin conservantes – a 4° C
49	Escherichia Colis	* /100 ml	agua sin filtrar - sin conservantes – a 4° C
50	Salmonelas	ausente en 1000 ml	agua sin filtrar - sin conservantes – a 4° C

#### NOTA

El carbono orgánico total (COT), la oxidabilidad al permanganato, la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) son análisis complementares al DQO, todos finalizados a evaluar la demanda de oxígeno y materia orgánica, pero no necesariamente todos indispensables. Se recomienda de hacer los parámetros 38, 39, 40 solamente para DQO superior a 30 mg/L

Efectuar los análisis de los parámetros de 41 a 44 solamente si hay indicaciones específicas.

Efectuar los análisis de los parámetros de 47 a 50 solamente si los valores de los coliformes totales superan los límites máximos admisibles de parámetros en cuerpos de agua según la aptitud de uso de la clase B (agua en entrada) y clase A (efluente del humedal), (ley del medio ambiente n° 1333 – Bolivia)

#### RESULTADOS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Comparar los valores de los análisis obtenidos con los valores aplicables de las aguas superficiales en lo que se refiere a los parámetros indicados en el Anexo n° 6 de la

Directiva 75/440/CEE y los valores del Cuadro N° A-1 de la ley de medio ambiente de Bolivia n° 1333 del 27 de Abril 1992.

El procesamiento de datos permitirá conocer los factores que inciden bajo el aspecto de contaminación del medio ambiente, y determinar cuales son los datos que deben controlarse para lograr un acercamiento lo más lógico posible al equilibrio natural.

Mapas de isovalores de parámetros físico-químicos permitirán la revelación de fenómenos de contaminación puntuales o difundidos.

## LOS HUMEDALES

Son ecosistemas de gran importancia para los procesos hidrológicos y ecológicos que en ellos ocurren y la diversidad biológica que sustentan.

En Sotomayor la protección y el uso sostenible del agua deberían ampliarse para abarcar la opción de implementación de humedales. Deben definirse los objetivos y las prioridades haciendo referencia a las funciones ecológicas que desarrollan los humedales favoreciendo la mitigación de la erosión costera y que a través de la retención, transformación y/o remoción de sedimentos, nutrientes y contaminantes juegan un papel fundamental en los ciclos de la materia y en la calidad de las aguas.

Se está planteando en Sotomayor, en un área en el cauce del río de aproximadamente 50 Ha (ver anexo n° 7), la implementación de humedales artificiales que permitan crear un micro sistema utilizable para la depuración y detoxificación de las aguas y también para la flora y fauna enriqueciendo el entorno.

Los humedales artificiales son sistemas naturales de depuración, que no producen olores ni contaminación de ningún tipo, que requieren poco mantenimiento y pocos conocimientos especiales para su implantación y manejo.

Antes de aprobar y ejecutar el proyecto se recomienda realizar un muestreo de las aguas para determinar los parámetros físico-químicos y su caracterización. Estos datos permitirán evaluar la posibilidad de conseguir un mejoramiento en la calidad del agua tratada, es decir menor sólidos suspendidos, menor polución y conservación de los recursos de agua potable.

### *CONCEPTOS PARA EL DISEÑO*

Los principales conceptos e instrumentos para el diseño de los humedales artificiales son:

**Ingeniería:** muelle de protección hecho en gaviones de piedras y cestones de tierra, canal<sup>17</sup> de toma de aguas en concreto con compuerta metálica para la regulación de los caudales y sistema de medición de caudal, canal en concreto y cubierto de salida al pueblo de Sotomayor, canales de derivación para riego, cerco de protección de la laguna para evitar la intrusión de animales...

**Hidráulica:** plano cartográfico de la zona, plano geológico y perfiles transversales y perfil estratigráfico, forma, superficie de la laguna y comportamiento hidráulico en función de los volúmenes de agua a tratar. Las necesidades de terreno se cifran en 4,0 – 10,0 m<sup>2</sup> por habitante, a evaluar es decir 2,5 – 3,5 hectáreas de humedal artificial<sup>18</sup>.

---

<sup>17</sup> Para la toma de agua se pueden realizar galerías filtrantes que son obras de captación y conducción de agua subterránea del río a la laguna que no sufren problemas debido a la progresiva colmatación del cauce por arenas y gravas

<sup>18</sup> La superficie seleccionada en el cauce del Pilcomayo, agua arriba de Sotomayor donde se encuentra la actual toma del canal artificial, tiene una superficie útil y explotable de forma triangular de aproximadamente 50 Ha

**Efecto del viento** en la circulación de las aguas en la laguna (posicionamiento de la laguna cerca de la pared vertical, farallón)

**Control de la estratificación de los sedimentos** y uso de deflectores horizontales para inducir condiciones de flujo favorables a la sedimentación

**Cinética:** aceleración de los procesos de depuración mediante introducción de biomasa fija (totora del valle de Concepción (Tarija), caña hueca, lirio de agua, juncos, camalotes de San Jacinto (Tarija), macrofitas<sup>19</sup>... y aeración natural.

**Filtros de rocas y de grava** en la parte terminal de los humedales

Las obras a realizar serán las necesarias para acondicionar el terreno y efectuar las siembras de los vegetales adecuados. En la represa de San Jacinto (Tarija), se encuentran macrofitas acuáticas que podrían ser introducidas en el humedal de Sotomayor.

Las obras se contratarán in situ y consistirán en eliminar la vegetación existente y efectuar los movimientos de tierras necesarios para garantizar una adecuada permanencia del agua en el humedal, el suministro de la vegetación, la plantación y dirección de obras.

Los humedales son sujetos al deterioro rápido tanto por contaminantes que se desarrollan en los ecosistemas acuáticos que por obras y modificaciones en el ambiente (corte de macrofitas, canalizaciones, actividades en zonas terrestres cercanas), ya sea por excesiva extracción de agua o por excesivos sedimentos y necesitan operaciones de mantenimiento. Debe tenerse en cuenta que, dado el carácter dinámico de los ambientes lóticos<sup>20</sup>, cualquier parte del ecosistema puede ser afectado por eventos que sucedan en aguas arriba (contaminación).

**ADVERTENCIA:** En ciertas condiciones de temperatura y contaminación algunas especies planctónicas pueden desarrollarse rápidamente en grandes cantidades formando floraciones algales, fundamentalmente en aguas eutróficas y en los meses más cálidos. Unas especies de *Microcystis* producen una toxina llamada microcistina, un polipéptido de características hepatotóxicas muy peligroso para la salud animal y humana.

### *CUANTO REGAR*

La cantidad de agua a aplicar en el riego depende de algunos parámetros como la capacidad de campo, que es el máximo contenido de agua que un suelo puede retener y el punto de marchitez permanente, cantidad de agua conocida como humedad aprovechable, las lluvias, el tipo de cultivo y los suelos.

La textura de los terrenos de tipo arenoso y franco que se encuentran en Sotomayor indica consumos de agua elevados por hectárea.

Un caudal de 80 L/s proporciona 34,6 m<sup>3</sup>/día de agua por hectárea a las 200 Ha irrigables de Sotomayor es decir 1.036 m<sup>3</sup>/mes

Considerando que la mayoría de los cultivos necesitan para riego entre 2500 - 3000 m<sup>3</sup>/mes se considera el caudal de 80 L/s un compromiso entre el tiempo suficiente de retención de las aguas en el humedal y la capacidad de riego, considerando además el aporte de las aguas pluviales.

El humedal puede de vez en cuando ser alimentado con cantidades de agua superiores a los 80 L/s en función de las necesidades del campo.

---

<sup>19</sup> Plantas acuáticas grandes (lirio de agua) como contraposición al fitoplancton y otras algas pequeñas

<sup>20</sup> Relativo al agua corriente; que vive en un arroyo o en un río

Si consideramos un humedal de tres hectáreas con una profundidad de 40 cm obtenemos un tiempo de retención de las aguas de 1,74 días, suficiente para sedimentar y filtrar las partículas en suspensión y disminuir los metales disueltos y la carga bacteriana.

### *CANAL DE RIEGO*

El canal se plantea como una pieza fundamental para mejorar la puesta en riego de las superficies agrícolas de Sotomayor. Se supone que permitirá el desarrollo prioritario de regadíos en la zona afectada a cultivos de zanahorias y papas.

Un estudio de prefactibilidad recomendará construir un canal y túnel de 4- 6 Km de longitud para brindar agua de riego con un caudal máximo de diseño de 200-250 l/s. La topografía permite llevar el canal a cielo abierto por el lado de la toma hasta donde se pueda llegar al farallón sin un túnel. En el pueblo de Sotomayor el canal estará totalmente cubierto para evitar todo tipo de contaminación y que se transforme en un colector de aguas grises y residuales.

La sección típica del canal se diseña en forma trapezoidal, para facilitar el revestimiento con hormigón. Sin embargo, con el ferrocemento se puede revestir una sección semicircular, que tendría mejores características de flujo, reduciría el volumen de excavación y permitiría un uso eficiente de la mano de obra no calificada para su mantenimiento.



# MÉTODOS DE CLARIFICACIÓN Y FILTRACIÓN DEL AGUA EN SOTOMAYOR

*OBJETO: se propone de desarrollar técnicas para producir aguas de calidad para uso animal y eventualmente humano mediante floculación y sedimentación en el área de Sotomayor*

## ALMACENAMIENTO DEL AGUA

El objetivo de los tanques de almacenamiento es mantener un depósito de agua permanente con disponibilidad para los usuarios, sean animales o humanos, en horas de máximo consumo y permitir el almacenamiento en horas de bajo consumo.

Se aconseja la construcción de dos unidades de cuatro tanques, dos en la parte baja de Sotomayor y alimentados por gravedad del canal artificial, y dos en la parte alta del pueblo alimentados con las aguas del canal mediante bombeo.

El tanque de almacenamiento debe tener una capacidad suficiente, de tal forma que dé abasto a las necesidades básicas de los usuarios (20 - 60 L x persona/día) y del consumo animal.

## CONSTRUCCIÓN DE LOS TANQUES

A título de ejemplo, suponiendo que el consumo por persona (añadiendo también el consumo animal) en un día es de 90 litros y que una familia esté conformada por seis personas, se tiene un consumo total de 540 litros por día.

A pesar que los tanques de almacenamiento pueden ser elevados, superficiales, semienterrados o completamente enterrados se aconseja la construcción de tanques superficiales que facilitan las operaciones de tratamiento.

Se recomienda diseñar un tanque de almacenamiento de agua que funcione como sedimentador, para garantizar agua por lo menos para 10 días. Es necesario, entonces, construir un tanque de almacenamiento con capacidad mínima de 5400 litros o de aproximadamente 6 m<sup>3</sup>. Los tanques pueden ser fabricados con diferentes materiales, como mampostería<sup>21</sup>, ferrocemento<sup>22</sup> y concreto reforzado con varilla de refuerzo.

Una unidad de tratamiento estará formada por dos tanques de 6 m<sup>3</sup> en paralelo de manera que mientras en uno se procesan las aguas el otro estará capacitado para el uso.

La coagulación y la floculación se realizan en los tanques de almacenamiento en forma discontinua, de forma que siempre se dispondrá de un tanque lleno de agua apta al consumo animal y eventualmente humano. Los sedimentos se acumularán en la parte baja del tanque y serán vaciados de vez en cuando por medio de una llave de fondo en un pequeño lecho de secado cercano.

La tubería de drenaje del agua sedimentada consiste en un tubo metálico o de PE de 1" de diámetro, perforado en la parte que está dentro del recipiente, a 40 cm del fondo. La parte que sale fuera del recipiente debe ir empotrada en una de las paredes del mismo y tener llave.

<sup>21</sup> Elemento o estructura, en este caso el tanque de almacenamiento, elaborado en ladrillo o en bloque

<sup>22</sup> Mezcla de arena, cemento y malla metálica

Los efectos de la coagulación sobre las sustancias contenidas en las aguas son muy válidas como resulta de la tabla siguiente:

**TABLA 1: COAGULACIÓN SOBRE LAS SUSTANCIAS CONTENIDAS EN EL AGUA**

PARÁMETROS	REDUCCIÓN (*)	PARÁMETROS	REDUCCIÓN (*)
Turbidez	+++	Color	+++
Materias en suspensión	+++	Olor	0, +
Fosfatos (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	+++	Dqo	+++
Nitratos	0	Cot	+++
Amonio	0	Dbo	+++
Cloruros	0, +	N Kjendhal	+++
Sulfatos	0, +	Fenoles	0
Fluoruros	++	Hidroc. Aromáticos policíclicos	++
Hierro	+++		
Aluminio	+++		
Manganeso	+	Pesticidas	+++
Cobre	+++	Agentes de superficie (reaccionando al azul de metileno)	0, +
Zinc	++		
Cobalto	0		
Níquel	0		
Arsénico	+++ As <sup>+5</sup> , ++As <sup>+3</sup>		
Cadmio	++, +++	Microorganismos	
Cromo	+ Cr <sup>+6</sup> , +++ Cr <sup>+3</sup>	Virus	+++
Plomo	+++	Bacterias	+++
Mercurio	++	Algas	++
Cianuros	0		

(\*) - 0 de reducción

- +: 0 a 20% de reducción

- ++: 20 a 60% de reducción

- +++: > 60% de reducción

Al adicionar sustancias químicas o naturales al agua turbia se logra que algunas partículas suspendidas precipiten al fondo del recipiente dejando una capa de agua clara arriba y una capa de sedimentos (lodos) en el fondo.

Estos sedimentos (lodos) deberán desecharse regularmente del fondo del tanque de almacenamiento conjuntamente con una cierta cantidad de agua de reserva antes de llenar otra vez el tanque. Es un proceso discontinuo.

Se pueden también utilizar sustancias naturales en lugar de las sustancias químicas para lograr los mismos resultados.

**Ver en anexo n° 4** las técnicas de clarificación del agua y el uso de productos químicos y naturales.

**Nota:** *Es indispensable realizar un programa de formación de la población sobre el uso del agua para consumo animal y humano además de formar personas con conocimiento de las técnicas manuales y teóricas de los procesos de clarificación del agua mediante coagulación – floculación*

## MÉTODOS DE FILTRACIÓN DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN SOTOMAYOR

*OBJETO: se proponen técnicas en el área de Sotomayor (Chuquisaca) para producir aguas aptas para consumo humano mediante filtración y desinfección*

### FILTROS LENTOS DE ARENA

Los filtros lentos de arena<sup>23</sup> se utilizan para el tratamiento de las aguas poco turbias sin procesos de coagulación ni sedimentación previa. En Sotomayor se podrán utilizar las aguas pretratadas sea mediante pasaje en humedales sea previo proceso de clari-floculación.

Estos filtros están constituidos de un estanque con una capa de arena de 0,60 - 1.00 m de espesor, soportada por una capa de grava de 0,30 a 0,40 m. de altura, cuya granulometría creciente hacia el fondo varía desde arena gruesa de dos mm o mayor de tamaño. Bajo la capa de grava existe un sistema de drenaje colector del agua filtrada. Completan el filtro, un sistema de control de entrada y salida del agua que permite mantener constante la carga de agua sobre la arena y regular el gasto de salida. La tasa de filtración de estos filtros es de 1,3 a 6,5 l/m<sup>2</sup>/min.

Los filtros lentos de arena, debido a la baja tasa de filtración, requieren grandes superficies y el número es función de la cantidad de agua necesaria.

Generalmente para las necesidades del piloto de Sotomayor cuatro filtros son suficientes. En general se considera satisfactoria para filtros lentos una arena con un tamaño efectivo de alrededor de 0,35 mm y un coeficiente de uniformidad de 75 % . Sin embargo, se encuentran filtros funcionando perfectamente con arena más gruesa (0,5 mm).

El proceso de retención de las partículas en suspensión que lleva el agua, se realiza fundamentalmente en la superficie de la arena y penetra sólo algunos centímetros en la capa filtrante.

Al poco tiempo se forma en la parte superficial del filtro una película semigelatinosa que se le conoce con el nombre de "*Schmutzdecke*" y un film gelatinoso que cubre los granos de arena, los cuales contienen partículas finísimas de arcilla, coloides y microorganismos provenientes del flóculo finísimo que no ha sedimentado en el estanque correspondiente. La retención de las partículas hace que el filtro se colmate, por lo que se hace necesario someter la arena a un lavado, ya sea retirándola del estanque (lavado mecánico a mano) o por medio de eyectores de agua en presión.

El período de carrera del filtro varía enormemente fluctuando desde varios días a uno o más meses, siendo función de la tasa de filtración, turbiedad del agua, granulometría de la arena y tipo de tratamiento previo que se le ha dado al agua. Los filtros lentos tienen un alto rendimiento bacteriológico y remueven en cierta proporción sabores y olores, debido a la actividad biológica del filtro, el cual modifica algunas formas de la materia orgánica.

<sup>23</sup>ENSIC, Environmental Sanitation Information Center (1990). Surface water filtration for rural areas: Guidelines for design, construction, operation and maintenance. Bangkok, Tailandia, pp.27-35.

Huisman, L. y W. Wood (1974). Slow Sand Filtration. World Health Organization.

U.S. Environmental Protection Agency, Region II (1987). Non-PRASA Public Water Systems Report. Water Management Division. Caribbean Field Office. pp.1-4.

Wegelin, M. (1986). Horizontal-Flow Roughing Filtration: A design construction and operation manual. IRCWD, Dübendorf, Switzerland, pp. 1-16.

Los filtros lentos son sistemas muy apropiados para eliminar del agua las formas de resistencia quistes y huevos de parásitos, teniendo un rendimiento bacteriológico muy satisfactorio.

### *DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL FILTRO*

El filtro lento de arena cuenta con 5 partes principales:

- El recipiente hecho de concreto, hablando de dimensiones internas, tiene indicativamente una base cuadrada de aproximadamente 40 – 60 cm de lado y una altura de aproximadamente 90 - 100 cm.
- La tubería de drenaje del agua filtrada consiste de un tubo metálico o de PE de 1/2" de diámetro, perforado en la parte que está dentro del recipiente para la captación del agua filtrada y la parte que sale fuera del recipiente debe ir empotrada en una de las paredes del mismo.
- El material filtrante, consiste de una capa de 10 cm de grava gruesa, colocada en el fondo del recipiente, envolviendo el tubo de drenaje y sobre ella una capa de 40 o 50 cm de arena fina, es decir de tamaño efectivo entre 0,15 y 0,30 mm y coeficiente de uniformidad menor que 5, aunque según la experiencia cualquier arena fina limpia de un banco local, podría ser utilizada satisfactoriamente.
- El plato superior difusor es un ladrillo de concreto con perforaciones de 4-6 mm distribuidas uniformemente en todo el ladrillo. Este dispositivo tiene la finalidad de recibir el agua sin filtrar y distribuirla uniformemente para evitar los disturbios que se podrían provocar sobre la capa de arena si se descargara el agua directamente sobre ella. Se puede también colocar sobre la capa superior (de la arena fina) una tela geotextil (en polipropileno), que se llama “filtro geotextil” que retendrá la mayoría de las partículas gruesas de turbiedad.
- La tapa del filtro que puede ser de madera o de concreto, debe asegurar que el filtro se mantenga hermético, evitando la introducción de polvo, insectos y otros contaminantes indeseables al interior del filtro.

### **OPERACIONES**

El filtro es operado de la siguiente manera:

Abastecer mediante tubería de ½ pulgada el agua del tanque de almacenamiento / sedimentación al filtro o directamente del canal de alimentación de las aguas para uso agrícola. Un sistema de válvula de nivel, con flotador, interno al filtro mantendrá siempre en la parte alta del mismo 10 cm de agua para que la biopelícula filtrante no se seque. Un grifo a la salida del filtro permite llenar recipientes exclusivos para el almacenamiento de agua filtrada (agua limpia) principalmente para beber y cocinar.

### **OBSERVACIONES:**

Los mayores porcentajes de remoción de las bacterias patógenas se presentan después de aproximadamente dos semanas de buena operación del filtro. Este periodo puede ser mayor si la arena es más gruesa que la recomendada.

### **MANTENIMIENTO DEL FILTRO**

El mantenimiento del filtro es sencillo, una vez que se observa que la velocidad con que pasa el agua por el material filtrante ha disminuido, es decir más de lo que normalmente se tardaba, entonces se debe quitar una capa de arena de 2 o 3 cm de espesor. Esta arena debe ser renovada inmediatamente, con la misma después de lavarla o con una nueva limpia.

Las investigaciones sobre filtros de este tipo han demostrado que estos son de bajo costo, sencillos de operar y de mantener, de gran aceptabilidad entre la población y muy eficientes en la reducción de riesgos a la salud, por el alto porcentaje de bacterias que eliminan de las aguas de consumo humano.

De esta manera el sector rural dispone de una tecnología casera para mejorar la calidad del agua de bebida y consecuentemente mejorar la salud.

Los filtros tienen la capacidad suficiente para filtrar en dos horas los volúmenes de agua requerida diariamente por una familia de 6 personas, considerando la dotación pro cápita para uso doméstico de 20-60 L\* persona/día.

Es necesario que se prevea la realización de análisis bacteriológicos del agua filtrada, mediante muestreos aleatorios integrados en los programas de vigilancia y control de calidad del agua.

## DESINFECCIÓN

**Premisa:** en el caso que con el sistema de filtración lenta no se logren las condiciones bacteriológicas para satisfacer los parámetros de calidad de las aguas para consumo humano se deben utilizar sistemas de desinfección de las mismas.

La desinfección consiste en la destrucción selectiva de los organismos que causan enfermedades. No todos los organismos se destruyen durante el proceso, punto en el que radica la principal diferencia entre la desinfección y la esterilización, proceso que conduce a la destrucción de la totalidad de los organismos. En el campo de las aguas de río contaminadas por aguas residuales sin tratar, las tres categorías de organismos entéricos de origen humano de mayores consecuencias en la producción de enfermedades son las bacterias, los virus y los quistes amebianos

Las enfermedades bacterianas típicas transmitidas por el agua son: tífus, cólera, paratífus y la disentería bacilar, mientras que las enfermedades causadas por los virus incluyen, entre otras, la poliomeletis y la hepatitis infecciosa.

Los métodos para llevar a cabo la desinfección son: agentes químicos, agentes físicos, medios mecánicos y radiación.

**Ver el anexo 5 para el empleo de los desinfectantes**

## PROCESO DE TRANSFERENCIA DE LA TECNOLOGÍA Y EDUCACIÓN SANITARIA

Lo primero que se debe hacer es definir el diseño de los prototipos que se utilizarán en el proceso de transferencia. Muy importante resulta el definir los tipos de materiales que serán utilizados para los filtros, que obviamente determinará los costos.

Cuando ya se hayan diseñado y construido los prototipos, se deben seleccionar la viviendas que presenten las condiciones reales donde se promoverá la instalación de filtros caseros.

Las familias seleccionadas para poner en funcionamiento los prototipos deben ser entrenadas, por lo menos los jefes de familia en la operación y mantenimiento del filtro y sobre conocimientos sanitarios básicos.

Instalados los prototipos se deben realizar evaluaciones de carácter técnico y social del prototipo a fin de conocer la aceptabilidad social, la facilidad de operación y mantenimiento, y la eficiencia de remoción de bacterias, durante un periodo aproximado de unos meses.

Los resultados de las evaluaciones deben ser analizados y deben servir para tomar la decisión de continuar en etapas de escala intermedia y de educación del uso del agua potable.

### *ESCALA INTERMEDIA*

En esta etapa se deben seleccionar otras viviendas, comunidades rurales y/o indígenas que no dispongan de agua potable en las que se instalen filtros caseros, uno por vivienda. Una vez que las comunidades estén seleccionadas, se debe efectuar un trabajo intenso de promoción social y educación sanitaria a los efectos de lograr el involucramiento de la comunidad en todas las fases de esta etapa, como por ejemplo, en la construcción e instalación de los filtros y en las evaluaciones del carácter técnico y social que se realizarán una vez que estén instalados los filtros en todas las viviendas.

Igual que en la etapa anterior, instalados los prototipos se deben realizar evaluaciones de carácter técnico y social del prototipo a fin de conocer la aceptabilidad social, la facilidad de operación y mantenimiento y la eficiencia de remoción de bacterias.

También se debe realizar una evaluación de los costos unitarios de producción de cada uno de los prototipos y la capacidad de adquisición de los mismos por parte de los comunitarios. Las evaluaciones deben realizarse durante un periodo aproximado de un año.

Los resultados de las evaluaciones deben ser analizados y deben servir para tomar la decisión de continuar a la PROMOCIÓN DEL USO MASIVO DE LA TECNOLOGÍA

## PILOTO 2

# TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y ÁCIDAS

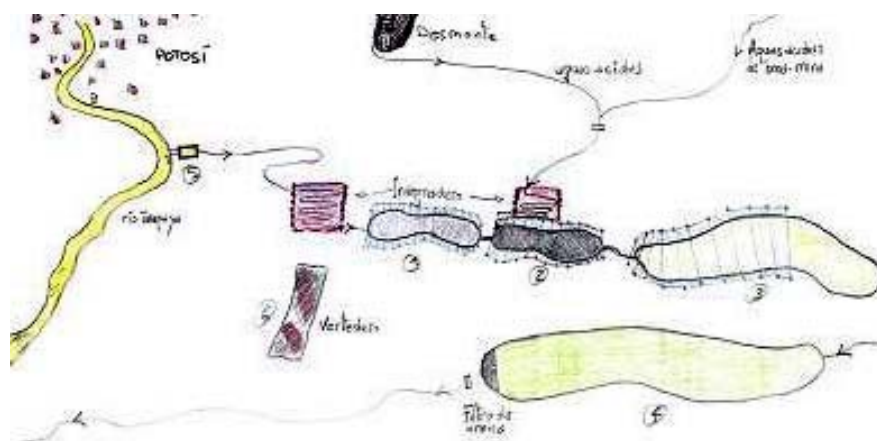
**OBJETO:** se propone un piloto en Potosí para tratar mediante lagunaje aguas residuales conjuntamente a aguas ácidas de mina para una posible reutilización agrícola.

## INTRODUCCIÓN

La ciudad de Potosí sufre del problema de las aguas residuales que son actualmente vertidas en el río Tarapaya que actúa como desaguadero (cloaca) de la ciudad. Las aguas son muy cargadas en contaminantes orgánicos, coliformes fecales, parte de las colas de los ingenios y parte de las aguas ácidas de boca mina

El piloto 2 de tratamiento de aguas residuales tiene como finalidad de:

- Demostrar la factibilidad de un sistema de tratamiento biológico anaeróbico aeróbico mixto que trate conjuntamente aguas residuales y aguas ácidas de drenaje de minas mediante tecnología sencilla y de bajo costo adaptada a las difíciles condiciones de altura y de temperatura de la ciudad de Potosí
- Demostrar la factibilidad de un sistema de tratamiento biológico aeróbico de las aguas pretratadas mediante lagunas facultativas que funcionen como invernaderos para lograr las temperaturas aptas al desarrollo de la flora y fauna indispensable a los procesos de degradación de la materia orgánica
- Demostrar la factibilidad de un sistema de calefacción de las aguas servidas y aguas ácidas que utilice la radiación solar como fuente de calefacción



**Figura 4: Boceto simplificado**

*Propuesta de lagunas de tratamiento de aguas residuales y ácidas en Potosí*

- |                                    |                        |
|------------------------------------|------------------------|
| -1- laguna anaeróbica primaria     | -4- laguna aeróbica    |
| -2- laguna anaeróbica aguas ácidas | -5- toma de agua       |
| -3- laguna facultativa             | -6- vertedero de lodos |

## INGENIERÍA DEL PROYECTO

La planta de tratamiento aguas residuales y ácidas se realiza en la parte baja de la ciudad en áreas donde se puedan utilizar dos hectáreas de terreno, relativamente cerca al río Tarapaya y con posibilidad de abastecimiento en aguas ácidas.

La planta se compone de lagunas de depuración en un conjunto formado por cuatro módulos de lagunas, dos primarias anaeróbicas, una tipo facultativa y una secundaria aeróbica de oxidación.

Se recomienda el siguiente procedimiento para dimensionamiento preliminar:

- Se selecciona la profundidad, dejando una profundidad adicional para acumulación de lodos.
- Se calcula el periodo de retención, comprobando que sea de 8-10 días o más para remoción de parásitos. Se calcula la eficiencia de remoción de DBO y de coliformes fecales
- La laguna secundaria se dimensiona para la eficiencia de remoción de los coliformes, utilizando el mismo modelo de dispersión, la misma tasa de mortalidad y un proceso de aproximaciones sucesivas, lo cual da el período de retención. Luego se asume la profundidad y se calcula el área.

Se describe a continuación y de manera indicativa las obras necesarias para la realización de la planta piloto precisando que debido a las particulares condiciones de altura, radiación y temperatura los parámetros de cálculo normalmente utilizados pueden subir cambios importantes:

### *TOMA Y PRETRATAMIENTO*

Se construye una toma de agua en el río Tarapaya con una rejilla de barras de limpieza manual y una “trampa de grasa” que hace las veces de desarenador, una compuerta de regulación de caudal, aforo de caudal.

Los sobrenadantes o natas igual que los sedimentos son recogidos todos los días en trampa de grasa y llevados mediante carretillas manuales a unas excavaciones distribuidas en el área cercana de las lagunas, donde son vertidos (vertederos, lechos de secado).

Las aguas servidas llegan del río Tarapaya a la planta por medio de una colectora principal (tubo de polietileno negro) de alcantarillado con un caudal de 1,6 -2,5 l/s

Un sistema de recolección de aguas ácidas de mina debería llegar a la segunda laguna anaeróbica de procesamiento con un caudal entre 0,2 - 0,5 l/s

### *CALEFACCIÓN DE LAS AGUAS*

La región de Potosí recibe anualmente en su superficie más radiación solar que cualquier otro país de Europa y se encuentra en una posición muy favorecida para el uso de la energía solar.

La cantidad de luz que incide sobre la atmósfera de nuestro planeta, un valor conocido como la constante solar, se ha establecido en 1.94 calorías/ cm<sup>2</sup>/minuto (Cole, 1983).

Asumiendo que toda esa energía estuviera disponible para la calefacción del agua:

En un minuto se procesan :  $2,5 \text{ L/s} \times 60 = 150 \text{ L}$  es decir 150.000 cm<sup>3</sup> que ocupan una superficie de 15 m<sup>2</sup> de 1 cm de altura.

Para levantar de 24°C (de 6 a 30°C) la temperatura de 150 L/m de agua con dicha radiación se necesitan teóricamente 186 m<sup>2</sup> de superficie.

Prácticamente estos valores de superficie de captación pueden doblar.

Para lograr temperaturas de las aguas próximas a los 30° C se utilizaran tubos de PEHD negro de una-dos pulgadas y calentadores solares similares a los utilizados por piscinas. El diseño y construcción de un calentador solar de este tipo requiere un estudio preliminar para determinar la longitud de los tubos en función del caudal, del tipo de material para lograr las temperaturas de cálculo con la realización de unos invernaderos.

### *INVERNADEROS*

Cuando la radiación solar atraviesa un vidrio u otro material transparente calienta los objetos que están detrás; éstos, a su vez, calientan el aire de su entorno. En ausencia de un recubrimiento por cristales el calor absorbido se elimina por corrientes convectivas y la emisión de radiación infrarroja de longitud de onda superior a la visible. La presencia de los cristales u otro material transparente impide el transporte del calor acumulado hacia el exterior por convección y obstruye muy poco la salida de radiación infrarroja por lo que el efecto neto es el de acumulación de calor y aumento de temperaturas. Contrariamente a la creencia popular, la radiación infrarroja escapa en gran medida a través de los cristales. El efecto de aumento de temperatura es debido casi exclusivamente al confinamiento del aire caliente que producen las paredes y techos del invernadero.

Para obtener el mejor rendimiento de las lagunas anaeróbica y facultativa, conviene protegerlas de las condiciones atmosféricas estresantes de la altura y del frío, que la debilitan. En el interior de un invernadero, las lagunas viven al margen de la lluvia, del frío, del viento. Además, se puede controlar el medio ambiente interior aplicando una eventual ventilación

Un invernadero es la forma más eficaz de controlar y obtener la temperatura optima de actividad bacteriana para el máximo rendimiento en la degradación de las sustancias orgánicas.

La altura del recubrimiento del invernadero no superará los dos metros y la cubierta del invernadero es el segundo punto de importancia en la construcción del mismo.

Existen en el mercado distintas clases de polietilenos para la cobertura de las lagunas. Se aconseja polietilenos de un espesor de 150 micrones. Cada dos años deben ser cambiados ya que las condiciones climáticas locales, por lo general desgastan el material en ese tiempo.

## DATOS PRELIMINARES DE CÁLCULO DE LAS LAGUNAS ANAERÓBICAS

Los cálculos<sup>24</sup> se basan sobre los trabajos del *"World Bank - technical paper number 7 - Notes on the Design and Operation of Waste Stabilisation Ponds in Warm Climates of Developing Countries"* y se basan sobre suposiciones y aproximaciones por falta de datos precisos en la región de Potosí.

---

<sup>24</sup>Se pueden considerar también los criterios de diseño para las lagunas en los cálculos de Yáñez, F., "Reducción de Organismos Patógenos y Diseño de Lagunas de Estabilización en Países en Desarrollo". Trabajo presentado en el XIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS). Santiago, Chile, Noviembre de 1984..

### **SUPOSICIONES**

*Actual total flow rate* (flujo actual):  $2,0 \text{ l/s} * 3,6 * 24 = 172,8 \text{ m}^3/\text{d}$

*Influent BOD5 concentration* (concentración a la entrada) =  $480 \text{ mg/L}$  (supuesta).

### **LAGUNA ANAERÓBICA PARA AGUAS RESIDUALES**

La laguna recibe las aguas residuales provenientes del río Tarapaya. Se calcula:

*Total organic load* (carga orgánica) =  $480 * 172.800 / 1.000.000 = 82,94 \text{ Kg/día}$

Se asume que a  $21^\circ\text{C}$  la laguna tenga una capacidad de digestión de los lodos =  $0,25 \text{ BOD}_5/\text{m}^3/\text{d}$

Volumen de la laguna =  $82,94 / 0,25 = 331,76 \text{ m}^3$

*Detention time* (tiempo de detención) =  $331,76 / 172,8 = 1,92 \text{ días}$

Se asume que a  $28^\circ\text{C}$  la laguna tenga una capacidad de digestión de lodos =  $0,38 \text{ BOD}_5/\text{m}^3/\text{d}$

Volumen de la laguna =  $82,94 / 0,38 = 218,26 \text{ m}^3$

*Detention time* (tiempo de detención) =  $218,26 / 172,8 = 1,26 \text{ días}$

La laguna anaeróbica primaria con un volumen de aproximadamente  $300 \text{ m}^3$  tendrá dimensiones internas de  $4,2 \text{ (h)} \times 12,0 \text{ (l)} \times 6,0 \text{ (a)} \text{ metros}$

**Nota:** Se recomienda la construcción de los módulos anaeróbicos en concreto con el fondo redondeado para facilitar la remoción manual de los lodos.

### **LAGUNA ANAERÓBICA PARA AGUAS ÁCIDAS**

La laguna anaeróbica para el tratamiento de aguas ácidas con un volumen de  $150 \text{ m}^3$  debe tener dimensiones internas de  $4,2 \text{ (h)} \times 6,0 \text{ (l)} \times 6,0 \text{ (a)} \text{ metros}$

Las aguas residuales después de su permanencia en la primera laguna anaeróbica serán vertidas en la segunda laguna anaeróbica y adicionadas a las aguas ácidas de mina con la finalidad de la detoxificación de los iones metálicos. Las bacterias reductoras de sulfato presentes en el medio acuoso reducen y oxidan una gran cantidad de especies moleculares (metales incluidos) con formación de lodos negros.

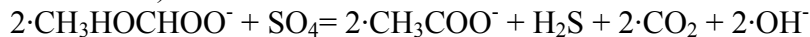
Es necesario poner un by-pass para poder verter, si fuera necesario, parte o la totalidad de las aguas ácidas en la parte mediana / terminal de la laguna primaria anaeróbica.

### **Algunas observaciones sobre la microbiología aplicada del Azufre**

Normalmente en las aguas residuales se encuentran bacterias heterótrofas (consuman orgánicos) y autótrofas. Se pueden inicialmente adquirir “*starter*” para aplicaciones de bioremediación de aguas residuales.

La remoción biológica de sulfatos consiste en la reducción del sulfato desde el seno de la solución, mediante el desarrollo anaerobio de microorganismos (bacterias) reductores de sulfato, como el género *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*, *Desulfomonas*, *Desulfobacter*, cada uno con diversas especies. Estas bacterias utilizan sulfato como aceptor terminal de electrones en su proceso metabólico. El sulfato es así reducido, conjuntamente con la oxidación de una fuente de carbono orgánico (ej. lactato, ácido acético...) o inorgánico

(dióxido de carbono) y, como producto de esta reacción, se generan sulfuros (de hidrógeno o metálicos):



Observaciones experimentales demostraron que esta operación produce una remoción total del sulfato. El producto de la reacción, ácido sulfhídrico (mol a mol), sirve para precipitar todos los metales pesados presentes en las soluciones como lodos que se acumulan en el fondo de la laguna. La literatura al respecto es abundante<sup>25</sup> en cuanto a aspectos microbiológicos y en menor grado a los bioquímicos.

### LAGUNA FACULTATIVA

Es una laguna o estanque de tratamiento con una sección superior aerobia y una inferior anaerobia de modo tal que los procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos se produzcan en forma simultánea.

Se calcula que la capacidad de remoción depende de la temperatura según la fórmula:

*areal loading rate*  $\lambda_s = 20T - 60 = \text{BOD}_5 \text{ Kg /ha/día}$

por  $T = 21 \text{ °C}$   $\lambda_s = 360 \text{ Kg /ha/día}$  y por  $T = 25 \text{ °C}$   $\lambda_s = 440 \text{ Kg /ha/día}$

Se asume que la capacidad de remoción de las lagunas anaeróbicas ha sido de 60% de la carga total:

*Influent to facultative pond*  $= 480 \text{ mg/L} \times 0,4 = 192 \text{ mg/L}$

Los  $\text{m}^3/\text{d}$  que la laguna recibe son debidos al aporte de 2,0 l/s de aguas residuales más 0,4 l/s de aguas ácidas, es decir  $216 \text{ m}^3/\text{día}$

La superficie necesaria para tratar las aguas es de:

$A = 10 \times L_i \times Q / \lambda_s$  donde  $L_i$  es la concentración del afluente y  $Q$  son los  $\text{m}^3/\text{d}$

**$A (T_{21^\circ\text{C}}) = 1.152 \text{ m}^2$  que corresponde a una laguna de 1,1 m (h) x 96m (l) x 12 m (a)**

**$A (T_{25^\circ\text{C}}) = 942 \text{ m}^2$  que corresponde a una laguna de 1,1 m (h) x 79 m (l) x 12 m (a)**

### LAGUNA AERÓBICA

Es la laguna que contiene oxígeno donde el agua residual se estabiliza por la actividad metabólica de bacterias y algas. Las lagunas pequeñas pueden mantener condiciones aerobias sin aeración mecánica. Las lagunas aeróbicas se basan en el aporte de oxígeno a partir del crecimiento de fotosintetizadores y permiten obtener efluentes de baja DBO soluble pero de alto contenido de algas, las que debieran ser filtradas a fin de controlar los cuerpos receptores. La profundidad debe ser tal que no se alcancen a producir regiones sin oxígeno, sobre todo teniendo presente que la turbiedad impide el paso de la luz solar. Se suelen encontrar profundidades de 40 a 90 centímetros y tiempos de retención hidráulicos

<sup>25</sup> Herrera L., J. Hernández, P. Ruíz "Reducción biológica de sulfatos: Estudio bibliográfico", informa a Gerencia Técnica CODELCO, 1989.

Herrera L., S. Duarte, J. Hernandez "Sulfate elimination to improve water quality of mine process effluents I: Se quencing batch bioreactor growth kinetics of *Desulfovibrio desulfuricans*", *Environ Toxicol and Water Quality*, vol 8(3), August 1993.

Cork D.J., M.A. Cusanovich "Sulfate decomposition: A microbiological process", en *Met. App. of bacterial leaching and rel. microbiological phenomena*, Ed: L.E. Mun, A.E. Torma, J.A. Brierly, Acad. Press, 1978.

Herrera L., J. Hernandez, P. Ruíz, S. Gantenbein "*Desulfovibrio desulfuricans* growth kinetics", *Environ. Toxicol. and Water Quality*, vol 6, 1991.

S. Duarte, "Desarrollo de un bioreactor para la reducción anaeróbica de sulfatos por *Desulfovibrio desulfuricans*", Tesis Magister Ciencias de la Ing., U. de Chile, 1992.

Herrera L., J. Hernandez, S. Duarte "Sulfate elimination to improve water quality of mine process effluents II: Hydrogen sulfide transport in biological recators", *Environ. Toxicol. and water quality*, vol 8(4), Nov 1993.

teóricos de 4 a 40 días de modo a obtener una concentración en colifecales <100 FC/100 ml

Se calcula en primera aproximación la superficie de la laguna en base al tiempo de retención que asumimos en 6 días, es decir:

$$\text{Volumen} = 216 \text{ m}^3/\text{day} \times 6 = 1296 \text{ m}^3$$

**Laguna = 0,90 (h) x 26 (a) x 56 (l)**

**Nota:** las formas de las lagunas pueden ser modificadas según las exigencias de la topografía de los lugares pero sin modificar el parámetro de la altura y la superficie de contacto aire/agua. Es aconsejable recubrir el fondo y las paredes de las lagunas con material impermeable como geomembranas en PEHD, arcillas y rocas básicas en las lagunas anaeróbicas.

Se recomienda periódicamente tomar muestras del efluente de la laguna aeróbica para realizar investigaciones sobre su contenido, particularmente en metales pesados y colifecales totales con referencia a los afluentes.

## MUESTREOS

### EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN LOS SUELOS DE SOTOMAYOR

#### *INTRODUCCIÓN*

La comunidad agrícola de Sotomayor, así como otras comunidades en la cuenca del río Pilcomayo, ha utilizado durante décadas las aguas del río para riego introduciendo en los suelos agrícolas los distintos contaminantes que se encuentran en suspensión o disueltos en el agua.

Informes y estudios indican como algunos metales pesados se encuentran en la cadena trófica y en particular en algunas hortalizas como zanahorias, e incluso en tejidos humanos.

#### *CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR AGUAS DE RIEGO*

En condiciones naturales, la concentración de determinados elementos en el suelo es relativamente baja, pero determinadas actuaciones antrópicas como el riego constante con aguas contaminadas pueden elevarla por encima de los niveles tóxicos.

En este caso, el suelo realiza una serie de procesos de filtración, neutralización, adsorción y precipitación, entre otros, que actúan como inactivadores de la toxicidad potencial de estos elementos.

Los procesos principales asociados a la retención y movilidad de los elementos en los suelos son:

- Alteración del material original
- Disolución y solubilización de minerales y complejos, acompañados por precipitación y co-precipitación de especies insolubles inorgánicas tales como carbonatos y sulfuros
- Adsorción por las raíces de las plantas e inmovilización por organismos del suelo
- Procesos de intercambio de iones en la arcilla y la materia orgánica
- Quimisorción específica y adsorción/desorción sobre óxidos e hidróxidos de Fe, Al y Mn
- Quelación y complejación por diferentes fracciones de la materia orgánica del suelo
- Lavado y movilidad de iones y quelatos orgánicos solubles

El contenido en materia orgánica, arcilla, carbonatos y óxidos e hidróxidos de Fe, a través de la regulación de las propiedades físicas (textura, estructura, permeabilidad y aireación) y físico-químicas (capacidad de intercambio iónico, pH y potencial redox) del suelo, son los principales componentes edáficos que controlan dichos procesos.

Cada suelo tiene una capacidad de depuración específica que depende de sus propiedades. Cuando se alcanza ese límite el suelo deja de ser eficaz e incluso puede funcionar como “fuente” de sustancias tóxicas tanto para los organismos que viven en él como para los sistemas con los que se relaciona. La carga crítica representa la cantidad máxima de un determinado componente que puede ser aportado a un suelo sin que se produzcan efectos nocivos sobre la estructura y funcionamiento del ecosistema

El objetivo del estudio propuesto es analizar la capacidad de depuración frente a un riego continuo con aporte de iones en solución y minerales del complejo Zn-Pb-Ag a fin de

avanzar en el conocimiento de los mecanismos de inmovilización de los contaminantes, la cantidad precipitada de dichos elementos a la cual se alcanza el nivel máximo biodisponible y para establecer mecanismos efectivos de lucha contra la degradación del medio natural.

## *MATERIALES Y MÉTODOS*

### **Escenario de trabajo: muestreo**

El espacio donde se llevaría a cabo la investigación son los campos de la comunidad de Sotomayor en el departamento de Chuquisaca y que han sufrido de riego continuado durante décadas.

Es necesario elegir seis unidades distintas pero homogéneas con características de suelos ricos en sustancia orgánica y que hayan sido utilizados de manera continua.

Las seis unidades de muestreo elegidas se encuentran en una zona regada con aguas del río Pilcomayo, sometida a un uso agrícola en régimen extensivo y caracterizada eventualmente por una carga ganadera y/o una frecuencia de pastoreo anual muy elevada. Cada muestra puntual de suelos es en realidad una “muestra compuesta”. Es decir, una muestra se compone de varias submuestras tomadas en el campo a distintas profundidades. El número de submuestras por cada muestra es variable y como recomendación general se sugiere que para una muestra puntual de suelos de un terreno homogéneo se tomen 6 submuestras.

En las seis unidades de muestras elegidas se tomarán muestras a profundidades de 5 - 15 - 30 - 50 - 80- 120 cm desde la superficie, lo que resulta un tamaño muestral de 36 muestras.

Cada muestra debe contener un mínimo de 500 g de suelo.

Es necesario elegir tres unidades distintas pero homogéneas con características de suelos similares a los precedentes, si posible ricos en sustancia orgánica, en arcilla y que se encuentren en zonas eventualmente sometidas a un uso agrícola. Estos suelos no deben haber sido regados con las aguas del río Pilcomayo y representan los “blancos” de referencia.

Se tomarán en las tres unidades de muestreo elegidas muestras en profundidades de 5 - 15 - 30 - 50 - 80- 120 cm desde la superficie, lo que resulta un tamaño muestral de 18 muestras.

Cada muestra debe contener un mínimo de 500 g de suelo.

### **Materiales para el muestreo**

- Cartografía detallada con ubicación de los distintos puntos de muestreo
- Machete
- Barreno, pala
- Cuchillo
- Balde
- Bolsas plásticas limpias
- Marcadores
- Hojas para identificar las muestras

Es necesario asegurarse que las herramientas estén completamente limpias, libres de superficies oxidadas y que no contengan residuos de otros materiales.

### *Parámetros de análisis.*

#### **Parámetros y métodos físicos (no indispensables)**

- Densidad aparente. Método del cilindro
- Porosidad. Se calcula mediante la relación entre el volumen de poros y el volumen total del suelo.
- Capacidad de retención de agua en el suelo a la capacidad de campo.
- Capacidad de infiltración. Método del infiltrómetro de cilindro simple con carga constante

#### **Parámetros y métodos químicos**

Para iniciar la identificación de los posibles contaminantes presentes en un suelo, se parte de las características básicas como el color, la textura y el olor.

Parámetros básicos de muestreo son el pH, las reacciones de óxido-reducción en medio acuoso y la conductividad<sup>26</sup>

Para la determinación de los metales pesados aprovechables por la plantas se utilizaran soluciones extractoras, encaminadas a generar una extracción a semejanza de los cultivos, sin embargo, las características químicas y físicas los suelos no permiten la adopción de un método universal de extracción, de ahí la necesidad de calibrar los métodos analíticos con respecto a la producción de un cultivo en condiciones de campo. La toxicidad de un suelo debido a los metales pesados y elementos asociados es una consecuencia directa de sus concentraciones en las fases bioasimilables; es decir, la solución del suelo y las formas adsorbidas.

Los parámetros de interés por este estudio, indicadores de contaminación son cinco:

#### **Prueba de extracción-lixiviación liviana**

**Plomo, Zinc, Cadmio, Mercurio, Arsénico:** *extracción de suelos en solución de DTPA o por EDTA y eventualmente por oxalato de amonio, ácido acético u otras soluciones extractoras, a especificar por el laboratorio*

#### **Prueba de extracción-lixiviación fuerte**

**Plomo, Zinc, Cadmio, Mercurio, Arsénico:** *extracción de suelos en solución de ácido nítrico y eventualmente por otras soluciones extractoras fuertes*

### **METALES TÓXICOS**

Entre los iones metálicos más tóxicos cabe destacar el Cd y el Hg. El primero se encuentra en forma catiónica y sus propiedades se asemejan a las del ión calcio. Su interacción con los constituyentes edáficos es más fuerte que la de este último. Debido a su extrema toxicidad, cualquier vertido en el suelo da lugar a situaciones muy problemáticas.

El mercurio en el suelo se presenta, en principio, precipitado como hidróxido  $\text{Hg}(\text{OH})_2$ . No obstante, en medios no muy oxidantes el  $\text{Hg}(\text{II})$ , puede reducirse a  $\text{Hg}(\text{I})$  y después a

---

<sup>26</sup> En la determinación de los diferentes parámetros se emplean procedimientos estandarizados internacionalmente reconocidos entre los cuales:

Procedimiento para análisis de suelos ISRIC.(datos de suelos FAO-ISRIC-CSIC)

Métodos analíticos para suelos y plantas de la Western States Laboratory Testing Program.

Métodos estándar para el análisis de aguas y aguas residuales de APHA, AWWA, WEF.

Métodos de muestreo y análisis de aguas de la EPA.

Normas alemanas para análisis de aguas, lodos sedimentos y tejidos, DIN.

mercurio metálico, el cual es muy volátil y puede difundirse fácilmente por los poros del suelo.

La toxicidad de un suelo debido a los metales pesados y elementos asociados es una consecuencia directa de sus concentraciones en las fases bioasimilables, es decir, la solución del suelo y las formas adsorbidas. Esta fracción asimilable se equipara a la extraída por DTPA o por EDTA y a ella se deberían referir los diferentes niveles de toxicidad.

Pero debido a la dificultad de extracción las normativas prefieren evaluar la cantidad total de elemento tóxico presente. Se supone que existe un equilibrio entre la fase soluble y la cantidad total presente<sup>27</sup>. Pero en esta correspondencia intervienen numerosos factores tanto del elemento tóxico en sí como de las características del propio suelo.

Por ejemplo, para una misma concentración de elementos tóxicos en un suelo, la concentración de la fase asimilable será mucho más elevada para un suelo ácido que para uno neutro o alcalino.

Sería correcto indicar que la concentración en la fase asimilable es una medida directa de la peligrosidad real o presente, mientras que la concentración total es válida para evaluar la peligrosidad potencial o futura y sólo representa de una manera indirecta y aproximada de la toxicidad actual de un suelo<sup>28</sup>.

---

<sup>27</sup> Lindsay, 1979, calcula que el 10% del total se encuentra en fase soluble

<sup>28</sup> **Las clasificaciones de suelos.** Sistemas según FAO. Leyenda Revisada del Mapa Mundial de Suelos de FAO de 1988 y Base de Referencia para los Suelos del Mundo de FAO de 1998. Principios generales. Horizontes diagnósticos. Propiedades diagnósticas. Materiales diagnósticos  
**Clases de suelos según FAO.** Leyenda Revisada del Mapa Mundial de Suelos de FAO de 1988 y Base de Referencia para los Suelos del Mundo de FAO de 1998. Equiparaciones a la Soil Taxonomy.

## RESUMEN

PARÁMETROS	TIPO DE SUELOS	NÚMERO DE MUESTRAS	MÉTODO DE EXTRACCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL
Pb, Zn, Cd, Hg, As	Blancos de referencia	18	<i>solución de DTPA o por EDTA</i>	AAS/ICP
Pb, Zn, Cd, Hg, As	Blancos de referencia	18	<i>solución de ácido nítrico</i>	AAS/ICP
Pb, Zn, Cd, Hg, As	Cultivos	36	<i>solución de DTPA o por EDTA</i>	AAS/ICP
Pb, Zn, Cd, Hg, As	Cultivos	36	<i>solución de ácido nítrico</i>	AAS/ICP
Total muestras a analizar =		108		
Total parámetros a analizar =		540		

# EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS VEGETALES EN SOTOMAYOR

## *Escenario de trabajo: muestreo y análisis*

Se tratará de determinar la biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo y, por ende, su toxicidad "real" para las plantas en ambientes terrestres como parámetros fundamentales de la interacción planta-metales pesados

El mismo espacio donde se llevaría a cabo la investigación de los suelos en la comunidad de Sotomayor permitirá de muestrear **doce muestras** de zanahorias y eventualmente otras hortalizas (habas, cebollas, papas) y maíz en suelos regados con las aguas del río Pilcomayo.

Cada muestra debe contener por lo menos 500 - 1000 g de los vegetales, incluyendo solamente las partes comestibles.

Los parámetros de interés para este estudio, indicadores de contaminación son cinco:

**Plomo, Zinc, Cadmio, Mercurio, Arsénico** (análisis cuantitativo: expresar los resultados en  $\mu\text{g}/\text{Kg}$  versus peso seco de los vegetales)

**Nota para el laboratorio:** para la determinación de los metales pesados se atacan las muestras con ácido nítrico y perclórico y la determinación se llevará a cabo mediante espectrometría atómica por acoplamiento de plasma inducido (ICP-AES) asociado a un espectrómetro de masa o con absorción atómica (AA) con horno de grafito.

## *INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS*

Se utilizarán métodos gráficos y estadísticos con el objeto de estudiar las relaciones entre los metales en los vegetales y los parámetros edáficos<sup>29</sup>, confirmando o no por caminos diferentes los resultados encontrados en los estudios antecedentes.

El estudio de las correlaciones puede contemplar el análisis de componentes principales y el análisis cluster. El propósito del análisis de conglomerados (cluster en terminología inglesa) es el agrupar las observaciones de forma que los datos sean muy homogéneos dentro de los grupos (mínima varianza) y que estos grupos sean lo más heterogéneos posible entre ellos (máxima varianza).

En el análisis de componentes principales el objetivo final es reducir la dimensionalidad de la tabla de datos concentrando la información en el menor número de variables.

En el análisis cluster el objetivo principal es encontrar clusters de las variables en orden a su similitud. Los resultados se expresan en un dendograma<sup>30</sup>

Además se podrán utilizar los coeficientes de correlación entre las características analíticas de los suelos estudiados y los contenidos totales en Zn, Pb, Cd, Hg en los vegetales.

---

<sup>29</sup> Del suelo o relativo a él, especialmente en lo que se refiere a las plantas.

<sup>30</sup> El dendograma es un diagrama parecido a un ARBOL que puede dibujar funciones o divisiones que son realizadas en niveles sucesivos, de los resultados obtenidos por las técnicas de agrupamiento o clustering jerárquico

## EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN HIDROQUÍMICA DE LA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO

El proyecto ha establecido unos puntos de aforo, toma de muestras de agua superficiales en la cuenca alta del Río Pilcomayo (Bolivia) para determinar la calidad del agua superficial, determinar las áreas de elevada vulnerabilidad debido a la contaminación de los ingenios mineros, aguas residuales, eventuales contaminaciones sea antrópica que natural e individualar las poblaciones o centros urbanos que pudiesen estar influenciados.

Aforo N°	Punto provisional	Lugar	Río que involucra
1	24	Tasapampa	Cachimayo
2	25	Tasapampa	Pilcomayo
3	27	Puente Méndez	Pilcomayo
4	23	Yotala	Yotala
5	36	Sotomayor	Pilcomayo
6	37	Taygata	Pilcomayo
7	38	San Antonio (Potosi)	Tube desagüe
8	39	San Antonio (Potosi)	Aljamayo
9	20	Tacobamba (Orea)	Pilcomayo
10	21	Tacobamba (Orea)	Tacobamba
11	40	La Palca	Huancarani
12	41	Puente La Palca	La Puerta
13	17	Mondragón	La Puerta
14	19	Yocalla	Pilcomayo
15	10	Toro Palca	Yura
16	11	Toro Palca	Caiza D
17	12	Tumusla	Tumusla
18	1	Cotagaita	Cotagaita
19	7	Palca de Higueras	Tumúsla
20	6	Palca de Higueras	Cotagaita
21	2	Cotagaitilla	Caiti
22	3	Cotagaitilla	Cotagaita
23	4	Palca Rio Blanco	Rio Blanco
24	5	Palca Rio Blanco	Quechisla
25	31	Entre Rios - Tupiza	Tupiza
26	32	Entre Rios - Tupiza	San Juan del Oro
27	30	Oploca	Tupiza
28	33	Palca de Higueras	Sococha
29	34	Palca de Higueras	San Juan del Oro
30	35	Palca de Higueras	Sococha y S.J.del Oro
31	29	El Puente	San Juan del Oro
32	14	Palca de Camblaya	Tumúsla
33	42	Palca de Camblaya	San Juan del Oro
34	43	Palca de Camblaya	Tumúsla-S.J.del Oro
35	13	La Palca Pte.S Pedro	Chico

De estos 35 puntos de aforo en la cuenca alta será necesario elegir un número de 10 -12 puntos estratégicos, de fácil acceso y cerca de comunidades (con electricidad y línea

telefónica cuando sea posible) para poder estudiar y evaluar los cambios de las características físico-químicas del río. Es estratégico establecer uno o dos puntos, agua arriba que no sean influenciados por la contaminación minera de los ingenios, depósitos artificiales de los lodos, y contaminación de aguas residuales.

Para definir las campañas de análisis y muestreo en la cuenca baja (Argentina y Paraguay) el proyecto ha tenido en cuenta lo siguiente:

*La problemática de contaminación del río por metales pesados y/o hidrocarburos, provenientes mayormente del territorio boliviano, puede monitorearse a partir de un único punto y que debido a razones operativas y de infraestructura debería ser Misión La Paz (Argentina)*

Otros dos puntos en el sector Argentino (provincia de Formosa) han sido propuestos: A la entrada del Bañado La Estrella, sector de *El Charcal* y aguas abajo del Bañado La Estrella, el sector de *Posta Km 45*:

En el sector paraguayo el punto de medición de calidad del agua se ubicará sobre la Cañada La Madrid, en el sector conocido como *Estancia Agropil*.

La problemática a enfrentar en la parte alta de la cuenca del río Pilcomayo está relacionada a la contaminación de la industria minera, de las aguas residuales y de las aguas ácidas de boca minas/vertederos y eventualmente de la contaminación provocada por los minerales (sulfuros) que se encuentran en los sedimentos más superficiales. En la cuenca baja, la contaminación del agua superficial del río es en parte originada por la contaminación precedente por iones y compuestos disueltos y sedimentos finos en suspensión (en la temporada seca del río Pilcomayo) y probablemente por el aporte de agua salada proveniente de los acuíferos subyacentes. La evaluación de este tipo de contaminación, debería hacerse en diferentes épocas del año y sobre algunas cañadas y/o riachos (eventualmente también en los esteros) seleccionados.

Para la ubicación de los puntos de muestreo en el sector Paraguayo y Argentino de la cuenca, el proyecto ha tenido en cuenta los conceptos enunciados anteriormente.

### *ANÁLISIS COMPLETA DE LAS AGUAS DEL RÍO PILCOMAYO<sup>31</sup> (a efectuarse tres veces por año)*

<b>N° PRUEBA</b>	<b>PARÁMETROS</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
7	Nitratos – NO <sub>3</sub>	mg/L	agua sin filtrar
8	Fluoruros – F	mg/L	agua sin filtrar
9	Sulfatos - SO <sub>4</sub>	mg/L	agua sin filtrar
10	Cloruros – Cl	mg/L	agua sin filtrar
11	Cianuros – CN	µg/L	agua sin filtrar
12	Fosfatos – PO <sub>4</sub>	mg/L	agua sin filtrar
13	Carbonatos/bicarbonatos - CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> /HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	agua sin filtrar
<b>N° PRUEBA</b>	<b>PARÁMETROS</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
14	Hierro – Fe	µg/L	agua sin filtrar / filtrada

<sup>31</sup> Los parámetros indicados hacen parte de la Directiva 75/440/CEE del Consejo, de 16 de junio de 1975, Anexo 2, relativa a la calidad requerida para las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable en los Estados miembros. Se aconseja hacer referencia a la directiva en caso de la superación de los límites establecidos

15	Manganeso - Mn	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
16	Cobre – Cu	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
17	Zinc – Zn	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
18	Boro – B	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
19	Berilio – Be	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
20	Cobalto – Co	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
21	Níquel – Ni	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
22	Vanadio – V	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
23	Arsénico – As	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
24	Cadmio – Cd	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
25	Plata – Ag	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
26	Cromo total – Cr	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
27	Plomo – Pb	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
28	Selenio – Se	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
29	Mercurio – Hg	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
30	Bario – Ba	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
31	Calcio – Ca	mg/L	agua sin filtrar
32	Magnesio – Mg	mg/L	agua sin filtrar
33	Sodio – Na	mg/L	agua sin filtrar
34	Potasio – K	µg/L	agua sin filtrar
35	Amoniac - NH <sub>4</sub>	µg/L	agua sin filtrar
	<b>OTROS PARÁMETROS</b>		
36	Materiales totales en suspensión	mg/L	agua sin filtrar
37	Demanda química de oxígeno ( DQO )	mg/L	agua sin filtrar
38	Nitrógeno Kjeldahl ( exceptuado NO <sub>3</sub> )	µg/L	agua sin filtrar
39	Hidrocarburos disueltos o emulsionados (después de extracción por éter de petróleo)	µg/L	agua sin filtrar
40	Plaguicidas-total (paratión, HCH, dieldrina)	µg/L	agua sin filtrar
41	Agentes tensoactivos ( que reaccionan ante el azul de metileno - laury-sulfato ) *	µg/L	agua sin filtrar
	<b>PARÁMETROS BACTERIOLÓGICOS</b>		
42	Coliformes totales 37 °C	* /100 ml	agua sin filtrar - sin conservantes – a 4° C
43	Coliformes fecales	* /100 ml	agua sin filtrar - sin conservantes – a 4° C
44	Estreptococos fecales	* /100 ml	agua sin filtrar - sin conservantes – a 4° C
45	Escherichia Colis	* /100 ml	agua sin filtrar - sin conservantes – a 4° C
46	Salmonelas	ausente en 1000 ml	agua sin filtrar - sin conservantes – a 4° C

*ANÁLISIS DE RUTINA DE LAS AGUAS DEL RÍO PILCOMAYO  
(a efectuarse cada mes)*

N° PRUEBA	PARÁMETROS DE CAMPO	UNIDADES	OBSERVACIONES
7	Nitratos – NO <sub>3</sub>	mg/L	agua sin filtrar
9	Sulfatos - SO <sub>4</sub>	mg/L	agua sin filtrar
10	Cloruros – Cl	mg/L	agua sin filtrar
11	Cianuros – CN	µg/L	agua sin filtrar
12	Fosfatos – PO <sub>4</sub>	mg/L	agua sin filtrar

CATIONES			
16	Cobre – Cu	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
17	Zinc – Zn	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
18	Boro – B	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
21	Níquel – Ni	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
23	Arsénico – As	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
24	Cadmio – Cd	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
25	Plata – Ag	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
26	Cromo total – Cr	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
27	Plomo – Pb	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
28	Selenio – Se	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
29	Mercurio – Hg	µg/L	agua sin filtrar / filtrada
35	Amoniac - NH <sub>4</sub>	µg/L	agua sin filtrar
<b>PARÁMETROS BACTERIOLÓGICOS</b>			
43	Coliformes fecales	* /100 ml	agua sin filtrar - sin conservantes – a 4° C

*PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE LAS AGUAS DEL RÍO PILCOMAYO  
(a efectuarse diariamente)*

N° PRUEBA	PARÁMETROS DE CAMPO	UNIDADES	OBSERVACIONES
1	pH	unidades	agua sin filtrar
2	Conductividad eléctrica	µs/cm	agua sin filtrar
3	Potencial redox (Eh)	mV	agua sin filtrar
4	Oxígeno disuelto	mg/L	agua sin filtrar
5	Temperatura	°C	agua sin filtrar
6	Turbidez <sup>32</sup>	UNT	agua sin filtrar
7	Cono Imhoff – sólidos sedimentables	cm <sup>3</sup>	agua sin filtrar
8	disco Secchi	cm	agua sin filtrar

**Prueba n° 1:** el pH =  $-\log[H_3O^+]$  es por tanto una magnitud cuantitativa, un valor numérico; es decir, las disoluciones no tienen pH ácidos, básicos o neutros sino que las disoluciones con valores del pH > 7 son básicas, las que tienen valores del pH < 7 son ácidas y para una disolución neutra o para el agua pura, a 25 °C, el pH = 7.

**Prueba n° 2:** la conductividad eléctrica de una muestra de agua es la expresión numérica de su capacidad para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones en el agua, de su concentración total, de su movilidad, de su carga o valencia y de las concentraciones relativas, así como de la temperatura de medición. En el sistema internacional de unidades, la unidad de conductividad eléctrica, es el micro Siemens por centímetro, µS/cm, en aguas salobres se usa el mS/cm

**Prueba n° 3:** el potencial redox (Eh) indica las relaciones entre las especies químicas oxidadas y reducidas en un medio líquido. Los procesos de oxidación y de reducción se definen en términos de migraciones electrónicas entre compuestos químicos. La oxidación

<sup>32</sup> Una Unidad Nefelométrica de turbiedad (NTU) = 7.5 ppm de SiO<sub>2</sub>. Actualmente, la unidad utilizada es la NTU, Unidad Nefelométrica de Turbidez y que equivale a 1 NTU = 1 ppm de formazina estándar

es la pérdida de electrones mientras que la reducción es la ganancia de electrones. Cuando se oxida una sustancia (libera electrones) siempre produce simultáneamente otra que se reduce (capta los electrones liberados). El Eh puede ser también utilizado para especificar el ambiente en que un microorganismo es capaz de generar energía y sintetizar nuevas células sin recurrir al oxígeno molecular. Los microorganismos aerobios necesitan valores redox positivos para crecer mientras que los anaerobios frecuentemente requieren valores redox negativos. En diferentes ambientes naturales el valor redox puede oscilar dentro de un rango comprendido entre una cifra anaeróbica inferior a -420 milivoltios (mV) hasta una cifra aeróbica de aproximadamente +300 mV y más.

**Prueba<sup>33</sup> n° 4:** el Oxígeno Disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno que está disuelta en el agua y que es esencial para los riachuelos, ríos, lagos y humedales saludables. El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador de cuanto contaminada está el agua y cuanto bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal. La cantidad de oxígeno que puede disolverse en el agua (OD) depende de la temperatura y se mide en mg/L.

**Prueba n° 5:** la temperatura es la medida de la cantidad de energía de un objeto. Es un parámetro indispensable para la medición de los otros parámetros físico-químicos.

**Prueba n° 6:** la turbidez es la expresión de la propiedad óptica de la muestra que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra.

La turbidez en el agua puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas de gases, líquidos y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos, con un ámbito de tamaños desde el coloidal hasta partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbulencia. En los lagos la turbidez es debida a dispersiones extremadamente finas y coloidales, en los ríos, es debido a dispersiones normales. Se mide en NTU (unidades de turbidez nefelométricas). El límite máximo permisible en el agua potable es de 10 NTU.

**Prueba n° 7:** el método estándar para medir los sólidos sedimentables en campo consiste en la decantación de la muestra en el cono de *Imhoff* que es un recipiente cónico de vidrio o plástico rígido, en donde se coloca un litro de muestra fresca y se deja en reposo durante dos horas. Se lee directamente en la gradación del cono, los mililitros de sólidos sedimentables por litro de muestra. Estas pruebas permiten estimar para una determinada fuente o cuerpo de aguas, los volúmenes de sólidos que deberán ser removidos en las unidades de sedimentación de una planta de tratamiento o purificación de aguas. En general, los sólidos sedimentables están formados por partículas inorgánicas neutras del tamaño de las arenas y/o por agregados orgánicos de mayor tamaño.

**Prueba n° 8:** El disco *Secchi* es un instrumento para medir la visibilidad dentro del agua. El disco mide 20-40 cm de diámetro y esta dividido en cuadrantes que alternan en color de blanco a negro. Para medir la turbiedad, se sumerge el disco en el agua (de espaldas al

---

<sup>33</sup> Los macroinvertebrados son organismos que son visibles sin usar un microscopio. Algunos macroinvertebrados del fondo de los ríos no pueden sobrevivir en aguas contaminadas mientras que otros pueden sobrevivir e incluso prosperar en aguas contaminadas. Por ejemplo, especies que a menudo se encuentran en aguas más frías y que necesitan altos niveles de oxígeno disuelto son indicadores de un riachuelo saludable. Las especies que a menudo se encuentran en aguas tibias son más tolerantes de niveles bajos de oxígeno disuelto y son indicadores de un río/riachuelo no saludable. **IMPORTANTE:** Un ecosistema saludable es soporte para una diversidad de organismos, la comunidad del fondo incluirá una variedad de todos los macroinvertebrados vulnerables a la contaminación. Por el contrario, un río no saludable dará soporte solamente a unos cuantos tipos no vulnerables de macroinvertebrados.

sol), y se mira directamente hacia abajo. La profundidad a la que el disco desaparece de su vista es la lectura en cm del disco *Secchi*. El rango más adecuado de turbidez debe ser 20 a 100 cm lo que significa aguas particularmente turbias por sólidos en suspensión.

### *VARIACIONES HIDROQUÍMICAS DE LAS AGUAS*

Las aguas naturales, tanto superficiales como subterráneas, contienen en disolución con mayor o menor concentración sales minerales y gases que se encuentran en equilibrio con el medio que los rodea: atmósfera, suelo y con las partículas sólidas en suspensión.

No se puede predecir la composición de un agua a partir de la estructura geológica de una cuenca, pero es posible establecer algunas características generales:

- En las zonas calcáreas puras las aguas serán bicarbonatadas cálcicas y con residuo seco variable
- En zonas de arenas de cuarzo cabe esperar aguas muy poco cargadas y ácidas
- En zonas yesosas el agua presentará un residuo seco alto y con predominio de sulfato-cálcico, no obstante el Cl, Na y Mg estarán presentes en cantidades notables
- En zonas arcillosas, aguas con una fuerte carga de todos los iones y un contenido en bicarbonato relativamente bajo,
- Si el terreno está formado por rocas cristalinas, las aguas que procedan de él, tendrán un residuo seco débil y serán bicarbonatadas sódicas y ácidas

El análisis químico revela diferencias importantes en el contenido mineral de las aguas:

- Aguas de mineralización muy débil: residuo seco de hasta 50 mg/l
- Aguas de mineralización débil: residuo seco de hasta 500 mg/l
- Aguas de mineralización fuerte: residuo seco superior a 1500 mg/l
- Aguas bicarbonatadas: más de 600 mg/l de bicarbonato
- Aguas sulfatadas: más de 200 mg/l de sulfatos
- Aguas cloruradas: más de 200 mg/l de cloruro
- Aguas cálcicas: más de 150 mg/l de calcio
- Aguas magnésicas: más de 50 mg/l de magnesio
- Aguas fluoradas, o que contienen fluoruros: más de 1 mg/l de fluoruros
- Aguas ferruginosas, o que contienen hierro: más de 1 mg/l de hierro
- Aguas bivalentes aciduladas: más de 250 mg/l de CO<sub>2</sub> libre
- Aguas sódicas: más de 200 mg/l de sodio.

De todos los aniones naturales que se pueden encontrar en un agua cabe resaltar que el dióxido de carbono en disolución, los sulfatos y los bicarbonatos tienen una importancia significativa sobre su equilibrio en los procesos de corrosión, incrustación, lixiviación y precipitación.

La captación de las aguas, las mezclas de afluyentes distintos en el mismo río, el aporte de aguas subterráneas y de manantiales da lugar a la ruptura de este equilibrio que tiende al establecimiento de un nuevo equilibrio con fenómenos de disolución y precipitación de algunas especies químicas, modificando también la concentración de los contaminantes. Los primeros datos analíticos de las aguas del río Pilcomayo indican grandes variaciones en los sulfatos (1727 - 191 mg/L) y en el calcio (785 - 165 mg/L) revelando que estas aguas son en general, en la parte alta de la cuenca, altamente mineralizadas, sulfatadas y cálcicas y no son siempre idóneas para el uso agrícola y el consumo humano debido a un alto residuo fijo y a la presencia de arsénico y metales pesados.

Los análisis que se efectuarán durante la campaña extensiva de monitoreo en la cuenca con mediciones in situ de los parámetros químico-físicos (pH, conductibilidad, Eh...) más alcalinidad sulfatos, calcio y dureza con aparatos portátiles<sup>34</sup>, servirán para definir un balance hídrico que considere también los aportes superficiales, subterráneos y de infiltraciones para caracterizar las variaciones hidroquímicas de las aguas del río Pilcomayo y de sus afluyentes en su curso e indagar como estas variaciones interaccionan con los contaminantes y el medio ambiente.

### *PROCESAMIENTO DE DATOS*

El procesamiento de datos permitirá de conocer el ciclo hidrológico en general y en particular los factores que inciden bajo el aspecto de contaminación del medio ambiente y de que forma y saber cuales son los datos que deben controlarse y analizar para lograr un acercamiento lo más lógico posible al equilibrio natural.

Los datos físicos, químicos y bacteriológicos de las aguas superficiales pueden brindar informaciones relativas a las siguientes temáticas:

- Revelación de fenómenos de contaminación puntuales o difundidos detallados con mapas de isovalores de parámetros físico-químicos
- Descripción de las fácies hidroquímica. Se usa este término para describir cuerpos de agua que difieren en su composición química y se pueden describir por medio del diagrama de Piper
- Análisis numéricos para la caracterización de aguas: estadística, diagramas de Piper, Stiff, ternarios, diagramas de Collins, diagramas de tortas (*pie diagrams*), histogramas...
- Determinación y evaluación del desplazamiento de interfaces salinas y caracterización de efluentes de aguas residuales
- Determinación de la calidad y características químico-físicas de agua en superficie y pozos: elementos mayoritarios y traza y físicas del agua (pH, eH, T°C, oxígeno disuelto, sales totales disueltas conductividad...)

### **Observaciones**

Se aconseja efectuar de una manera lo más regular posible en toda la cuenca del río Pilcomayo un muestreo diario de los parámetros de campo que permitan, a costos reducidos y en tiempos rápidos conocer el estado general de las aguas.

Los tres análisis completos de las aguas sirven para una caracterización químico-física exhaustiva durante la temporada de lluvias (3-5 meses – 1 muestreo) y durante la temporada seca (7-9 meses – dos muestreos)

---

<sup>34</sup> A título de ejemplo se puede utilizar:

- Alkalinity test, acid capacity up to ph 8.2 and ph 4.3 Aquamerck™i Acidity Test, Cat. No. 1.11108.0001.
- Sulfate Test, :200-400-800-1200-1600 mg/l SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - 1.10019.0001
- Calcium Test, 2-200 mg/l Cat. N° 11110.0001
- Test Dureza total aquamerck Cat. N° 1.08047.0001 - 1.08040.0001

## RECOMENDACIONES

### ACCIONES POSIBLES A IMPLEMENTAR POR EL PROYECTO

Durante las visitas en el campo el experto ha seleccionado algunas de las intervenciones posibles a implementar por el proyecto:

- Piloto 1:**
- Humedales para producir agua de uso agrícola en Sotomayor
  - Filtros y sedimentadores para producir aguas de uso animal/humano
  - Filtros lentos de arena para producir agua para consumo humano, procesos de desinfección y educación sanitaria
  - Canal de riego que permitirá el regadío en la zona afectada a cultivos en Sotomayor
- Piloto 2:** Lagunas anaeróbicas/aeróbicas en Potosí para tratar conjuntamente aguas residuales y aguas ácidas de mina

Campañas de monitoreo:

**Muestreo 1:** evaluación de la contaminación en los suelos de Sotomayor

**Muestreo 2:** evaluación de la contaminación de los vegetales en Sotomayor

**Muestreo 3:** evaluación continuativa de la condición hidroquímica de la cuenca del río Pilcomayo

A prever otras importantes acciones de intervención en la cuenca como:

### *REMEDIACIÓN DE DESMONTES*

Los residuos mineros sólidos depositados en botaderos o desmontes generan un complejo problema ambiental. Estos materiales contienen diversas especies mineralógicas, las que - de ser abandonadas expuestas a las condiciones naturales - pueden disolverse por la presencia de agua (lluvia), bacterias (lixiviantes, acidófilas), oxígeno (aire), para formar diversos compuestos solubles tales como sulfatos metálicos y ácido sulfúrico. Los licores así generados son similares a los generados en minas abandonadas, los que se conocen como *aguas ácidas de mina*

La experiencia internacional indica que los desmontes (los cuales se encuentran en la zona de Potosí y normalmente cerca de cada boca mina), deben ser cubiertos con sólidos inertes y fértiles para forestar mediante la creación de una capa de humus sobre éstos. De esta forma se impide el acceso de oxígeno y se reduce el flujo de agua, con lo cual se retarda la generación de las aguas ácidas.

La remodelación de los desmontes (reducción de la pendiente de los vertientes) y el recubrimiento con geotextiles y sólidos inertes, permite eliminar la generación de polvos finos en el aire y aumenta la estabilidad geotécnica de los mismos



**Figura 5: Desmonte de San Antonio en Potosí con pozas de aguas ácidas**

#### *MUESTREO DE LOS SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO*

Los lodos procedentes de las minas distribuidas principalmente en la parte alta de la cuenca cubren una extensión que necesita ser todavía evaluada. Comprendida entre las minas potosinas y las minas a lo largo de los otros afluentes en la cuenca alta del río Pilcomayo, esta extensión puede actuar como un enorme reactor químico-biológico en el cual parte de los sulfuros lentamente se oxidan liberando los metales pesados bajo forma iónica en las aguas, disminuyendo el pH, y provocando importantes cambios en el quimismo de las aguas, produciendo fenómenos de contaminación directos e indirectos por lixiviado de las rocas y sedimentos del cauce del río

Se recomienda una campaña de monitoreo y de evaluación de los volúmenes de sedimentos en el cauce del río Pilcomayo, empezando de la región andina, hasta al Chaco Paraguayo y Argentino.

La finalidad del muestreo es examinar los diferentes horizontes de sedimentos que llevan minerales sulfurados, materia orgánica y evidenciar reacciones de oxidación de los mismos causantes la lixiviación de los sedimentos y rocas de los cauces con extracción de elementos como el boro.

Juntamente y paralelamente a esta campaña de monitoreo se debería implementar también un muestreo de los bentos para la evaluación de la fauna béntica como indicador de la calidad de río y la calidad hidroquímica de las aguas de los río afluentes del río Pilcomayo.



**Figura 6: Lodos, arena y sedimentos sulfurados en el cauce del río Tarapaya**

#### *PROGRAMA DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN POTOSÍ*

Un estudio hidrológico en la cuenca de la ciudad de Potosí efectuado por el CIMA (*Centro De Investigación Minero Ambiental*) en colaboración con el JICA (*Cooperación Japonesa*) ha establecido una elevada contaminación de las aguas subterráneas con metales pesados en algunos sectores de la cuenca.

El mecanismo de concentración de los metales pesados en el acuífero no es claro: parte de ellos proviene de infiltraciones de los diques de colas de los ingenios mineros, de los suelos durante la temporada de lluvias, de las aguas ácidas del cerro Rico y de concentraciones geológicas naturales.

En colaboración con el CIMA se pueden implementar proyectos de investigación de la calidad de los acuíferos en Potosí y otras ciudades de elevada vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea. Por ejemplo aquellos sectores donde la concentración de la actividad minera es elevada (con gran cantidad de residuos mineros) y las formaciones geológicas son de elevada permeabilidad.

En un documento técnico el proyecto Pilcomayo sugiere:

*Determinar las áreas (si es posible dentro de subcuencas) Fijar las áreas de contaminación puntual (por ej. pozos petroleros, etc.) y contaminación areal (por ej. diques de colas, áreas de actividad agrícola intensiva, etc.).*

*Delimitar las poblaciones o centros urbanos cercanos y que pudiesen estar influenciados por la actividad minera, petrolera, etc. Efectuar un relevamiento de los pozos existentes y el uso que se le da al agua subterránea (por ej. uso doméstico, para riego, industrial, etc.).*

*Caracterizar las formaciones geológicas (especialmente permeabilidad de las formaciones, características litológicas, potencia de las mismas, etc.) de cada área a*

*monitorear. Analizar los perfiles de los pozos en profundidad y delimitar los posibles acuíferos existentes.*

*Efectuar un análisis de las características hidráulicas de los acuíferos (profundidad de los mismos, niveles estáticos y direcciones de circulación preferencial del agua subterránea).*

*Una vez inventariados las áreas y los pozos a monitorear se aconseja establecer una red de monitoreo de 2-3 pozos por área. Si es posible se deben fijar pozos cuya profundidad de captación del agua sea distinta.*

*Sobre los pozos fijados para el monitoreo de agua subterránea, se aconseja efectuar las siguientes mediciones y/o tener en cuenta lo siguiente:*

Los parámetros a determinar in-situ son los mismos establecidos para las aguas superficiales y en laboratorio se determinarán los parámetros de caracterización de las aguas y metales pesados.

Como aspecto complementario se aconseja efectuar en aquellas áreas con problemas de contaminación del curso del río un análisis de la interrelación entre las aguas superficiales de río, las eventuales aguas ácidas y las aguas de colas versus el acuífero.

## CONCLUSIONES

El experto en contaminación de medio ambiente y minería durante las siete semanas de su permanencia en Bolivia, respectivamente en Tarija, Potosí, Sotomayor (departamento de Chuquisaca) y La Paz ha adquirido una serie de informaciones y documentaciones sobre el estado actual de la contaminación del río Pilcomayo, principalmente de la cuenca alta debido que en esta región se encuentran los focos principales de la contaminación antrópica.

Se recomienda por lo tanto implementar una serie de intervenciones pilotos para demostrar la factibilidad de sucesivas intervenciones a larga escala sobre la perspectiva de proveer agua de calidad para las poblaciones ribereñas y mejorar la calidad de las aguas del río mismo y las condiciones medio ambientales.

En particular se aconseja implementar:

PILOTO 1: clarificación y filtración del agua en Sotomayor que tiene como finalidad principal de realizar humedales artificiales para obtener agua apta al consumo agrícola. Métodos de clarificación y filtración del agua en Sotomayor que tiene como finalidad principal de realizar tanques de almacenamiento para obtener agua apta al consumo animal y eventualmente humano

Métodos de filtración y desinfección del agua en Sotomayor que tiene como finalidad principal de realizar filtros lentos de arena para obtener agua apta al consumo humano e implementar la educación sanitaria sobre el uso del agua y la transferencia de tecnología.

Construcción de un canal que se plantea como una pieza fundamental para mejorar la puesta en riego de las superficies agrícolas de Sotomayor y que permitirá el desarrollo prioritario de regadíos en la zona afectada a cultivos.

PILOTO 2: Tratamiento en Potosí mediante lagunaje de aguas residuales conjuntamente a aguas ácidas de mina para una posible reutilización agrícola y para su incorporación al cauce fluvial.

Se proponen también campañas de muestreo y monitoreo para examinar las condiciones de contaminación de los terrenos y de los vegetales en Sotomayor además de un muestreo de evaluación de la condición hidroquímica de la totalidad de la cuenca del río Pilcomayo. Un estudio de las características hidroquímicas de las aguas desde las llanuras chaqueñas hasta las cumbres cordilleras permitirá evaluar los aportes en iones de metales pesados, calcio magnesio, aguas sulfatadas, carbonatadas y cloruradas, de afluentes superficiales, manantiales, aguas de infiltración y los fenómenos de precipitación y solubilización que se acompañan y que inducen cambios en el quimismo de las mismas, estrictamente relacionados con la vida acuática y su uso.

Un análisis no exhaustivo de otras importantes posibles acciones de intervención prevé la remediación de desmontes, el muestreo de los sedimentos en la totalidad de la cuenca del río Pilcomayo y un programa de monitoreo y de remediación de las aguas subterráneas en Potosí.

Se recomienda una atención particular referente a la implementación y desarrollo de nuevas actividades mineras extractivas y de procesamiento en toda la cuenca, lo que podría implicar un aumento de contaminantes en los riachuelos y ríos afluentes del

Pilcomayo. En particular la industria minera del oro podría aumentar la contaminación en cianuros y mercurio en las aguas.


La presencia en Bolivia de dos proyectos de la UE que se ocupan respectivamente del desarrollo de la industria minera y de la salud pública podría permitir implementar colaboraciones y sinergias con el proyecto del río Pilcomayo fortaleciendo institucionalmente el impacto de los proyectos mismos.

No obstante que la solución de los problemas que la industria minera extractiva origina en la cuenca alta del río Pilcomayo no sea un objetivo prioritario del proyecto, es opinión del experto que sería de gran importancia que el proyecto actúe como coordinador entre las distintas instituciones financieras públicas y privadas implicadas en este ámbito para obtener una reducción del impacto global que esta contaminación conlleva. A pesar de que este rol coordinador introduciría el proyecto en asuntos que no son de su específica competencia, esta iniciativa podría resultar muy ventajosa para alcanzar los objetivos generales del proyecto mismo.

## ANEXOS

1	ANEXO 1 .....	67
1.1	INFORME DE MISIÓN DEL 13 -17 DE OCTUBRE DE 2004 .....	67
2	ANEXO 2 .....	71
2.1	INFORME DE MISIÓN DEL 25 - 29 DE OCTUBRE DEL 2004 .....	71
3	ANEXO 3 INDUSTRIA MINERA Y EFECTOS AMBIENTALES .....	74
3.1	TRITURACIÓN Y MOLIENDA.....	74
3.2	LOS INGENIOS (PLANTA DE BENEFICIO).....	74
3.3	INTRODUCCIÓN A LA FLOTACIÓN .....	74
3.4	LA QUÍMICA DEL SISTEMA ACUOSO .....	76
3.4.1	Límites de toxicidad.....	77
3.4.2	Efectos ambientales.....	78
3.4.3	TOXICIDAD.....	79
3.4.4	TOXICIDAD DE ALGUNOS METALES .....	80
	Plomo.....	80
	Arsénico.....	82
	Mercurio.....	83
	Cadmio.....	84
3.4.5	INDICADORES QUÍMICOS DE CONTAMINACIÓN.....	85
3.4.6	Bibliografía y Libros:.....	85
4	ANEXO 4 LA CLARIFICACION DEL AGUA .....	86
4.1.1	INTRODUCCIÓN .....	86
4.1.2	MEZCLADOR RAPIDO .....	86
4.2	PRODUCTOS QUÍMICOS Y NATURALES .....	87
4.2.1	CLARIFICACIÓN DEL AGUA CON COMPUESTOS NATURALES.....	87
4.2.2	IMPORTANCIA DEL pH EN LA COAGULACIÓN.....	88
4.2.3	Documentación de referencia:.....	90
5	ANEXO 5 LA FILTRACIÓN Y DESINFECCIÓN DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO .....	92
5.1.1	LA FILTRACIÓN.....	92
5.1.2	MATERIALES FILTRANTES GRANULARES.....	92
5.2	DESINFECCION .....	93
5.2.1	AGENTES FÍSICOS.....	93
5.2.2	DESINFECCIÓN QUÍMICA.....	93
	DESINFECCIÓN CON CLORO.....	93

6	ANEXO 6 PARAMETROS DE REFERENCIA AGUAS SUPERFICIALES Y POTABLES .....	95
6.1.1	Definición de los métodos de tratamiento tipo que permiten la transformación de las aguas superficiales de las categorías A1 , A2 y A3 en agua potable.....	95
6.2	Calidades de aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable ...	95
7	ANEXO 7 AREA DE SOTOMAYOR.....	103
8	ANEXO 8 CONTENIDOS MÁXIMOS DE UNOS METALES PESADOS EN PRODUCTOS ALIMENTICIOS .....	104



## ANEXO 1

### INFORME DE MISIÓN DEL 13 -17 DE OCTUBRE DE 2004

Referencia: visita del Dr. Enrico Mariuz a la ciudad de Potosí y alrededores a efectos de interiorizarse de problemática de la contaminación minera y sus consecuencias sobre el medio ambiente  
Fecha: del 13 al 17 de octubre de 2004 (cinco días).  
Componentes:  
Mariuz Enrico, experto UE a corto plazo  
Terrazas Edilberto, técnico hidrólogo, Proyecto Pilcomayo  
Burgos Fredy, conductor, Proyecto Pilcomayo  
Transporte: vehículo del proyecto Pilcomayo, Nissan Terrano, placa: 83 MI 15

Miércoles, 13 de octubre 2004

De Tarija a Potosí y Sucre, vía Camargo, donde se dejó a la Ing. Leonor Castro Directora Departamental de Medio Ambiente de la Prefectura de Chuquisaca. Pernocte en Sucre. En el trayecto se pudieron ver los puntos de monitoreo sobre los ríos San Juan del Oro, localidad el Puente y el río Tumusla, localidad Palca Grande. En Potosí se pudo observar un ingenio minero en plena actividad donde se observó la salida de aguas contaminadas que vierten a un cauce. En el puente Sucre se observó el punto de monitoreo del río Pilcomayo; cerca de la ciudad de Sucre. Visita a una planta de tratamiento de las aguas residuales.

Jueves, 14 de octubre 2004

De Sucre a Potosí en la mañana. Encuentro en las oficinas de CIMA (Centro de Investigación Minero Ambiental), trabajos a desarrollar y coordinación de las actividades a cumplir.

Personas encontradas:

Ing. Primo Choque, Investigador Ambiental.  
Ing. Jorge Venegas M., Investigador Minero Ambiental.  
Ing. Hernán Ríos M., Geólogo consultor Ambiental.  
Ing. Franz Mamani Y., Investigador Ambiental.  
Lic. Makoto Otsuka, Coordinador del JICA.  
Ing. Yoichi Matsuda, Experto del JICA.

Se realizan las visitas al Ingenio Bolívar, Socavón Real y al complejo minero Pailaviri.

Por la noche el signatario cumple en el CIMA una disertación sobre el tema de contaminación y medio ambiente, a petición del director del CIMA, Ing. René Torrejón, y otros profesores de la Universidad Autónoma Tomás Frías de Potosí.

Viernes, 15 de octubre 2004

Visita al Ingenio San Marcos, a los ríos embovedados de la Rivera, Wayna Mayu, Suko Mayu, Ingenio Velarde, Ingenio San Miguel y a las vertientes del mismo nombre. Se pudo observar el desmonte San Miguel de gran magnitud. Visita a los canales que se juntan para transportar las colas a Laguna Pampa. Observación del río La Rivera por donde circulan las aguas residuales de la ciudad de Potosí que a su vez desembocan en el río Tarapaya.

Sábado, 16 de octubre 2004

Visita al centro Minero de Porco de propiedad de COMSUR (Compañía Minera del Sur).

Entrevista con el Ing. Zenón Bellido, gerente del Área Sur; se realiza una reunión informativa por parte de la COMSUR con los Ing. René Cortes, superintendente general y el Ing. Otto Cuba encargado de la parte ambiental. Se efectuó un rápido recorrido por el complejo minero.

En la tarde se visitó la localidad de Mondragón donde se observó una disminución de los lodos mineros y la presencia de aguas residuales de la ciudad de Potosí en el río Tarapaya. Se intentó llegar a la confluencia del río Pilcomayo y el río Tarapaya, sin lograr el acceso al punto de confluencia.

Domingo, 17 de octubre 2004

Regreso de Potosí a Tarija, por la carretera Tupiza. Observación de los puntos de monitoreo de los ríos Tumusla, Cotagaita, Tupiza, San Juan del Oro, Sococha con la confluencia del río San Juan del Oro a la altura de la comunidad de Tojo.

En la zona de Tupiza se está reactivando la minería por el grupo minero COMISAL (Compañía minera Salinas) y otros.

Observaciones:

El proyecto Pilcomayo debe solicitar al CIMA, Ing. René Torrejón, informes técnicos prometidos, bajo requerimiento oficial, sobre Laguna Pampa, realizados por el ing. Franz Mamani

Dirección: CIMA (Centro de Investigación Minero Ambiental) Att. Ing. René Torrejón, director CIMA

e-mail: [setar2000@yahoo.com](mailto:setar2000@yahoo.com) - Oficina Ave Arce s/n, esquina Serrado - POTOSÍ

Tel/Fax: 6229710

El proyecto Pilcomayo debe solicitar urgentemente a la COMSUR, atención al Ing. Zenón Bellido, gerente Área Sur, informes técnicos prometidos, bajo requerimiento oficial, sobre datos de monitoreo, gestión del medio ambiente de la mina y los ingenios, estudios técnicos del levantamiento del dique de colas "D" y tratamiento de las aguas del dique mediante proceso de aireación.

Dirección: COMSUR (Compañía Minera del Sur) Atención Ing. Zenón Bellido, gerente Área Sur

e-mail: [zbellido.cpt@comsur.com.bo](mailto:zbellido.cpt@comsur.com.bo)

Oficina de Potosí Calle Lanza n° 58 - POTOSÍ

Tel: 26243476 (mina de Porco) - 26222486 (oficina Potosí)

	<b>SITUACIONES OBSERVADAS</b>	<b>SOLUCIONES PROPUESTAS</b>
1	Ingenios mineros: vertidos de aguas residuales industriales, colas, lodos, sólidos disueltos y sedimentables en el río Tarapaya	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementación de pequeños diques de colas y de las conexiones con canales a Laguna Pampa (CIMA<sup>35</sup>)</li> <li>- Piloto de investigación para mejorar la sedimentación y reducir los sólidos disueltos mediante aeración, ventilación y otras técnicas</li> </ul>
2	<p>Dique de colas “Laguna Pampa”:</p> <p>-1 Levantamiento de los diques (muros de contención de lodos) mediante técnica <i>downstream</i>. La utilización de los lodos como material de construcción constituye un riesgo potencial: deslizamientos y posible desborde de colas en la parte baja (pueblo de San Antonio)</p> <p>-2 Infiltraciones de las aguas y contaminación del acuífero</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-1 Estudio geotécnico de los suelos; dibujo/planos estructurales del levantamiento de los talud del dique con material homogéneo y compactado, inserción de geomembranas de polietileno alta densidad de impermeabilización para eliminar posibles infiltraciones (CIMA)</li> <li>- 2 Impermeabilización del dique mediante geomembranas sobre capas de arcilla (encapsulación) y monitoreo del acuífero en los alrededores del dique mediante piezómetros</li> </ul>
3	Aguas residuales en Potosí: el río Tarapaya es actualmente el desagadero (cloaca) de la ciudad de Potosí con aguas muy cargadas en contaminantes orgánicos, coliformes fecales, parte de las colas de los ingenios y aguas ácidas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planta de tratamiento de agua residuales mediante un sistema integrado físico químico y biológico (¿financiamiento KFW? )</li> <li>- Piloto de tratamiento aguas residuales con aguas ácidas de mina mediante reducción anaeróbica de los sulfuros (CIMA)</li> <li>- Estudios de calentadores solares para las aguas residuales y ácidas finalizadas al tratamiento biológico/bacteriano</li> </ul>
4	Aguas ácidas (drenaje ácido de mina = DAM) en las boca-minas y en los desmontes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inventario de las DAM, captación y neutralización (CIMA)</li> <li>- Implementación de un piloto para neutralización (físico química y/u biológica) conjuntamente con el CIMA</li> <li>- Tratamiento biológico de aguas ácidas de minería, selección de una población bacteriana , procesos y sistemas de bombeo en aguas residuales a alta concentración para estudios de biodegradación.</li> </ul>
5	Desmontes y/o vertederos de lodos y inertes en la ciudad de Potosí (desmonte de San Miguel con mas de un millón de toneladas de sólidos) y alrededores: riesgo de deslizamientos, derrumbes y formación de aguas ácidas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inventario de los desmontes (CIMA)</li> <li>- Estudios y planos de obras de protección mediante remodelación, protección superficial con arcillas y geomembranas (incapsulación) y reforestación</li> <li>- Estudio y análisis de los residuos sólidos, ver la posibilidad de recuperar metales pesados</li> <li>- Recuperación y tratamiento de las aguas ácidas</li> </ul>
6	Deposición de sedimentos (complejo de sulfuros de Zn, Pb, As...) en el río Tarapaya y río Pilcomayo (parte alta) y cesión de nutrientes y metales pesados en perfiles de suelos en las aguas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muestreo de sedimentos para investigaciones sobre los volúmenes de depósitos mineralizados y eventuales dragados en el cauce del río</li> <li>- Análisis de las muestras en fluorescencia X</li> <li>- Estudio de la evolución mecánica (pulverización) y química (oxidación) de los complejos en los ríos</li> </ul>
7	Acuífero en la región de Potosí: estudios antecedentes y delimitados informan de una fuerte contaminación de las aguas subterráneas por metales pesados. Elevado riesgo para las poblaciones que se abastecen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluación de la contaminación mediante una campaña de monitoreo en pozos y nuevos piezómetros. (conjuntamente con CIMA)</li> <li>- Tratamiento de aguas subterráneas con técnicas de <i>pump and treat</i> y otras</li> </ul>

<sup>35</sup> proyecto ejecutado por CIMA (Centro de Investigación Minero Ambiental) bajo asistencia y supervisión del proyecto Pilcomayo

	de las aguas en los pozos de la ciudad y en los alrededores	- Prevención de la contaminación de los acuíferos (estudio de los focos de contaminación)
8	<p>Aspectos de higiene de medio ambiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-1 Contaminación del aire (polvos finos PM10 debidos a la circulación urbana en Potosí</li> <li>-2 Contaminación de las áreas de cultivo (hortalizas) por riego con aguas residuales</li> <li>-3 Niveles de protección muy bajos y insuficientes en las minas e ingenios</li> <li>-4 Otros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-1 Muestreo de PM10 y PM 2,5; sensibilización de las autoridades de salud pública sobre los polvos finos; capacitación de técnicos sobre la regulación de los motores diesel en altura (reducción de emisiones)</li> <li>-2 Estudios y pilotos de tratamiento aguas para riego y uso animal - Estudios y piloto de tratamiento aguas para consumo humano</li> <li>-3 Sensibilización de las Prefecturas, asociaciones de ingenios y trabajadores sobre las normas de seguridad en el trabajo</li> <li>-4 Otros: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Construcción in situ de calentadores solares para uso doméstico</li> <li>- Reutilización de lodos orgánicos (cuando posible!) en agricultura</li> <li>- Separación de los residuos sólidos orgánicos y compostaje</li> <li>- Otros argumentos a desarrollar</li> </ul> </li> </ul>



## ANEXO 2

### INFORME DE MISIÓN DEL 25 - 29 DE OCTUBRE DEL 2004

Referencia: El viaje llevado a cabo a las ciudades de Sucre y La Paz por el *Dr. Enrico Mariuz* (experto europeo en contaminación minera) y el *Ing. Ronald Pasig* (ingeniero principal del proyecto) ha tenido la siguiente finalidad:

1. Efectuar un relevamiento de las áreas de posible emplazamiento de proyectos pilotos, tendientes a mitigar los efectos de la contaminación minera y/o urbana;
2. Tomar contacto con las instituciones a nivel nacional y que pudiesen intervenir en acciones concretas para solucionar el problema de la contaminación minera en el sector de Potosí y áreas colindantes

El cronograma de reuniones ha sido el siguiente:

Ciudad	Institución	Tel./E-mail	Contacto
Sucre (25-27.11.04)	Prefectura	6453105/6453108	Ing. Mario Ramirez Arce Prefecto y Comandante General del Departamento de Chuquisaca <b>Ing. Leonor Castro</b> Directora – Dirección Departamental de Medio Ambiente y Recursos Naturales <b>Ing. Walter Taboada</b> Técnico - Dirección Departamental de Medio Ambiente y Recursos Naturales
La Paz (28.11.04)	Simbiosis	02-2433510 Fax. 02-2111829 <a href="mailto:rafael_anze@simbiosis.com.bo">rafael_anze@simbiosis.com.bo</a>  02-772522/792582 Fax. 02-797511 <a href="mailto:mvfranken@yahoo.com">mvfranken@yahoo.com</a> <a href="mailto:lca_ie@yahoo.com">lca_ie@yahoo.com</a>	Rafael Anze Martin – <b>Gerente Técnico</b>  <b>Dra. Margot Franken</b> – Responsable de la Unidad de Calidad Ambiental – Universidad de San Andrés
La Paz (28.11.04)	KfW  Fichtner	02-2413337/2117708 Fax.: 02-2411786 <a href="mailto:agencia@kfw-bolivia.org">agencia@kfw-bolivia.org</a> 772-34421 (Chaco) 716-91616 <a href="mailto:fischaco@cidis.ws">fischaco@cidis.ws</a>	Stefan Zeep – Director Agencia de la KfW en Bolivia  <b>Víctor A. Velasco</b> – Gerente de Proyecto
La Paz (28.11.04)	CoMiBol	02-2145208 <a href="mailto:rboon@xs4all.nl">rboon@xs4all.nl</a>	Ronald G.J. Boon (consultor internacional) Asesor Técnico en Gestión Ambiental Minera Programa de Cooperación Danesa al Sector Medio Ambiente (PCDSMA)
La Paz (29.11.04)	Delegación Unión Europea	02-2782244 Fax.: 02-2784550	<b>Marco Tomasi</b> – Responsable del Proyecto Pilcomayo - Sección de Cooperación

		Idem <a href="mailto:nicolaus.hansmann@cec.eu.int">nicolaus.hansmann@cec.eu.int</a>	<b>Nicolaus Hansmann</b> – Responsable del Proyecto Apemin 2 - Sección de Cooperación
--	--	--	---

Se obtuvo también el siguiente contacto y que pudiese ser importante para los trabajos futuros:

Dr. Wolfgang Wagner – Experto CIM para el tema de tratamiento de lagunas de desechos cloacales y urbanos. Dirección: Calle Sucre, ciudad de Oruro. Te.: 5251926, empresa Sella Tel.: 5241040, Cel: 72489551

## **Resultados y Recomendaciones**

### **Sector de Chuquisaca (Sucre)**

a. En el sector de Sucre se realizó una visita al área de Sotomayor y donde los problemas de contaminación por actividad minera son agudos y pronto a ser solucionados. Se ha podido constatar que el lugar pudiese ofrecer buenas condiciones para la implementación de una obra piloto, cuya finalidad sería la de:

- Mejorar la calidad de las aguas provenientes del río Pilcomayo y hacerlas aptas para uso agrícola (primera etapa), uso ganadero (segunda etapa) y uso humano (tercera etapa). Para ello, el Dr. Mariuz, ha propuesto la implementación de un sistema de lagunas de decantación y tratamiento (mediante especies vegetales seleccionadas) del agua de río. *La imagen detallada del sistema será descrita por el experto europeo en su informe de misión*
- Complementariamente se podría implementar un sistema de riego, de forma tal de mejorar y optimizar el sistema actualmente en uso.

Para la implementación de las obras pilotos mencionadas se ha podido identificar un área de buenas condiciones de acceso y dimensiones apropiadas a aproximadamente 4-5 Km. aguas arriba de la localidad de Sotomayor. Corresponde a un área de una antigua terraza del río Pilcomayo, de aproximadamente 50 ha de superficie y que debería ser protegida contra futuras inundaciones del río. El croquis de la obra piloto en anexo 7.

Es de notar que la calidad del agua en el Sector de Sotomayor ha mejorado (por lo menos desde el punto de vista visual) en forma notoria, con la puesta en funcionamiento del dique de Laguna Pampa.

Se ha realizado una entrevista con el Sr. Prefecto del Departamento de Chuquisaca, Ing. Mario Ramírez Arce, de manera de ponerlo al corriente acerca de los trabajos presentes y futuros que se pretenden ejecutar en el departamento de Chuquisaca. Igualmente se han coordinado acciones con la Directora Departamental de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ing. Leonor Castro.

### **Sector de La Paz**

La visita a organizaciones e instituciones involucradas en la problemática de la contaminación de los cursos de agua por actividad minera ha tenido la siguiente finalidad:

1. KfW (Banco de Desarrollo Alemán): En la visita a la KfW se ha obtenido información acerca del estado de los proyectos financiados por la KfW en la ciudad de Potosí.
  - El proyecto de agua potable de la ciudad de Potosí se encuentra en ejecución
  - El proyecto de Alcantarillado en la ciudad de Potosí ha sido paralizado, debido a la falta de operatividad de la empresa responsable del mismo (AAPOS)
  - El proyecto de financiamiento para la construcción del dique de colas de San Antonio sigue formando parte de la agenda de la KfW, debiendo sin embargo cumplimentarse algunos pasos previos al prometido financiamiento (que son en realidad fondos de donación). Las siguientes actividades se llevarán a cabo:
    - i. Se realizará una consultoría para evaluar quien será el administrador del mencionado dique, lo cual debería concluirse en febrero/marzo del 2005
    - ii. Una vez obtenidos los resultados de la consultoría (i) y siempre y cuando se aclaren los puntos pendientes, la KfW hará la solicitud para el desembolso de fondos al Ministerio de Cooperación Alemán (BMZ). Esto se podría obtener en el/los meses posteriores.
    - iii. Se hará la licitación y adjudicación de los trabajos a la empresa consultora adjudicada, la que en el mejor de los casos, podría otorgarse en el mes de junio/julio 2005.
    - iv. Se iniciará los trabajos de construcción del dique, lo que según el proyecto presentado por la empresa Fichtner, demandará un tiempo de unos 18 a 24 meses de ejecución. En este periodo el

dique no podría ser utilizado y recién a su conclusión final podría ser puesto en operación. Se estima que el dique pudiera estar concluido a inicios o mediados del año 2007. Con el vertido actual (de unas 1200 a 2000 toneladas de colas diarias), podría tener un tiempo de vida de 12 a 15 años. Durante la reunión se hizo presente el jefe de proyectos de la empresa Fichtner, el cual dio detalles técnicos y de concepción del proyecto a los presentes.

2. SIMBIOSIS (Servicios Integrales en Medio Ambiente): Se ha realizado una visita a esta empresa consultora, de manera tal de poder interiorizarse acerca de los servicios que brinda y conocer sus trabajos en el área de la cuenca del río Pilcomayo. La Dra. Margot Franken ha explicado su experiencia en el tema del análisis de la fauna de micro-invertebrados (fauna béntica) y ha dado a conocer el trabajo realizado sobre las micro cuencas del Cotagaita y Tumusla, trabajo financiado por la cooperación Danesa y encargado a SERGEOMIN. Este trabajo es propiedad de la prefectura de Potosí y del cual el proyecto Pilcomayo tratará de solicitar una copia.
3. COMIBOL: Se realizó una reunión en la sede de la Unidad de Medio Ambiente de la COMIBOL, donde el Ing. Ronald Boon, asesor técnico en Gestión Ambiental Minera y perteneciente a la Cooperación Danesa ha dado a conocer los avances en el tema del monitoreo de la calidad del agua en las áreas de operación del proyecto y que se encuentran dentro de la cuenca del río Pilcomayo. También se ha podido saber, que la prefectura del departamento de Potosí, a través de la dirección de Medio Ambiente y Recursos Naturales, ha solicitado a la cooperación danesa la suma de 400.000 USD como aporte de contrapartida para la construcción del dique de San Antonio de la KfW. Este aporte no ha sido autorizado, pero la cooperación danesa podría dar la aprobación del mismo, una vez se llegue a un acuerdo entre las partes.
4. Delegación de la Unión Europea: Se realizó una visita a la sede de la Unión Europea en la ciudad de La Paz, donde se conversó con el Ing. Marco Tomasi (responsable del Proyecto Pilcomayo) y el Ing. Nicolaus Hansmann. Los temas tratados fueron:
  - Ing. Tomasi: se comentó acerca del funcionamiento general del proyecto y el posible involucramiento del mismo en acciones concretas que logren viabilizar acciones tendientes a mejorar la descontaminación del río por actividad minera. Estas acciones deberán necesariamente contar con el aval y coordinación de la Delegación de la Unión Europea.
  - Ing. Hansmann: Se propuso lograr una coordinación entre el Proyecto *Apemin 2* de Oruro y el Proyecto Pilcomayo para optimizar resultados y ahorrar recursos en temas que pudiesen ser de interés común.

## ANEXO 3

# INDUSTRIA MINERA Y EFECTOS AMBIENTALES

## TRITURACIÓN Y MOLIENDA

La carga proveniente del interior de la mina es transportada por medio de volquetes de 8 T en las tolvas de gruesos. Las tolvas con capacidad distinta sirven para alimentar en manera secuencial las chancadoras de quijada utilizadas para reducir el tamaño del mineral a aproximadamente de un centímetro de diámetro y pasar sucesivamente al proceso de molienda.

El objetivo principal de la molienda es el de reducir ulteriormente el tamaño del mineral hasta lograr a menos de 0,2 milímetros, para asegurar la liberación de los elementos y compuestos de valor económico, los minerales de Pb-Zn y Ag de los estériles. Al mineral molido que viene de la planta de trituración se le agrega agua y algunos reactivos y se lleva a los molinos de barra y de bolas. Los molinos giran y las barras o bolas muelen el material.

## LOS INGENIOS (PLANTA DE BENEFICIO)

Para las suspensiones, que contienen agua, reactivos químicos y los minerales, comienza el beneficio a través del proceso de flotación selectiva de plomo/plata – zinc/plata.

Los principales productos de rendimiento económico son así minerales de plomo, zinc y plata mientras que minerales como la casiterita ( $\text{SnO}_2$ ) son actualmente descargados<sup>36</sup> en las aguas de las colas junto con otros minerales inertes por falta de tecnología apropiada para la reducción de los costos de recuperación.

La mayoría de los minerales de Pb-Zn pueden ser clasificados como minerales complejos y los problemas de recuperación aumentarán con el grado de diseminación de los minerales. La presencia de grandes cantidades de otros minerales como la pirita incrementa los problemas de recuperación y selectividad. Los minerales de Pb-Zn contienen variables cantidades de plata, arsénico, antimonio...

La práctica general en el tratamiento de minerales de Pb-Zn es flotar el concentrado de plomo primero, mientras los minerales de zinc son deprimidos. Después de la flotación de plomo, los minerales de zinc son reactivados con sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ).

## INTRODUCCIÓN A LA FLOTACIÓN

La flotación es hoy el método más importante de concentración mecánica. En su forma más simple, es un proceso de gravedad modificado en el que el mineral finamente triturado se mezcla con agua y otros reactivos. El proceso metalúrgico permite la separación de las especies valiosas contenidas en un mineral, del material estéril. Para lograr una buena separación, es necesario que los minerales sean liberados del material estéril. Esto se logra moliendo el mineral en circuitos de molienda. La separación se

---

36 después el colapso de la ITC (*International Tin Council*) en 1985

realiza en agua formándose una pulpa y en donde las partículas sólidas se mantienen en suspensión por medio de unos agitadores especialmente diseñados para este caso.

Al mineral finamente reducido en tamaño proveniente de la molienda se agrega una serie de reactivos químicos que causan una condición de hidrofobicidad sobre las partículas valiosas de tal manera que, al introducir aire al sistema, se produce un conjunto de burbujas sobre las cuales se adhieren estas partículas. Las burbujas, a medida que van ascendiendo, se van enriqueciendo de estas partículas hasta que se alcanza la superficie y en donde son posteriormente retiradas. Mientras tanto, las partículas de material estéril no han sido afectadas por los reactivos químicos y permanecerán suspendidas dentro de la pulpa.

Algunos sulfuros suelen flotar, mientras que otros y la ganga se van al fondo. En algunos casos ocurre lo contrario. En la mayoría de los procesos de flotación modernos se emplean agentes tensioactivos como el isobutil xantato para ayudar a flotar al metal o a la ganga. Esto permite que floten en agua sustancias de cierto peso. En uno de los procesos se mezcla con agua un mineral finamente triturado que contiene sulfuro de cobre, al que se le añaden pequeñas cantidades de aceite, ácido y otros reactivos de flotación. Cuando se insufla aire en esta mezcla se forma una espuma en la superficie, que se mezcla con el sulfuro pero no con la ganga. Esta última se va al fondo, y el sulfuro se recoge de la espuma.

El proceso de flotación ha permitido explotar muchos depósitos minerales de baja concentración, e incluso residuos de plantas de procesamiento que utilizan técnicas menos eficientes.

La flotación diferencial permite concentrar mediante un único proceso diversos compuestos metálicos a partir de un mineral complejo. La recuperación de las especies valiosas se hace en un solo producto llamado concentrado. Es el caso de la planta de Porco en la cual después de una separación de todos los sulfuros de la ganga se aplica la flotación diferencial entre los sulfuros de Pb-Ag y Zn-Ag, descartando los sulfuros de Fe. El plomo se flota en un concentrado de plomo inhibiendo la flotación de Zinc. Después de que la flotación del plomo ha terminado, el zinc es activado y recuperado en un concentrado separado.

Los AGENTES MODIFICADORES se usan para modificar la superficie de minerales (depresores) o para modular el entorno de flotación (activadores y modificadores).

Los DEPRESORES son sustancias orgánicas o inorgánicas que previenen la absorción del Colector en la superficie del mineral o previenen la adición de burbujas de aire en la superficie del mineral. Ejemplos de estos reactivos son las sales de cianuro, sulfuro / hidrosulfuro que depresan sulfuros minerales. Silicatos sódicos líquidos como almidón, carboximetil celulosa y cuarzo se pueden usar para depresar el talco y otros minerales silicios.

Los ACTIVADORES son esencialmente compuestos inorgánicos que aumentan la adherencia de los colectores al mineral valioso, que no tendría lugar sin su presencia. El mejor ejemplo de esto es la activación de sphalerite con sulfato de cobre y la sulfidización de los minerales oxidicos. Los modificadores se usan para modular el entorno de flotación, principalmente el valor del pH. En general, el consumo de estos reactivos como por ejemplo la cal puede ser un factor de costo importante relativo a los productos químicos usados en el proceso de flotación.

El uso de productos químicos en la industria minera extractiva es relativamente reciente, mitad del siglo XX. En particular el uso intensivo de productos químicos como el

isobutilxantato de sodio comporta problemas desconocidos de contaminación de las aguas. La IARC (*International Agency for Research on Cancer*) no ha evaluado el grado de cancerogenicidad del producto tal como la ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*) no tiene estudios de los efectos a medio-largo plazo para la salud animal y humana.

## LA QUÍMICA DEL SISTEMA ACUOSO

Todos los elementos pesados se encuentran presentes en los medios acuáticos, aunque sus concentraciones, en ausencia de contaminación, son muy bajas. Los metales pesados se encuentran tanto como coloides, partículas minerales en suspensión, fases disueltas como cationes o iones complejos. Las formas coloidales suelen dar lugar a la formación de hidróxidos, mientras que las partículas sólidas incluyen una gran variedad de minerales. Las fases disueltas pueden a su vez ser capturadas por adsorción y absorción en arcillas o hidróxidos. Adicionalmente, los compuestos orgánicos pueden constituir fases con gran capacidad de captura de cationes metálicos, que en ocasiones dan lugar a fases extremadamente tóxicas como sucede con el metilmercurio ( $\text{CH}_3\text{Hg}$ ).

La química del sistema acuoso regula las tasas de adsorción/ desorción en el sistema agua-sedimento. La adsorción/absorción remueve el metal de la columna de agua; la desorción lo incorpora nuevamente a ésta.

Los parámetros que regulan el sistema son: la salinidad, el potencial redox (Eh) y el pH: Un incremento de la salinidad conlleva una competencia, entre metales pesados y metales grupos I y II, por los sitios de ligazón (p.ej. espaciado interlaminar en las arcillas, lo que se traduce en la expulsión de los metales pesados, y su devolución a la columna de agua. Un incremento del Eh genera la inestabilidad de los compuestos reducidos como los sulfuros, poniendo el metal en solución.

Un decrecimiento del pH tiene dos efectos:

- Induce la disolución de compuestos metal-carbonato (p.ej. cerusita:  $\text{PbCO}_3$ );
- Aumenta la solubilidad de los metales disueltos.

El decrecimiento del pH puede ligarse directamente a la serie de fenómenos fisico-químicos que se derivan de la oxidación de especies sulfuradas, particularmente la pirita ( $\text{FeS}_2$ ). La consecuencia directa es la formación del denominado drenaje ácido. El sistema se encuentra así fuertemente regulado por:

- Las cantidades iniciales de pirita y de sulfuros en el yacimiento
- La presencia de bacterias oxidantes (p.ej. *T. ferrooxidans*)
- Los niveles de oxígeno.

Las condiciones físicas y químicas dominantes y los contaminantes en los medios acuáticos determinan el tipo de organismos que viven en ese medio. Se han propuesto varias clasificaciones ecológicas de los organismos acuáticos; la más aceptada hoy día es: **Plancton**. Comprende los organismos que viven suspendidos en las aguas y que, por carecer de medios de locomoción o ser muy débiles, se mueven o se trasladan a merced de los movimientos de las masas de agua o de las corrientes. Generalmente son organismos pequeños, la mayoría microscópicos.

**Necton**. Son organismos capaces de nadar libremente y, por tanto, de trasladarse de un lugar a otro recorriendo a veces grandes distancias (migraciones). En las aguas dulces, los

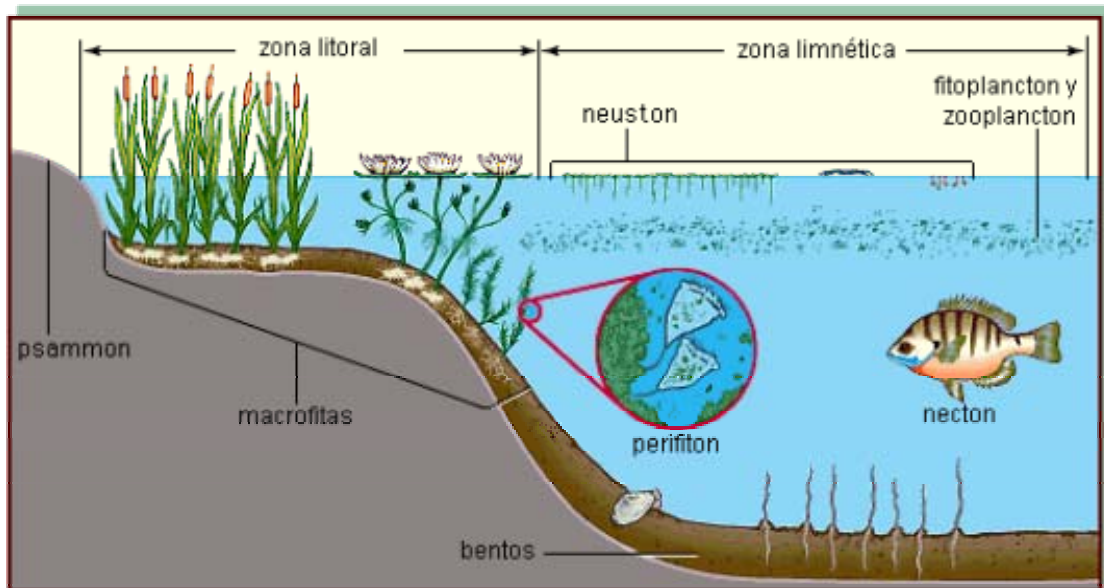
peces son los principales representantes de esta clase, aunque también encontramos algunas especies de anfibios y otros grupos.

**Bentos.** Comprende los organismos que viven en el fondo o fijados a él y por tanto dependen de éste para su existencia. La mayoría de los organismos que forman el bentos son invertebrados.

**Neuston.** A este grupo pertenecen los organismos que nadan o "caminan" sobre la superficie del agua. La mayoría son insectos.

**Seston.** Es un término adoptado recientemente y se aplica a la mezcla heterogénea de organismos vivos y no vivos que flotan sobre las aguas.

**Perifiton.** Organismos vegetales y animales que se adhieren a los tallos y hojas de plantas con raíces fijadas en los fondos.



### *Límites de toxicidad*

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos ha determinado una serie de límites para las concentraciones de metales pesados que se reportan como referencia. Estos metales pueden causar graves trastornos en los seres vivos, y finalmente ocasionar la muerte. Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos:

*Vida acuática en sistema de agua dulce (ríos lagos):*

<b>Metal</b>	<b>Dureza del agua (mg/l)</b>	<b>Límite máximo (µg/l)</b>
As		50
Be		130 (+)
Cd	50	0.66 (*)
	150	1.10 (*)
	200	2.00 (*)
Cu	50	6.50 (*)
	150	12.00 (*)
	200	21.00 (*)
Hg		0.012 (*)
Ni	50	56.00 (x)
	150	96.00 (x)
	200	160.00 (x)
Pb	50	1.30 (*)
	150	3.20 (*)
	200	7.70 (*)
Zn	50	180.00 (#)
	150	320.00 (#)
	200	570.00 (#)

+: Concentración promedio por 1 hora; x: concentración promedio en 24 horas; \*: concentración promedio en 4 días; #: niveles que no pueden excederse en ningún lapso de tiempo.

*Vida acuática estuarina o en zonas de costas:*

<b>Metal</b>	<b>Límite máximo (µg/l)</b>
As	50
Cd	8 (*)
Cu	2.9 (+)
Hg	0.025 (*)
Ni	7.10 (x)
Pb	5.8 (*)
Zn	76.6 (*)

+: concentración promedio por 1 hora; x: concentración promedio en 24 horas; \*: concentración promedio en 4 días.

*Consumo por los seres humanos:*

<b>Metal</b>	<b>Límite máximo (µg/l)</b>
As	0.05 mg/l (+)
Cd	10 µg/l (*)
Cr	0.05 mg/l (+)
Cu	1.0 µg/l (#)
Hg	144 ng/l (*)
Ni	632.0 µg/l (*)
Pb	50.0 µg/l (*) (adultos)
Zn	5.0 µg/l (*)

\*: criterios para el agua; +: máximo nivel de contaminación; #: nivel que jamás debe ser superado.

*Efectos ambientales*

Los organismos pueden verse severamente afectados por pequeñas concentraciones de elementos pesados como se especifica en las tablas anteriores. En el caso de los organismos acuáticos, puede que algunos determinados valores no induzcan su muerte, sin embargo desarrollarán una serie de problemas fisiológicos y metabólicos (a estas dosis se les denomina subletales). Entre estos problemas podemos mencionar:

- Cambios histológicos o morfológicos en los tejidos.
- Cambios en la fisiología como supresión del crecimiento y desarrollo, torpeza para nadar, etc.

- Cambios en la bioquímica del organismo, tales como en la actividad enzimática, y química de la sangre.
- Trastornos del comportamiento.
- Cambios en la reproducción.

Algunos organismos pueden regular las concentraciones de metales presentes en sus tejidos. Por ejemplo, los peces y crustáceos pueden excretar metales esenciales para su metabolismo (p.ej. Cu, Zn, Fe), siempre y cuando estos superen las dosis requeridas. Desgraciadamente otros metales (no esenciales) tales como el mercurio o el cadmio son excretados con mayor dificultad.

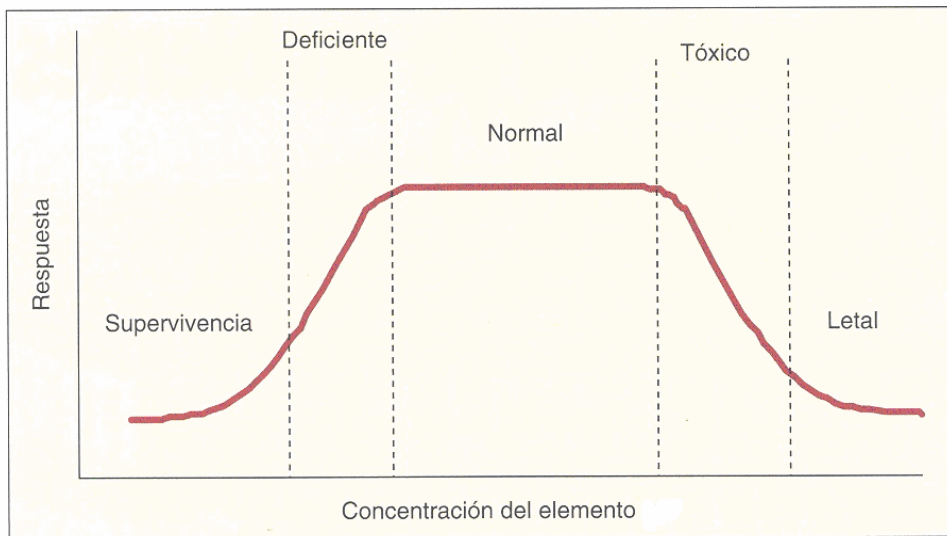
Las plantas acuáticas (algas) y los bivalvos (p.ej. mejillones, ostras) no son capaces de regular con éxito las concentraciones de metales pesados, y de ahí puede derivarse una serie de problemas. Así por ejemplo, el mercurio puede hacer decrecer dramáticamente la capacidad de fotosíntesis de un alga (p.ej. *Macrocystes*). Los bivalvos por su parte acumulan los metales pesados, pudiendo pasar estos directamente al ser humano por ingestión. De ahí que se deben de tomar precauciones extremas para el consumo en zonas sujetas a altos niveles de contaminación.

Las vías de incorporación de los metales pesados a los organismos acuáticos son las siguientes:

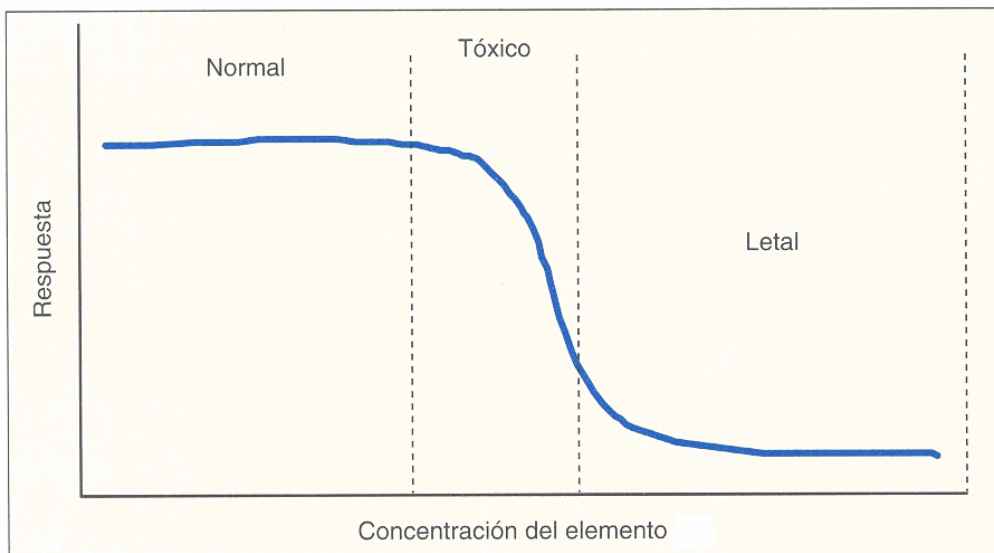
- Cationes metálicos libres que son absorbidos a través de los órganos respiratorios externos (agallas), los cuales pasan directamente a la sangre.
- Cationes metálicos libres que son adsorbidos por el cuerpo y luego pasivamente difundidos al torrente sanguíneo.
- Metales que son adquiridos durante la ingestión de organismos (otros peces, bivalvos, o algas) contaminados.
- En el caso de las algas, el proceso ocurre por absorción a través de las paredes celulares y difusión posterior.

### *TOXICIDAD*

Muchos elementos o compuestos químicos pueden ser clasificados como tóxicos, si bien unos lo serán más que otros. Así, se define como nivel de toxicidad de una sustancia como la cantidad que causa el correspondiente efecto adverso. La relación entre la cantidad y el efecto o respuesta de un elemento es distinta si se trata de elemento esencial o no (tóxico). En la figura siguiente se puede ver la relación entre concentración y respuesta para elementos esenciales (**Cr, Mo, Zn...**)



La relación entre concentración y respuesta para elementos tóxicos (As, Cd, Hg...) se caracteriza por una concentración mínima, pero no indispensable, en el medio ambiente que los seres vivos pueden aceptar al pasar un nivel de concentración de toxicidad:



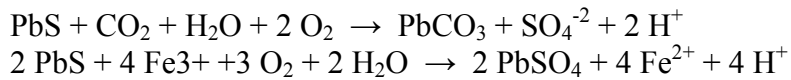
Por otra parte, la toxicidad de los metales depende en gran medida de la forma química en la cual sean introducidos en el organismo: por lo general los compuestos orgánicos de los metales son más tóxicos que los inorgánicos; por ejemplo, los compuestos orgánicos de mercurio y cadmio son 10-100 veces más tóxicos que los inorgánicos. Sin embargo esto no ocurre así con el arsénico, en el cual las formas orgánicas son menos tóxicas. Incluso el estado de oxidación puede determinar el carácter tóxico de un metal: un ejemplo notable es el caso del cromo; mientras que el  $\text{Cr}^{3+}$  es un elemento esencial, el  $\text{Cr}^{6+}$  es altamente cancerígeno.

### *TOXICIDAD DE ALGUNOS METALES*

#### **Plomo**

El plomo se encuentra presente en un gran número de minerales, siendo la forma más común el sulfuro de plomo (galena:  $\text{PbS}$ ). También son comunes, aunque en orden

decreciente, la cerusita ( $\text{PbCO}_3$ ) y la anglesita ( $\text{PbSO}_4$ ). El plomo es un metal difícilmente movilizable, y bajo condiciones oxidantes la galena da origen a minerales tales como la cerusita y anglesita:



Así, el principal riesgo relacionado con la minería del plomo no radica en la posible puesta en solución de este metal (precipita rápidamente como carbonato o sulfato), sino en lo que concierne a los procesos metalúrgicos de las menas de plomo (fundiciones). Cabe destacar que el problema con el plomo no es nuevo. Estudios en Suecia revelan que por lo menos el 50 % de la contaminación en suelos del país fue depositada en períodos anteriores al año 1800.

El particulado de plomo relacionado con problemas metalúrgicos constituye el problema principal, pero existen otras fuentes que entrañan también una peligrosidad extrema. En los años 90 se constató en la ciudad de Antofagasta (Chile) que habían niños que presentaban altos contenidos de plomo en la sangre. La fuente del problema pudo ser determinada, y eran minerales y concentrados de plomo que se acumulaban sin protección en las instalaciones portuarias (pertenecientes a Bolivia), para su posterior envío.

El particulado fino de plomo (10-100  $\mu\text{m}$ ) puede ser extremadamente peligroso por las siguientes razones:

- Se adhiere más fuertemente a la piel.
- Es más soluble que el particulado grueso en el tracto gastrointestinal.
- Es fácilmente absorbible a través del sistema respiratorio.

El plomo es un metal carente de valor biológico, es decir, no es requerido para el funcionamiento normal de los seres vivos. Debido a su tamaño y carga, el plomo puede sustituir al calcio ( $\text{Pb}^{2+}$ : 0.84 Å;  $\text{Ca}^{2+}$ : 0.99 Å) siendo su sitio de acumulación los tejidos óseos. Esta situación es particularmente alarmante en los niños, que debido a su crecimiento incorporan altas cantidades de calcio. Altas dosis de calcio hacen que el plomo sea "removido" de los tejidos óseos, y que se incorpora al torrente sanguíneo. Una vez ahí localizado puede inducir nefrotoxicidad, neurotoxicidad, e hipertensión. Niveles de plomo en la sangre de 0,48  $\mu\text{g}/\text{l}$  pueden inducir en los niños:

- Daño durante el desarrollo de los órganos del feto.
- Daño en el sistema nervioso central.
- Reducción de las habilidades mentales e iniciación de desórdenes del comportamiento.
- Daño en las funciones del calcio (anteriormente discutido).

A su vez, niveles del orden de 1,2  $\mu\text{g}/\text{l}$  pueden inducir:

- Descenso del coeficiente intelectual (CI). Problemas de desarrollo cognitivo y del comportamiento.
- Déficits neurológicos que pueden persistir hasta la adolescencia.
- Elevación de los umbrales auditivos.
- Peso reducido en recién nacidos. Desarrollo cognitivo temprano anormal.

En adultos que trabajan en ambientes expuestos a la contaminación con plomo, el metal puede acumularse en los huesos, donde su vida media es superior a los 20 años. La osteoporosis, embarazo, o enfermedades crónicas pueden hacer que éste plomo se incorpore más rápidamente a la sangre. Los problemas relacionados con la sobre exposición al plomo en adultos incluyen:

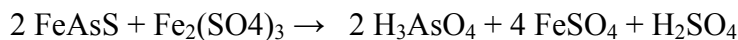
- Daño en los riñones.
- Daño en el tracto gastrointestinal.
- Daño en el sistema reproductor.
- Daño en los órganos productores de sangre.
- Daños neurológicos.
- Abortos.

### Arsénico

El arsénico se encuentra presente en más de 200 especies minerales, siendo la arsenopirita (FeAsS), la enargita (Cu<sub>3</sub>AsS<sub>4</sub>), las más comunes. Por razones no determinadas, la arsenopirita es muy común en los yacimientos minerales europeos (p.ej. sulfuros masivos de la faja pirítica de España-Portugal), mientras que la enargita lo es en los yacimientos de la cadena andina, donde constituye una mena principal de cobre (pórfidos cupríferos y epitermales de Au-Ag). La solubilización de las formas sulfuradas de arsénico no es fácil. Esto está muy claro en el caso de la arsenopirita, la que por ser en ocasiones portadora de inclusiones de oro, ha constituido un tema de numerosos estudios con resultados poco claros hasta la fecha. La reacción fundamental en medio ácido es:



Si además hay piritita en la mena, entonces el sulfato férrico producido actuará de la siguiente manera coadyuvando a la oxidación-lixiviación del arsénico:



El arsénico puede precipitar finalmente como FeAsO<sub>4</sub>.

Sin restarle importancia al problema de la solubilización de especies minerales arsenicales, la principal fuente de contaminación está relacionada, al igual que en el caso de plomo, con el tratamiento metalúrgico de los minerales de arsénico. En concreto, los procesos de fundición de concentrados de cobre, que incluyan la presencia de minerales arsenicales (p.ej. enargita), pueden dar lugar a intensos problemas de contaminación por vía aérea (arsénico que escapa por las chimeneas), en la forma de As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. El arsénico que así escapa se deposita luego en los suelos del entorno de la fundición. El arsénico en los suelos puede ser disuelto y adsorbido/absorbido por las arcillas o la materia orgánica. Muchos de estos procesos son mediados por la materia orgánica la que puede producir transformaciones del tipo:

- Cambios de redox que inducen la transformación arsenito-arsenato.
- La reducción y metilación del arsénico.
- La biosíntesis de compuestos de arsénico.

Las formas solubles del arsénico (p.ej. ácidos metil arsénico [MMA] y dimetil arsénico [DMA]) son fuertemente tóxicas. La ingestión de grandes dosis lleva a problemas gastrointestinales, cardiovasculares, disfunciones del aparato nervioso, y finalmente a la muerte. El arsénico ha sido uno de los venenos de largo plazo más utilizados en la historia de la humanidad.

Dosis bajas pero sostenidas superiores a 0,75 mg m<sup>-3</sup> por año (p.ej. 15 años con concentraciones de 50 µg m<sup>-3</sup>) pueden llevar al desarrollo de cánceres.

La vida acuática y terrestre muestra una amplia gama de sensibilidades a las distintas especies arsenicales. En general las formas inorgánicas son más tóxicas que las orgánicas,

y el arsenito más peligroso que el arsenato. Los arsenitos pueden fijarse a las proteínas, mientras que el arsenato afecta a la fosforilización oxidativa.

Los organismos marinos contienen residuos arsenicales que van desde  $<1$  a  $100 \text{ mg k}^{-1}$ , los cuales se encuentran como arsenoazúcares (en las algas) o arsenobetaina (en invertebrados y peces). Las plantas terrestres pueden acumular arsénico por captación a través de las raíces, o por adsorción de arsénico aerotransportado, en las hojas.

## Mercurio

La forma principal de mercurio en la naturaleza es el cinabrio ( $\text{HgS}$ ), el que constituye la mena principal para la obtención de este metal. Otras formas minerales incluyen la corderoita ( $\text{Hg}_3\text{S}_2\text{Cl}_2$ ), la livingstonita ( $\text{HgSb}_4\text{S}_8$ ), y formas supergénicas tales como el mercurio nativo ( $\text{Hg}_0$ ), el calomelano ( $\text{HgCl}_2$ ) y la schuetteita ( $\text{Hg}_3(\text{SO}_4)_2\text{O}_2$ ).

El mercurio posee una de las peores reputaciones entre los metales pesados. El incidente de la Bahía de Minamata (Japón, años 50s-60s) bastó para que este elemento infundiese alarma pública en todas las regiones del mundo donde podía haber fuentes de contaminación relacionadas con este metal. Consideraciones económicas aparte, todas las investigaciones indican claramente que el mercurio puede constituir una amenaza para la salud humana y la vida silvestre. Ahora bien, el riesgo viene determinado por los siguientes factores:

- El tipo de exposición al mercurio.
- La especie de mercurio presente (algunas son más tóxicas que otras).
- Los factores geoquímicos y ecológicos que influyen en la forma de migración del mercurio en el medio ambiente, y los cambios que puede sufrir durante dicha migración.

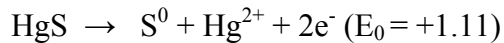
La principal fuente de contaminación con mercurio, en relación con la actividad minera, viene de los gases emitidos por las plantas de tratamiento de cinabrio. El mercurio gaseoso emitido por los hornos (especialmente en los antiguos procesos de tratamiento), es depositado en los suelos que rodean a las instalaciones metalúrgicas como  $\text{Hg}^{2+}$ . Esto puede ocurrir por depositación directa de emisión de  $\text{Hg}^{2+}$  o por conversión de vapores de  $\text{Hg}^0$  a  $\text{Hg}^{2+}$  (p.ej.  $2\text{Hg}^0 = \text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^-$   $E_0 = +0.80$ ), proceso este último mediado por el ozono. Una vez depositado el  $\text{Hg}^{2+}$  éste puede formar complejos con la materia orgánica de los suelos (ácido fúlvico y/o húmico).

De todas las especies de mercurio conocidas, la más peligrosa es sin duda el metilmercurio ( $\text{CH}_3\text{Hg}$ ). Aunque la forma exacta en que se produce la metilación del mercurio se desconoce, se sabe que en el proceso intervienen bacterias que participan en el ciclo  $\text{SO}_4^{2-}$   $\text{S}^{2-}$ . Estas bacterias, que por lo tanto contendrán metilmercurio, son consumidas por el peldaño superior de la cadena trófica, o bien lo excretarán. En este último caso el metilmercurio puede ser rápidamente adsorbido por el fitoplancton y de ahí pasar a los organismos superiores. Debido a que los animales acumulan metilmercurio más rápido de lo que pueden excretarlo, se produce un incremento sostenido de las concentraciones en la cadena trófica (biomagnificación). Así, aunque las concentraciones iniciales de metilmercurio en el agua sean bajas o muy bajas, los procesos biomagnificadores acaban por convertir el metilmercurio en una amenaza real para la salud humana.

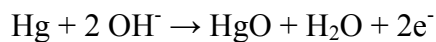
El metilmercurio daña al organismo de las siguientes maneras:

- Afecta al sistema inmunológico
- Altera los sistemas genéticos y enzimáticos
- Daña el sistema nervioso: coordinación, sentidos del tacto, gusto, y visión.
- Induce un desarrollo anormal de los embriones (efectos teratogénicos); los embriones son 5 a 10 veces más sensibles a los efectos del mercurio que un ser adulto.

El cinabrio, aunque es una forma relativamente estable de mercurio, puede también sufrir transformaciones que resultan en una posible especiación indeseable. Así, en medio ácido y oxidante tenemos:



Esta reacción pone en solución al mercurio, el que puede así formar complejos con la materia orgánica (peligrosidad). No obstante, en un medio alcalino oxidante el mercurio precipitará como óxido:



lo que en principio parece una forma más o menos estable, mientras el sistema mantenga la alcalinidad y condiciones oxidantes.

### **Cadmio**

Los minerales de cadmio, no se encuentran en concentraciones y cantidades suficientes como para justificar una actividad minera específica del elemento. Entre los minerales de cadmio, la greenockita (CdS) es el más común. Este mineral se encuentra casi siempre asociado con la esfalerita (ZnS). De esta manera, el cadmio se recupera principalmente como un subproducto de la minería, fundición, y refinación del zinc, y en menor grado de la del plomo y cobre. En promedio se recuperan unos 3 Kg de cadmio por tonelada de zinc.

Debido a su toxicidad, el cadmio se encuentra sujeto a una de las legislaciones más severas en términos ambientales y de salud humana. En la vida acuática, el cadmio puede incorporarse a los peces a través de dos vías principales:

- Ingestión
- Introducción en las agallas.

El cadmio así adquirido se acumula en el hígado, riñones, y en el tracto gastrointestinal. Sus efectos son los siguientes:

- Problemas en las agallas y riñones
- Pobre mineralización de los huesos
- Anemia
- Crecimiento retardado
- Anormalidades del desarrollo y del comportamiento

En el caso de los seres humanos, el cadmio se puede adquirir por dos vías: ingestión e inhalación. Sus efectos pueden ser divididos en dos categorías:

- Agudos: fiebre de vapores de metal (*metal fume fever*) causada por una exposición severa; los síntomas son equivalentes a los de la gripe; en 24 horas se desarrolla generalmente un edema pulmonar agudo, el que alcanza su máximo en 3 días; si no sobreviene la muerte por asfixia, el problema puede resolverse en una semana.
- Crónicos: la consecuencia más seria del envenenamiento por cadmio es el cáncer. Los efectos crónicos que primero se observan son daño en los riñones. Se piensa que el cadmio es también el causante de enfisemas pulmonares y enfermedades de los huesos (osteomalacia y osteoporosis). Los problemas óseos han sido observados en Japón (el problema con metilmercurio; Incidente Minamata), y la enfermedad "itai-itai" (por

consumo de arroz contaminado con cadmio; causa: irrigación). Otros problemas incluyen anemia, decoloración de los dientes, y pérdida del sentido del olfato (anosmia).

### *INDICADORES QUÍMICOS DE CONTAMINACIÓN*

Un indicador para evaluar la dispersión de los contaminantes en la cuenca alta del río Pilcomayo y que diera cierta información sobre el potencial riesgo de contaminación consecuencia de la presencia de restos del vertido en los sedimentos afectados podría basarse en la determinación del contenido en **S-sulfuro que es principalmente S-pirítico**. Este indicador presenta las ventajas de la rapidez y escaso costo de análisis<sup>37</sup>.

Se necesita evaluar los niveles de fondo de metales pesados en los suelos y sedimentos no contaminados, la zona de estudio, y determinar el ratio de sulfuros totales, sulfuros antrópicos y estableciendo de esta manera el nivel de referencia de sulfuros para los suelos, limos a la orilla del río y sedimentos en el cauce, en los primeros centímetros del suelo (20 -200 cm, a evaluar)

#### *Bibliografía y Libros:*

*Krauskopf, K.B. & Bird, D.K. 1995. Introduction to Geochemistry. MacGraw-Hill, NY, 647 pp.*

*Scheiner, B.J., Doyle, F.M. & Kawatra, S.K. (Eds.). 1989. Biotechnology in Minerals and Metal processing. Society of Mining Engineers Inc., Littleton (CO), 209 pp.*

---

<sup>37</sup> Para la determinación del S-pirítico es necesario eliminar las formas de S-sulfato solubles y/o absorbidas. En el residuo seco se determina el contenido en S mediante analizador elemental. El contenido de S obtenido representa el S-sulfuro más S-orgánico (el contenido de materia orgánica de los suelos es normalmente bajo y la relación C/S es elevada, así puede considerarse despreciable el S-orgánico frente al S-sulfuro pirítico)

## ANEXO 4

# LA CLARIFICACION DEL AGUA

### *INTRODUCCIÓN*

Las aguas naturales del Pilcomayo después de pasar a través de los humedales artificiales y a mayor razón si se toman crudas del río, contienen sustancias tanto disueltas como en suspensión, ambas pueden ser orgánicas e inorgánicas. Las materias en suspensión pueden tener un tamaño y densidad tal que pueden eliminarse del agua por simple sedimentación, pero algunas partículas son de un tamaño muy pequeño y tienen una carga eléctrica superficial que las hace repelerse continuamente, impidiendo su aglomeración y formación de una partícula más pesada y poder así sedimentar. Estas partículas, con una dimensión que suele estar comprendida entre 1  $\mu\text{m}$  y 0,2  $\mu\text{m}$ , son verdaderas partículas coloidales. La coagulación en el proceso de tratamiento del agua tiene por objeto agrupar estas partículas coloidales dispersas en el agua en otras más voluminosas y pesadas que puedan ser separadas más fácilmente del agua.

Mediante el proceso de coagulación se neutraliza la carga eléctrica del coloide anulando las fuerzas electrostáticas repulsivas, esta neutralización suele realizarse aplicando al agua determinadas sales de aluminio o hierro (coagulantes); generalmente se aplica sulfato de aluminio, de forma que los cationes trivalentes de aluminio o hierro neutralizan las cargas eléctricas negativas que suelen rodear a las partículas coloidales dispersas en el agua.

La coagulación se consigue mediante una difusión rápida de las sustancias coagulantes en el agua objeto del tratamiento, empleando en lo posible, medios de agitación rápida. Tras la neutralización de las partículas coloidales, es decir una vez conseguida la desestabilización coloidal, las partículas formadas están en disposición de aglomerarse, esta aglomeración de las partículas descargadas ayudadas ahora por una agitación lenta, es el objetivo de la floculación.

### *MEZCLADOR RAPIDO*

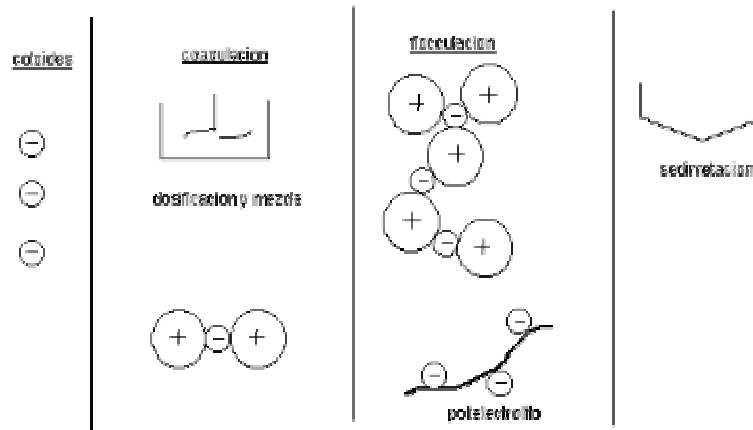
La coagulación y la floculación tienen lugar en sucesivas etapas, de forma que una vez desestabilizadas las partículas, la colisión entre ellas permita el crecimiento de los microflóculos, apenas visibles a simple vista, hasta formar flóculos mayores. Al observar el agua que rodea a los microflóculos, ésta debería estar clara, si esto no ocurre, lo más probable, es que todas las cargas de las partículas no han sido neutralizadas y por tanto la coagulación no se ha completado, en este caso será necesario añadir más coagulante.

En la eficacia de la coagulación influyen diversos factores entre los que destaca el pH y otras características físico-químicas del agua, así como una adecuada energía de agitación rápida para conseguir una apropiada dispersión del coagulante y proporcionar las necesarias colisiones entre las partículas para conseguir una óptima coagulación. El tiempo de esta mezcla rápida, en la correspondiente cámara de mezcla, suele ser del orden de 1 a 3 minutos.

A continuación de la etapa de coagulación tiene lugar un segundo proceso llamado floculación, éste tiene lugar tras someter a los microflóculos a una agitación lenta que permite la unión de estos en agregados mayores o flóculos visibles ya a simple vista y con la suficiente cohesión y densidad para someterlos a la siguiente etapa de sedimentación. La floculación requiere un menor gradiente de agitación para impedir la rotura y

disgregación de los flóculos ya formados. Los flóculos rotos son difíciles de retornar a su tamaño inicial.

Importante: La floculación se ve mejorada con el empleo de coadyuvantes de ésta, conocido como poli electrolitos, estos suelen ser macromoléculas de polímeros orgánicos (tipo poliacrilamidas).



## PRODUCTOS QUÍMICOS Y NATURALES

El alumbre<sup>38</sup> es un compuesto químico muy práctico de utilizar y económico. Su presentación es en forma de cristales de color blanco. Dependiendo de la turbiedad del agua, permite utilizar una dosis adecuada en polvo sin afectar la salud de las personas y sedimentando las partículas suspendidas en el fondo del recipiente.

Este producto se puede conseguir en algunas farmacias o establecimientos que distribuyan productos químicos en general. Existen muchos otros productos comerciales para utilizarse como el cloruro de hierro.

Se realiza la coagulación a fin de eliminar las partículas en suspensión coloidal. Para facilitar este proceso se añade una pequeña cantidad de sulfato de aluminio o de cloruro férrico<sup>39</sup> en medio débilmente básico. Estas sustancias provocan la precipitación de los hidróxidos correspondientes y que arrastran las partículas en suspensión que por sí mismas no sedimentarían:

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O} \text{ ----> } \text{Al}(\text{OH})_3$  precipitado, se deposita en el fondo

$\text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{O} \text{ ----> } \text{Fe}(\text{OH})_3$  precipitado, se deposita en el fondo

### CLARIFICACIÓN DEL AGUA CON COMPUESTOS NATURALES

#### Pepas de durazno y habas – (Intento)

Procedimiento

1. Secar las pepas de durazno y las habas
2. Moler en forma separada cada uno de los productos, tratando de obtener un polvo

<sup>38</sup> Sulfato de Aluminio (PM =599,75 g/mol) - fórmula química:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3 \text{ H}_2\text{O}$ . Este producto se puede conseguir en algunas farmacias o establecimientos que distribuyan productos químicos en general.

<sup>39</sup> Ejemplo: Sulfato de Hierro para coagulación y floculación : dosis 300 mg/L

3. Adicionar 0,5 gramos de cualquiera de los productos por cada litro de agua a tratar
4. Remover durante un minuto con una paleta de agitación en forma circular
5. Mantener el agua en reposo durante dos horas para que sedimenten las partículas al fondo del recipiente
6. Utilizar la parte superior del volumen de agua

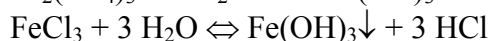
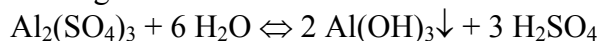
### **Penca de tuna - (Intento)**

#### Procedimiento

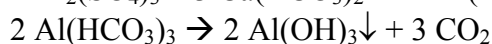
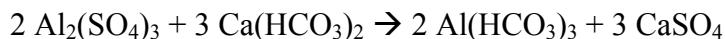
1. Cortar en trozos cuadrados de cuatro centímetros de longitud la penca de tuna
2. Proceder a machacarla sobre piedras planas
3. Considerando un recipiente de 20 litros de capacidad, verter 5 gramos (1/2 cucharadita) del producto machacado
4. Remover durante un minuto
5. Dejar sedimentar por el tiempo de dos horas
6. Utilizar la parte superior del volumen de agua

### *IMPORTANCIA DEL pH EN LA COAGULACIÓN*

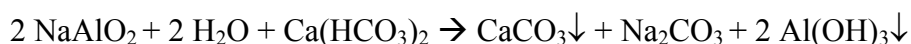
Usando sulfato de alúmina como coagulante, podemos expresar la reacción de ionización en el agua así:



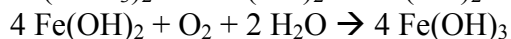
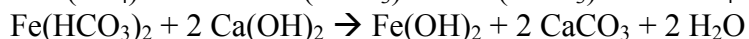
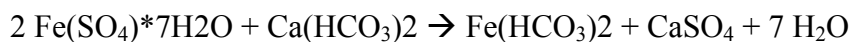
Al reaccionar los iones  $\text{Al}^{3+}$  con los iones hidróxilo, consecuencia de la alcalinidad del agua (bicarbonatos) o por la cal apagada o soda añadidas si era insuficiente, se formará hidróxido de aluminio:



Para aguas con un pH elevado puede ser utilizado el aluminato de sodio.



Si se utiliza el hierro como sulfato de  $\text{Fe}^{2+}$ , en presencia de bicarbonatos se obtienen las mismas reacciones del aluminio más la oxidación del hierro por acción del oxígeno disuelto o por borboteo de aire:



con un pH ideal para la coagulación de 8,5-9 (hasta un pH de 10);

Para cada tipo de agua hay un pH óptimo, en el que la precipitación de hidróxido de aluminio es máxima

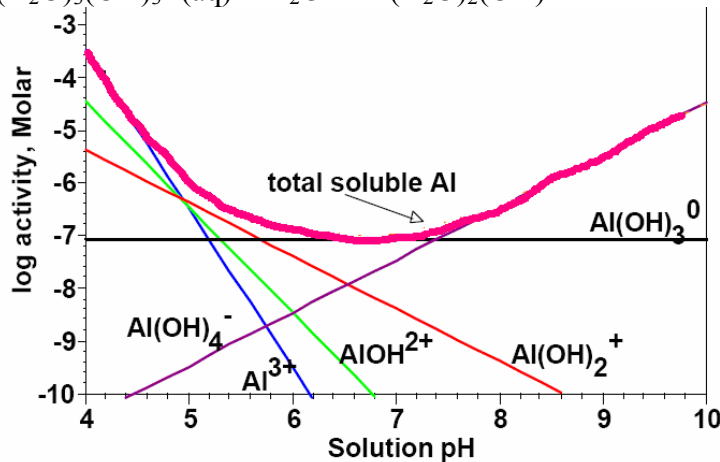
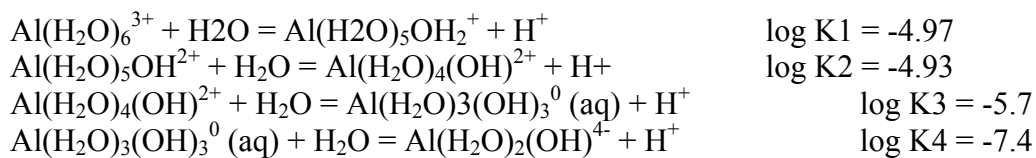
Las anteriores reacciones son reversibles, y, por otra parte, si la dosis de álcali utilizado es insuficiente o excesiva, puede dar lugar a la formación de sales básicas o ácidas de aluminio (aluminatos) bastante complejas y, que además, son solubles. Motivo éste por el cual el agua filtrada puede contener indicios de aluminio, mientras que el hidróxido de aluminio formado a un pH determinado no es soluble, por lo que difícilmente pasará a

través del filtro en la fase de filtración, subsiguiente a la coagulación, floculación y sedimentación.

La coagulación depende de una serie de características físico-químicas del agua y muy especialmente del pH. Se sabe que para algunas determinadas aguas hay una zona de pH en la que una dosis mínima de la sal de  $Al^{3+}$  origina una coagulación óptima, lo que dará lugar a la formación de un buen floculo; se observa que para pH iniciales comprendidos entre 6,9 y 8,0, el pH óptimo de coagulación se sitúa en la región de 6,7 a 6,9, mientras que también se ha observado que a medida que el pH inicial del agua se hace mayor, la dosis de coagulante requerida es mayor pudiendo deducirse que para los pH iniciales más elevados, una parte importante del sulfato de alúmina es empleada en la acidificación, por tanto, podría acidificarse previamente el agua, mediante ácidos y economizarse así parte del sulfato de alúmina.

La hidrólisis del sulfato de alúmina debe ser total, **para asegurarse que el mismo no se quede en solución en el agua filtrada**. Siendo el pH de hidrólisis total del sulfato de alúmina del orden de 6,5- 7,5, a pH inferiores o superiores, puede quedar en solución y encontrarse por tanto en el agua filtrada.

A medida que el pH cambia se obtienen distintos hidróxidos hidratados, recordando que lo único verdaderamente insoluble y que se quiere obtener es el  $Al(OH)_3 \cdot 3H_2O$



De los anteriores conceptos se deduce que para obtener una buena coagulación se debe trabajar a un pH comprendido entre el de hidrólisis y el de coagulación, y, por otra parte, para que la coagulación origine una buena floculación se deberá usar la menor dosis posible de sulfato de alúmina.

Vemos que tres factores hidrólisis, coagulación y floculación se deben controlar continuamente; podemos decir entonces que de la naturaleza del agua dependerá el pH con el cual se produce la mejor coagulación, y para que el agua filtrada contenga los menores indicios posibles de  $Al^{3+}$  se deberá operar a un pH comprendido en el de la hidrólisis total. Lógicamente, por la hidrólisis del sulfato de alúmina el pH del agua disminuye, pudiendo llegar a ser agresiva, y entonces es posible que sea necesario incorporar un reactivo que eleve este pH, generalmente se suele utilizar hidróxido cálcico, esta elevación del pH se debe realizar después de adicionado el coagulante, pues en caso contrario puede dar lugar a la disolución de algunas materias sólidas, generalmente orgánicas, con lo que podrían escapar a la filtración y pasar al agua filtrada.

También es posible que el pH óptimo para una buena coagulación comunique al agua ya decantada un cierto carácter agresivo, por lo que debemos aumentar, posteriormente, este pH.

Debido a la complejidad de las reacciones entre las sustancias del agua y los reactivos añadidos, la influencia del pH, temperatura, grado de agitación, etc. es difícil hallar la dosis de reactivos exacta, necesaria para obtener una buena coagulación, aún cuando se conozcan las sustancias presentes en el agua.

En la práctica, para conocer la dosis óptima de sulfato de alúmina, hidróxido cálcico u otro reactivo, así como el pH óptimo, se recurre a los ensayos de floculación en laboratorio, con los cuales, y mediante tanteos, llegamos a conocer las dosis óptimas de reactivo, según el período y grado de agitación escogido.

Otro medio de conocer y controlar el proceso de coagulación, muy práctico, es el del filtro piloto, consistente en tomar una muestra de agua, y filtrar a continuación por un filtro piloto controlando diversas características del efluente, principalmente el color, la turbiedad y el contenido de aluminio.

Para que las partículas que se encuentran en el agua y las del coagulante puedan coagular, será necesario que estén en contacto unas con otras, por lo tanto será obligatoria una agitación del líquido para mantener este contacto. Esta agitación deberá ser rápida durante un breve período inicial para dispersar bien la coagulación y favorecer las reacciones de coagulación, y más lenta durante el período de floculación.

El contacto entre las partículas se verá incrementado a medida que aumenta su concentración en el agua, con este objeto es conveniente que en el líquido se conserve una determinada cantidad de flóculos que anteriormente se han formado.

Durante la floculación la agitación deberá ser lo suficientemente lenta para no deshacer los flóculos formados, dando entonces nuevamente lugar a una suspensión coloidal.

Es importante observar que las aguas turbias precipitan mucho mejor que las claras, por lo que la entrada de aguas limpias supone añadir mucha más alúmina y otros elementos floculantes. En cultivos experimentales, el aluminio resulta tóxico para las células nerviosas; desde hace 20 años se intenta relacionar su ingestión con el riesgo de provocar la enfermedad de Alzheimer, sin conclusiones claras

#### *Documentación de referencia:*

*Caracterización y concentración del aluminio en el tratamiento del agua : Publicado en la página de Water Research Commission*

*Coagulation and Flocculation Process Fundamentals : Página en inglés, de Minnesota Rural Water Association, con descripciones y esquemas de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación.*

*Coagulantes inorgánicos de uso frecuente en el tratamiento del agua . Publicación del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos.*

*Coagulación y floculación de contaminantes del agua . Publicación en la página de "Ciencia Abierta" de la Universidad de Chile.*

*Considerando n.º 22. Directiva 98/83/CE del Consejo, de 3 de noviembre de 1998, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Diario oficial de las Comunidades Europeas*

*Seminario Organizado por la Subdirección General de Sanidad Ambiental; Dirección General de Salud Pública; Ministerio de Sanidad y Consumo. Coorganizado por la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento (AEAS). Información publicada en*

*la Revista Española de Salud Pública, n°2, Marzo- Abril de 1997 (Rev. Esp. Salud Pública 1997; 71: 205-207).*

*WHO. Report of WHO meeting on emerging infectious disease. Ginebra : CDS/BVI/92.2, 25-26 de abril de 1994.*

*Mac Kenzie y otros 10 autores: "A massive outbreak in Milwaukee of Cryptosporidium infection transmitted through the public water[vi] Ramirez Quirós, Francisco. El Cryptosporidium y su eliminación en las ETAPs. Tecnología del Agua, 1997; 168:33-41.*

## ANEXO 5

# LA FILTRACIÓN Y DESINFECCIÓN DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO

### *LA FILTRACIÓN*

Se puede definir como el proceso por el cual se separa la materia suspendida, mediante el paso del agua a través de una capa porosa (generalmente arena) que retiene las partículas en suspensión. La filtración puede ser natural o artificial.

La filtración artificial puede hacerse por medio de filtros de arena lentos, rápidos, a presión y a vacío.

La arena ha sido usada universalmente como materia filtrante tanto para filtros lentos como rápidos y a presión. La arena puede ser calificada de acuerdo con la variación del tamaño y su distribución, formas y sus variaciones, peso específico y composición química.

Hay dos factores fundamentales que se usan para definir la granulometría de la arena:

- Tamaño efectivo
- Coeficiente de uniformidad<sup>40</sup>

El tamaño efectivo, P<sub>10</sub>, es el tamaño del grano expresado en milímetros tal, que la dimensión de los granos de arena corresponde al 10 % su peso sea superior a ese tamaño.

### *MATERIALES FILTRANTES GRANULARES.*

Los filtros pueden estar compuestos de arena natural de sílice, carbón de antracita (duro) triturado, magnetita (mineral) triturada y arenas de granate.

Las arenas naturales y los minerales triturados que se emplean normalmente, de diferentes tamaños. Los valores medios de tamaño y las variaciones proporcionan los parámetros aceptables para:

- Describir la geometría de los materiales;
- Predicción racional de su comportamiento hidráulico
- Calcular la remoción de impurezas por filtración.

El tamaño de las partículas es tridimensional y describe el volumen de los granos. La forma de la partícula es un concepto geométrico más difícil. En filtración de agua, la forma es una medida deseable del área superficial del grano en relación a su volumen, es decir, una longitud o diámetro. En el caso ideal de sólidos geométricos regulares puede este diámetro, o medición de longitud, identificar tanto al volumen real como al área superficial verdadera. Los diámetros y las áreas superficiales que dependen del diámetro característico de las partículas irregulares no se pueden medir directamente en un sentido geométrico significativo. A causa de esto, se recurre a características indirectas del tamaño y forma para relacionarlos con propiedades significativas del flujo a través de los materiales filtrantes y con la purificación resultante.

---

<sup>40</sup> Coeficiente de uniformidad es el término empleado para definir la razón entre el tamaño del grano expresado en milímetro tal que la dimensión de los granos de arena correspondiente al 60 % en peso sea superior a ese tamaño (P<sub>60</sub>) y el tamaño efectivo (P<sub>10</sub>/P<sub>60</sub>). El tamaño efectivo, P<sub>10</sub>, es el tamaño del grano expresado en milímetros tal, que la dimensión de los granos de arena corresponde al 10 % su peso sea superior a ese tamaño

## DESINFECCION

### *AGENTES FÍSICOS*

Los desinfectantes físicos que se pueden emplear son la luz y el calor. El agua caliente a la temperatura de ebullición, por ejemplo, destruye las principales bacterias causantes de enfermedades pero con dificultad las esporas. Es principalmente un sistema de desinfección doméstico y de alto costo. Quince o veinte minutos a temperatura de ebullición son suficientes para destruir cualquier microorganismo debido a la expulsión de los gases por el incremento de temperatura.

En la esterilización de pequeñas cantidades de agua, el empleo de lámparas especiales UV ha resultado exitoso. La eficacia de este proceso depende de la penetración de los rayos en el agua. La geometría de contacto entre la fuente emisora de luz ultravioleta y el agua es de gran importancia debido a que la materia en suspensión, las moléculas orgánicas disueltas y la propia agua, además de los microorganismos, absorberán la radiación. Por lo tanto, la aplicación de la radiación ultravioleta como mecanismo de desinfección resulta sencilla en sistemas acuosos, pero no fácilmente practicable por los costos de los aparatos, especialmente en zonas rurales.

### *DESINFECCIÓN QUÍMICA*

Los agentes químicos más utilizados para la desinfección incluyen:

- Cloro y sus componentes, bromo, yodo, ozono, compuestos amoniacales cuaternarios, agua oxigenada entre otros

Los desinfectantes más comunes son los productos químicos oxidantes, de los cuales el cloro es el más universalmente empleado. El ozono es un desinfectante muy eficaz cuyo uso va en aumento, a pesar de que no deja una concentración residual que permita valorar su presencia después del tratamiento.

### **DESINFECCIÓN CON CLORO**

Como se dijo anteriormente, de todos los desinfectantes utilizados, el cloro es quizás el más universalmente empleado.

Los compuestos del cloro más comúnmente empleados en las plantas de tratamiento de aguas residuales son el cloro gas ( $\text{Cl}_2$ ), el hipoclorito sódico ( $\text{NaOCl}$ ), el hipoclorito de calcio [ $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ ], y el dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ). Los hipocloritos sódico y cálcico se suelen emplear en las plantas pequeñas, especialmente en las prefabricadas, en las que la simplicidad y seguridad son criterios de mayor peso que el costo.

El dióxido de cloro también se emplea en las instalaciones de tratamiento, debido a que no reacciona con el amoníaco y no forma compuestos órgano-clorurados, pero por el hecho de su costo y difícil generación y utilización no se aconseja para todas las situaciones. A continuación se analizará el empleo del cloro porque es la forma más ampliamente adoptada.

### **EFICACIA GERMICIDA DEL CLORO<sup>41</sup>**

---

<sup>41</sup> La seguridad sanitaria que aporta la cloración es relativa, el año 1993, en Milwaukee, EE.UU, se produjo la mayor epidemia transmitida por un abastecimiento de aguas; un fallo en la clarificación provocó 400.000 casos de *Cryptosporidiosis*, un parásito intestinal que resiste elevadas concentraciones de Cloro (80 mg/l). Un año más tarde, en Las Vegas, ocurría la primera epidemia de *Cryptosporidium* documentada en un abastecimiento urbano sin ningún fallo aparente. Esta ciudad se abastece de remotas aguas de calidad, a través de cientos de kilómetros de canales.

Cuando se utiliza el cloro (gas o hipoclorito en solución) para la desinfección, los principales parámetros a medir, además de los parámetros ambientales tales como pH o la temperatura, son el número de organismos y el cloro residual presente después de un período de tiempo determinado. El grupo de los organismos coliformes se puede determinar empleando el procedimiento del número más probable o mediante el método de recuento en placas.

El cloro residual (libre y combinado), se debe medir empleando el método amperométrico, cuya mayor fiabilidad respecto a los demás métodos existentes en la actualidad ha sido probada.

Cuando todos los parámetros físicos que controlan el proceso de cloración se mantienen constantes, la eficacia germicida de la desinfección medida a partir de la supervivencia bacteriana, depende principalmente del cloro bactericida residual presente y del tiempo de contacto.

El uso de carbón activado proporciona una completa adsorción tanto del cloro residual libre como del combinado liberando el agua del sabor típico de la cloración pero con el riesgo de recontaminación rápida del agua.

La importancia histórica de la desinfección es de haber hecho desaparecer las grandes epidemias hídricas pero es necesario enfrentar los nuevos riesgos como la formación de los Tri-Halo-Metanos (THM), a partir de la cloración y la aparición de los nuevos gérmenes patógenos resistentes.

**Es importante observar que nada sirve un tratamiento de potabilización de las aguas si la calidad se degrada en la red de distribución y de conservación domiciliaria.**

## ANEXO 6

### PARAMETROS DE REFERENCIA AGUAS SUPERFICIALES Y POTABLES

#### **Directiva 75/440/CEE del Consejo, de 16 de junio de 1975, relativa a la calidad requerida para las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable en los Estados miembros**

La Comunidad Europea ha dictado varias Directivas de obligado cumplimiento para los países miembros. La más reciente, completa y actualizada es la directiva 98/83/CEE, del 3 de noviembre del año 1998, que sustituye a la 80/778/CEE, adaptándola al progreso científico y técnico. No obstante, hasta que la nueva Directiva sea incorporada a las decisiones nacionales, seguirá siendo válida la de 1980. Además de éstas existen otras dos Directivas importantes relacionadas con el agua potable, la 75/440/CEE, relativa a la calidad requerida para las aguas superficiales destinadas a la producción de aguas potables, y la 79/869/CEE, relativa a los métodos de medición y frecuencia de muestras y análisis de las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable.

*Definición de los métodos de tratamiento tipo que permiten la transformación de las aguas superficiales de las categorías A1, A2 y A3 en agua potable*

Categoría A1: Tratamiento físico simple y desinfección, por ejemplo, filtración rápida y desinfección.

Categoría A2: Tratamiento físico normal, tratamiento químico y desinfección, por ejemplo, precloración, coagulación, floculación, decantación, filtración y desinfección (cloración final)

Categoría A3: Tratamiento físico y químico intensivos, afino y desinfección, por ejemplo, cloración hasta el « break point », coagulación, floculación, decantación, filtración, afino (carbón activo) y desinfección (ozono, cloración final).

#### Calidades de aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable

\* Parámetros \* A1 \* A1 \* A2 \* A2 \* A3 \* A3 \*

\*\* G \* I \* G \* I \* G \* I \*

1 \* pH \*\* 6,5-8,5 \*\* 5,5-9 \*\* 5,5-9 \*\*

2 \* Coloración ( después de filtración simple ) \* mg/l escala Pt \* 10 \* 20 ( O ) \* 50 \* 100 ( O ) \* 50 \* 200 ( O ) \*

3 \* Materiales totales en suspensión \* mg/l MES \* 25 \* \* \* \* \*

4 \* Temperatura \* ° C \* 22 \* 25 ( O ) \* 22 \* 25 ( O ) \* 22 \* 25 ( O ) \*

5 \* Conductividad \* µs/cm-1 a 20 ° C \* 1 000 \* \* 1 000 \* \* 1 000 \* \*

6 \* Olor \* ( factor de dilución a 25 ° C ) \* 3 \* \* 10 \* \* 20 \* \*

7 (\*) \* Nitratos \* mg/l NO<sub>3</sub> \* 25 \* 50 ( O ) \* \* 50 ( O ) \* \* 50 ( O ) \*

8 (1) \* Fluoruros \* mg/l F \* 0,7/1 \* 1,5 \* 0,7/1,7 \* \* 0,7/1,7 \* \*

9 \* Cloro orgánico total extraíble \* mg/l Cl \* \* \* \* \* \*

10 \* Hierro disuelto \* mg/l Fe \* 0,1 \* 0,3 \* 1 \* 2 \* 1 \* \*

11 \* Manganeso \* mg/l Mn \* 0,05 \* \* 0,1 \* \* 1 \* \*

12 \* Cobre \* mg/l Cu \* 0,02 \* 0,05 ( O ) \* 0,05 \* \* 1 \* \*

13 \* Zinc \* mg/l Zn \* 0,5 \* 3 \* 1 \* 5 \* 1 \* 5 \*

14 \* Boro \* mg/l B \* 1 \* \* 1 \* \* 1 \* \*

15 \* Berilio \* mg/l Be \* \* \* \* \* \*

16 \* Cobalto \* mg/l Co \* \* \* \* \* \*

- 17 \* Níquel \* mg/l Ni \* \* \* \* \*
- 18 \* Vanadio \* mg/l V \* \* \* \* \*
- 19 \* Arsénico \* mg/l As \* 0,01 \* 0,05 \* \* 0,05 \* 0,05 \* 0,1 \*
- 20 \* Cadmio \* mg/l Cd \* 0,001 \* 0,005 \* 0,001 \* 0,005 \* 0,001 \* 0,005 \*
- 21 \* Cromo total \* mg/l Cr \* \* 0,05 \* \* 0,05 \* \* 0,05 \*
- 22 \* Plomo \* mg/l Pb \* \* 0,05 \* \* 0,05 \* \* 0,05 \*
- 23 \* Selenio \* mg/l Se \* \* 0,01 \* \* 0,01 \* \* 0,01 \*
- 24 \* Mercurio \* mg/l Hg \* 0,0005 \* 0,001 \* 0,0005 \* 0,001 \* 0,0005 \* 0,001 \*
- 25 \* Bario \* mg/l Ba \* \* 0,1 \* \* 1 \* \* 1 \*
- 26 \* Cianuro \* mg/l Cn \* \* 0,05 \* \* 0,05 \* \* 0,05 \*
- \* Parámetros \* A1 \* A1 \* A2 \* A2 \* A3 \* A3 \*
- \* \* \* G \* I \* G \* I \* G \* I \*
- 27 \* Sulfatos \* mg/l SO<sub>4</sub> \* 150 \* 250 \* 150 \* 250 ( O ) \* 150 \* 250 ( O ) \*
- 28 \* Cloruros \* mg/l Cl \* 200 \* \* 200 \* \* 200 \* \*
- 29 \* Agentes tensoactivos ( que reaccionan ante el azul de metileno ) \* mg/l ( laury-sulfato ) \* 0,2 \* \* 0,2 \* \* 0,5 \* \*
- 30 (\*) (2) \* Fosfatos \* mg/l P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> \* 0,4 \* \* 0,7 \* \* 0,7 \* \*
- 31 \* Fenoles ( índice fenoles ) para antralina 4 aminoantipirina \* mg/l C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>OH \* \* 0,001 \* 0,001 \* 0,005 \* 0,01 \* 0,1 \*
- 32 \* Hidrocarburos disueltos o emulsionados ( después de extracción por éter de petróleo ) \* mg/l \* \* 0,05 \* \* 0,2 \* 0,5 \* 1 \*
- 33 \* Carburo aromático poli cíclico \* mg/l \* \* 0,0002 \* \* 0,0002 \* \* 0,001 \*
- 34 \* Plaguicidas-total ( paratión , HCH , dieldrina ) \* mg/l \* \* 0,001 \* \* 0,0025 \* \* 0,005 \*
- 35 (\*) \* Demanda química de oxígeno ( DQO ) \* mg/l O<sub>2</sub> \* \* \* \* \* 30 \* \*
- 36 (\*) \* Tasa de saturación de oxígeno disuelto \* % O<sub>2</sub> \* > 70 \* \* > 50 \* \* > 30 \* \*
- 37 (\*) \* Demanda bioquímica de oxígeno ( DBO<sub>5</sub> ) a 20 ° C sin nitrificación \* mg/l O<sub>2</sub> \* < 3 \* \* < 5 \* \* < 7 \* \*
- 38 \* Nitrógeno Kjeldahl ( exceptuado NO<sub>3</sub> ) \* mg/l N \* 1 \* \* 2 \* \* 3 \* \*
- 39 \* Amoniac \* mg/l NH<sub>4</sub> \* 0,05 \* \* 1 \* 1,5 \* 2 \* 4 ( O ) \*
- 40 \* Sustancias extraíbles con cloroformo \* mg/l SEC \* 0,1 \* \* 0,2 \* \* 0,5 \* \*
- 41 \* Carbono orgánico total \* mg/l C \* \* \* \* \* \*
- 42 \* Carbono orgánico residual tras floculación y filtración en membrana ( 5 μ ) TOC \* mg/l C \* \* \* \* \* \*
- 43 \* Coliformes totales 37 ° C \* /100 ml \* 50 \* \* 5 000 \* \* 50 000 \* \*
- 44 \* Coliformes fecales \* /100 ml \* 20 \* \* 2 000 \* \* 20 000 \* \*
- 45 \* Estreptococos fecales \* /100 ml \* 20 \* \* 1 000 \* \* 10 000 \* \*
- 46 \* Salmonelas \* \* ausente en 5000 ml \* \* ausente en 1000 ml \* \* \* \*

I = impèrative ( obligatorio ) .

G = guía .

O = circunstancias climáticas o geográficas excepcionales .

(\*) = véase la letra d ) del artículo 8 .

(1) Los valores indicados constituyen los límites superiores determinados en función de la temperatura media anual ( temperatura elevada y temperatura baja ) .

(2) Se incluye este parámetro para cumplir los requisitos ecológicos de determinados medios .

## Regulaciones concernientes a la calidad del agua para el consumo humano.

Parámetros	Directivo ECC		Directivo ECC MAC	QUIEN Recomendaciones
	No.	GL		
Color mg/L Pt-Co	1	1	20	15
Turbidez mg/L SiO <sub>2</sub>	2	1	10	
Unidad de Jacksont		0.4	4	5
				1 para desinfección
Olor (dilución)	3	0	2 a 12°C 3 a 25°C	Ningún efecto en los consumidores
Gusto (dilución)	4	0	2 a 12°C 3 a 25°C	
Temperatura °C	5	12	25	
pH	6	6.5-8.5		6.5-8.5
Conductividad uS/cm at 20°C	7	400		
Cloro mg/L Cl	8	25		250
Sulfato mg/L SO <sub>2</sub>	9	25	250	400
Silicio mg/L SiO <sub>2</sub>	10			
Calcio mg/L Ca	11	100		
Magnesio mg/L Mg	12	30	50	
Sodio mg/L Na	13	20	150	200
Potasio mg/L K	14	10	12	
Aluminio mg/L Al	15	0.05	0.2	0.2
Alcalinidad Fr. deg.	-			
			Mínima conc. 2.5 para aguas ablandadas	
Titrición para dureza Fr. deg.	16			50
				Mínima conc. 15 para aguas ablandadas
DS mg/L (180°)	17		1500	
Oxígeno disuelto (% saturación)	18		Saturación > 75% excepto para agua de superficie	
CO <sub>2</sub> libre mg/L CO <sub>2</sub>	19		El agua no debería ser agresiva	
Nitrato mg/L NO <sub>3</sub>	20	25	50	44
Nitrito mg/L NO <sub>2</sub>	21		0.1	
Amonio mg/L NH <sub>4</sub>	22	0.05	0.5	
Kjeldahl nitrógeno mg/L N	23		1	
Valor del permanganato mg/L O <sub>2</sub>	24	2	5	
Total carbon orgánico mg/L C	25			
Sulfito de hidrógeno ug/L S	26		organoleptically indetectable	organoleptically indetectable
CES* mg/L	27	0.1	-	
Hidrocarburos disueltos ug/L	28		10	
Fenoles (índice de fenoles) ug/L	29		0.5	
Boro ug/L B	30	1000		

Lauryl detergentes de azufre ug/L	31		200	
Compuestos organoclorados ug/L				Límite de formas de aureola
(otros como pesticidas 55)	32	1		tanto como que sea posible
Hierro ug/L Fe	33	50	200	300
Manganeso ug/L Mn	34	20	50	100
Cobre ug/L Cu	35	100		1000
			(leaving the facility)	
			3000	
	36	(12 h in network)		
Zinc ug/L Zn		100		5000
			(leaving the facility)	
			5000	
			(12 h in network)	
Fosfato ug/L PzOs	37	400	5000	
Fluor ug/L F	38	1500 (8 to 12°C)		
		700 (25 to 30°C)		
Cobalto ug/L Co	39			
Sólidos suspendidos mg/L	40	None		
Agentes oxidantes residuales ug/L Cl2	41			
Bario ug/L Ba	42	100		
Plata ug/L Ag	43		10	
Arsénico ug/L As	44		50	50
Berilio ug/L Be	45			
Cadmio ug/L Cd	46		5	5
Cianuro ug/L CN	47		50	100
Cromo ug/L Cr	48		50	50
Mercurio ug/L Hg	49		1	1
Níquel ug/L Ni	50		50	50
Plomo ug/L Pb	51		50	50
			(agua en movimiento)	
Antimonio ug/L Sb	52		10	
Selenio ug/L Se	53		10	10
Vanadio ug/L V	54			
Pesticidas y sustancias similares ug/L	55			
- por sustancias			0.1	
Aldrin y dieldrin				0.03
Hexaclorobenceno				
-total			0.5	
-PCB y PCT				
PAH ug/L	56			
total para las siguientes sustancias:			0.2	0.1
-fluoranteno				

-benzo(3,4)fluoranteno			
-benzo(11,12)fluoranteno			
-benzo(1,12)perileno			
-indeno(1,2,3cd)pireno			
-benzo(3,4)pireno			
Coliformes totales( 100 ml)	57	0	0.01
Coliformes fecales( 100 ml)	58	0	0
Estreptococos fecales ( 100 ml)	59	0	0
Sulfato- dostridium reducido en 20 ml	60	MPN=<1	0
Número Total de bacterias en 1 ml	61		
(agua potable)			
37°C	10		
22°C	100		
Número Total de bacterias en 1 ml	62		
(agua acondicionada)			
37°C	5	20	
22°C	20	100	
Compuestos orgánicos ug/L			
-benceno			10
-treta cloruro de <a href="#">carbono</a>			3
-chlordan			0.3
-clorobenceno			0.1 to 3
-cloroformo			30
-2,4D			100
-D.D.T.			1
-1,2 dicloroetano			10
-1.1 dicloroetano			0.3
-heptacloro y heptacloro-epoxy			0.1
-hexaclorobenceno			0.01
-gamma-HCH (lindano)			3
-metoxicloro			30
-pentaclorofenol			10
-tetracloroetano			10
-tricloroetano			30
-2,4,6 triclorofenol			10
Radioactividad			
Actividad alfa Bq/L			0.1
Actividad beta Bq/L			1

**DIRECTIVA 98/83/CE DEL CONSEJO, DEL 3 DE NOVIEMBRE DE 1998, RELATIVA A LA CALIDAD DE LAS AGUAS DESTINADAS AL CONSUMO HUMANO DOCE 330/L, DE 05-12-98**

**PARÁMETROS Y VALORES PARAMÉTRICOS**

Parte A

Parámetros microbiológicos

Parámetro.....Valor paramétrico  
.....(número/100 ml)

Escherichia coli (E. coli).....0

Entero cocos.....0

A las aguas comercializadas en botellas u otros recipientes se aplicarán los valores siguientes:

Parámetro.....Valor paramétrico

Escherichia coli (E. coli).....0/250 ml

Entero cocos.....0/250 ml

Pseudo monas aeruginosa.....0/250 ml

Recuento de colonias a 22 °C.....100 ml

Recuento de colonias a 37 °C.....20 ml

Parte B

Parámetros químicos

Parámetro.....Valor paramétrico.....Unidad.....Notas

Acrilamida.....0,10.....µg/l.....Nota 1

Antimonio.....5,0.....µg/l

Arsénico.....10.....µg/l

Benceno.....1,0.....µg/l

Benzo(a)pireno.....0,010.....µg/l

Boro.....1,0.....mg/l

Bromato.....10.....µg/l.....Nota 2

**Cadmio.....5,0.....µg/l**

Cromo.....50.....µg/l.....Nota 3

Cobre.....2,0.....mg/l.....Nota 3

Cianuro.....50.....µg/l

1,2-dicloroetano.....3,0.....µg/l

Epiclorhidrina.....0,10.....µg/l.....Nota 1

Fluoruro.....1,5.....mg/l

**Plomo.....10.....µg/l.....Notas 3 y 4**

**Mercurio.....1,0.....µg/l**

Níquel.....20.....µg/l.....Nota 3

Nitrato.....50.....mg/l.....Nota 5

Nitrito.....0,50.....mg/l.....Nota 5

Plaguicidas.....0,10.....µg/l.....Notas 6 y 7

Total plaguicidas.....0,50.....µg/l.....Notas 6 y 8

Hidrocarburos poli cíclicos aromáticos.....0,10.....µg/l.... Suma de concentraciones de compuestos especificados; nota 9

Selenio.....10.....µg/l

Tetracloroetano y tricloroetano.....10.....µg/l.....Suma de concentraciones de parámetros especificados

Total trihalometanos.....100.....µg/l Suma de concentraciones de compuestos especificados; nota 10

Cloruro de vinilo.....0,50.....µg/l.....Nota 1

Nota 1: El valor del parámetro se refiere a la concentración monomérica residual en el agua, calculada con arreglo a las características de la migración máxima del polímero correspondiente en contacto con el agua.

Nota 2: Cuando sea posible sin que afecte a la desinfección, los Estados miembros deberán procurar obtener un valor más bajo.

Para las aguas a que se refieren las letras a), b) y d) del apartado 1 del artículo 6, el valor se cumplirá, a lo sumo, a los diez años naturales de la fecha de entrada en vigor de la presente Directiva. Para el período

comprendido entre el quinto y el décimo año a partir de la entrada en vigor de la presente Directiva, el valor paramétrico de bromato será de 25 µg/l.

Nota 3: El valor se aplica a una muestra de agua destinada al consumo humano, obtenida por un método adecuado de muestreo en el grifo y recogida de modo que sea representativa de un valor medio semanal ingerido por los consumidores. Cuando proceda, los métodos de muestreo y control deberán efectuarse de una forma armonizada, que se establecerá con arreglo al apartado 4 del artículo 7. Los Estados miembros tendrán en cuenta la presencia de valores punta que puedan provocar efectos adversos en la salud humana.

Nota 4: Para las aguas a que se refieren las letras a), b) y d) del apartado 1 del artículo 6, el valor se cumplirá, a lo sumo, a los quince años naturales de la fecha de entrada en vigor de la presente Directiva. Para el período comprendido entre el quinto y el decimoquinto año a partir de la entrada en vigor de la presente Directiva, el valor del parámetro plomo será de 25 µg/l.

Los Estados miembros velarán porque se adopten todas las disposiciones apropiadas a fin de reducir cuanto sea posible la concentración de plomo en las aguas destinadas al consumo humano durante el plazo necesario para cumplir el valor de este parámetro.

Al poner en práctica las medidas necesarias para cumplir este valor, los Estados miembros darán progresivamente prioridad a las zonas con máximas concentraciones de plomo en las aguas destinadas al consumo humano.

Nota 5: Los Estados miembros velarán porque a la salida de las instalaciones de tratamiento de aguas se respete la cifra de 0,10 mg/l para los nitritos y se cumpla la condición de que  $[\text{nitrato}]/50 + [\text{nitrito}]/3 \leq 1$ , donde los corchetes significan concentraciones en mg/l para el nitrato (NO<sub>3</sub>) y para el nitrito (NO<sub>2</sub>).

Nota 6: Por «plaguicidas» se entiende:

- insecticidas orgánicos,
- herbicidas orgánicos,
- fungicidas orgánicos,
- nematocidas orgánicos,
- acaricidas orgánicos,
- alguicidas orgánicos,
- rodenticidas orgánicos,
- molusquicidas orgánicos,
- productos relacionados (entre otros, reguladores de crecimiento) y sus pertinentes metabolitos y productos de degradación y reacción.

Sólo es preciso controlar aquellos plaguicidas que sea probable que estén presentes en un suministro dado.

Nota 7: El valor paramétrico se aplica a cada uno de los plaguicidas. En el caso de la aldrina, la dieldrina, el heptacloro y el heptacloropóxido, el valor paramétrico es de 0,030 µg/l.

Nota 8: Por «total plaguicidas» se entiende la suma de todos los plaguicidas detectados y cuantificados en el procedimiento de control.

Nota 9: Los compuestos especificados son: benzo(b)fluoranteno- benzo(k)fluoranteno- benzo(ghi)perileno- indeno(1,2,3-cd)pireno.

Nota 10: Cuando sea posible sin que afecte a la desinfección, los Estados miembros deberán procurar obtener un valor más bajo.

Los compuestos especificados son: cloroformo, bromoformo, dibromoclorometano, bromodichlorometano.

Para las aguas a que refieren las letras a), b) y d) del apartado 1 del artículo 6, el valor se cumplirá, a lo sumo, a los diez años naturales de la fecha de entrada en vigor de la presente Directiva. Para el período comprendido entre el quinto y el décimo año a partir de la entrada en vigor de la presente Directiva, el valor paramétrico de THM totales será de 150 µg/l.

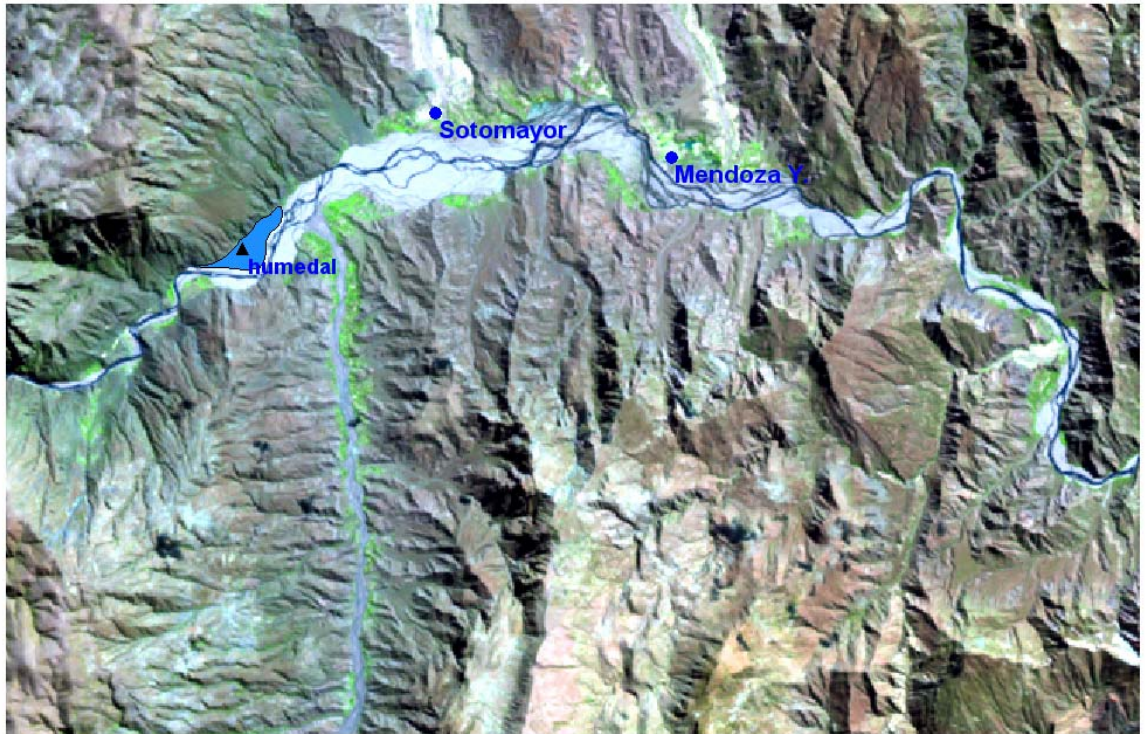
Los Estados miembros se cerciorarán de que se adopten todas las medidas adecuadas para reducir la concentración de THM en el agua destinada al consumo humano en la mayor medida posible durante el período necesario para lograr el cumplimiento del valor paramétrico.

Al aplicar las medidas necesarias para cumplir este valor, los Estados miembros darán progresivamente prioridad a las zonas con máximas concentraciones de THM en el agua destinada al consumo humano.



## ANEXO 7

### AREA DE SOTOMAYOR



## ANEXO 8

# CONTENIDOS MÁXIMOS DE UNOS METALES PESADOS EN PRODUCTOS ALIMENTICIOS

Reglamento CE 466/2001 de 8 de Marzo de 2001

<b>CADMIO (Cd) / PRODUCTO</b>	Contenido máximo (mg/Kg peso fresco)
Cereales, excluido el salvado y el germen ( de cualquier cereal), el grano de trigo y el arroz	<b>0,1</b>
Salvado y germen ( de cualquier cereal), grano de trigo y arroz	<b>0,2</b>
Habas de soja	<b>0,2</b>
Las hortalizas tal como se define en el artículo 1 de la Directiva 90/642/CEE del Consejo, excluidas las hortalizas de hoja, las hierbas aromáticas frescas, todas las setas, los tallos jóvenes, las hortalizas de raíz y las patatas	<b>0,05</b>
Las hortalizas de hoja, las hierbas aromáticas frescas, los apionabos y todas las setas cultivadas	<b>0,2</b>
Tallos jóvenes, hortalizas de raíz y patatas, excluidos los apionabos. En el caso de las patatas, el contenido máximo se aplica a las patatas peladas	<b>0,1</b>
<b>MERCURIO (Hg) / PRODUCTO</b>	
Productos de la pesca,	<b>0,5</b>
<b>PLOMO (Pb) / PRODUCTO</b>	
Cereales ( incluido el alforfón), verduras y legumbres secas	<b>0,2</b>
Las hortalizas tal como se define en el artículo 1 de la Directiva 90/642/CEE del Consejo, modificada en último término por la Directiva 2000/48/CE de la Comisión, excluidas las del Género Brassica, las hierbas frescas y todas las setas. En el caso de las patatas, el contenido máximo se aplica a patatas peladas	<b>0,1</b>
Hortalizas del Género Brassica y todas las setas cultivadas	<b>0,3</b>

---