

HALOS DE CONTAMINACIÓN EN LA SUB-CUENCA DEL RÍO ANTEQUERA
(PAZÑA – DEPARTAMENTO DE ORURO)
POLLUTION HALOS IN THE SUB WATERSHED OF THE ANTEQUERA RIVER
(PAZÑA, DEPARTMENT OF ORURO)

E. RICALDI[†]

Instituto de Investigaciones Físicas
Universidad Mayor de San Andrés
La Paz – Bolivia

RESUMEN

Mediciones de Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) practicados en la sub-cuenca del río Antequera en el municipio de Pazña del Departamento de Oruro fueron utilizadas para el estudio de problemas de contaminación ambiental por actividad minera. Se realizaron siete perfiles de medición de diferentes longitudes siendo los más extensos los de Avicaya y la Confluencia de Ríos, con 2800 y 1800 metros, respectivamente.

Los datos de superficie fueron utilizados para la definición preliminar de los “Halos de contaminación” en dos dimensiones (mapas). Todas las curvas de sondeo de resistividad eléctrica fueron reducidas a un “modelo de tres capas”, que permite una discusión, también preliminar, de las denominadas “plumas de contaminación” en tres dimensiones, es decir, los volúmenes de “contaminación subterránea”.

Estos datos y los resultados fueron contrastados con valores de mediciones de conductividad eléctrica puntuales, valores de *pH*, y resultados de análisis químicos de muestras de aguas y suelos puntuales medidos por grupos de investigación hidro-química y ampliados por observaciones visuales del estado de los suelos *in situ*.

Una primera interpretación nos permite indicar que aproximadamente el 60% de los terrenos, zona central longitudinal, de la llanura de la sub-cuenca del río Antequera se encuentra contaminada, distribuida entre áreas de alto hasta leve grado, por aguas con influencia minera, ácidas, en la parte norte y por la influencia de fuentes termales, alcalinas, en la parte sur. Un 40% de los terrenos de la sub-cuenca, especialmente el lado occidental y sus alrededores todavía se encuentran libres de la acción contaminadora de estas fuentes que creemos deben preservarse. Para mayor detalle observe el “mapa de riesgo ambiental” presentado al final.

Descriptor: geoelectricidad — inducción electromagnética y conductividad — estudios ambientales

Código(s) PACS: 91.25.-r, 91.25.Qi, 89.60.-k

ABSTRACT

Vertical electrical sounding measurements (VES) were taken at the sub watershed of the Antequera River located within the Pazña Municipality in the Department of Oruro. The results were used to study the environmental contamination problems caused by mining activity in the area. Seven profiles were obtained using measurements taken at different longitudes, from the most extensive at Avicaya to the confluence of the area's rivers at 2,800 and 1,800 metres respectively. Surface area data was used to form a preliminary definition of the “pollution halos” in two dimensions (maps). The curves of the electrical resistance soundings were converted to a three layer model that enables a preliminary discussion of the “pollution plumes” in three dimensions, i.e., the volume of subterranean pollution. Data and results were correlated with exact electrical conductivity measurements, *pH* values, and results from a chemical analysis of soil and water taken by a group of hydro-chemical researchers and complemented by visual observations of the state of the ground *in situ*. A first analysis and interpretation of the results indicates that approximately 60% of the lands in the central longitudinal zone of the planes of the sub watershed of the Antequera River are contaminated. The contaminated areas are distributed between high and low gradient areas in the north water bodies are affected by acidity produced through mining activity. In the south, water quality is affected by the alkaline properties of thermal waters. A percentage of 40% of the sub watershed, especially in the west and surroundings, remains free of contamination (we believe that it must be preserved). Greater detail is shown in the environmental risk map produced as part of the study.

Subject headings: geoelectricity — electromagnetic induction and conductivity — environmental studies

1. INTRODUCCIÓN

La base de la definición del concepto de “contaminación ambiental” es de carácter químico toxicológico. Se refiere a la *presencia de ciertos elementos y compuestos químicos en cantidades excesivas en un determinado medio*, especialmente aquellos elementos disueltos o en suspensión en el agua, puesto que el agua es el principal medio de transporte de sustancias alimenticias;

a su vez es la principal sustancia que es renovada permanentemente en el cuerpo de los seres vivientes (vegetales o animales) y es también el principal constituyente de los mismos.

Las aguas contaminadas resultan nocivas y hasta letales para la subsistencia de la vida en el medio ambiente en consideración.

Las cantidades de la mayoría de los elementos y sustancias químicas y el estado físico-químico admisibles por un ser viviente han sido determinados en arduo trabajo y todavía continúa el estudio de los que son desconocidos.

Estos valores límites se encuentran tabulados y mencionados

[†]Email: ericaldi@fiumsa.edu.bo.

TABLA 1
INDICADORES DE CONTAMINACIÓN POR ACTIVIDAD MINERA EN 1996.
PROMEDIOS NACIONALES.

Metal pesado	COMIBOL		COOPERATIVAS	
	pH	g/l	pH	g/l
estaño	5	1-9 (prom=5)	3	10-90 (prom=50)
wolfram	5	0,005 (bajo)	5	1-9 (prom=5)
antimonio	4	1-9 (prom=5)	5	0,005
zinc, plomo, plata	4	1-9 (prom=5)	5	0,005
oro	agua de concentración de mercurio: 20000 kilos			

en las diferentes leyes civiles para la conservación del medio ambiente que ya se han puesto en vigencia y que todo emprendimiento económico debe observar y cumplir, dimensionando el denominado “impacto ambiental del proyecto empresarial”, si éste es nuevo.

Naturalmente, durante la vida de un estado como el boliviano se han desarrollado emprendimientos económicos por parte de actores privados nacionales e internacionales y por empresas del estado que han producido y abandonado los denominados “pasivos ambientales” y los que actualmente están en desarrollo deben observar las leyes ambientales que el país ha señalado.

2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El presente trabajo está limitado al estudio de la contaminación ambiental por efectos de la actividad minera practicada y la que actualmente se desarrolla en la región de estudio, razón por la cual el concepto de contaminación tiene un fuerte carácter de contaminación sustancial, por sustancias, es decir, es de carácter químico.

Como objetivos específicos del presente trabajo se ha decidido la realización de *sondeos geo-eléctricos de los sedimentos que están rellenando la cuenca del río Antequera, con la finalidad de proporcionar información sobre problemas de contaminación de los posibles recipientes y conductores de aguas subterráneas y de los terrenos de superficie.*

Con este propósito se ha definido la realización de mediciones sobre los siguientes perfiles:

- (i) En el curso de la parte alta del río Antequera, en la sub-cuenca inicial del río Antequera, en una zona denominada *Totoral*.
- (ii) En la cuenca del río *Cucho Avicaya*.
- (iii) Un perfil transversal al río Antequera en su curso medio, parte más ancha del valle, dominada por una amplia llanura, que llamaremos perfil *Avicaya*.
- (iv) Sobre el curso bajo del río *Urmiri*.
- (v) Sobre el curso bajo del río *Antequera*.
- (vi) Una transversal al río Antequera a la altura de la *Confluencia de los Ríos Antequera y Urmiri*.
- (vii) Sobre el curso del río *Pazña*.

3. CONSIDERACIONES GENERALES

3.1. Fuentes de contaminación

Existen varias fuentes de contaminación minera:

- (a) El potencial contaminante de los yacimientos mineros, conocidos y desconocidos. Las minas Bolívar, Martha y otras operadas por Cooperativas, en el curso superior de la cuenca.
- (b) El potencial contaminante de los restos (pasivos ambientales), de los procesos mineros, desmontes de las minas y las colas de los ingenios, lagunas de decantación de las aguas copajira, los restos del dragado de la parte superior de la parte media de la cuenca; pié de monte, por parte, de la ex empresa minera Estalsa.
- (c) La contaminación por los procesos permanentes de enriquecimiento de los minerales en explotación.
- (d) El potencial contaminante de las fuentes de aguas termales de Urmiri y Pazña en la parte baja de la cuenca.



FIG. 1.— (1) El curso del río Antequera por la quebrada de Totoral, (2) la parte oriental de la parte media y ancha de la cuenca del río Antequera (zonas de remoción de sedimentos por la ex empresa minera ESTALSA), que incluye la laguna de decantación (manchas negras en la fotografía), y (3) la zona de manchas negras y grises de la parte media y baja de la misma, son las regiones de mayor contaminación superficial y de profundidad media.

En las fuentes primarias, en las minas, el o los minerales que en un determinado momento adquieren un valor económico notable, gozan de buena cotización, son los que se recuperan de los depósitos mineros y los que no estén en estas condiciones son los que se dejan como *residuos* o *pasivos ambientales*.

3.2. Contaminación ambiental

El concepto de contaminación ambiental en realidad corresponde a la idea de proceso de contaminación de una región por los elementos y sustancias químicas contaminantes liberados en las fuentes, estos son transportados, difundidos, diseminados y depositados a través de algún mecanismo, de alguna manera, especialmente por las aguas de los ríos y las tormentas en las épocas de lluvias, a niveles inferiores de una determinada cuenca hidrográfica, afectándolos en el sentido de salud ambiental.

Es por demás conocido que *no es posible una recuperación del 100% del mineral comerciable*.

En las faldas aledañas a las minas, yacimientos mineros, se depositan grandes cantidades de caja, roca que encajona las vetas minerales, desmenuzada incluyendo partes de la veta con minerales que no interesan y partes irrecuperables de las que sí interesan, separadas de buena proporción de los minerales con valor comercial por procesos simples de selección a mano o a máquina (por gravitación), pasando a constituir los denominados *desmontes de las minas*.

Los procesos tecnológicos de enriquecimiento de los minerales que se realizan en los ingenios por lo general trabajan con grandes cantidades de agua y reactivos químicos, hidrometalurgia, y generan sustancias contaminantes que pasan a constituir las denominadas *colas*.

Residuos que a futuro se convierten en fuentes de contaminación llegan a denominarse *fuentes de contaminación secundarias* o *pasivos ambientales*.

El agua de las precipitaciones pluviales y las corrientes de aguas permanentes se constituye entonces en el *principal agente de contaminación de un área geográfica*, como las cuencas de

TABLA 2
ANÁLISIS QUÍMICO MEDIANTE ICP-MS EN MUESTRAS DE AGUA TOMADAS
DEL RÍO ANTEQUERA Y LAS TERMAS DE PAZÑA. UNIDADES: mg/l.

Elemento	Límite de detección	Antequera	Termas
Na	0,005	74	2490,97*
Li	0,001	0,655	12,9*
Mg	0,001	27,5	38,4
Al	0,002	16,82*	0,45
Si	0,2	23	285,0
K	0,003	8,5	162,0
Ca	0,7	114,78	95,0
Cr	0,0005	0,003	-0,03
Mn	0,0001	8,5*	0,015
Fe	0,01	0,1	-0,5
Co	0,000005	0,103	0,0008
Ni	0,0003	0,1735	-0,015
Cu	0,0002	0,38	0,055
Zn	0,0005	74,62*	2,62*
As	0,00003	0,00175	0,005
Br	0,003	0,1	1,95
Sr	0,00004	0,625	2,285
Cd	0,00001	0,425*	0,0045
Sb	0,00001	0,0008	0,0235*
Hg	0,0002	-0,001	-0,01
Pb	0,00001	0,0239	0,233*

*Son valores por encima de los máximos permisibles, se los puede considerar como contaminantes.

TABLA 3
ANÁLISIS QUÍMICO DE SEDIMENTOS DEL RÍO ANTEQUERA. †

Elemento	Límite de detección (ppm)	Valores (ppm)
Cu	0,01	96,1—77,5
Zn	0,1	714,0—948,0
As	0,1	520,0—555,0
Cd	0,01	6,22—6,71
Pb	0,01	244,0—152,0

†Indicamos solamente los elementos químicos caracterizados por valores por encima de los máximos permitidos, es decir, los contaminantes.

los ríos donde éstas son descargadas. Las aguas reaccionan con las sustancias y minerales de los desmontes y colas, diluyendo algunas de ellas y transportando en suspensión otras.

Procesos contaminantes que pueden ser estimado, junto con la consideración de algunas otras variables, definen el llamado *impacto ambiental*.

3.3. Elementos y sustancias contaminantes

Para un detenido análisis del efecto toxicológico de los elementos y sustancias químicas, sus cantidades, se remite a los estudios desarrollados por especialistas en el tema. Inmediatamente nos interesan los límites de elementos y sustancias químicas soportables por la vida, vegetal y animal y sobre todo por el ser humano.

En este trabajo nos limitaremos a mencionar tres tipos de elementos y/o sustancias químicas que consideramos contaminantes dentro de ciertos límites:

Los metales pesados: Estos serían removidos de sus fuentes por el agua de las precipitaciones pluviales por percolación, a través de mecanismos químicos todavía no muy bien explicados, y son transportados hacia las zonas más bajas de una cuenca hidrográfica. Depositados sobre terrenos de cultivo representan una peligrosa fuente de contaminación especialmente para la actividad agropecuaria y la vida en general.

Las soluciones acuosas ácidas, que están caracterizadas por bajos valores del *pH*, se constituyen en una extraordinaria amenaza para las sustancias orgánicas, es decir, para el desarrollo de la vida.

TABLA 4
CLASIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS SEGÚN SU TOXICIDAD Y OTROS CRITERIOS.

No críticos	sodio (Na), carbono (C), fluor (F), potasio (K), fósforo (P), litio (Li), magnesio (Mg), hierro (Fe), rubidio (Rb), calcio (Ca), azufre (S), estroncio (Sr), hidrógeno (H), cloro (Cl), oxígeno (O), bromo (Br), silicio (Si), nitrógeno (N) y aluminio [‡] (Al)
Tóxicos (insolubles o no frecuentes)	titanio (Ti), galio (Ga), hafnio (Hf), La, Zr, Os, W, Rh, Nb, Ir, Ta, Ru, Re y el bario (Ba).
Muy tóxicos (relativamente disponibles)	berilio (Be), arsénico (As), oro (Au), cobalto (Co), selenio (Se), mercurio (Hg), níquel (Ni), telurio (Te), tantalio (Ta), cobre (Cu), paladio (Pd), plomo (Pb), estaño (Sn), cadmio (Cd), bismuto (Bi), cromo (Cr) y el platino (Pt).

[‡]Tóxico para organismos que viven en los suelos y el agua.

Las soluciones acuosas alcalinas (básicas), que están caracterizadas por altos valores de *pH*, también son consideradas como dañinas de manera general, pero todas las soluciones caracterizadas por valores no muy altos de *pH* son admitidas por una gran variedad de especies de vida tanto vegetal como animal, es decir, que ambientes básicos son tolerables por la vida.

4. LA CUENCA DEL RÍO ANTEQUERA, ZONA DE ESTUDIO

4.1. Ubicación

Se trata del estudio de la sub-cuenca, dentro del área de influencia de la Cuenca del Lago Poopó, del río Antequera, localizado dentro del Municipio de Pazña, del Departamento de Oruro. Los orígenes de este río se los encuentra en las alturas montañosas, falda occidental de la Cordillera de Livichuco. Para su rápida localización se pueden tomar en cuenta al norte el Cerro Soincharcomani, por cuya falda oriental discurre el río Antequera y al sur la línea de latitud que pasa por la localidad de Pazña.

Este terreno se encuentra entre 66° 40' y 67° 00' de longitud oeste y entre los 18° 30' y 18 45' de latitud sur geográficas, respectivamente.

4.2. Accesibilidad

La sub-cuenca del río Antequera es transitable durante todo el año y está muy bien comunicada con los grandes mercados, las grandes ciudades como Oruro y La Paz a través del camino de primera clase inter-departamental entre Oruro y Potosí que es pavimentada y en la parte interna se tienen los caminos que comunican Pazña con la mina Bolívar y el camino de Bolívar a la localidad de Poopó por la parte norte (ver Fig. 6).

4.3. Estrategia de trabajo

El estado de contaminación de los terrenos de la cuenca del río Antequera resultará definido en un momento determinado de tiempo por los resultados que arrojen:

(I) Los análisis químicos de por lo menos una muestra de agua correspondiente a los puntos de la red de medición planificada con este propósito, que tienen que ver con la identificación de los elementos y sustancias químicas y sus cantidades en las muestras, que pasan a ser comparadas con cantidades de estos mismos elementos y sustancias tomados como patrones, definirán cuáles de estas se encuentran en cantidades anómalas para su calificación como contaminantes o no.

(II) Los trabajos físicos (geo-físicos) consistentes en la medición de por los menos una magnitud, que sea índice del grado de contaminación del ambiente, es decir que, tenga relación con problemas de contaminación.

Indicadores químicos que se utilizan con este propósito son:

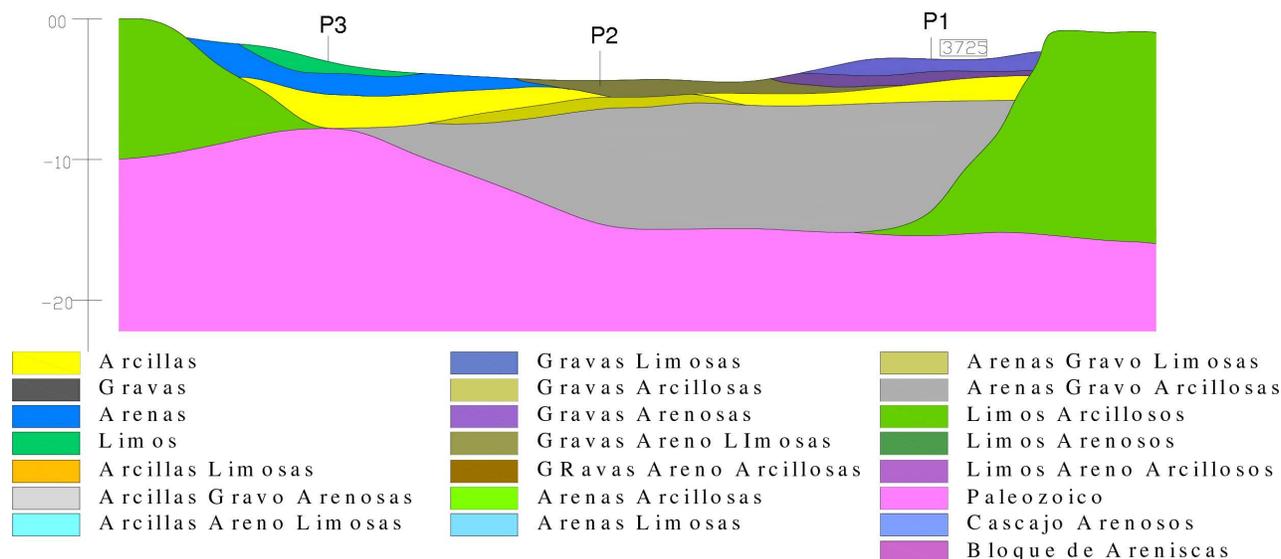


FIG. 2.— Sección geológica correspondiente al perfil del río Urmiri. Escala $H = 1 : 500$, $V = 1 : 500$. La versión a colores puede encontrarse en la página de la RBF en <http://fiumsa.edu.bo>.

mg/Kg ó *ppm*: Es la cantidad, en *mg*, de la sustancia considerada como contaminante contenida en un *Kg* de la muestra de material tomada del suelo de un terreno de cultivo o de una mina, y en *g/l* (gramos por litro) en muestras de agua.

El *pH*: El nivel de contaminación de los suelos y las aguas es rápidamente verificado al medir la magnitud denominada el *pH* de las muestras. El *pH* está definido por una escala logarítmica del equilibrio entre los iones de hidrógeno (H_3O^+) y los iones hidróxido (OH^-) en un líquido.

Un valor de *pH bajo* corresponde a una alta concentración de iones de hidrógeno, mientras más iones de hidrógeno estén presentes, menos iones de hidróxido habrá y la *solución* será más *ácida*.

Un *pH alto* corresponde a una baja concentración de iones de hidrógeno. En este caso habrá más iones hidróxido y la *solución* será más *básica*.

La determinación del *pH* se realiza midiendo diferencias de potencial producidas por dos líquidos separados por una membrana, debido a la actividad iónica del hidrógeno de la solución de la cual se desea averiguar su *pH*. En la Tabla 1 se presentan promedios nacionales del *pH* correspondientes a la actividad minera de 1996.

En las Tablas 2 y 3 se presentan resultados de estudios químicos realizados por el Departamento de Hidro-química de la Carrera de Química de la FCPN de la UMSA y otras instituciones, que son consideradas para la evaluación de los resultados del presente trabajo.

Y para clarificar mejor el concepto de contaminación, en la Tabla 4 se adjunta la importante clasificación de los elementos químicos según su toxicidad.

El plomo, zinc y el cadmio estarían presentes principalmente en las muestras de aguas superficiales de los ríos con influencia minera. El arsénico y el hierro en las aguas superficiales de todos los ríos, por lo menos en los ríos de la zona de estudio.

Aguas ácidas corresponden a aguas superficiales de los ríos con influencia minera. Un ejemplo notable se tiene en las aguas de la laguna de decantación en la zona de gravas revueltas por la ex empresa minera Estalsa, En este cuerpo de agua no se observan rastros de desarrollo de vida vegetal ni animal, en la parte central alta de la cuenca del río Antequera.

Aguas alcalinas son las que provienen de las fuentes termales de Urmiri en nuestro caso, del este de la parte central baja de la cuenca del río Antequera. Claramente se observa que estas aguas

permiten el desarrollo de ciertas especies de vida tanto vegetal como animal, aunque no en abundancia, o la inversa, que ciertas especies animales y vegetales soportan esta calidad de aguas.

Las aguas de mina, copajira, son ácidas, caracterizadas por valores bajos de *pH* y transportan metales pesados en medidas de gramos por litro, como ya se vio.

Indicadores físicos que con este propósito se utilizan son:

La *conductividad eléctrica*: Valores altos de esta magnitud son indicativos de un alto nivel de contaminación de las aguas, se mide en *Siemens/m* ó $\mu S/cm$.

La *resistividad eléctrica*: Calculada a partir de la realización de *Sondeos Eléctricos Verticales* (SEVs), se mide en *Ohm/m* y es otra magnitud apropiada para el estudio de problemas de contaminación ambiental.

5. TRABAJO EXPERIMENTAL: LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DETERMINADA POR EL MÉTODO GEOELÉCTRICO

El presente trabajo está dedicado a la determinación de la distribución los valores de resistividad eléctrica sobre un corte, en sección, de un terreno. Distribución de la resistividad eléctrica sobre un plano, sección, con ejes *Z* y *X*, constituido por un perfil, línea *X*, de medición localizada sobre la superficie de la tierra, y la profundidad de inspección o exploración, eje *Z*, que de manera general es denominada *sección geoelectrica transversal* o simplemente *sección en corte*.

Sobre una línea simétrica al punto de medición en dirección de la línea del perfil, en su caso transversalmente, se disponen cuatro *electrodos*, dispositivos destinados a lograr el contacto entre el terreno y el instrumento de medición. *Dos electrodos son utilizados para introducir corriente eléctrica (Amperaje)* en el terreno y *dos para medir la diferencia de potencial (voltaje)* presente entre los mismos. De manera general, la distancia de separación de los electrodos de corriente es mucho mayor que la distancia de separación entre los electrodos de voltaje.

Cuando estamos realizando el *SONDEO*, la separación entre los electrodos de corriente es incrementada. Entonces, en un formulario, vamos registrando los valores de la corriente eléctrica (*I*, en amperios), el voltaje (*V*, en voltios) para cada nuevo valor de la mitad de la distancia de separación de los electrodos de corriente ($AB/2$, en metros) y en algunos casos, cuando se hace necesario, la nueva distancia de separación entre los electrodos de voltaje (MN , en metros).

Con base en estos datos y otro denominado factor geométrico, *K*, calculamos los *valores de las resistividades eléctricas para*

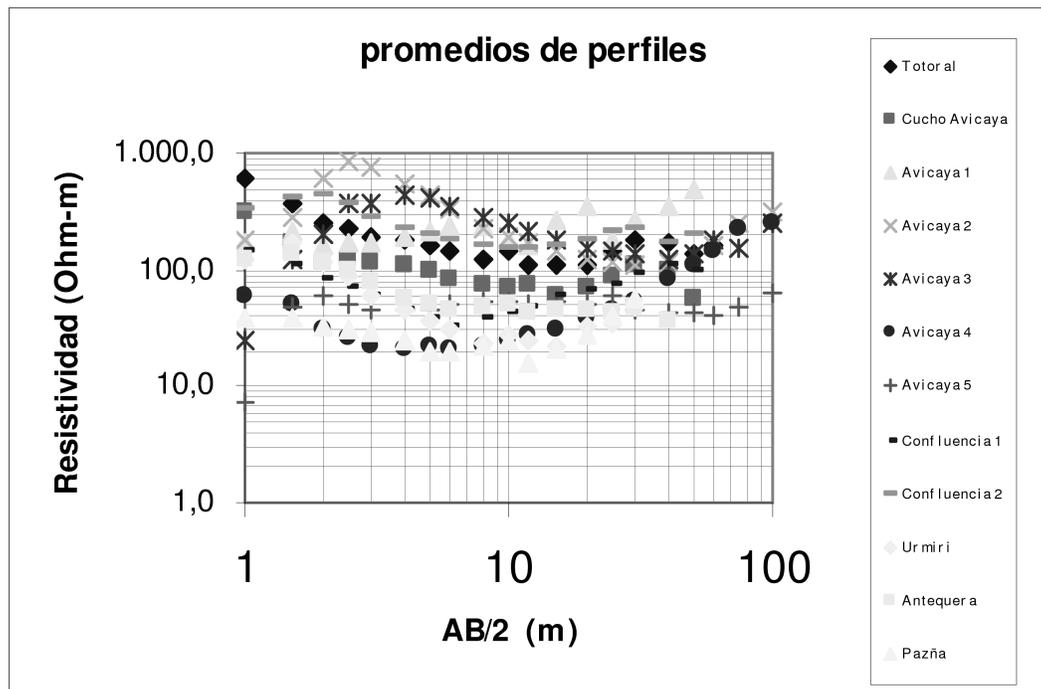


FIG. 3.— Curvas de resistividad para los siete perfiles practicados.

TABLA 5
CARACTERÍSTICAS DE LOS PERFILES.

Zona de perfil	Longitud del perfil (m)	No de puntos de sondeo
Totoral	100	6
Cucho Avicaya	80	4
Avicaya	2800	28
Confluencia de Ríos	1800	10
Urmiri	10	3
Antequera	10	3
Pazña	8	2

cada valor de $AB/2$.

5.1. Curvas de resistividad

Con el par de valores, del formulario, correspondientes a las distancias $AB/2$ y sus correspondientes resistividades eléctricas, en un sistema de coordenadas con escalas logarítmicas producimos una gráfica de distribución de resistividades en función de las pseudo profundidades ($AB/2$) para cada sondeo en cada punto de medición, denominadas *curvas de resistividades*.

Estas curvas constituyen uno de los productos de los resultados del trabajo experimental realizado en la zona de estudio que se utilizarán con propósitos de estudios de contaminación ambiental, en 1D.

Obtenemos la misma cantidad de “curvas de sondeo” por “puntos de medición” que contenga el perfil.

5.2. Secciones geoelectricas

Este método, además de resolver problemas de estructura geológica del terreno por debajo de la superficie de la tierra a lo largo del perfil de exploración, nos proporciona las denominadas *secciones geoelectricas*, una imagen de la distribución de la resistividad eléctrica (Ohm-metro) en función de la profundidad (Z), que se constituyen en otro de los productos, esta vez en 2D, que se adecuan para una interpretación de contaminación ambiental.

Los trabajos prácticos se realizaron del 1 al 15 de octubre de 2008, sobre los perfiles de medición indicados en los objetivos,

con equipos de medición proporcionados por el Instituto de Hidrología e Hidráulica (IHH-UMSA) de la Carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la UMSA y de la empresa GEOFING Srl. La logística corrió por cuenta del Instituto de Investigaciones Físicas (IIF-UMSA) y el apoyo económico fue del Instituto de Investigaciones Químicas (IIQ-UMSA), ambas de la Facultad de Ciencias Puras y Naturales, todas de la UMSA.

5.3. Características de los perfiles

Las características correspondientes se muestran en la Tabla 5 y como ejemplo de una *sección geoelectrica* presentamos en la Fig. 2 una *sección geológica* que corresponde al perfil sobre el Río Urmiri.

6. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

6.1. Resultados

6.1.1. Inter-comparación de las curvas de resistividad eléctrica versus pseudo-profundidad

En la Fig. 3 se muestran las curvas de resistividad contra distancia $AB/2$ para los siete perfiles practicados: Cinco correspondientes a Avicaya, dos de Confluencia de ríos y una por cada perfil corto (Totoral, Cucho Avicaya, Urmiri, Antequera y Pazña), doce curvas en total.

Se observa que las mismas quedan definidas alrededor de diferentes niveles de valores de resistividad eléctrica, tómesese en cuenta que las escalas son logarítmicas.

En la Fig. 4(a): Los cinco tramos que conforman el gran perfil de Avicaya. La serie 1 corresponde al tramo del extremo occidental y la serie 5 al tramo del extremo oriental del perfil.

Se puede advertir variación en la distribución de los valores de la resistividad en superficie, valores alrededor de 100 Ohm – m a media profundidad y variación de estos valores en profundidad.

En la Fig. 4(b): Los dos tramos del perfil Confluencia de Ríos. La serie 1 corresponde al tramo occidental y la serie 2 al tramo oriental.

El tramo oriental a profundidad mantiene un valor constante de resistividad y cuenta con valores bajos en superficie. El tramo

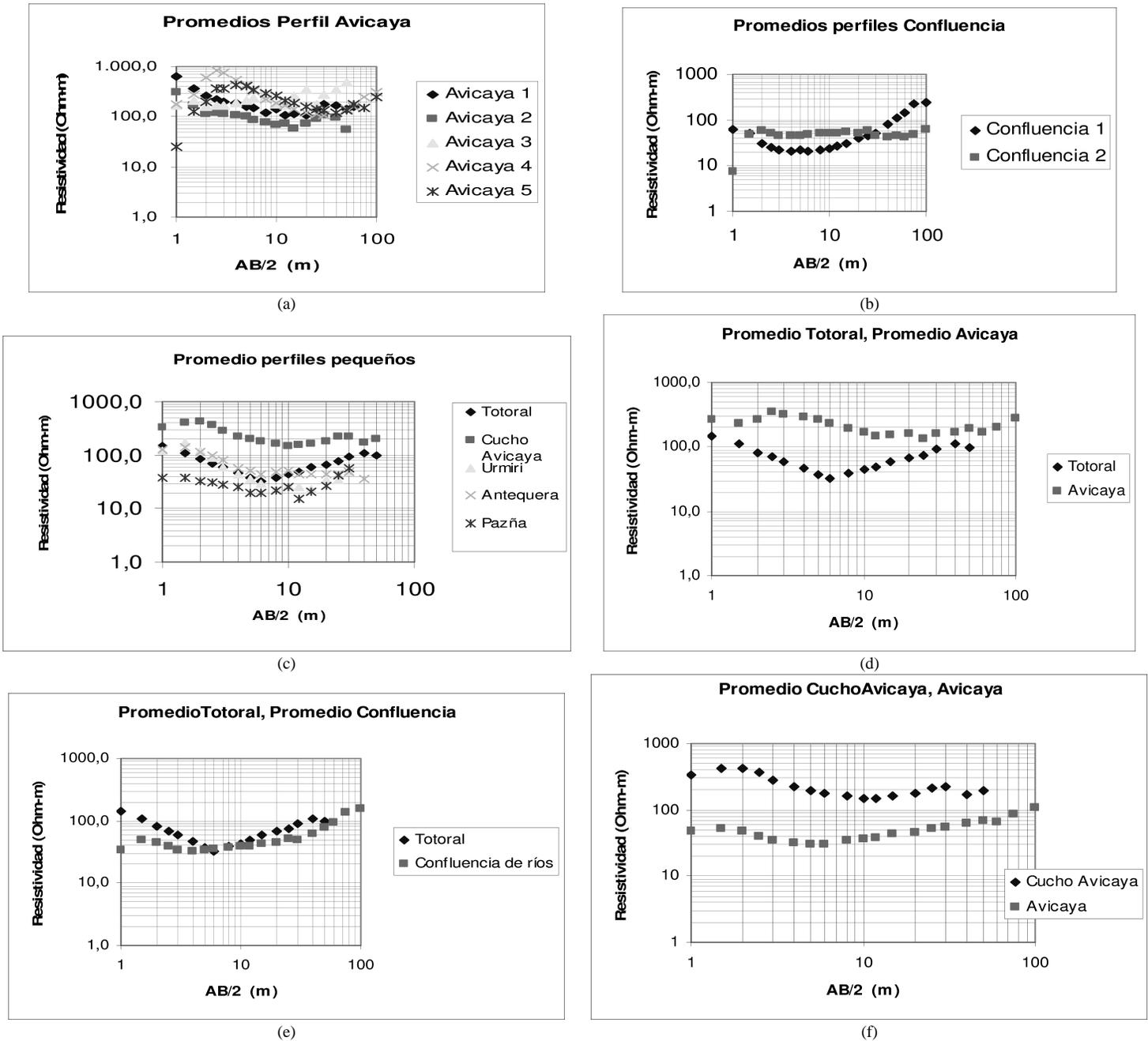


FIG. 4.— Curvas de resistividad contra distancia.

occidental es más variable, presenta valores bajos a mediana profundidad.

En la Fig. 4(c): Los perfiles cortos: La serie 2, correspondiente a Cucho Avicaya, se caracteriza por valores más altos de resistividad, indicativo que esta zona está menos contaminada que las otras. Acompañan las curvas de Ttotal, Urmiri, Antequera y Pazña.

En la Fig. 4(d): Curva promedio de Ttotal comparada con la curva promedio de Avicaya (de todas las cinco, anteriormente mencionadas). La serie 1, correspondiente a Ttotal, muestra valores menores que los correspondientes a Avicaya (serie 2).

La zona de Ttotal se encuentra más contaminada que la de Avicaya.

En la Fig. 4(e): La curva promedio de Ttotal (serie 1) comparada con la curva promedio de Confluencia de Ríos (de dos mencionadas líneas arriba, serie 2).

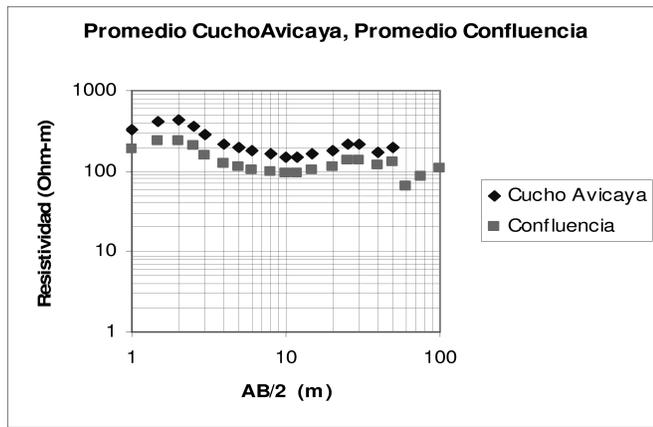
Confluencia de Ríos muestra valores menores, especialmente en superficie, por tanto estaría más contaminada que Ttotal, parte de los elementos contaminantes están dispersos en una amplia zona; la otra fracción está más concentrada en el curso actual del río Antequera. Posiblemente los elementos contaminantes ya no son los mismos que en la parte alta de la cuenca, pues en esta zona se observa un insipiente desarrollo tanto de la vida vegetal como animal.

En la Fig. 4(f): La curva de Cucho Avicaya (serie 1) tiene valores mayores que los de la curva correspondiente a Avicaya (serie 2).

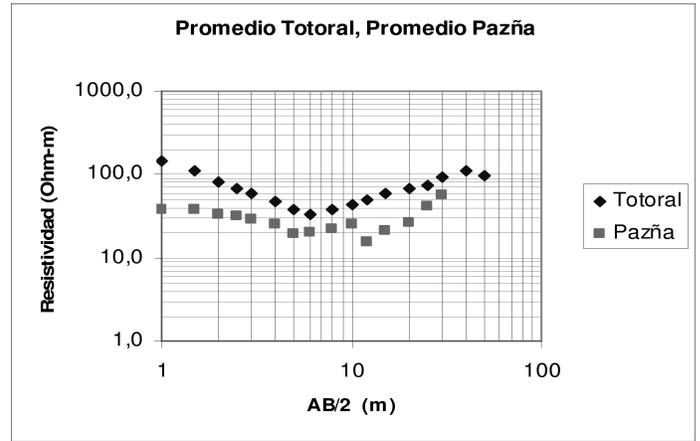
Claramente el área de Cucho Avicaya está libre de contaminación minera y no así los terrenos de Avicaya.

En la Fig. 5(a): La curva de Cucho Avicaya (serie 1) tiene valores mayores que los de la Confluencia de Ríos (serie 2).

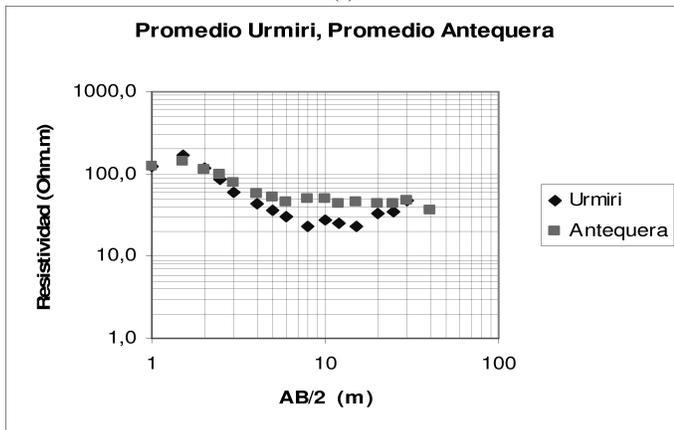
Se vuelve a confirmar la buena calidad de terrenos de Cucho



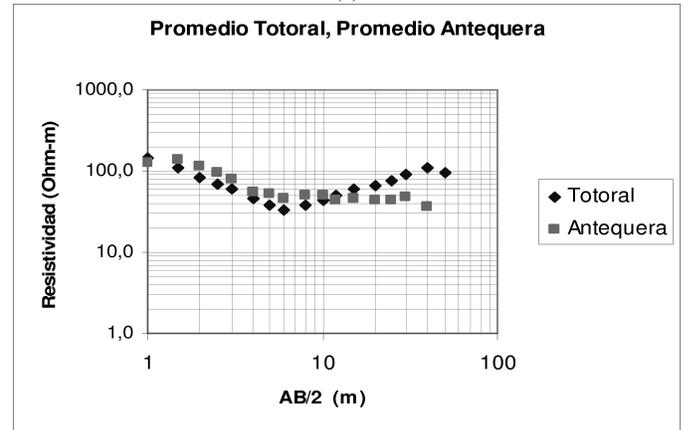
(a)



(b)



(c)



(d)

FIG. 5.— Curvas de resistividad contra distancia (continuación).

Avicaya. El área de la región de Confluencia de Ríos está contaminada (de manera general y mucho más en su parte occidental).

En la Fig. 5(b): La serie 1, correspondiente a *Totoral*, indica que esta zona está menos contaminada que el área de *Pazña* (serie 2). Debe indicarse, no obstante, que los componentes contaminantes seguramente ya no son los mismos, pues se observa que la región (agua y tierra) de *Pazña* permite la subsistencia de cierto tipo de vegetales.

En la Fig. 5(c): Se observa que los niveles de contaminación en ambos ríos son idénticos, aunque difieren en profundidad, es mayor en *Urmiri* (serie 1) que en *Antequera* (serie 2).

Los elementos contaminantes en ambas sub-cuencas son diferentes.

En la Fig. 5(d): En superficie el grado de contaminación en ambos puntos es casi igual (menor en *Antequera*). En profundidad, la contaminación es mayor en *Totoral* que en *Antequera*.

Antequera puede ser considerada como una zona de concentración de material contaminante.

6.1.2. Modelo de tres capas – Modelo tridimensional. Subdivisión de la profundidad en partes de inspección

Se ha procedido a subdividir la profundidad de inspección en tres partes fundamentales, es decir, el o los modelos reales son reducidos en todos los casos a un modelo de tres capas.

Cada una de estas capas está caracterizada por su correspondiente valor promedio de resistividad eléctrica:

Parte superficial: De la superficie de la tierra hasta 1,5 m, aproximadamente.

Profundidad intermedia: Entre 1,5 y 10 m.

Parte profunda: De 10 m en adelante.

Los resultados obtenidos se reportan en la Tabla 6.

6.2. Interpretación

De la inter-comparación de las curvas de resistividad promedio de las distintas zonas de investigación sacamos las siguientes conclusiones particulares:

— Las curvas de resistividad eléctrica versus profundidad definen diferentes niveles de resistividad para las diferentes zonas de inspección.

— La curva promedio de resistividad del valle de *Cucho Avicaya* tiene los valores más altos, confirmando su calidad de zona no contaminada o de menor contaminación.

— La curva promedio de resistividad en la angostura del río *Pazña* tiene los valores más bajos, confirmando su calidad como zona más contaminada de la cuenca del río *Antequera*.

— La curva promedio de resistividad correspondiente al angosto valle de *Totoral* tiene valores tan altos como los del río *Pazña*, consolidando su calidad de segundo punto más contaminado de la cuenca.

— La curva promedio de resistividades de la zona de *Confluencia de Ríos* tiene valores mayores que el del perfil de *Avicaya*, indicando que la primera es menos contaminada que la segunda.

— Las curvas de resistividad promedio correspondientes al río *Antequera* y al río *Urmiri* son aproximadamente de igual nivel; sin embargo, sus aguas tienen diferentes orígenes y cursos lo que nos conduce a pensar que los elementos contaminantes en ambos ríos no son los mismos.

— Las curvas de resistividad promedio del río *Antequera*, del río *Urmiri* y del río *Totoral* tienen aproximadamente el mismo

TABLA 6
VALORES PROMEDIO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA ($Ohm - m$) PARA
DISTINTAS PROFUNDIDADES CON EL MODELO DE TRES CAPAS.

zona	Profundidad		
	superficial	media	profunda
Totoral	205	7	140
Cucho Avicaya	300	129	213
Antequera	137	40	40
Urmiri	164	20	1600
Pazña	40	25	5000
Confluencia 1	79	18	6000
Confluencia 2	27	100	2500
Avicaya 1	747	100	180
Avicaya 2	239	100	50
Avicaya 3	105	15	1200
Avicaya 4	256	12	29000
Avicaya 5	94	20	228

nivel, sus aguas están contaminadas.

El ensayo de la distribución de resistividades promedios en un modelo de terreno de tres capas nos proporciona las siguientes conclusiones:

A. En la superficie, las zonas más contaminadas en orden de importancia, debido a los bajos valores de resistividad eléctrica que los caracteriza, son:

— La zona del río Pazña, confinado casi totalmente al curso del río, por aguas con influencia minera y aguas de origen termal.

— La región de la Confluencia de los Ríos, ambos lados tanto occidental como oriental, siendo la más contaminada la parte oriental. Representa áreas de terreno de tamaño mediano con influencia de aguas alcalinas, es decir de origen termal.

— Las zonas correspondientes a los tramos 4 y 5 del perfil de Avicaya, es decir, la zona más oriental del perfil, justo al este del camino que cruza el perfil, que conduce de Pazña a la mina Bolívar, que representan extensas áreas de terreno de la parte oriental de la llanura de la cuenca del río Antequera, están contaminadas por influencia de aguas ácidas generadas por actividad minera.

B. En profundidades medias, las regiones más contaminadas son:

— Totoral es la más contaminada. En esta zona se habrían concentrado las aguas con mayores índices de contaminación.

— Antequera es otra área crítica aunque con diferentes características; junto con Avicaya 5 son las que sufren por efectos de contaminación por actividad minera actual y pasada.

— Urmiri y Confluencia de Ríos 1 están contaminadas por aguas termales.

— Pazña sufre contaminación por la mezcla de aguas de ambos tipos de fuentes de contaminación.

C. A grandes profundidades se señalan a:

— Antequera, posiblemente contaminada por aguas provenientes de fuentes termales.

— Avicaya 2, por las mismas razones y en esta zona se ha detectado la presencia de una falla tectónica notable en la base del sinclinal que dio origen a la cuenca del río Antequera.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones específicas

— La contaminación, por efecto de la actividad minera que se practica en la parte alta de la cuenca, es mayor justamente en esta parte y en la zona central alta (la cual es denominada pié de monte) comparada con la contaminación existente en las partes central baja y baja propiamente dicha.

La contaminación se torna mayor en las zonas donde la sección del conducto de fluidos se reduce, es decir, en las angosturas de los ríos y de la cuenca, seguramente por efectos de concentración —ejemplos: Totoral y Pazña—, y es menor en las

zonas donde la sección del ducto se hace ancha, por efectos de dispersión —por ejemplo en Avicaya y la zona de la Confluencia de Ríos.

Aparentemente no hay un fenómeno de dilución de elementos contaminantes, concentración de las sustancias en dependencia de la distancia a sus fuentes. Esto tiene que ser estudiado desde el punto de vista químico y si existiera dilución se tendrá que averiguar de cuáles elementos se trataría y por qué.

El valle del río Cucho Avicaya estaría libre de fenómenos de contaminación, especialmente por influencia de actividad minera, debido a que dentro de esta micro-cuenca no se han producido hasta el momento actividades de este tipo, pero para declararlas categóricamente como zona libre de contaminación hay que averiguar que en la misma no estén presentes otras fuentes de contaminación como la natural, aguas termales por ejemplo.

Las profundidades medias serían las más contaminadas en todas las regiones de manera general, esto se debería a fenómenos de percolación e infiltración de las aguas superficiales para pasar a constituir cuerpos de aguas subterráneas contaminadas y en otros casos, por filtración desde las profundidades de aguas termales, portadoras de elementos disueltos de carácter contaminante, por ejemplo, el caso del tramo de la Confluencia de Ríos y del río Urmiri en particular, y finalmente, como producto de la mezcla de ambos tipos de aguas, por ejemplo en el caso del río Pazña. (En este último caso, ¿debería producirse un proceso químico de neutralización de manera natural?)

Los elementos químicos contaminantes producidos por cada tipo de fuente de contaminación son diferentes. Los de origen de actividad minera tienen un efecto toxicológico letal para la vida comparados con los de origen termal. En los ríos con contribución de aguas de origen termal se observa desarrollo de ciertos tipos de vida, especialmente vegetal, lo que no ocurre donde los ríos tienen contribuciones de aguas contaminadas por actividad minera.

La actividad eléctrica de los iones disueltos en los líquidos no define el grado de contaminación de los mismos desde el punto de vista toxicológico. El análisis químico es de vital importancia en el problema de identificación de los elementos químicos y su grado de toxicidad.

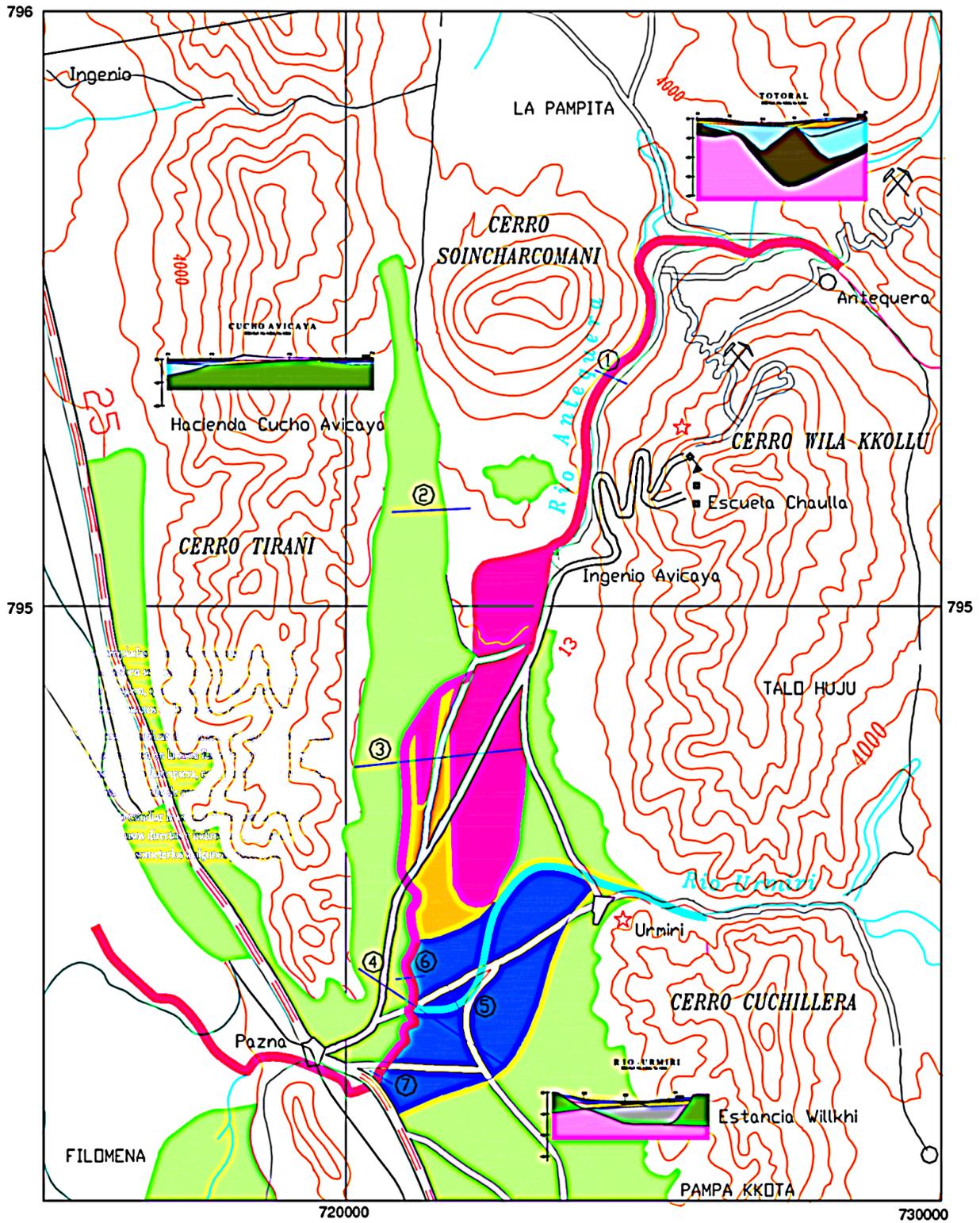
7.2. Conclusiones generales

Los análisis químicos realizados en muestras de aguas superficiales y sub-superficiales del área de estudio declaran que algunas de ellas transportan metales pesados como el hierro, plomo, arsénico, cadmio, manganeso, zinc y cobre en diferentes proporciones, cuyas fuentes se localizan en las minas de la parte alta de la cuenca del río Antequera, y al mismo tiempo, el material desmenuzado extraído de la mina al reaccionar con aguas de diferentes procedencias produce sustancias ácidas a las que se suman los reactivos que introducen los procesos tecnológicos de enriquecimiento de minerales que producen las aguas denominadas de mina o copajira, las que pasan a aumentar los caudales del río en consideración, convirtiéndolo en río con aguas contaminadas. Otras aguas son de carácter alcalino, básico, que están vinculadas a fuentes de aguas termales, con presencia de carbonatos y sales disueltas, principalmente.

Aunque ambos tipos de agua están caracterizados por diferentes valores de pH , provocan bajos valores de resistividad eléctrica, es decir, promueven la idea de alta contaminación ambiental.

Las aguas ácidas y los metales pesados son los elementos contaminantes letales para el desarrollo de la vida, como claramente se puede observar en el curso superior del río Antequera y la laguna de decantación abandonada por la ex empresa minera Estalsa, área donde no se observa rasgo alguno de vida.

Las aguas alcalinas no obstante de su alta actividad iónica,



UNIVERSIDAD MAJOR DE SAN ANDRES
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FISICAS
AREA DE GEOFISICA
 IHH - Asdi Sarec
 IIQ - Caminar
 ESCALA 1: 250000 FECHA: MARZO - 2008

AREAS , CONDICION AMBIENTAL

- | | |
|---|--|
| <p>ORIGEN MINERO</p> <p>ORIGEN TERMAL</p> | <ul style="list-style-type: none"> Contaminacion de alta a media por elementos acidos y metales pesados Contaminacion de ligera a baja por elementos acidos y metales pesados Contaminacion de alta a media por elementos alcalinos Contaminacion de ligera a baja por elementos alcalinos Areas agricolas no contaminadas |
|---|--|

PERFILES GEOELECTRICOS

- 1.- Total
- 2.- Cucho Ayicaya
- 3.- Avicaya
- 4.- Confluencia de Rios
- 5.- Urmiri
- 6.- Antequera
- 7.- Pazña

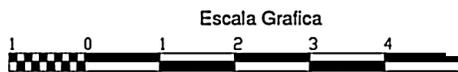


FIG. 6.— Halos de contaminación en la cuenca del río Antequera (mapa de riesgo ambiental). Véase la versión a colores en la página de la RBF en <http://www.fiumsa.edu.bo>.

todavía son soportadas por algunas especies de vida.

La Fig. 6, *mapa de riesgo ambiental*, resume toda esta información, observaciones *in situ* propias, comunicaciones orales y consultas de artículos científicos referidos al tema en la zona de estudio. De la misma se pueden inferir una serie de conclusiones, como las siguientes: Delimita las zonas que han sido calificadas como alta, mediana, ligera o levemente contaminadas por actividad minera y por fuentes termales.

También señala zonas que todavía están libres de éstos procesos de contaminación (probablemente un 40% del área de la cuenca del río Antequera, que inicialmente era considerada como de vocación agrícola).

7.3. Recomendaciones

Para hacer sostenible el desarrollo humano en el municipio de Pazña es necesario *preservar los terrenos que todavía se encuentran aptos para el desarrollo de la actividad agropecuaria*. Los

cuales, aplicando tecnología altamente desarrollada, podrían lograr niveles de eficiencia productiva cada vez más aceptables en términos económicos.

La actividad minera, sin ser prohibida, debe ser seriamente restringida a determinadas zonas, para evitar la continuación de su acción contaminadora.

Aguas apropiadas para el desarrollo agropecuario y humano deben ser buscadas y captadas en las zonas altas de la región, quebradas y rellenos cuaternarios y en los sedimentos de los valles no contaminados.

No se aconseja utilizar directamente las aguas subterráneas que se encuentren en la zona llana de la parte principal de la cuenca del río Antequera, éstas pueden constituirse en una fuente y vehículo de contaminación. Es necesario estudiar la calidad de las mismas, definir sus posibles usos directos e indirectos, además de la posibilidad de someterlos a algunos procesos de limpieza.

REFERENCIAS

- 2007, Evaluación ambiental del lago Poopó y sus ríos tributarios 2005-2007, Publicación conjunta de la UTO, INCO srl, Worley Persons Komex y el Laboratorio de Limnología de la UMSA
- 2008, 3er Congreso internacional de agua subterránea para el desarrollo sostenible 2008, Publicación conjunta de la SIDA, UMSA, CEEDI, Embajada de Suecia, IRD, LIDEMA y la OEA
- Ahlfeld, F. & Schneider, S. A. 1964, Los yacimientos minerales y de hidrocarburos de Bolivia (Boletín No.5. Ministerio de Minas y Petróleo. La Paz – Bolivia)
- Capriles, V. O. 1977, Historia de la Minería Boliviana (Biblioteca BAMIN, La Paz – Bolivia)
- García, M. E. et al. 2008, Estudio de la distribución de metales pesados en las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del lago Poopó (IIQ – UMSA)
- Ormachea, M. et al. 2008, Evaluation of shallow groundwater quality and arsenic presence in the basin of lake Poopo – Bolivia (IIQ – UMSA)
- Peñaranda, S. J. 1996, Indicadores de contaminación (Instituto de Investigaciones Socio Económicas – UMSA)
- Suárez, R. S. et al. 1995, Compendio de Geología de Bolivia (Publicación de Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos, YPF)
- Taquichiri, L. 2008, Juntuma aguas termales en el departamento de Oruro — Un potencial ignorado