

## VI. CLASIFICACIÓN DE UN LAGO MINERO: PROCESOS DE ESTRATIFICACIÓN Y MEZCLA

### VI.1. CARACTERÍSTICAS COMUNES DE LOS LAGOS MINEROS

En los estudios realizados en cortas de mina inundadas (Bachmann *et al.*, 2001; Shevenell *et al.*, 1999; Shevenell, 2000; Denimal *et al.*, 2005; Hamblin *et al.*, 1999 y Jonas, 2000), se ha puesto de manifiesto una serie de características comunes que singularizan a estas masas de agua en comparación con los lagos naturales (Ming Lu, 2004).

Suelen tener una profundidad relativa alta. Esta se define como el ratio, expresado en porcentaje, entre la máxima profundidad del lago y el valor medio de su diámetro. La profundidad relativa en los lagos mineros se encuentran normalmente en el rango 10-40%, mientras que un lago natural no supera normalmente el 2% (Doyle y Runnells, 1997; Levy *et al.*, 1996). Son los lagos mineros, por tanto, masas de agua con una pequeña superficie y una gran profundidad, en comparación con los lagos naturales, lo que favorece que se den en su seno procesos físico-químicos que conducen a su estratificación química.

Debido a que la historia de estos lagos mineros es bastante corta, no hay que olvidar que las explotaciones a cielo abierto son relativamente recientes, la capa de sedimentos formados en el lago suele ser de escaso espesor, además en muchos casos estos sedimentos están sin consolidar, presentándose embebidos en agua o como lodos de difícil recuperación, lo que complica su estudio (Stevens y Lawrence, 1998).

Durante su formación, en el proceso de inundación de la corta inactiva y abandonada, el nivel del agua pueden sufrir incrementos notables y rápidos, especialmente en sus primeros estadios (Shevenell *et al.*, 1999).

La naturaleza altamente reactiva de los sulfuros provoca una disolución oxidativa de estos, incrementándose el contenido de sólidos disueltos en las masas de agua que inundan las cortas, a la vez que se ven sometidas a un proceso de acidificación. Así es frecuente el tener masas de agua confinadas en cortas mineras con un alto contenido en sulfatos, metales y un pH ácido. La naturaleza ácida del agua favorece la alteración/disolución de las litologías del encajante incrementándose, de este modo también, la concentración de sólidos disueltos (Bachmann *et al.*, 2001; Levy *et al.*, 1997).

Las paredes de las cortas suelen ser bastantes abruptas y elevadas, presentando unas pendientes medias de 45-50°. Esta fuerte pendiente hace que en los lagos mineros se vea muy reducida, o sea inexistente, una zona somera litoral (Stevens y Lawrence, 1998). Estas características de lagos encajados entre altas paredes con ausencia de orillas de escasa profundidad, unido a su hidroquímica, les confiere una singularidad que les diferencia totalmente como ecosistemas de otros lagos naturales cercanos. En general la productividad primaria en los lagos mineros es generalmente baja, así como su actividad biológica (Doyle y Runnells, 1997; Friese *et al.*, 2002).

Un lago minero es un sistema complejo y diversos factores pueden influir en la

evolución de la calidad del agua con el tiempo. Como factores importantes están los relativos a la mineralogía, hidrología y limnología de la corta.

La mineralogía de los taludes y bermas, junto con la superficie expuesta en la corta, es importante en relación a la química del agua. Por ejemplo, las rocas que contienen sulfuros de hierro, en presencia de agua y oxígeno, pueden ser oxidadas, lo que puede producir lagos con altos niveles de sulfatos y metales disueltos (Fe, Al, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd). Si el agua está en contacto con calcita o dolomía en las litologías encajantes de la mineralización, la acidez puede ser neutralizada de forma natural y el agua en este caso puede presentarse con mejor calidad.

Otro factor que influye en la calidad de las aguas de una corta es la hidrología, donde hay que valorar el volumen y naturaleza química de las diversas entradas a la corta: i) precipitación directa, ii) agua de escorrentía y iii) infiltración subterránea. Si hay una renovación del agua por considerables entradas/pérdidas a través de flujo subterráneo en zonas de alta permeabilidad, ayudará a mantener cierta calidad del agua. En el caso contrario de un marcado estancamiento facilita el empeoramiento de su calidad. Como pérdida de agua, la evaporación tiene un papel muy importante, así en un área árida los efectos de la evaporación neta puede llegar a ser un proceso importante a largo plazo en la calidad del agua (Eary, 1998).

## VI.2. LIMNOLOGÍA FÍSICA EN RELACIÓN A LA FORMA DEL LAGO

La morfología de un lago minero nos va a aportar cierta información que nos va a permitir clasificarlo a priori en relación a los procesos de mezcla y estratificaciones que se pudieran dar en la columna de agua, antes incluso de realizar su estudio. Especialmente importante es la relación que existe entre la profundidad máxima y el área superficial del lago, ya que en función de esta relación, pueden o no tener lugar, procesos de circulación en la columna de agua, y así presentar o estar ausentes, las zonaciones de carácter físico-químico dentro de la masa de agua.

Así pues la **profundidad relativa** es un parámetro que puede ser usado para comparar tipos de lagos, y prever ciertos aspectos de su limnología. La profundidad relativa, ya definida como el ratio, expresado en porcentaje, entre la máxima profundidad del lago y el valor medio de su diámetro, puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Profundidad relativa} = 50z_m \sqrt{\pi} / \sqrt{A_0}$$

Donde  $z_m$  es la profundidad máxima, y  $A_0$  es el área superficial (Doyle y Runnells, 1997).

Los fenómenos de mezcla se explican fundamentalmente por la diferente densidad que tiene el agua en función de la temperatura, presentando un máximo a 4 °C (Figura 6.1). Así pues, en el rango 0-4 °C, las aguas más frías sobrenadan sobre las más cálidas al ser más ligeras. Esto explica la estratificación térmica en invierno en climas fríos. La situación se invierte por encima de los 4 °C. Entonces son las aguas más cálidas las más ligeras, ocupando la parte más superficial de la columna de agua. Es la razón de la estratificación estival. La evolución de las temperaturas con las estaciones provoca la

inversión térmica propia de la estratificación de invierno o de verano, produciéndose entonces la mezcla de aguas en profundidad.

Normalmente los lagos con baja profundidad relativa (3-10%), son lagos en los que se suele dar una mezcla anual que afecta a toda la columna de agua, introduciendo oxígeno desde la superficie a las zonas más profundas. Estos lagos se denominan **holomicticos**. Si esta mezcla se produce dos veces al año, para lo cual se requiere la existencia de estratificación térmica de verano e invierno, lo que ocurre solo en climas fríos, se denominan **dimicticos**.

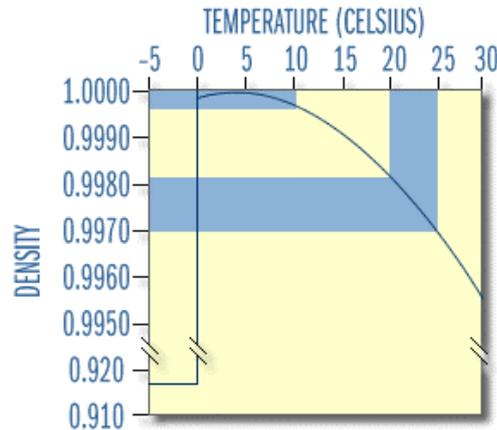


Figura 6.1. Variación de la densidad del agua en función de la temperatura. La máxima densidad se alcanza a 4 °C. Las zonas sombreadas señalan las variaciones en la densidad del agua con intervalos de cinco grados de temperatura.

Los lagos holomicticos presentan una estratificación térmica en los meses más cálidos. Se reconocen entonces tres zonas en la columna de agua (Figura 6.2); el **epilimnion** (la más cálida y superficial, de solo algunos metros de espesor), el **metalimnion** o termoclina (donde se produce un acusado descenso de la temperatura en solo algunos metros) y el **hipolimnion** (la más profunda y de gran espesor, con temperatura constante) (Figura 6.2).

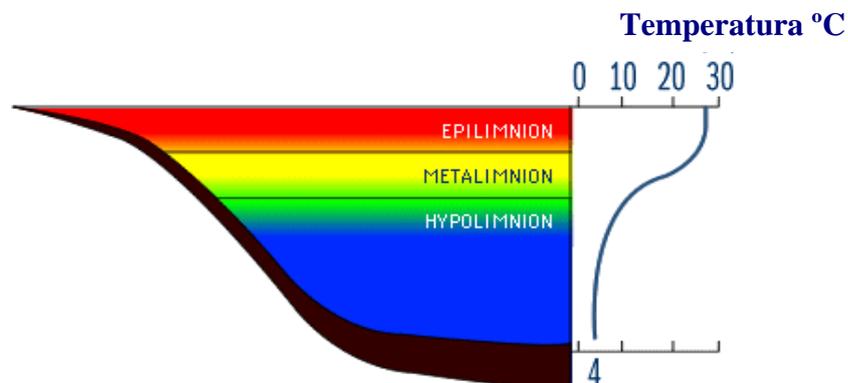


Figura 6.2. Estratificación térmica y zonas definidas en la columna de agua en un lago holomictico.

En invierno esta estratificación desaparece, y es cuando se produce la mezcla de la parte

superficial con las zonas más profundas, produciéndose una homogeneización de las características del agua.

Un ejemplo sobre la variación de la temperatura del epilimnion y hipolimnion, a lo largo del año en un lago holomíctico, se tiene en la figura 6.3. Hasta mediados del verano las temperaturas de ambas zonas se van incrementando. La diferencia de temperaturas entre ambas capas se incrementa al calentarse más rápidamente la más superficial. Cuando la insolación se atenúa y la temperatura ambiente empieza a decrecer, se ve reflejado rápidamente en la temperatura del epilimnion, sin embargo la temperatura del hipolimnion continua ascendiendo lentamente. Cuando en el descenso de la temperatura del epilimnion se iguale o sea ligeramente inferior que la del hipolimnion se iniciaran los procesos de mezcla.

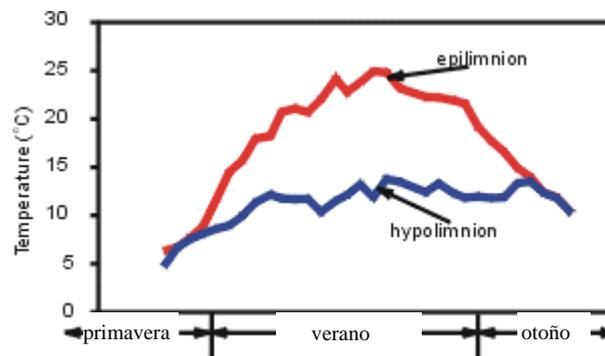


Figura 6.3. Ejemplo de la evolución de la temperatura con las estaciones, en el epilimnion e hipolimnion, en un lago holomíctico.

Los lagos con una profundidad relativa alta (10-40%), se suelen comportar como lagos **meromícticos**. Este tipo de lago se caracteriza por la existencia de una estratificación química permanente, provocada por la ausencia de fenómenos de mezcla en la capa más profunda. Esta capa que no llega a mezclarse nunca se denomina **monimolimnion**, diferenciándola de otra capa superior afectada por mezclas estacionales y denominada **mixolimnion**. Es habitual que el monimolimnion sea anóxico. La zona intermedia entre estas dos capas recibe el nombre de **quimioclina**. El mixolimnion se ve sometido a los procesos de estratificación térmica y mezcla ya comentados (Figura 6.4).

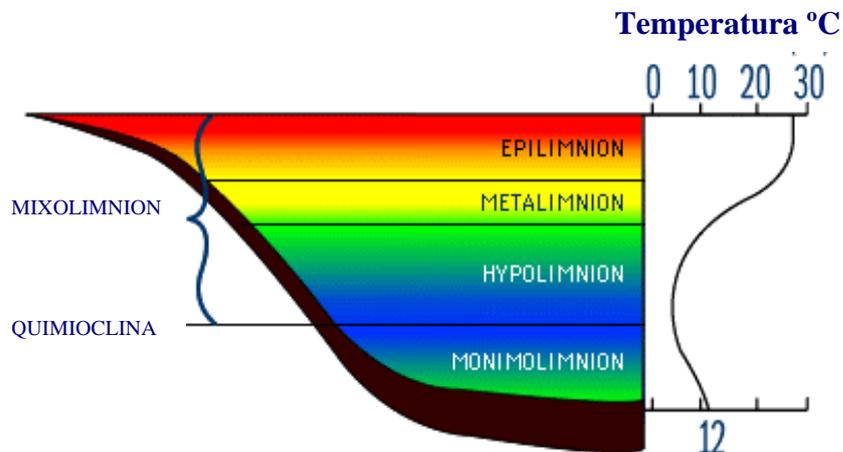


Figura 6.4. Estratificación térmica y química en un lago meromíctico.

### VI.3. CLASIFICACIÓN DEL LAGO MINERO DE AZNALCÓLLAR POR SU MORFOLOGÍA

En marzo de 2005, la profundidad máxima de la corta de Aznalcóllar era de unos 39 metros, y la superficie de la lámina de agua era de 284.000 m<sup>2</sup> (Figura 6.6). Con estos datos la profundidad relativa es del 6%, por lo que cabe esperar, en base a lo anteriormente comentado, que el lago minero de la corta Aznalcóllar se comporte como un **lago holomictico** y como tal, se tenga una mezcla completa de toda la columna de agua en los meses más fríos de cada año.

Esto se ha podido comprobar que ocurre así, a través del programa de monitorización bimensual que se ha llevando a cabo desde marzo de 2005 hasta la actualidad, por parte del IGME (ver Capítulo XI), y con el dispositivo de monitorización instalado en la corta por el UFZ, organismo de investigación alemán colaboradores del IGME en este proyecto.

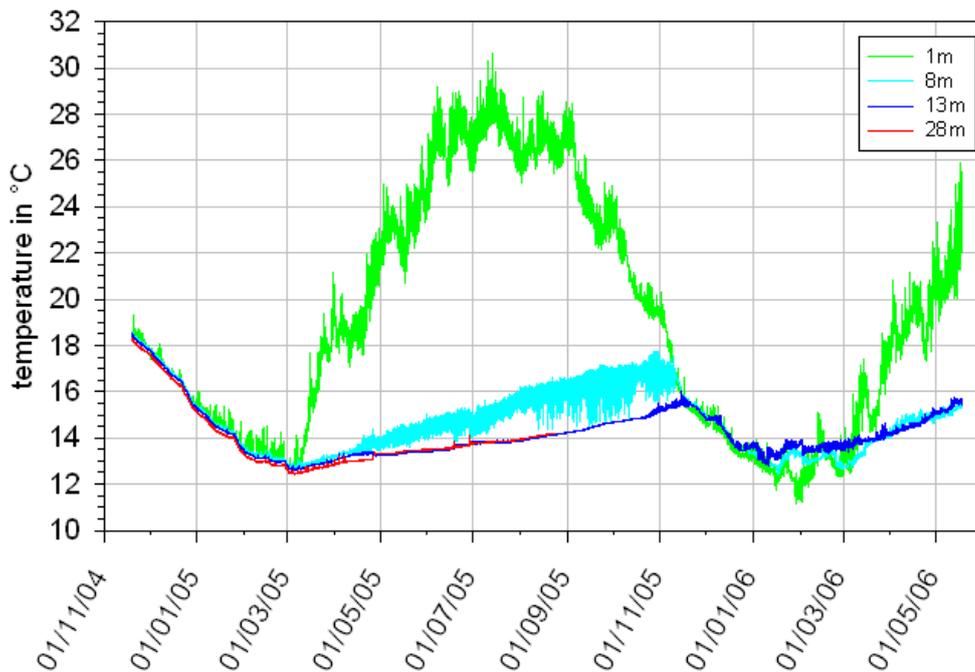


Figura 6.5. Registro continuo de la temperatura desde noviembre-2004 a mayo-2006, a cuatro profundidades diferentes. El proceso de mezcla en el invierno de 2005/2006 se inicia en noviembre y finaliza en marzo.

### VI.4. BATIMETRÍA DE LA CORTA DE AZNALCÓLLAR

#### VI.4.1. Batimetría del UFZ en el 2002

En el mes de diciembre de 2002, en colaboración con el UFZ, se realizó la primera batimetría de la corta Aznalcóllar (Figura 6.6). La cota de la lámina de agua en la corta se encontraba en ese momento a -6,6 m r.n.m. (metros en referencia al nivel del mar).

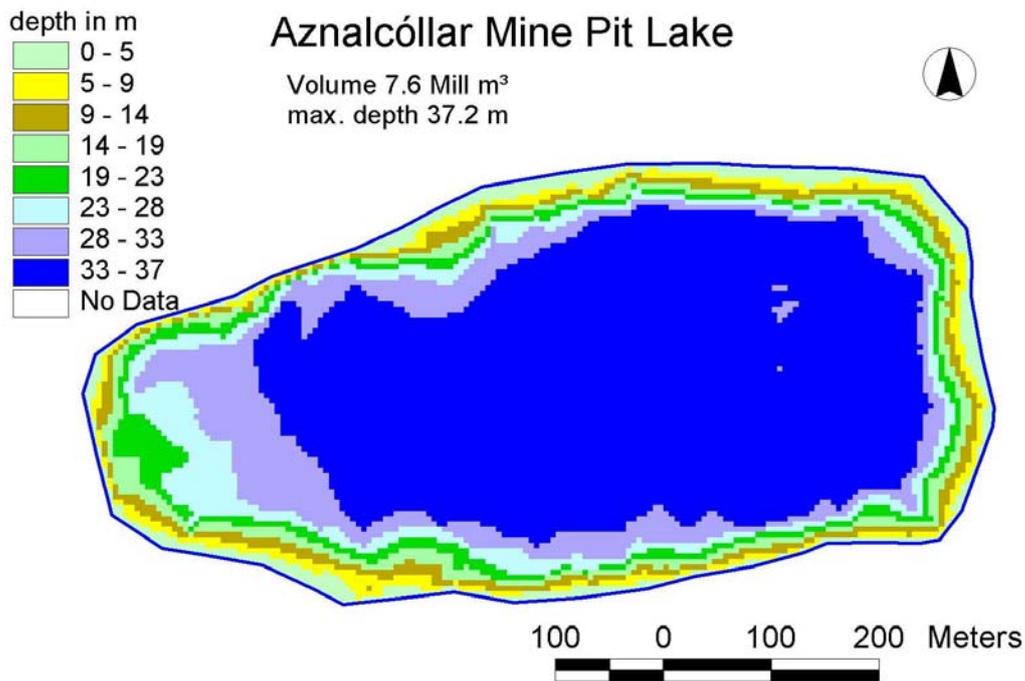


Figura 6.6. Batimetría de la corta de Aznalcóllar realizada en colaboración con el UFZ en diciembre de 2002. La profundidad máxima era de 37,2 m y el volumen de agua de la corta de 7,6 Mm<sup>3</sup>. La cota de la lámina de agua estaba en -6,6 m.

En la mayor parte de la corta la profundidad es bastante homogénea situándose entre los 33 y 37 m, siendo la profundidad máxima de 37,2 metros. La zona más somera se encuentra en la parte más occidental, con una profundidad comprendida entre los 20 y 30 m. Esto puede estar relacionado con el hecho de que es en esta zona donde está el punto de vertido de los lodos provenientes de la planta de tratamiento de agua. Las orillas en general son muy abruptas, incrementándose notablemente la profundidad al alejarse de ellas.

El conocimiento de la batimetría permitió calcular el volumen de agua en la corta, estimándose en unos 7,6 millones de m<sup>3</sup>.

#### VI.4.2. Batimetría del IGME en el 2005

Desde la primera batimetría efectuada en diciembre de 2002, hasta el inicio de este proyecto a finales de 2004, se ha venido efectuando una serie de vertidos de sólidos a la corta (suelos contaminados recogidos en el valle del Guadiamar y cenizas de tostación de pirita de la escombrera S-9, ver Capítulo VII). Dado el importante volumen de estos vertidos, desde la Delegación Provincial de la Consejería de Innovación Ciencia y Empresa en Sevilla, se solicitó al IGME la realización de una nueva batimetría que permitiera conocer el volumen disponible para nuevos vertidos previstos de residuos mineros (desmantelamiento de las escombreras S-2 y S-3).

Esta batimetría solicitada se efectuó en marzo de 2005, cuando la cota de la lámina de agua se encontraba en -4,26 m r.n.m. Para su realización se utilizó una ecosonda manual Modelo SM-5 de Speedtech Instruments (resolución  $\pm 1$  m) y un GPS Garmin modelo

76S. Se comenzó definiendo el perímetro de la corta y a continuación se fue levantado perfiles batimétricos con orientación norte-sur cada 50 metros. En su conjunto la batimetría quedó definida con un total de 347 puntos.

Los datos se trataron con el programa Surfer 8, obteniendo las isóbatas mediante la interpolación de los puntos (Figura 6.7), así como la superficie de la lámina de agua (284.000 m<sup>2</sup>) y el volumen total de agua (6,05 millones de m<sup>3</sup>). La máxima profundidad medida en la corta fue de 38,8 metros.

La única diferencia entre las dos batimetrías efectuadas, en lo que respecta a la morfología del fondo, se da en la parte suroriental de la corta. En esta zona se aprecia un suave levantamiento del fondo que está sin duda relacionado con el hecho de que fue precisamente en esta orilla donde se estableció la plataforma de vertido de la escombrera de cenizas púrpuras, estimado su volumen según el personal de EGMASA en aproximadamente 1 millón de m<sup>3</sup>. Esto ha provocado una zona de fondo con profundidades entre 30 y 35 m con una forma que recuerda a un cono de deyección o vertido.

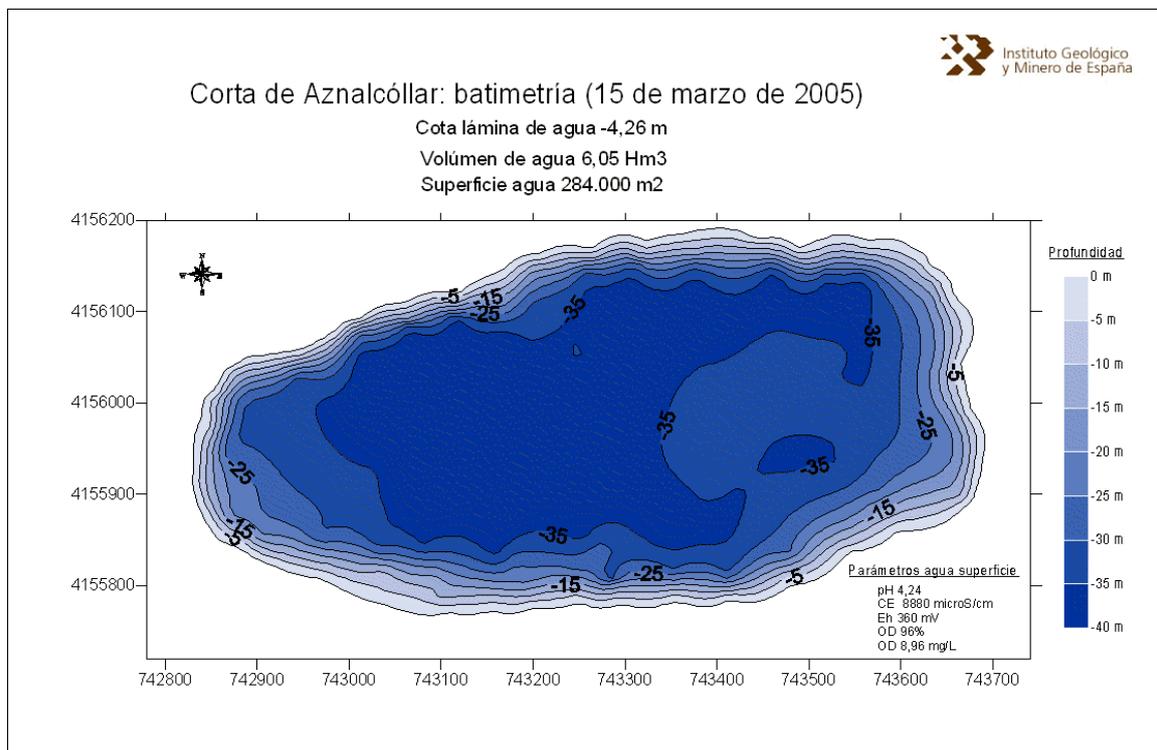


Figura 6.7. Batimetría de la corta de Aznalcóllar realizada por el IGME en marzo de 2005. La cota de lámina de agua estaba en -4,26 m r.n.m, el volumen del agua de la corta calculado fue 6,05 hm<sup>3</sup> y la superficie de la lámina de agua fue 284.000 m<sup>2</sup>.

Con el objetivo de estimar el volumen vertido a la corta entre la batimetría de 2002 y la de 2005, se ha efectuado la comparación entre el volumen de agua total de la corta en las dos fechas, corregida la diferencia asociada a los 2,4 m de diferencia entre la cota de la lámina de agua de ambas fechas (-6,6 m r.n.m. en 2002 y -4,2 m r.n.m. en 2005). Así a los 6,05 millones de m<sup>3</sup> de 2005 hay que descontarles 0,7 millones de m<sup>3</sup>, por la mencionada diferencia de cota (lo que resulta 5,35 Mm<sup>3</sup>), para poderlos comparar con el

dato de 2002 (7,6 Mm<sup>3</sup>). Efectuada esta corrección se deduce que el volumen de residuos sólidos vertidos a la corta entre diciembre de 2002 y marzo de 2005 debe de estar por los 2,25 millones de m<sup>3</sup>.

Antes de finalizar el proyecto hubiera sido interesante realizar una última batimetría, pero tanto por motivos de seguridad (el talud de la plataforma de vertido era muy inestable), como por limitaciones técnicas (la escasa consolidación del fondo de la corta después de tanto vertido absorbía la señal de la ecosonda) no ha sido posible efectuar su ejecución.