

## XVI. LIMNOLOGÍA FÍSICO-QUÍMICA DE LA CORTA INUNDADA DE LOS FRAILES: EVOLUCIÓN ANUAL

Desde junio de 2005 se han llevado a cabo 8 campañas de campo en la corta de Los Frailes. En estas campañas se vienen realizando de forma sistemática las siguientes tareas: 1) Medida *in situ* de parámetros físico-químicos (pH, potencial redox (Eh), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD) y temperatura) en toda la columna de agua (Figura 16.1); 2) Muestreo de agua a diferentes profundidades para su análisis en el laboratorio; 3) Valoraciones de alcalinidad *in situ* de las muestras obtenidas, y 4) Medida del aumento del nivel de agua. Ocasionalmente se han medido en la columna de agua la atenuación de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), la turbidez y la clorofila.

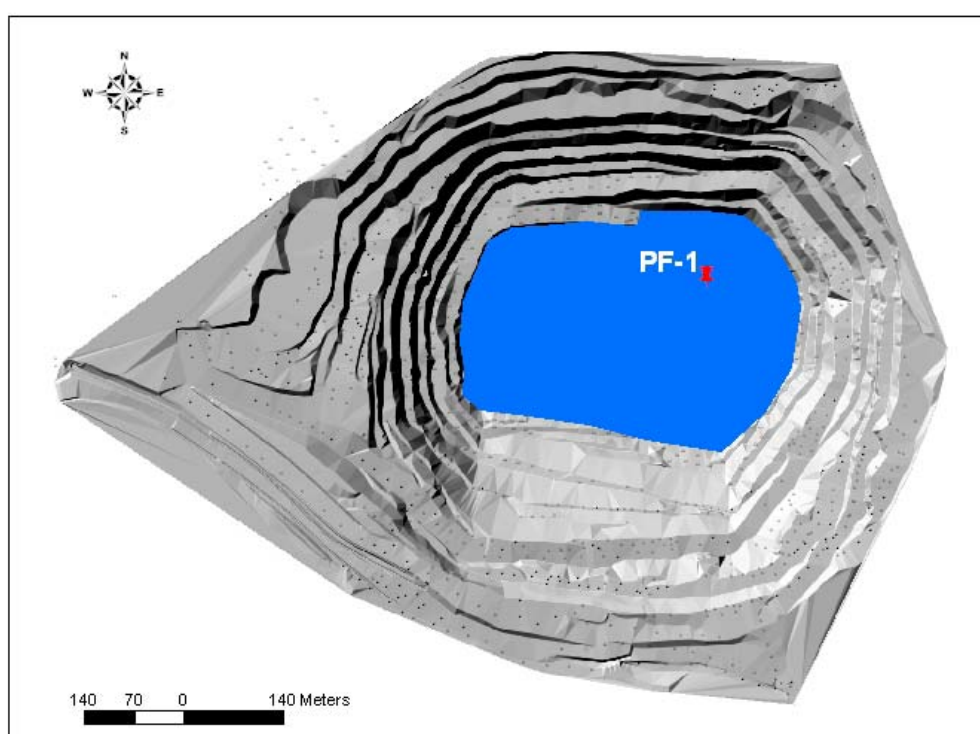


Figura 16.1. Nivel actual de inundación en la corta Los Frailes y situación del perfil vertical (PF-1) realizado en cada una de las campañas (zona de máxima profundidad).

Las campañas de campo en la corta se han realizado con periodicidad bimensual, desde junio de 2005 hasta julio de 2006. A partir de esta fecha se viene efectuando con la misma periodicidad el registro del aumento del nivel de agua. Durante el año 2007 se han realizado dos nuevas campañas de campo en enero y marzo.

### XVI.1. MORFOLOGÍA DE LA CORTA DE LOS FRAILES

La excavación de la corta Los Frailes comenzó en el año 1995 y finalizó en el año 2001. La cota final alcanzada en su fondo fue de -166 m, el borde de la corta se sitúa entre los 80-100 m, y el volumen excavado supera los 47 hm<sup>3</sup>. El lago minero presenta una forma

semirectangular, con dimensiones aproximadas de 460 m en dirección E-O y 280 m en dirección N-S.

Actualmente (noviembre 2007) la profundidad máxima del lago es de unos 105 metros, y su superficie aproximadamente 133.000 m<sup>2</sup> (datos obtenidos del modelo digital del terreno (Figura 16.2) a partir de la topografía proporcionada por EGMASA). Teniendo en cuenta estos datos su profundidad relativa es de 25% (ver su definición en el Capítulo VI), y según Doyle y Runnells (1997), con esta profundidad relativa tan elevada el lago se debería comportar como meromictico: presentaría una estratificación química permanente al existir una capa de agua profunda ajena al proceso de mezcla durante la época invernal. Esto sin embargo no es así, debido probablemente a la considerable entrada de agua subterránea (~3.100 m<sup>3</sup>/día de llenado efectivo en el periodo 2002-2007), lo cual puede favorecer la homogeneización química de toda la columna de agua, comportándose la corta inundada como un lago holomictico.

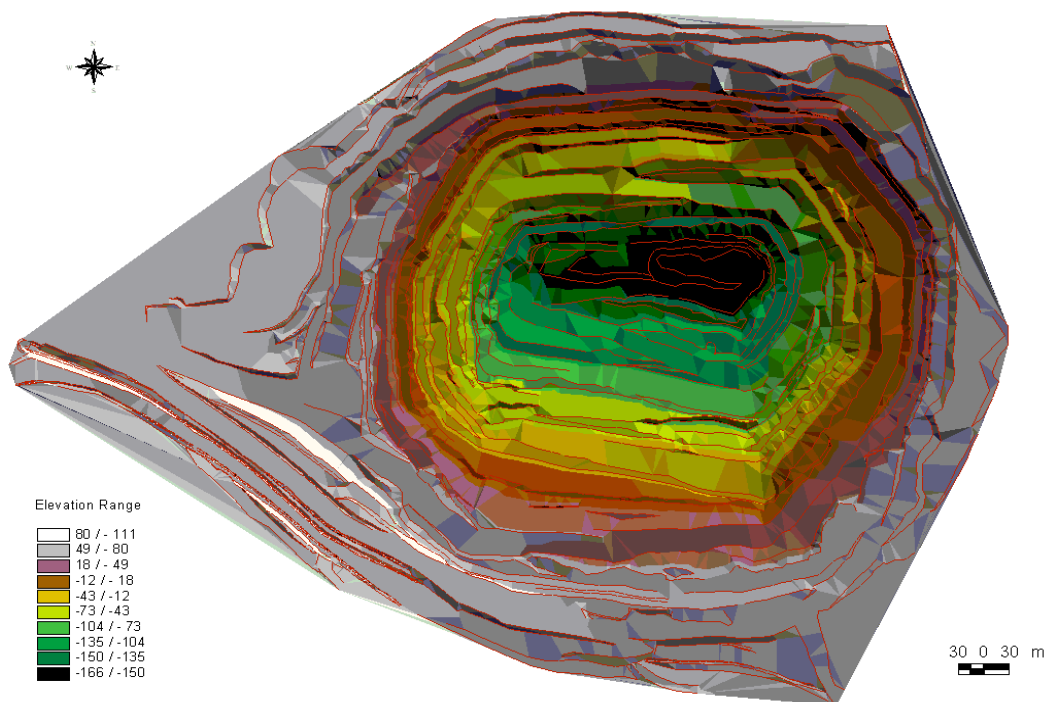


Figura 16.2. Modelo digital del terreno de la corta Los Frailes.

Una entrada muy importante de agua es la que se produce a través del túnel de exploración, que drena materiales paleozoicos, el cual desemboca en la corta a una cota de -123 m. El caudal es considerable: 320 m<sup>3</sup>/d, según el modelo digital de flujo subterráneo desarrollado por BAPSL (2000 a), para la cota actual de la lámina de agua (-61 m). Además la corta recibe el aporte de agua subterránea que fluye desde los materiales del Paleozoico, estimándose su caudal, según el modelo citado, en unos 310 m<sup>3</sup>/d.

## XVI.2. EVOLUCIÓN DEL NIVEL DEL AGUA EN LA CORTA LOS FRAILES

El modelo digital del terreno de la corta Los Frailes (Figura 16.2), permite calcular el volumen y la superficie del lago minero a diferentes cotas de nivel de agua (Anexo VI). En la última visita efectuada a la corta (julio de 2007) el nivel estaba en la cota  $-61$  metros, y el lago contenía un volumen de  $6,36 \text{ hm}^3$ . El llenado efectivo desde el inicio de su inundación (año 2002) equivale a un caudal medio diario de  $\sim 3.100 \text{ m}^3/\text{día}$  (Figura 16.3). En el periodo en el que se ha efectuado el seguimiento del llenado de la corta en este proyecto (oct-2005 a jul-2007), el nivel del agua se ha incrementado en unos 13 metros, lo que equivale a un incremento en volumen de  $1,6 \text{ hm}^3$ , resultando para este periodo un llenado efectivo de  $\sim 2.550 \text{ m}^3/\text{día}$ . Esta disminución del caudal efectivo de llenado puede deberse a la reducción progresiva de la entrada de agua subterránea según se incrementa el nivel del lago (ver Capítulo III), y al aumento progresivo de las pérdidas por evaporación según se incrementa su superficie (cerca de un 15% en este periodo).

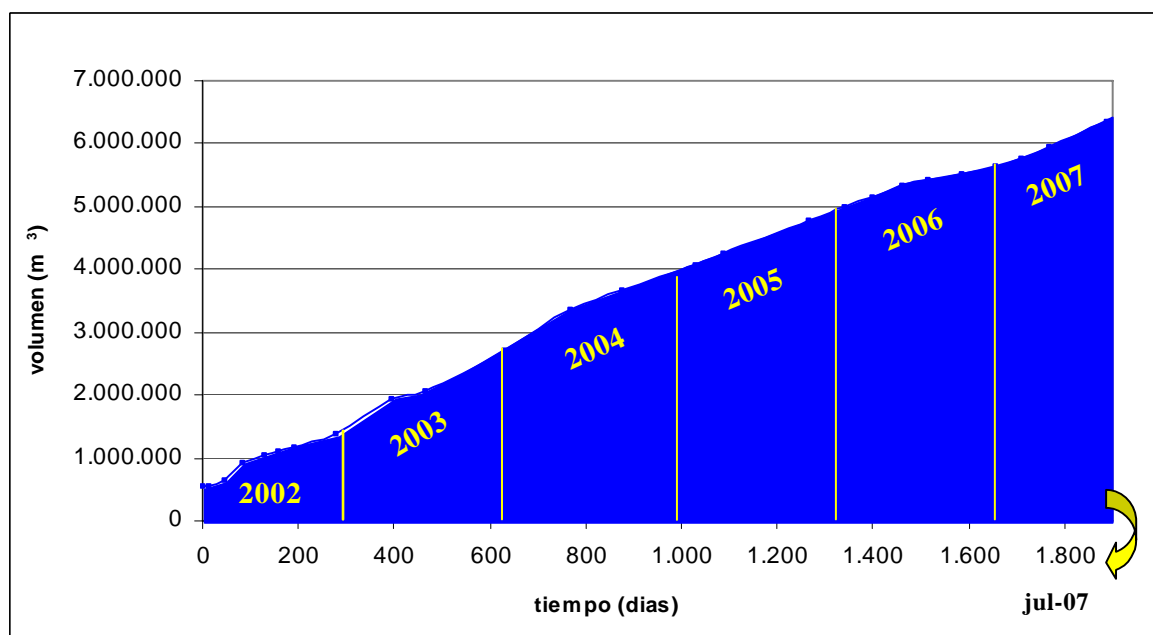


Figura 16.3. Representación de la evolución del volumen de agua de la corta Los Frailes, desde febrero de 2002 a julio de 2007. Se observa que el incremento del volumen de agua es relativamente constante en este periodo.

En base a estos datos es previsible que el volumen de agua en la corta de Los Frailes, a finales del año que viene, sea aproximadamente de  $7,95 \text{ hm}^3$ , situándose la lámina de agua a una cota aproximada de  $-50 \text{ m r.n.m.}$  (Figura 16.4).

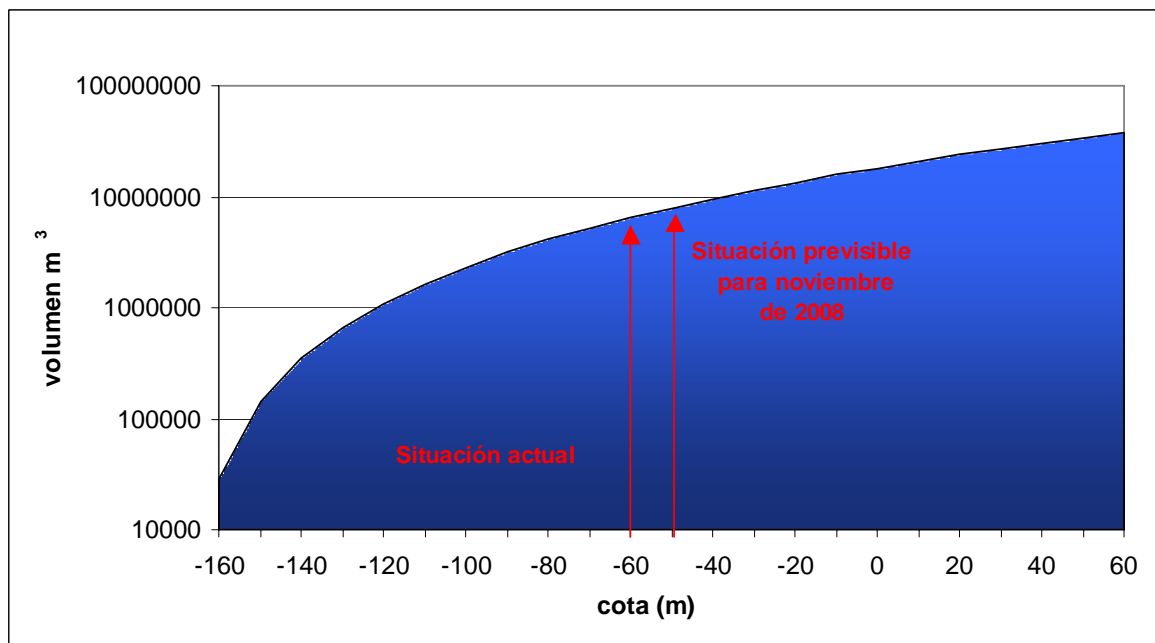


Figura 16.4. Curva volumen-nivel del agua en la corta Los Frailes. Indicando la situación actual ( $6,36 \text{ hm}^3$ ,  $-61 \text{ m}$ ) y la previsible a finales del año 2008 ( $7,95 \text{ hm}^3$ ,  $-50 \text{ m}$ ).

### XVI.3. HIDROQUÍMICA DE LA COLUMNA DE AGUA EN CORTA LOS FRAILES

Para el estudio de la hidroquímica del lago en este periodo se dispone de los datos generados en ocho muestreos, efectuados en los meses de junio y octubre del año 2005, enero, marzo, mayo y julio del año 2006, y enero y marzo de 2007.

#### XVI.3.1. Estudio de los parámetros físico-químicos obtenidos *in situ*

Mediante los parámetros que se obtienen con la sonda multiparamétrica de la columna de agua, se puede conocer gran parte de las características del lago en cuanto a su estratificación térmica y química, y procesos asociados. A continuación se presentan los resultados obtenidos de cada parámetro en las diferentes campañas.

##### *Temperatura (T)*

El lago ha estado estratificado térmicamente en las campañas realizadas en octubre de 2005, mayo y julio de 2006, y marzo de 2007 (Figura 16.5 A). Se puede considerar entonces que la estratificación se inicia a mediados de primavera y permanece hasta mediados de otoño. En invierno la temperatura del agua es homogénea y se sitúa sobre los  $14 \text{ }^\circ\text{C}$ , en primavera se empieza a establecer una capa superficial algo más cálida (mar-07, Figura 16.5 A), la temperatura de esta capa se va incrementando (may-06) hasta los meses más cálidos del verano, puede alcanzar los  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  (jul-06), a la vez que se reduce levemente su espesor. En estos momentos se tiene una capa superficial (epilimnion) de unos 5 m de espesor, a continuación una capa de transición en la que la temperatura desciende muy rápidamente hasta los 10 m de profundidad (metalimnion),

y a partir aquí y hasta el fondo, una capa inferior (hipolimnion) con una temperatura constante de unos 15 °C. A finales del verano la capa superficial empieza a enfriarse, esto provoca su mezcla con la parte más superficial del metalimnion, por lo que el epilimnion alcanza mayor profundidad a la vez que se reduce el espesor del metalimnion (oct-06). Durante el periodo que dura la estratificación térmica la capa inferior ha ido incrementando su temperatura muy lentamente hasta los 16 °C. Cuando en otoño se igualan las temperaturas de las capas se inician los procesos de mezcla en la vertical, y estos duran mientras la temperatura del agua se vaya enfriando durante los meses de invierno, hasta el inicio en la primavera de un nuevo ciclo.

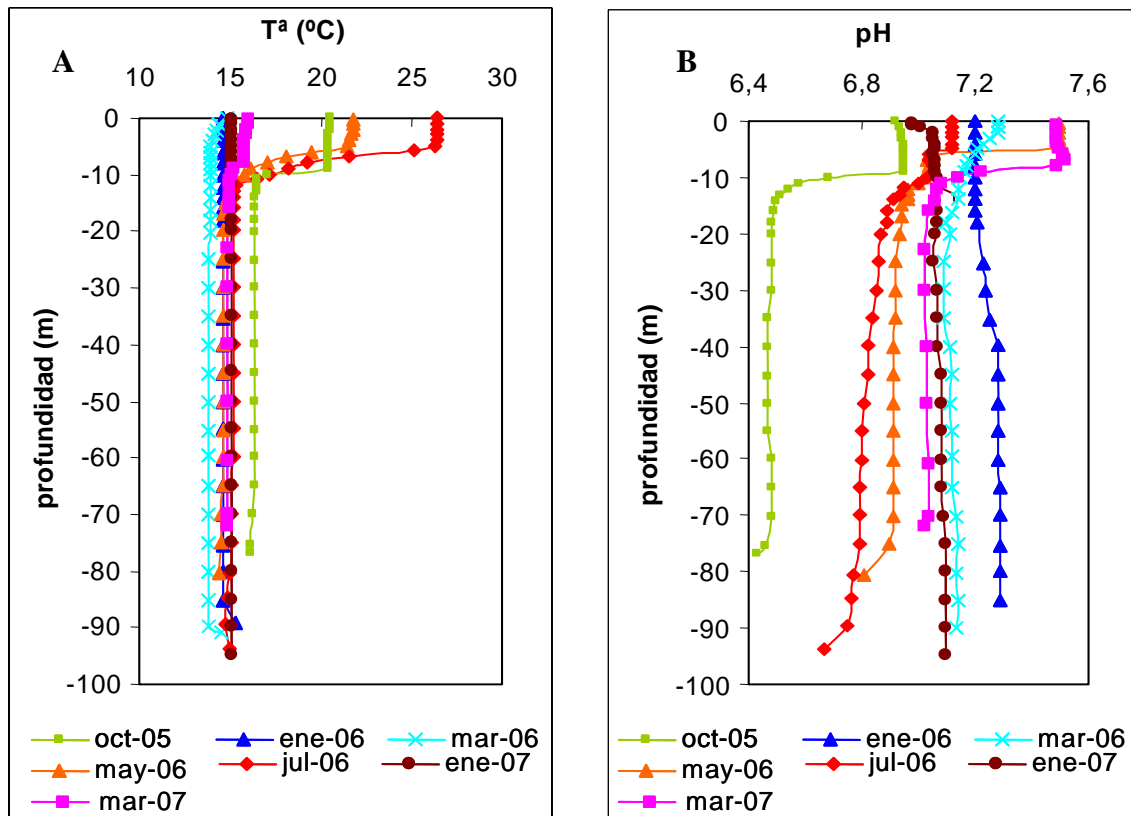


Figura 16.5. Variación con la profundidad y evolución estacional de la T y pH. A) Temperatura. B) pH.

### *pH*

El pH en la columna de agua varía levemente con la profundidad, manteniéndose siempre en valores circunneutrales (Figura 16.5 B). En el epilimnion se miden los valores más altos (6,9 en octubre y 7,5 en mayo de 2006 y marzo de 2007), los cuales descienden en el metalimnion, registrándose en el hipolimnion los valores más bajos (6,5 en octubre y 6,8 en julio), los cuales permanecen invariables con la profundidad.

En enero de 2006 el pH (7,2) de la corta es homogéneo en profundidad debido a que se ha producido la mezcla anual en toda la columna de agua. En enero de 2007 también se tiene esta homogeneidad salvo en el primer metro, cuyo valor es algo menor, probablemente debido a las fuertes lluvias caídas que han provocado la entrada agua de lluvia, más ácida y menos densa que el agua de la corta.

### Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica se ha mantenido en el rango 2,07-2,31 mS/cm en todas las campañas realizadas (Figura 16.6 A). En octubre de 2005, el epilimnion (2,31 mS/cm) muestra una conductividad superior al hipolimnion (2,15 mS/cm), debido seguramente a la evapoconcentración ocurrida durante los meses de verano. Al igual que otros parámetros la conductividad también pone de manifiesto la desaparición de la zona de transición (metalimnion) entre las capas superficial y profunda en octubre de 2005. En los meses de invierno (ene-06 y mar-07), la corta presenta una CE muy homogénea con la profundidad, debido a la mezcla anual. Se ha observado una leve bajada de la conductividad de julio de 2006 (2,22 mS/cm) a enero de 2007 (2,07 mS/cm), la cual debe reflejar la dilución provocada, por la entrada de agua a la corta, asociado a un periodo de fuertes lluvias (254 mm en octubre/noviembre).

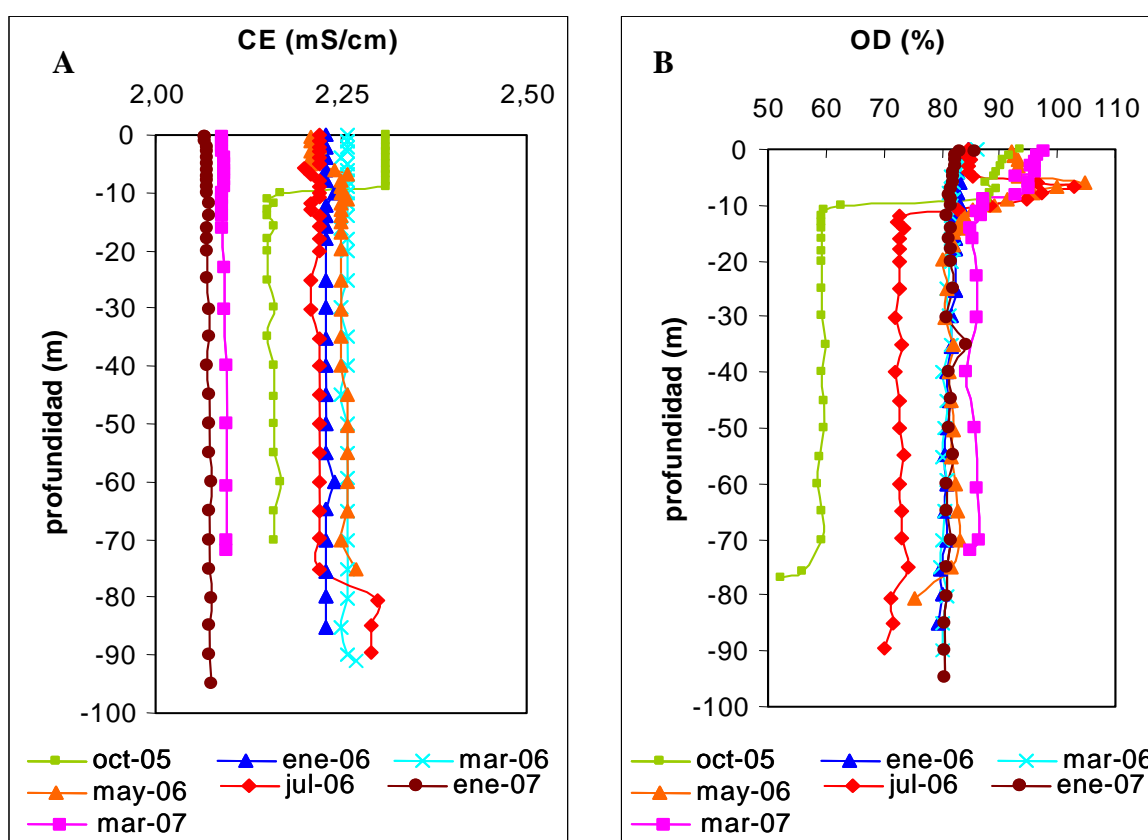


Figura 16.6. Variación con la profundidad y evolución estacional de la conductividad (CE) y oxígeno disuelto (OD). A) Conductividad eléctrica. B) Oxígeno disuelto (% sat.).

### Oxígeno disuelto (OD)

Los valores de oxígeno disuelto son elevados manteniéndose en el rango 5,5-9,5 mg/l, en ninguna ocasión se ha encontrado condiciones de anoxia en la columna de agua (ver tablas en el Anexo VI). Las concentraciones de oxígeno disuelto expresadas como porcentaje de saturación nos indican que la masa de agua en su conjunto se mantiene entre el 56 y el 98% (Figura 16.6 B).

En el periodo que el lago permanece estratificado térmicamente, el epilimnion siempre está cercano a su saturación en oxígeno, mientras que en el hipolimnion se va reduciendo su concentración gradualmente desde la primavera al otoño. Hay por tanto un consumo de oxígeno en el hipolimnion en este periodo que se aproxima a los 3 mg/l.

En mayo y julio de 2006, se ha observado un máximo metalimnetico en oxígeno disuelto, alcanzando valores de 108% (Figura 16.6 B). Estos máximos de oxígeno en el metalimnion que llegan a alcanzar valores de sobresaturación, son casi siempre debidos a la producción de oxígeno asociada a la actividad fotosintética de las poblaciones algales (Wetzel, 1981), como se verá más adelante.

### Potencial redox (Eh)

Los valores de Eh medidos con la sonda multiparámetrica presentaron problemas de estabilización, observándose una deriva del valor según desciende la sonda en el seno del agua. En ningún caso se ha observado un cambio brusco del Eh con la profundidad (Anexo VI). El valor medio de Eh de los muestreos realizados se encuentra entre 547 mV y 658 mV.

### XVI.3.2. Valoración de otros parámetros obtenidos *in situ* (clorofila, turbidez y PAR)

En el mes de septiembre se levantó un perfil vertical con una nueva sonda multiparamétrica (Datasonde serie 5, de Hydrolab®) que incorpora sensores para medir la clorofila, la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y la turbidez (Figura 16.7). El perfil vertical de estos parámetros se ha representado hasta los 18 metros, dado la homogeneidad que muestra el lago en profundidad.

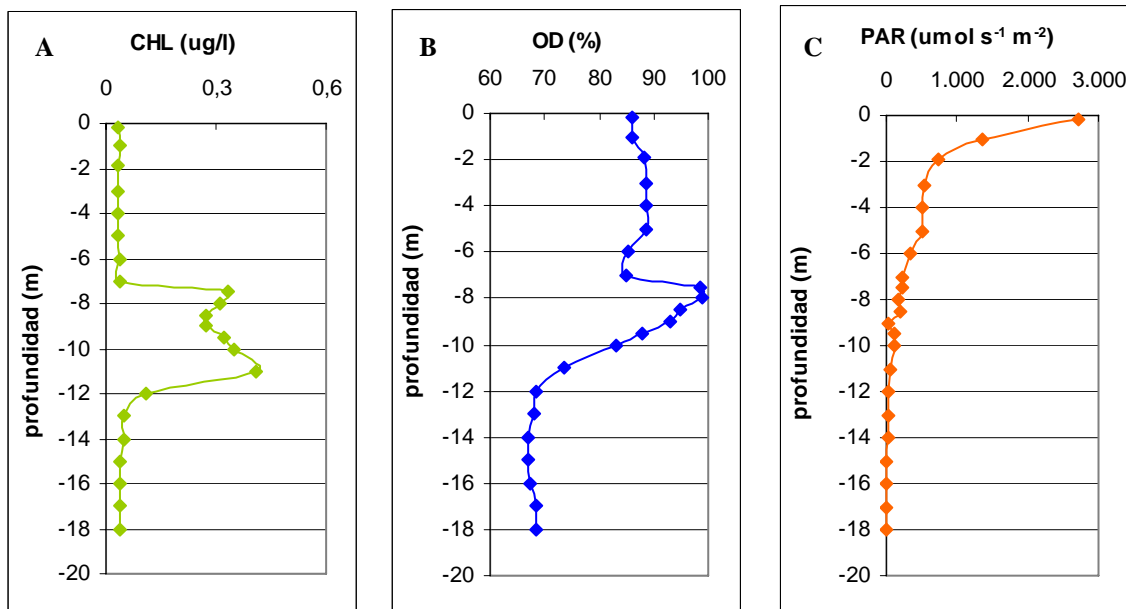


Figura 16.7. Perfil vertical realizado en la corta de Los Frailes, en septiembre de 2006. A) Clorofila. B) Oxígeno disuelto. C) Radiación fotosintéticamente activa (PAR).

Se ha observado en el metalimnion la presencia de clorofila (0,2 a 0,4 µg/l), lo cual denota la existencia de una actividad fotosintética, por lo que probablemente en esta zona se tenga una población de algas (Figura 16.7 A), además se ha identificado un máximo de oxígeno disuelto en la misma zona, lo que ratifica la presencia de esta población y su actividad fotosintética (Figura 16.7 B).

Las algas que se desarrollan en lagos en general, son normalmente estenotermas, estando adaptadas a crecer bien a temperaturas e intensidades de luz bajas (Wetzel, 1981), como ocurre en el metalimnion de la corta Los Frailes, donde se ha registrado una fuerte atenuación de la penetración de la radiación PAR (la que activa la fotosíntesis), la cual se atenúa drásticamente en los primeros dos metros (más de 2/3), para luego decrecer más suavemente en el metalimnion (Figura 16.7 C).

La corta de Los Frailes no presenta turbidez en ningún punto de la columna de agua, tal como ha demostrado los valores registrados en el perfil vertical efectuado con la nueva sonda multiparamétrica.

### XVI.3.3. Estudio de la evolución química del agua de la corta en el periodo 2003-2005

Las concentraciones en sulfato y metales disueltos en la corta Los Frailes son altas en comparación con las aguas naturales, pero bajas si se comparan con las concentraciones habituales de cualquier lago minero de la Faja Pirítica (ver Capítulo XVII). Sus valores de pH circunneutrales son verdaderamente una excepción, dentro de los lagos mineros estudiados en la Faja Pirítica, los cuales suelen presentar un pH en torno a 3.

Muestra superficial	Fecha			pH	Eh mV	CE µS/cm	OD mg/l	OD %	T °C	Alc. mg/l
	Mes	Día	Año							
CLF	12	11	2003	5,8	234	2.350	7,30	78	17,3	44
CLF	3	31	2005	7,6	265	2.070	7,7	95	21,3	40

Tabla 16.1. Parámetros físico-químicos de muestras de agua superficial de la corta de Los Frailes en diciembre de 2003 y marzo de 2005. La alcalinidad se expresa en mg/l eq. de CaCO<sub>3</sub>.

Muestra	Fecha	elementos mayoritarios												
		PO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	Ca	Mg	Na	K	Mn	Cu	Zn	Fe	Al
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l
CLF	dic-03	*	1.020	*	0,23	258	72	98	4	5,2	0,4	47	0,5	3,78
CLF	mar-05	<0,05	1.380	67	122	282	64	81	5,1	3,8	0,1	33	0	0,41

elementos trazas														
Ag	As	Ba	Cd	Co	Cr	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Th	Tl	U	V
µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
<4	12,3	33	67	127	455	1,5	65	6,3	8,6	0,5	10	7,2	0,4	3,3
0,6	17,2	28	40	38	6,6	2,2	*	0,9	26	*	<0,4	2,2	2,8	1,8

Tabla 16.2. Analítica de las muestras del agua superficial en la corta de Los Frailes en diciembre de 2003 y marzo de 2005, donde se observa un descenso en la concentración de la mayoría de los elementos disueltos. Elementos no analizados (\*).



El lago de Los Frailes mejoró la calidad de sus aguas en el periodo comprendido desde diciembre de 2003 a marzo de 2005, incrementándose su pH de 5,8 a 7,6, lo que provocó una reducción de los metales disueltos (Tablas 16.1 y 16.2).

Esto significa que las aguas que van inundando progresivamente la corta son capaces de contrarrestar la acidez provocada por la oxidación de los sulfuros. La alcalinidad de las aguas que entran a la corta es un parámetro clave, pero en este caso parece que es más importante su gran volumen. Ya se ha mencionado anteriormente que el volumen medio diario de agua que ha estado entrando a la corta, en el periodo 2002-2005, es superior a los 3.200 m<sup>3</sup> día. Este importante volumen de agua mejora la calidad de agua debido a:

1. La alcalinidad aportada en forma de iones bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), la cual reacciona y neutraliza la acidez que pudiera existir en el agua de la corta.
2. La dilución de los contenidos metálicos y del anión sulfato.
3. El alcanzar pH neutros provoca, que los metales disueltos sufran hidrólisis y precipitación, formándose principalmente los precipitados de Fe y Al que además favorecen la retirada de otros metales traza (p.ej. Cu, As, Mn, y Zn) por adsorción (Sánchez *et al.*, 2006).

La mejora de la calidad de las aguas en la corta Los Frailes entre los años 2003 y 2005 se cifra en los siguientes datos: 1) aumento del pH de 5,8 a 7,6, 2) reducción en las concentraciones de Al (de 3,8 a 0,4 mg/l), Zn (47 a 33 mg/l), Mn (5,2 a 3,8 mg/l) y Cu (0,4 a 0,1 mg/l), y otros metales en concentraciones traza (Cd, Co, Cr, Pb, Th, Tl); (Figuras 16.8 A y B).

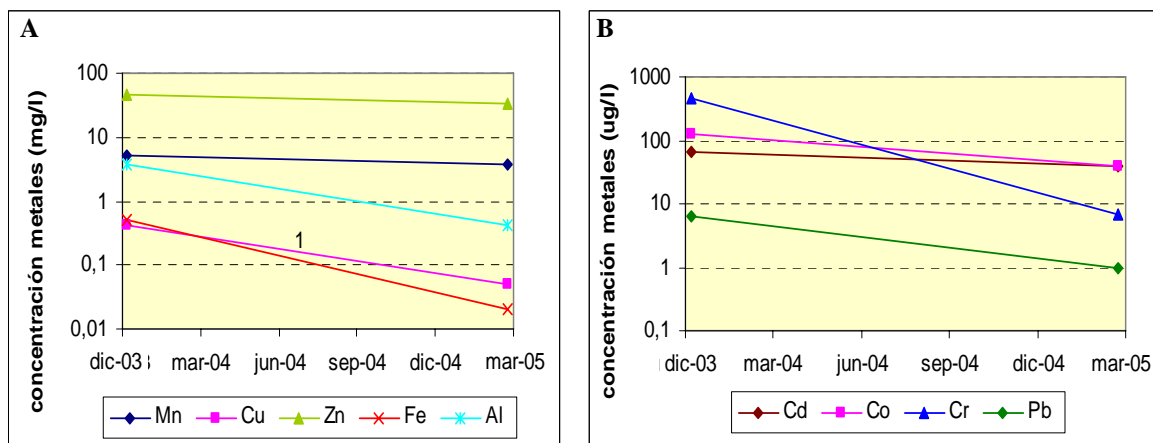


Figura 16.8. Variación de la concentración de los elementos disueltos en la corta Los Frailes entre diciembre de 2003 y marzo de 2005. Se observa la disminución de las concentraciones de los metales disueltos. A) Elementos mayoritarios. B) Elementos traza.

#### XVI.3.4. Resultados analíticos: hidroquímica de la columna de agua (2005-2006)

En las campañas de campo de junio y octubre de 2005, enero, marzo, mayo y julio de 2006 y enero de 2007, se han tomado muestras de agua a distintas profundidades al objeto de conocer las posibles variaciones químicas de la columna de agua (Tabla 16.3).

El muestreo de agua se ha realizado siempre en el mismo punto y coincide con la posición del perfil PF-1 (Figura 16.1). Se han tomado una media de 5 muestras en cada campaña, distribuidas en profundidad en base a los datos obtenidos previamente con la sonda multiparamétrica.

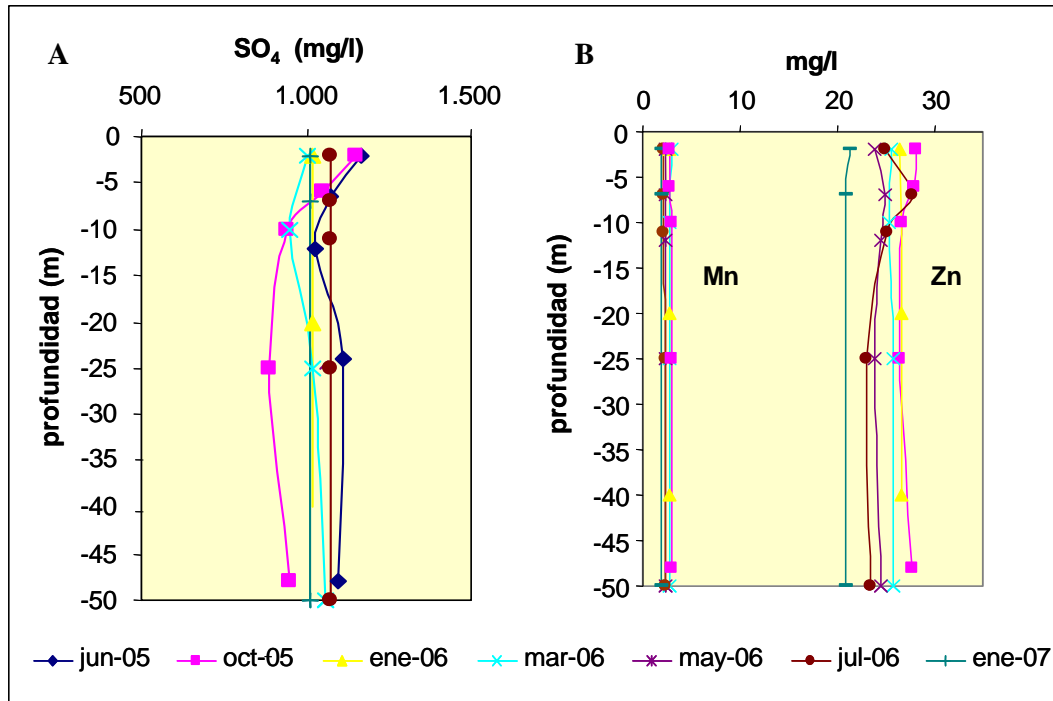


Figura 16.9. Concentración en la columna de agua de SO<sub>4</sub>, Mn y Zn, en diferentes campañas. A) Concentración del SO<sub>4</sub> (mg/l). B) Concentración de Mn y Zn (mg/l).

Las concentraciones de los elementos mayoritarios y traza son siempre muy homogéneas con la profundidad, obteniéndose solo un ligero incremento del valor de SO<sub>4</sub> en el epilimnion, debido a procesos de evapoconcentración, puestos de manifiesto también por un ligero incremento de la CE (p.ej. en octubre, ΔCE=0,14 mS/cm).

Fecha	superficial	profundidad
	mg/l eq. CaCO <sub>3</sub>	mg/l eq. CaCO <sub>3</sub>
jun-05	28	47
oct-05	26	48
ene-06	50	50
mar-06	46	46
may-06	34	45
jul-06	44	60
ene-07	52	56
mar-07	52	54

Tabla 16.4. Alcalinidad obtenida *in situ*, mediante una valoración con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1,6 N. Valores obtenidos tanto en superficie (epilimnion: ~2 m prof.) como en profundidad (hipolimnion: ~50 m prof.).

Muestra	Prof. m	elementos mayoritarios													elementos traza																
		PO4	SO4	HCO <sub>3</sub>	Cl	Ca	Mg	Na	K	Mn	Zn	Cu	Al	Fe	Ag	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Th	Tl	U	V	
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l
LF-2 jun-05	-2	<0,05	1.170	50	127	295	64	70	2,7	3,82	30,2	0,01	1	0,07	0,8	<7	31,6	3	50,7	37,7	4,8	0,5	81	2,4	14,4	530	0,3	5,7	1,5	3,6	
LF-6,5	-6,5	<0,05	1.070	66	120	292	61	71	2,9	3,6	30,8	0,01	1	0,07	0,9	18	28,5	3	42	32,7	3,5	0,7	74	1,8	20,9	608	<0,2	5,3	1,3	3,3	
LF-12	-12	<0,05	1.030	77	125	293	59	69	2,5	3,57	29,4	0,01	1	0,03	1,5	43	31,5	3	44,2	33,2	3,6	0,9	65	2,8	28,9	462	0,2	5,3	1,6	3,6	
LF-24	-24	<0,05	1.110	76	123	279	59	71	3,6	3,62	29,6	0,01	1	0,07	0,7	5	30,2	3	40,2	33,9	3,9	0,6	87	1,1	28,7	634	<0,2	5,1	1,5	3,5	
LF-48	-48	<0,05	1.100	75	123	286	61	72	2,5	3,59	29,7	0,01	0,14	0,06	1,4	22	30,3	3	41	32,7	3,8	0,6	74	1,6	28,7	504	<0,1	5,4	1,4	3,2	
LF-2 oct-05	-2	<0,04	1.150	43	129	403	71	92	4,1	2,84	28,2	0,04	0,68	<0,5	<0,4	1	31,7	1	49,9	39,5	6,83	1,81	57	0,68	13,4	21	<0,4	2,72	1	2,16	
LF-6	-6	<0,04	1.050	43	130	395	70	92	4,2	2,8	27,9	0,03	0,88	<0,5	<0,4	6	30,8	1	46,3	36,8	8,28	1,29	61	1,62	12,8	23	<0,4	2,46	1	3,72	
LF-10	-10	<0,04	940	71	125	367	65	89	4,3	3,06	26,7	0,04	0,95	<0,5	<0,4	<1	28,5	1	37,7	37,4	8,19	1,11	58	0,67	27,6	13	<0,4	2,09	0,8	3,14	
LF-25	-25	<0,04	890	74	126	357	65	90	4,1	3,03	26,4	0,02	0,48	<0,5	<0,4	8	29,1	1	37,6	38,2	8,87	1,12	65	0,44	30,2	35	<0,4	1,96	0,9	2,9	
LF-48	-48	<0,04	950	72	126	368	66	90	4,1	3,08	27,8	0,03	0,41	0,5	<0,4	<1	29,9	1	42	37,8	8,68	0,7	84	1,1	30,9	39	<0,4	2,07	0,9	3,38	
LF-2 ene-06	-2	<0,04	1.020	72	136	347	63	87	4,7	2,73	26,5	0,02	1,09	0,11	<0,4	7	30,9	<40	30,1	22,8	6,77	1,09	24	<0,4	23,6	6	<0,4	2,5	1	2,79	
LF-20	-20	<0,04	1.020	78	133	342	64	86	4,7	2,71	26,7	0,02	0,54	0,03	<0,4	<400	32,3	<40	31,4	23,8	7,49	1,26	28	0,49	24,9	<800	<0,4	2,49	1	2,85	
LF-40	-40	<0,04	1.020	78	137	341	65	89	4,8	2,72	26,6	0,02	0,27	0,07	<0,4	<400	32,6	<40	32,1	23,9	8,16	1,1	28	<0,4	25,2	3	<0,4	2,49	1	2,73	
LF-60	-60	<0,04	1.060	72	137	343	65	87	4,8	2,71	26,6	0,01	0,54	0,03	<0,4	<400	32,4	21	32,9	24,2	8,31	1,27	28	<0,4	25,2	3	<0,4	2,47	1	2,84	
LF-2 mar-06	-2	<0,04	1.000	62	125	295	86	99	5	2,9	25,7	0,04	1,19	<0,1	<0,4	47	29,5	3	30,7	23,6	<4	1,15	52	2,42	25,5	120	<0,4	4,4	1,6	1,09	
LF-10	-10	<0,04	950	65	125	297	87	100	5	2,72	25,4	0,01	0,72	<0,1	<0,4	66	28,2	3	29,1	19,6	<4	1,19	47	0,59	24,8	155	<0,4	4,13	1,4	1,24	
LF-25	-25	<0,04	1.020	60	126	293	88	98	5	2,74	25,8	0,01	1,43	<0,1	<0,4	59	28,1	3	29,2	20,2	<4	1,29	51	1,05	25,5	115	<0,4	4,17	1,4	1,36	
LF-50	-50	<0,04	1.060	66	126	298	88	98	5	2,67	25,8	0,01	4,06	<0,1	<0,4	40	29,5	3	32,4	21,9	<4	1,36	52	3,47	26,2	163	<0,4	4,29	1,4	1,45	
LF-2 may-06	-2	<0,04	1.000	60	133	296	96	87	5	2,45	24	0,03	0,81	<0,1	<0,4	<400	26,3	<40	30	19,9	<4	1,05	40	0,82	18	<800	<0,4	3,57	1,4	3,44	
LF-7	-7	<0,04	1.000	60	133	297	96	84	5	2,39	24,9	0,02	<0,5	<0,1	<0,4	<400	25,9	<40	28,8	16,9	<4	0,7	40	1,55	21,1	<800	<0,4	3,78	1,6	3,44	
LF-12	-12	<0,04	1.040	66	132	295	96	90	5	2,41	24,5	0,01	1,61	<0,1	<0,4	<400	1.411	<40	28,8	17,2	<4	0,7	31	1,29	25,4	<800	<0,4	3,75	1,4	4,11	
LF-25	-25	<0,04	1.040	68	136	290	96	90	5	2,41	24	0,02	0,81	<0,1	<0,4	<400	37	<40	28,9	16,5	<4	0,77	32	0,54	25,9	30	<0,4	3,81	1,4	3,81	
LF-50	-50	<0,04	1.020	70	137	296	96	87	5	2,43	24,5	0,02	0,27	<0,1	<0,4	<400	48	<40	29,1	16,5	<4	0,64	39	0,64	25,9	<800	<0,4	3,78	1,4	3,56	
LF-2 jul-06	-2	<0,04	1.070	56	119	310	82	100	5	2,23	25,0	0,02	0,78	<0,1	0,61	3	27,3	<40	25,9	21,7	4,36	1,77	32	1,58	15,9	<800	1,57	3,32	2,3	5,09	
LF-7	-7	<0,04	1.070	56	119	310	73	99	5	2,21	27,8	<0,1	0,78	<0,1	0,62	1	25,1	<40	26,8	19,1	4,29	1,38	30	1,53	20,7	<800	1,55	3,46	2,6	5,34	
LF-11	-11	<0,04	1.070	66	120	310	73	99	5	2,20	25,1	<0,1	0,52	<0,1	0,56	4	24,7	<40	23,5	18,7	4,67	1,6	28	2,89	21,9	<800	1,58	3,21	2,2	5,5	
LF-25	-25	<0,04	1.070	72	120	310	72	100	5	2,26	23,1	0,01	0,26	<0,1	0,61	<400	24,9	<40	22	18,3	4,26	1,41	26	2,38	25,1	<800	1,57	3,2	2,2	5,41	
LF-50	-50	<0,04	1.070	72	120	310	72	99	5	2,25	23,5	0,01	0,26	<0,1	0,6	5	25,1	<40	22,5	17,5	4,83	1,44	25	2,39	25	<800	1,65	3,08	2,1	5,52	
LF-2 ene-07	-2	<0,04	1.010	56	126	336	73	106	3	1,86	21,4	0,03	0,65	<1	<0,4	12	28,4	<10	27,9	14,6	<4	1,11	35	<0,4	24,7	9	<0,4	3,67	1,43	<1	
LF-7	-7	<0,04	1.010	58	127	338	75	111	4	1,84	20,9	0,02	1,53	<1	<0,4	12	27,6	<10	27,2	13,8	<4	<2	32	<0,4	24,5	2	<0,4	3,7	1,38	<1	

Tabla 16.3. Analítica del perfil muestreado en la corta de Los Frailes (datos de junio y octubre de 2005, y enero, marzo, mayo y julio de 2006).

Para los elementos mayoritarios y traza no se observa variaciones significativas entre los diferentes muestreos realizados (Figura 16.9 y Tabla 16.3). En los meses donde la estratificación térmica es más acusada se ha observado una reducción importante del bicarbonato en el epilimnion respecto a las concentraciones del hipolimnion, tanto con las determinaciones *in situ* de la alcalinidad (Tabla 16.4) como con los datos de bicarbonato del laboratorio (Figura 16.10 y Tabla 16.3).

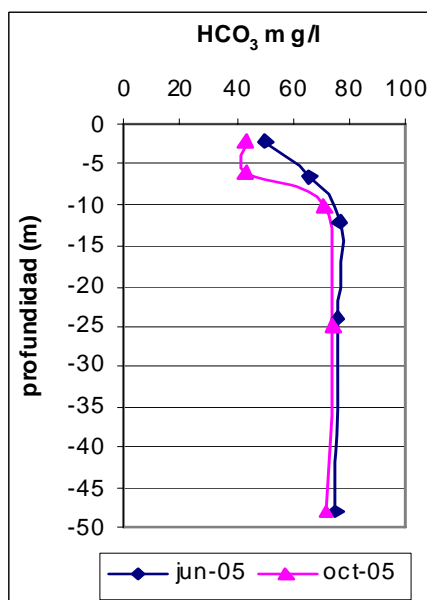
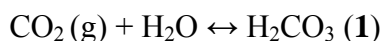


Figura 16.10. Variación de la concentración de bicarbonato con la profundidad, en las campañas de junio y octubre de 2005 (datos de laboratorio).

Si nos fijamos en los valores del ión bicarbonato, de los meses de invierno (enero y marzo, Tabla 16.3), vemos que tenemos valores muy homogéneos tanto en la parte superficial como en la zona más profunda (~75 mg/l eq. de CaCO<sub>3</sub> en enero y ~65 mg/l eq. de CaCO<sub>3</sub> en marzo), debido a que en estos meses se produce la mezcla total de toda la columna de agua.

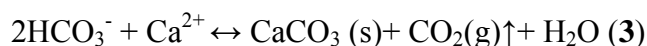
El contenido de bicarbonato en los meses más cálidos, son de alrededor de 43-60 mg/l en el epilimnion, y entre 60 y 78 mg/l en el hipolimnion (Tabla 16.3). Se ha observado una tendencia invertida en el pH, en ambas capas, respecto al comportamiento del ión bicarbonato (o alcalinidad del agua), presentando un epilimnion con un pH más alto y menor contenido de ión bicarbonato que el hipolimnion (epilimnion 6,9-7,5 y 6,5-6,8 en el hipolimnion). Este contraste evidente entre pH y el contenido del ión bicarbonato puede ser explicado por las siguientes reacciones de equilibrio:



En lagos mineros con pHs neutrales el CO<sub>2</sub> disuelto en su zona más superficial está en equilibrio con el CO<sub>2</sub> atmosférico (Eary, 1999; Wetzel, 2001). Por otro lado la solubilidad del CO<sub>2</sub> se reduce cuando se incrementa la temperatura del agua. Así, según

se desarrolla la estratificación térmica, y el epilimnion va incrementado su temperatura, se va reduciendo la solubilidad del CO<sub>2</sub>, produciéndose una desgasificación parcial del epilimnion. Esta pérdida de CO<sub>2</sub> provoca el desplazamiento de las reacciones (1) y (2) hacia la izquierda, lo que conlleva una disminución del contenido del ión bicarbonato y de hidrogeniones (H<sup>+</sup>), y por tanto a una pérdida de alcalinidad (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y a un incremento del pH. Por otro lado, la utilización fotosintética de CO<sub>2</sub> en la parte más superficial del lago (zona trofогénica) también contribuye a reducir el contenido de CO<sub>2</sub>, y por consiguiente a aumentar el pH y reducir la alcalinidad, siendo este efecto más intenso en el periodo primavera-verano por un mayor desarrollo de la población algal (Wetzel, 2001).

El incremento del pH en el epilimnión puede provocar que el agua esté saturada en calcita (índice de saturación (IS) mayor que cero), y ésta pueda empezar a precipitar (**reacción 3**), si bien normalmente debido a su lenta cinética de precipitación las aguas pueden llegar a presentar sobresaturación (Eary, 1999).



Esta posibilidad es apoyada por cálculos realizados con PHREEQC 2.7, que sugieren que el agua del epilimnion de Los Frailes está cerca del equilibrio (IS~0) en lo que respecta a la calcita. La calcita precipitada en el epilimnion, al decantarse y alcanzar el hipolimnion (más ácido), sufre su redisolución liberando al medio HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Ca<sup>2+</sup> (Wetzel, 2001).

Este sistema de CO<sub>2</sub> (g)-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-CaCO<sub>3</sub> (s), por lo general constituye un fuerte tampón químico en muchos lagos mineros con pHs circunneutrales.