

3.2.- Contexto geológico de las zonas de estudio

Con el objeto de caracterizar de manera especial las zonas influenciadas por las actividades extractivas en el delta a escala local, en este estudio se han caracterizado dos zonas claramente diferenciadas: la zona de Can Rovira–Can Sabadell y la zona de Cal Dimoni que a continuación se describen.

3.2.1.- Zona de Can Rovira–Can Sabadell:

Esta zona coincide con la antigua carretera de Barcelona a Valencia (carreteras B–204 y B–210) y es especialmente interesante por contener pozos del acuífero libre superficial y estar en la zona de antiguas graveras posteriormente rellenadas.

A continuación se destaca la recopilación de datos de sondeos (figura 3.4) (Marquès, 1984) que ha sido de gran utilidad para determinar la geología del subsuelo.

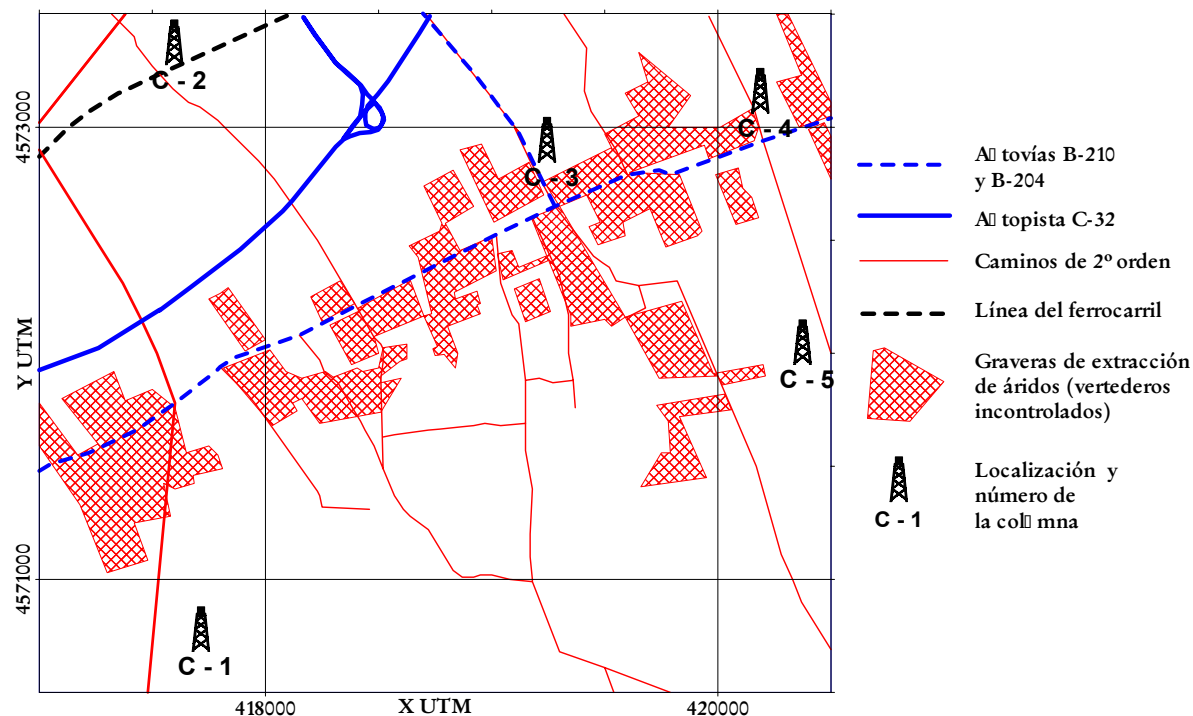
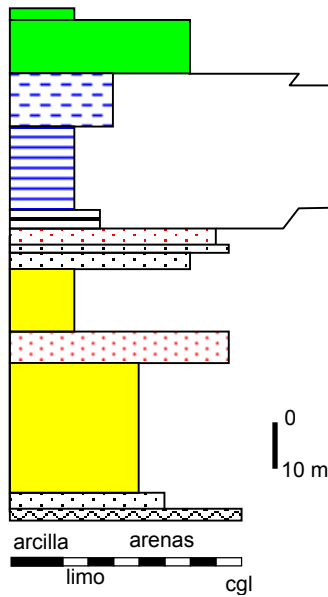


Figura 3.4(a).- Localización de las columnas estratigráficas para la zona Can Rovira–Can Sabadell

Columna C-1:



Columna C-2:

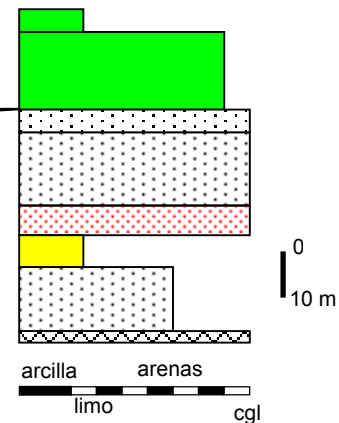
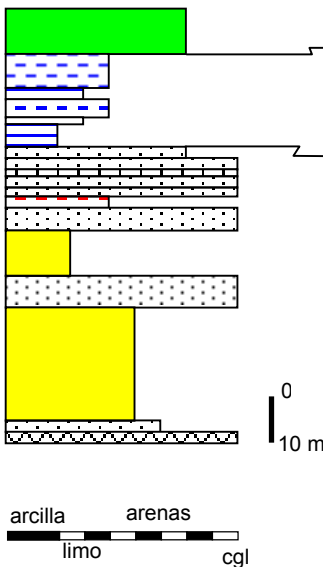
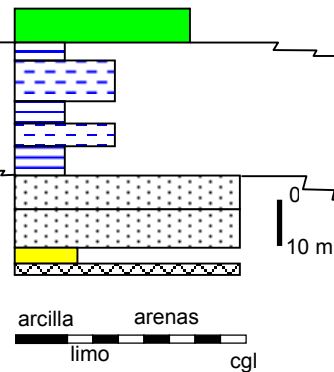


Figura 3.4(b).- Relación estratigráfica entre las columnas C-1 y C-2. Las líneas quebradas marcan la progresiva desaparición del nivel impermeable de arcillas y limos que separa los dos acuíferos del delta marcados en verde el superficial y en amarillo el inferior (Modificado de Marquès, 1984).

Columna C-3:



Columna C-4:



Columna C-5:

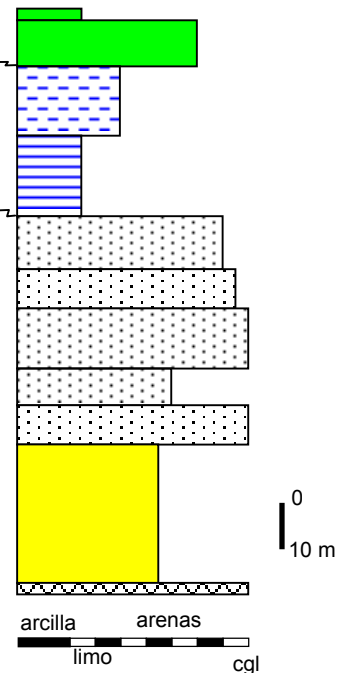


Figura 3.4(c).- Relación estratigráfica entre las columnas C-3, C-4 y C-5. Nótese la casi nula variación del nivel impermeable (Modificado de Marquès, 1984).

3.2.2.- Zona de Cal Dimoni:

Localizada dentro de la zona protegida de las lagunas del mismo nombre y en la que se ha caracterizado la geología por medio de seis sondeos distribuidos tanto en el interior de la zona de extracción–relleno como en sus alrededores, para poder determinar la naturaleza de los vertidos (figura 3.5). Estos sondeos además han permitido determinar la estructura del subsuelo y se han utilizado como piezómetros para control y muestreo del acuífero libre superficial.

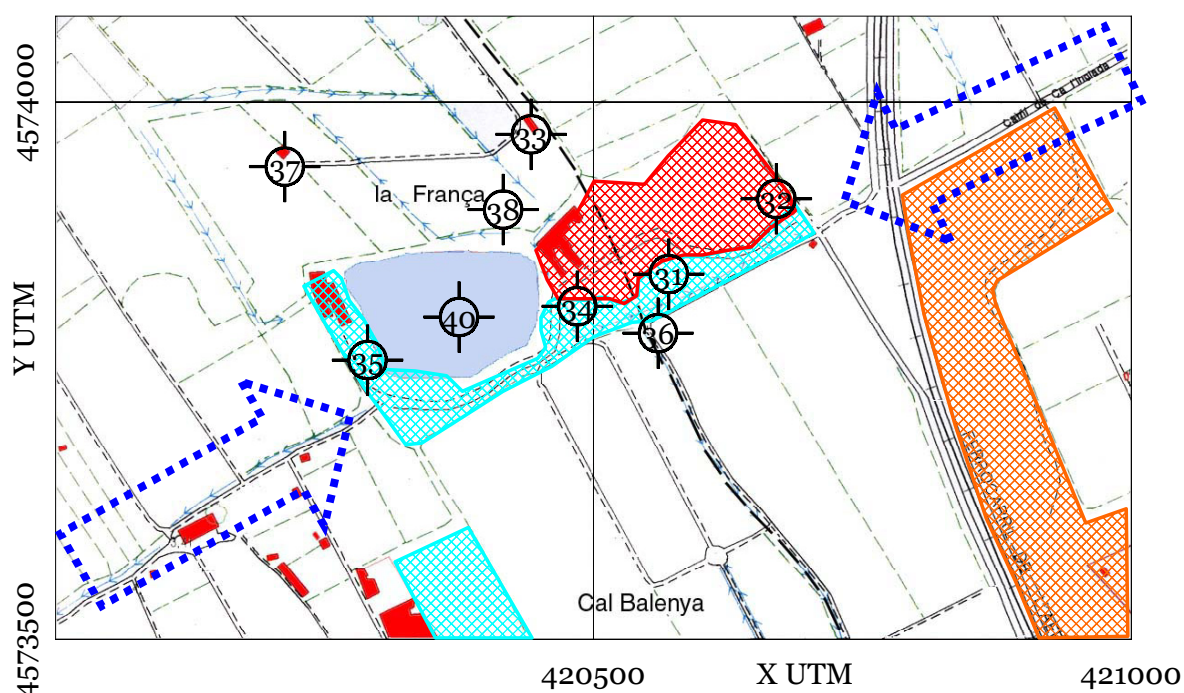


Figura 3.5: Mapa de localización de sondeos (31, 32, 34, 35 y 36), puntos de muestreo de aguas subterráneas (33, 37 y 38) y muestra de la laguna de Cal Dimoni (40) (Modificado de Font et al.; 1998). Las zonas ralladas indican el lugar de extracción–relleno de gravas y arenas. En azul, la laguna de Cal Dimoni donde aflora el nivel freático. Las flechas con trazo discontinuo marcan la dirección de flujo local y la localización del corte geológico de la figura 3.6.

El sondeo 31 presenta de base a techo (figura 3.6):

- Nivel de limos y arcillas (c) que aparece sobre los 15 m de profundidad, bastante homogéneo e impermeable.

- Nivel de gravas y arenas (**b**) con una alta porosidad y permeabilidad, con un espesor total de 2 m. Tal como se puede observar, representa el nivel explotado por las graveras.
- Nivel de relleno (**d**) de los agujeros de la explotación de arenas y gravas, estos materiales comprenden diversos tipos de residuos, desde residuos sólidos urbanos hasta industriales, con un espesor aproximado de 8 m. Este nivel de rellenos es el que se considera la fuente de contaminación de las aguas subterráneas de los alrededores, ya que durante la explotación se alcanzó el nivel freático del acuífero libre superficial y las oscilaciones del mismo han hecho que se generasen lixiviados.

El sondeo 32 presenta de base a techo (figura 3.6):

- Nivel de gravas y arenas (**b**). Entre 5 y 2 m de profundidad arenas de playa con abundantes fósiles, especialmente conchas de foraminíferos.
- Nivel areno-arcilloso (**a**) con un espesor máximo de 2 m y que constituye la llanura de inundación del delta, formado por: arcillas y limos (entre 1 y 2 m de profundidad) y suelo vegetal (entre 0 y 1 m de profundidad).

En este sondeo no se ha encontrado ningún nivel de relleno, además, tal como se verá más adelante, de los diferentes análisis es el que se considera como piezómetro de nivel de base, por contener las menores concentraciones en los diferentes iones y metales pesados.

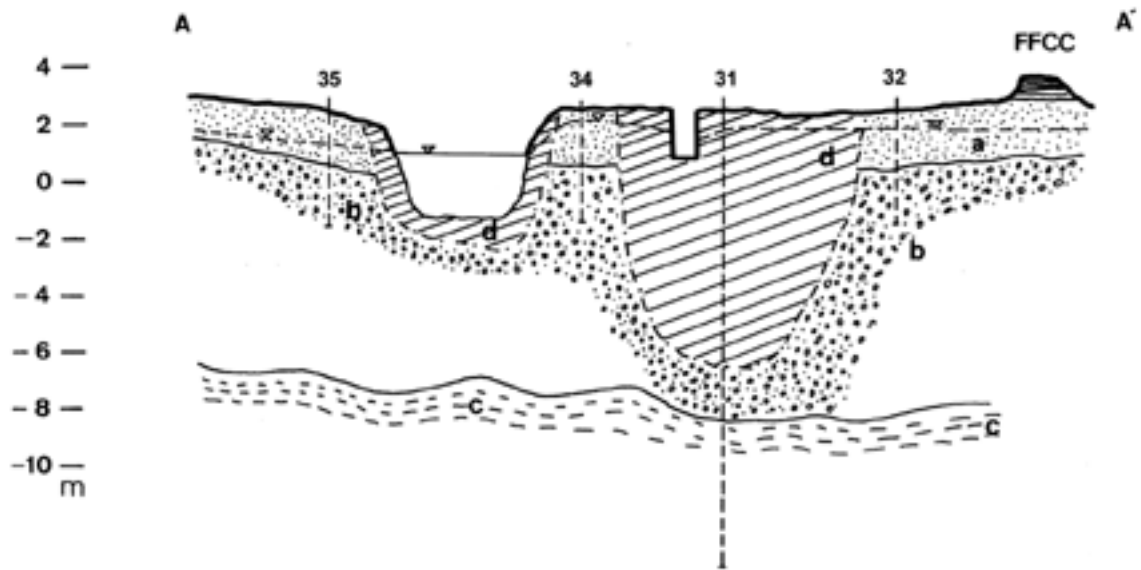


Figura 3.6: Estructura local a partir de los datos de los sondeos, **a** = nivel areno arcilloso, **b** = nivel de gravas y arenas, **c** = nivel de limos y arcillas y **d** = materiales de relleno. (Modificado de Font et al., 1998)

3.3.- Acuíferos

Del apartado anterior, especialmente en lo que se refiere a la estructura geológica del delta, se puede destacar la división del mismo en tres partes principales: dos acuíferos, uno superficial y otro profundo y el material de naturaleza impermeable que los separa y al que en general se le denomina la cuña de limos. A continuación se describen las principales características de los acuíferos.

3.3.1.- Acuífero profundo:

Tal como se observa en la figura 3.3. este acuífero se extiende por todo el delta, pero no es homogéneo litológicamente; en su parte central está formado por gravas en las que predominan los elementos calizos, en algunos puntos de casi 40 m de espesor. En la costa la base del acuífero se sitúa entre los 50 y 70 m de profundidad, su espesor es de aproximadamente 10 m y parece enlazar sin solución de continuidad, desde un punto de vista químico, con los acuíferos marginales, de características arenosas o formados por gravillas de playa. Por debajo del nivel del mar el espesor de este acuífero disminuye hasta 0,5 m.

El acuífero profundo es cautivo en toda la zona cubierta por la cuña de limos. Sin embargo, en los márgenes del delta, entre Sant Boi y Castelldefels (margen derecho), y entre Cornellà, l'Hospitalet y el Puerto Franco (margen izquierdo), la cuña de limos desaparece por cambio lateral de facies a arenas finas, y el acuífero profundo se comunica con el superficial a través de ellas (MOP, 1966; Iribar, 1992).

En lo que respecta a la transmisividad, la mayor información al respecto está recogida en Iribar (1992), Iribar (1985) y PHPO (1985) donde se pueden encontrar planos de isotransmisividades confeccionados a partir de ensayos de bombeo y datos de caudal específico. Además en ellos se aprecia una buena relación entre la transmisividad y las características físicas del acuífero (potencia y tamaño de grano), por lo que los valores más altos de transmisividad, de hasta 30.000 m²/día se encuentran alineados con el eje de la estructura central del delta, como prolongación del valle inferior. En la llanura deltaica la transmisividad baja hasta los 5.000

m²/día y en las cercanías de la desembocadura del río los valores oscilan entre 250 y 100 m²/día.

Con respecto a los datos sobre el coeficiente de almacenamiento y la porosidad, las mismas fuentes consideran valores de entre 10^{-5} y 10^{-3} para el coeficiente de almacenamiento y de entre 0,20 y 0,40 con un valor medio de 0,25 para la porosidad que corresponde a los materiales de tipo aluvial.

3.3.2.- Acuífero superficial:

Este acuífero se extiende por todo el delta y está formado por sedimentos fundamentalmente arenosos –arenas finas en su zona central y arenas algo más gruesas en las zonas marginales– de origen deltaico, fluvial y litoral. En algunos puntos este acuífero superficial presenta gravas. Su máximo espesor no es frecuente que supere los 20 metros. En la parte central del delta este acuífero está cubierto por una capa de limos y arcillas de llanura deltaica, que como máximo tienen un espesor de 5 m. Este techo a veces hace de nivel confinante local (MOP, 1966).

Este acuífero enlaza con el profundo en los bordes del delta, por lo que a menudo es difícil averiguar en esta zona marginal si un pozo corresponde al acuífero profundo, al superficial, o no es posible hacer esta distinción por tratarse de un único acuífero. Es muy frecuente que los pozos marginales, muchas veces de riego, sean dobles, es decir que exista un pozo excavado a mano y dentro de él se encuentre clavado un tubo que tiene la rejilla 10 o 15 metros por debajo del fondo del pozo excavado. Habitualmente la bomba toma agua de ambos pozos con lo que así se asegura que no faltará agua, con un consumo menor de energía.

Los datos existentes de transmisividad de este acuífero se han obtenido a partir de ensayos de descenso en piezómetros (MOP, 1971) y tienen un escaso valor representativo con relación a datos de ensayos de bombeo e incluso de caudal específico. Los valores de transmisividad en este acuífero son, en general, menores que los del acuífero profundo, ya que esta formado por materiales de grano mas fino. Los valores varían entre 500 m²/día en la parte central del delta, a 2.000–3.000 m²/día en los márgenes del mismo, donde el acuífero superficial y el profundo están conectados (Iribar, 1992).

En lo que respecta a los valores de porosidad, el acuífero superficial del delta constituido por materiales de grano más fino, tiene un valor, según el PHPO (1985) del orden de 0,15; y de coeficiente de almacenamiento del orden de 10^{-3} .

3.4.- *Funcionamiento hidráulico y balance hídrico*

El modelo de funcionamiento de los acuíferos del delta fue establecido por el MOP (1966). Posteriormente, Custodio y otros (1971), Custodio (1981) y el PHPO (1985) fueron perfeccionando el modelo, hasta que Custodio y otros (1991) e Iribar (1992) determinaron el comportamiento tal y como a continuación se resume:

a) Áreas de recarga y descarga:

Se han utilizado los datos de los niveles piezométricos (figura 3.7), los datos hidroquímicos, etc. Principalmente se ha utilizado la piezometría para determinar las zonas de recarga y descarga. En nuestro caso, el acuífero superficial se recarga principalmente por infiltración del agua de lluvia, excedentes de riego y pérdidas de canales y otras conducciones de agua. Su descarga es principalmente por drenaje hacia el río Llobregat, al mar, a zanjas de drenaje y correderas, directo al acuífero profundo o a través de la cuña de limos. Una parte muy importante de descarga son los bombeos, aunque como el principal uso es el riego, estos prácticamente no se consideran.

b) Relaciones entre los acuíferos:

En el estrecho de Cornellà se conectan tanto el acuífero profundo como el superficial con el acuífero del valle inferior. Tal como ya se ha explicado, la cuña de limos separa los acuíferos en la parte central del delta, pero en los márgenes los acuíferos quedan interconectados. El paso de agua de uno a otro depende de las posiciones relativas del nivel freático.

c) Relación con las aguas superficiales:

Los principales cursos de agua son:

- El río Llobregat que juega un papel importante respecto al acuífero superficial al cual recarga en la zona comprendida entre Cornellà y El Prat de Llobregat y drena entre El Prat y la desembocadura.

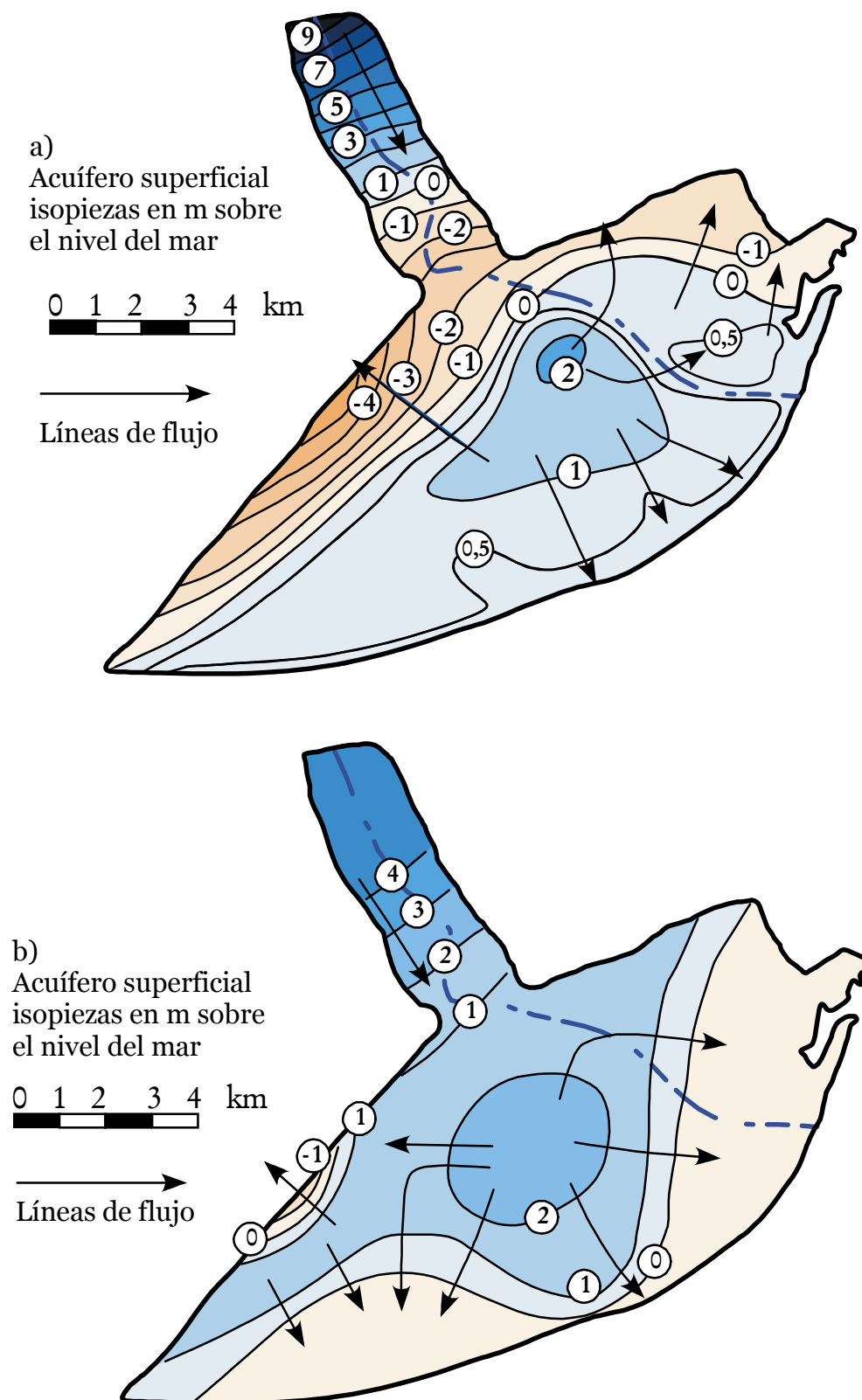


Figura 3.7.- Posición del nivel freático para el acuífero superficial del delta. a) año 1983 (según Iribar, 1992. Modificado); b) año 1991 (según Custodio, 1991. Modificado).

- Los canales de riego: El canal de la Infanta tiene su toma en el Papiol, y riega todo el margen izquierdo del valle y del delta. Lleva aproximadamente un 64% de agua de la riera de Rubí, un 30% de agua del río Anoia (CIHS, 1991). Cuando ambos ríos tienen un caudal bajo se derivan al canal, haciendo que éste quede contaminado. El canal de la Derecha tiene su toma en St. Vicenç dels Horts y riega el margen derecho del delta en una gran extensión. Al igual que el canal de la Infanta, su área de riego ha ido disminuyendo por la construcción de polígonos industriales. La infiltración se realiza de manera directa o por excedente de riego. El sistema de canales posee un subsistema de drenaje que sirve para evacuar el exceso de riego o para regar las partes más bajas del perímetro regable.

- Las zanjas de drenaje poseen una gran importancia ya que mantienen constante el nivel del acuífero en su zona próxima, pudiendo recargarlo o drenarlo en función de la posición relativa de la cota de agua del canal y del nivel freático.

- Las correderas poseen la misma relación que la red de drenaje con el acuífero superficial. Son un sistema de zanjas entre Gavà, Viladecans y Castelldefels que cumplen la función de drenaje a la vez que se bombea agua de las mismas para riego. Con ellas se riega unas 930 ha. Actualmente su uso está cambiando y se están convirtiendo en el punto de destino de las aguas residuales de los mencionados núcleos urbanos. También les ha afectado la construcción del canal olímpico de remo.

- Las conducciones de abastecimiento y aguas residuales provienen de centros urbanos e industriales. En Gavà y Viladecans algunas veces se utiliza el agua para riego en los campos del delta. Pueden asimismo tener pérdidas por lo que el agua se infiltra en el acuífero superficial.

- Las lagunas litorales han ido sufriendo una serie de transformaciones tal y como ya se ha explicado. Las tres lagunas existentes recogen las aguas de los colectores y drenajes y la descargan al mar. Hidráulicamente pueden considerarse zonas de nivel constante en relación al acuífero superficial.

- El mar y el acuífero superficial tienen una relación bastante sencilla. Los niveles piezométricos del acuífero en general están por encima del nivel del mar, en la zona de costa la cota del nivel del acuífero se encuentra a unos 0,5 m s. n. m. Por lo que este acuífero realiza su principal descarga hacia el mar, excepto en la Zona Franca.

d) Cuantificación de las entradas y salidas de agua

Los datos que mejor se adaptan al modelo de balance de los acuíferos del delta son los que muestra la tabla 3.1 en los que se puede observar que el balance es bastante aproximado.

Tabla 3.1.-Balance medio para el período de 1966–1983 en hm³/año (PHPO, 1985)

ENTRADAS		SALIDAS	
Infiltración de lluvia y excedente de riegos (a)	59.7	Bombeo riego (b)	13.7
Infiltración río Llobregat. Valle bajo.	30.0	Bombeo Industrial y abastecimiento (b)	89.1
Infiltración río Llobregat. Acuífero superficial.	1.2	Salida al mar. Acuífero superficial	3.1
Aportación rieras laterales (a)	6.2	Drenaje al río y zanjas. Acuífero superficial	9.5
Infiltración por pérdidas en las redes de abastecimiento y saneamiento	5.4	Cambio en el almacenamiento	0.0
Recarga artificial. Cornellà. Acuífero profundo	3.9		
Entrada mar. Acuífero profundo	6.9		
TOTAL	113.3	TOTAL	115.4
Error de cierre 2.1 hm ³ (1.8%). (a) en los 3 acuíferos (b) acuífero profundo y valle inferior.			

En resumen, el funcionamiento hidráulico de los acuíferos se puede presentar de manera esquemática tal como muestra la figura 3.8.

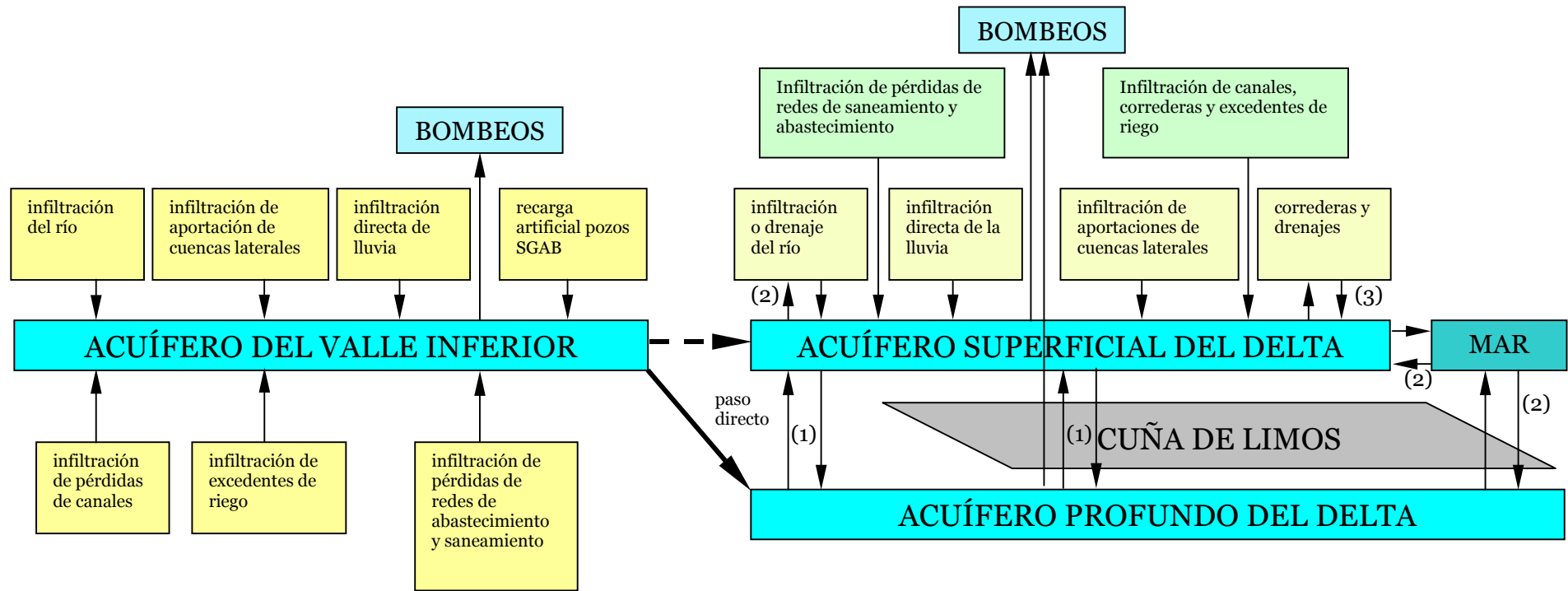


Figura 3.8.- Funcionamiento y balance hídrico de los acuíferos del Baix Llobregat. (1) Según la posición relativa de los niveles piezométricos. (2) Según la posición relativa entre el nivel piezométrico y el nivel del mar o río. (3) Según la posición relativa entre el nivel piezométrico y el nivel de la corredera o zanja de drenaje. (según Iribar, 1992. Modificado)

3.5.- Síntesis y conclusiones del capítulo

Al estar la zona de estudio preferentemente enmarcada en el acuífero libre superficial del delta, cabe remarcar lo siguiente:

- Las zonas de extracción-relleno se han desarrollado principalmente en los materiales cuaternarios del delta que se depositaron en un ambiente de tipo playa con formación de dunas y por tanto en la línea de costa (datada como del siglo I de nuestra era). Dichos materiales constituyen el sustrato de la antigua carretera de Barcelona a Valencia (actuales carreteras B-204 y B-210). El hecho que precisamente pase una carretera por esta antigua línea de costa se puede explicar considerando que en la actualidad se construyen las vías de comunicación en la zona de las dunas por ser topográficamente más elevadas.
- El acuífero libre superficial posee por tanto una cierta homogeneidad desde el punto de vista de su composición litológica, principalmente de arenas de grano fino en la parte central y de grano grueso en las zonas marginales, en algunos puntos este acuífero presenta gravas y en su parte central está cubierto por intercalaciones de arcillas y limos generados por desbordamientos periódicos del río y que pueden hacer de nivel confinante local.
- Este acuífero es el menos conocido del delta, debido a que principalmente se ha estudiado el inferior. A pesar de ello se pueden resumir sus principales características:
 - Espesor medio muy uniforme y de aproximadamente 10 m y con valor máximo de 20 m y mínimo de 5 m.
 - Sus valores de transmisividad varían entre 500 m²/día en la parte central del delta, a 2.000–3.000 m²/día en los márgenes.
 - La porosidad media es de 0,15 y el coeficiente de almacenamiento de 10⁻³.

Capítulo 4

Hidrogeoquímica del acuífero superficial

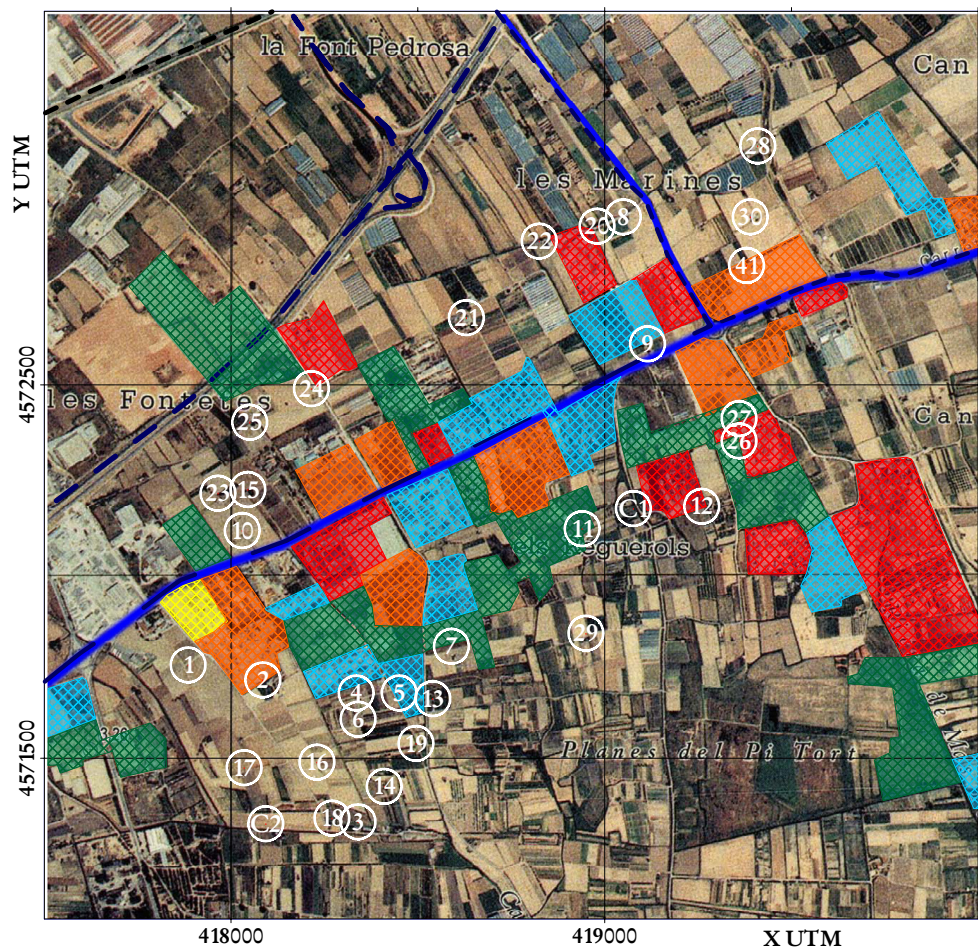
4.1.- Inventario de puntos de agua.

En el área de estudio se ha realizado un inventario de puntos de muestreo del acuífero libre superficial que se presenta en el anexo A.1. Todos los puntos se han localizado en un mapa general y los datos de cada pozo se han tabulado mostrando los aspectos siguientes:

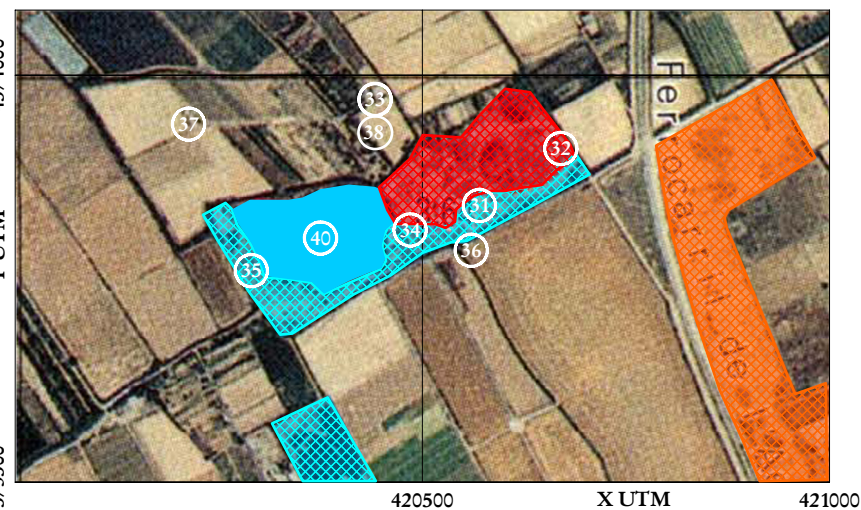
- Localización: Mapa (número de hoja del mapa 1:5000 del mapa toponímico del Área Metropolitana de Barcelona y del mapa 1:5000 del *Servei Cartogràfic de Catalunya*), coordenadas UTM, municipio, toponimia (nombre local del lugar), cota del suelo (estimada según la topografía del mapa 1:5000) y referencia altimétrica.
- Características del pozo: profundidad máxima, diámetro, profundidad del nivel del agua (en función de la cota) y accesibilidad.
- Análisis químico tipo: con los resultados de los análisis de las muestras de agua, que incluyen cationes y aniones principales y fecha del análisis.
- Mediciones de campo: pH, Eh, temperatura y conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

El objetivo principal de este inventario es determinar las diferentes características del acuífero libre superficial, tanto aguas arriba como aguas abajo de la zona de extracción–relleno.

Se han localizado y catalogado 31 puntos de muestreo en la zona comprendida entre Can Rovira y Can Sabadell y 5 piezómetros y dos puntos de muestreo en la zona de Cal Dimoni, tal como se observa en las figuras 4.1 A y B.



A



B

Figura 4.1.- A.- Localización de los puntos de muestreo del acuífero superficial de la zona de Can Rovira-Can Sabadell. En números los pozos, las muestras de canal con la letra "C". Las zonas coloreadas (amarillo, naranja, verde, rojo y azul) corresponden a las zonas de explotación de gravas que posteriormente fueron rellenadas. Las líneas discontinuas de color azul son las carreteras B-210, B-204 y la autopista C-32.

B:- Localización de los piezómetros para muestreo del acuífero superficial en la zona de Cal Dimoni, excepto el número 37 que es un pozo y el número 40 que marca el muestreo de la Laguna.

4.2.- Campañas de muestreo sistemático de aguas subterráneas.

En el presente estudio se ha realizado el muestreo sistemático de los puntos de muestreo de aguas del acuífero libre superficial. El objetivo ha sido determinar las características generales de las mismas y su evolución o variación temporal invierno–verano.

Para la zona de Can Rovira–Can Sabadell se ha muestreado en intervalos de 6 meses desde junio de 1996 hasta febrero de 1998. En la zona de Cal Dimoni se ha muestreado desde junio de 1997 hasta julio de 1999.

Debe hacerse notar que en las diferentes campañas no se ha muestreado igual número de puntos de agua por diferentes razones. Una de las más importantes y que cabe destacar es la inaccesibilidad al punto de muestreo por ausencia del propietario, probablemente debida a las vacaciones estivales o a que la actividad en el delta disminuye por las altas temperaturas del verano. Así, en las campañas de verano el número de muestras es inferior a las de invierno tal como se observa en la tabla 4.1.

Tabla 4.1.- Número de muestras de agua subterránea recogidas y analizadas en cada campaña.

Campañas de Verano	Puntos de agua muestreados	Campañas de invierno	Puntos de agua muestreados
1996	16	1997	28
1997	20	1998	28

En cada campaña de muestreo se han seguido las directrices explicadas principalmente por Custodio y Llamas (1983) y Appelo y Postma (1996) y que a continuación se detallan:

4.2.1.- Toma de muestras

En la toma de muestras se han empleado botellas de plástico polietileno de 250 ml para los aniones y cationes y botellas de vidrio de 40 ml para la determinación del carbono orgánico total.

El procedimiento de recogida de muestras se puede resumir de la siguiente forma:

En los pozos en los que se dispone de bomba de extracción se ha tomado la muestra en la salida ligada lo más directa y próxima a la misma, esperando un tiempo prudencial antes de muestrear con la intención de evitar el agua que está estancada en el pozo.

En los pozos sin bomba y en los piezómetros se ha utilizado una bomba de aspiración eléctrica portátil, dejando pasar igualmente un tiempo razonable, en este caso, para evitar muestrear el agua estancada y para que el tubo se llene completamente con el agua que interesa muestrear (ver figura 4.2A).

En cada punto de muestreo se han tomado las siguientes submuestras (ver figura 4.2B):

- *Submuestra para la determinación de los aniones mayores:*, se ha lavado la botella llenándola y vaciándola un par de veces antes de taparla. Se han llenado las botellas el máximo posible para evitar que quede aire en las mismas; lo cual ha permitido que no varíen las concentraciones, especialmente del anión bicarbonato, al coger la muestra.
- *Submuestra para la determinación de los cationes mayores y los elementos traza:* Las submuestras han sido filtradas a través de un filtro “Millipore” de 0.45 μm y posteriormente se les han añadido 20 gotas de ácido nítrico al 60 % para evitar las reacciones de oxidación, prevenir la absorción y la precipitación de los cationes.

- *Submuestra para la determinación del carbono orgánico total:* Las botellas de vidrio fueron lavadas un par de veces antes de llenarlas y taparlas con la ayuda de “parafilm” entre la tapa y el agua. Así se ha evitado, lo máximo posible el almacenamiento de aire.



A



B

Figura 4.2.- A) Bomba eléctrica portátil para extraer las muestras de los puntos de muestreo de aguas subterráneas. B) Submuestras preparadas para cada punto de muestreo (explicación en el texto).

4.2.2.- Determinaciones en el campo

Se ha empleado una sonda eléctrica para determinar la altura del nivel del agua y la profundidad de los puntos de muestreo. Los parámetros determinados han sido los siguientes:

- *Temperatura*: Se han realizado las medidas con un termómetro marca “Crison” cuya precisión es de 0,1° C. La temperatura se ha tomado en el momento previo a la recogida de cada una de las muestras, tanto en los pozos con bomba como en los piezómetros y pozos en los que se utilizó la bomba portátil.
- *Concentración de H^+ (pH)*: Se ha utilizado el electrodo específico marca “Crison” con una precisión de 0,01 unidades de pH. Previamente al inicio de cada campaña, el pHmetro ha sido calibrado para la temperatura a la que se trabajaba por medio de la utilización de soluciones diluidas estándar de pH 4,02 y 7,00.
- *Potencial redox (Eh)*: Se ha determinado con un electrodo de platino marca “Crison” con una precisión de 1 mV.
- *Conductividad*: Se ha empleado un conductivímetro marca “Crison” con una precisión de 1 μ S/cm, y con un corrector de temperatura.

Las muestras fueron recogidas en campañas de 2 a 3 días de duración que se hicieron coincidir con el fin de semana para poder entregarlas para su análisis el día lunes. Durante la recogida las muestras se almacenaron en una nevera portátil a una temperatura aproximada de 5° C. El fin de semana antes de la entrega al laboratorio se almacenaron en la nevera del departamento de Petrología, Geoquímica y Prospección Geológica a una temperatura de 4° C.

4.2.3.- Análisis químicos. Métodos analíticos

Las muestras han sido analizadas en los Servicios Científico-Técnicos de la Universidad de Barcelona. Para cada parámetro y determinación cuantitativa se emplean diferentes técnicas analíticas por lo que la preparación de las muestras se ha realizado en función de las mismas. En lo que respecta a la preparación de las muestras, sólo se ha realizado la dilución en función de la alta conductividad que presentaban las muestras que se entregaron para el análisis de cationes y elementos traza. En general las muestras se han diluido de 1 a 10 y en ocasiones de 1 a 20.

En la tabla 4.2 se han resumido las técnicas analíticas empleadas para cada uno de los parámetros descriptivos y la determinación cuantitativa de aniones, cationes, elementos traza y carbono orgánico total en el laboratorio.

Tabla 4.2.- Técnicas analíticas y límites de detección para cada parámetro o elemento analizado en los Servicios Científico-Técnicos de la Universidad de Barcelona.

Parámetros descriptivos	unidades	Técnica de análisis
pH		E.E.
Conductividad	µS/cm	E.E.

Análisis cuantitativo de aniones	Límite de detección y unidades	Técnica de análisis
Bicarbonatos	7 mg/l	V.
Sulfatos	2 mg/l	C.I.
Cloruros	1 mg/l	C.I.
Nitratos	2 mg/l	C.I.
Nitritos	0,05 mg/l	C.I.

Análisis cuantitativo de cationes	Límite de detección y unidades	Método de análisis
Sodio	0,1 mg/l	I.C.P.
Potasio	1 mg/l	I.C.P.
Calcio	0,1 mg/l	I.C.P.
Magnesio	0,001 mg/l	I.C.P.
Amonio	0,1 mg/l	C.

Análisis de elementos traza	Límite de detección y unidades	Método de análisis
Hierro	10 µg/l	I.C.P.
Manganeso	1 µg/l	I.C.P.
Aluminio	1 µg/l	I.C.P.
Bario	1 µg/l	I.C.P.
Estroncio	1 µg/l	I.C.P.
Zinc	5 µg/l	I.C.P.
Plomo	1 µg/l	I.C.P.
Cobre	10 µg/l	I.C.P.
Fósforo	100 µg/l	I.C.P.
Litio	1 µg/l	I.C.P.
Boro	50 µg/l	I.C.P.
Cromo	10 µg/l	I.C.P.
Níquel	20 µg/l	I.C.P.
Selenio	50 µg/l	I.C.P.
Molibdeno	1 µg/l	I.C.P.
Arsénico	5 µg/l	I.C.P.
Cadmio	1 µg/l	I.C.P.
Cobalto	1 µg/l	I.C.P.

Análisis cuantitativo carbono orgánico	Límite de detección y unidades	Método de análisis
Carbono orgánico	0,5 mg/l	N.P.O.C.

E.E. = Electrodos específicos
 V. = Volumetría ácido – base
 I.C.P. = Plasma de Inducción Acoplada
 N.P.O.C. = Calcinación y detección de CO₂, previa eliminación del carbono de origen inorgánico.
 C. = Colorimetría
 C.I. = Cromatografía iónica

4.3.- Resultados obtenidos

Los resultados de los análisis para cada campaña se adjuntan en el anexo A.3. Para presentar los datos se ha optado por la opción de hojas de cálculo, ya que permiten colocar en una sola hoja una mayor cantidad de información. El formato de las hojas presenta los puntos de agua muestreados y los análisis realizados para cada uno en la fecha especificada. Para las diferentes campañas se ha comprobado la validez de los análisis por medio del balance de aniones y cationes.

En general se tienen en cuenta dos tipos de error:

- *Errores de precisión* (o estadísticos) que reflejan las fluctuaciones aleatorias del procedimiento analítico.
- *Errores de exactitud* que muestran las desviaciones sistemáticas debidas a procedimientos inadecuados o interferencias durante el análisis. La exactitud de los análisis se puede determinar a través del parámetro de *Electro neutralidad* (E.N.) que establece que la suma de los cationes debe estar balanceada por la suma de los aniones según la siguiente fórmula:

$$\textbf{Electro neutralidad } EN(\%) = 100 \left(\frac{\Sigma cat + \Sigma an}{\Sigma cat - \Sigma an} \right) \quad (4.1)$$

En donde los cationes y los aniones están expresados en mili equivalentes por litro (meq/l). En general la suma de los cationes incluye: Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} y la de los aniones Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} y NO_3^- . Algunas veces otros elementos contribuyen de manera significativa en este parámetro, como por ejemplo Fe^{2+} o NH_4^+ en aguas subterráneas reducidas o H^+ y Al^{3+} en aguas ácidas (Appelo y Postma, 1996).

También se utiliza la fórmula de error del balance:

$$\textbf{Error } (\%) = \frac{\Sigma cat - \Sigma an}{\Sigma cat + \Sigma an} \cdot 200 \quad (4.2)$$

El error admisible depende de la concentración y del tipo de agua. En aguas con conductividades superiores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ el error admisible no debe superar el 5% (Custodio y Llamas, 1983)

En todas las muestras se ha comprobado la validez de los análisis para las diferentes campañas por medio del error del balance (las conductividades superan en su mayoría los 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) por lo que los análisis de las muestras que superan el 5% en este parámetro deben tomarse con precaución; ya que puede ser debido a un error grave en el análisis.

4.4.- Características generales. Composición de las aguas subterráneas.

Para determinar las características generales de las aguas del acuífero superficial se ha realizado el análisis de las muestras y su interpretación ha permitido clasificar las aguas y determinar la evolución temporal de su composición.

4.4.1.- Zona de Can Rovira–Can Sabadell

En el anexo A.3 se muestran los resultados de todas las campañas para la zona de Can Rovira–Can Sabadell. El quimismo original de la zona se ha determinado a partir de los resultados con menor contenido iónico, escogiéndose el pozo de Can Sabadell por sus valores mínimos durante la primera campaña de muestreo y su localización aguas arriba de la principal línea de flujo de la zona. Se trata de aguas sulfatadas cálcico-sódicas con unos valores de conductividad moderados (valor promedio de las campañas = 1920 $\mu\text{S}/\text{cm}$), con un pH ligeramente básico (pH promedio = 7,4) y ligeramente oxidantes (Eh promedio = +106 mV).

A partir de los datos de los análisis de todas las campañas se ha realizado el tratamiento estadístico general del cual se destaca la variabilidad que éstos presentan (ver Anexo 4). Los valores de conductividad varían en un amplio rango de entre 350 y 4670 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La mayor parte de los valores se encuentran entre 2400 y 2900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el promedio es de 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Esta variabilidad en los valores es especialmente notoria en las composiciones de los iones mayoritarios: por regla general los cationes dominantes son el Ca^{2+} y el Na^{+} y en algunas muestras se pueden encontrar contenidos importantes de Mg^{2+} , especialmente en las que están aguas abajo de las zonas de vertido. Con respecto a los aniones la variabilidad es mayor, destacando el SO_4^{2-} y el Cl^{-} como dominantes, el primero aguas arriba y el segundo aguas abajo de las zonas de vertido. Están presentes también con cierta importancia el HCO_3^{-} y el NO_3^{-} .

Con respecto al pH, se puede observar que los valores son principalmente básicos con valores mínimos cercanos a 7 y máximos en torno a 8,7; la mayoría de los valores se concentran en la zona entre 7,25 y 7,44 con un valor promedio de 7,35.

Los valores del potencial de óxido–reducción son principalmente oxidantes (valores positivos) con un mínimo en -250 mV y un máximo en $+268$ mV. La mayoría de los valores se encuentran entre $+96$ y $+138$ mV con una media de $+117$ mV.

4.4.2.- Zona de Cal Dimoni

El quimismo original de las aguas viene dado por la muestra 32, elegida con los criterios ya explicados, que presenta una composición química bicarbonatada cálcica o cálcico-sódica (ver Anexo A.3)

Al igual que en la zona de Can Rovira–Can Sabadell, del tratamiento estadístico de los resultados de los análisis para todas las campañas (Anexo A.4) se puede destacar que el contenido iónico o mineralización de estas aguas va de alto a muy alto (mayoría de los valores de conductividad entre 3000 y 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), llegando las muestras 33, 34 y 40 a conductividades mucho más elevadas.

En esta zona también se observa gran disparidad de composiciones químicas, predominando los iones Ca^{2+} y HCO_3^- en las aguas sin contaminar y destacándose el progresivo intercambio hacia Na^+ y Cl^- en las aguas más influenciadas por la contaminación.

En general las muestras presentan carácter neutro con una cierta tendencia alcalina (la mayor parte presenta un pH entre 7,2 y 7,5).

La mayoría de las aguas son reductoras, pero con valores de potencial de óxido–reducción muy negativos ($E_h = -405$ mV), la mayoría de las muestras se encuentran entre -118 y -8 mV. Existen algunas excepciones que pasan a ser aguas oxidantes, especialmente las aguas de la laguna y las del piezómetro más cercano a ella y que por tanto se considera altamente influenciado por estas aguas (muestra 35).

4.5.- Tratamiento de los datos

Tras la recopilación de los resultados de los análisis de todas las campañas se han realizado los tratamientos adecuados para poder obtener los diagramas de isocontenidos que recogen las 4 campañas de muestreo para la zona de Can Rovira–Can Sabadell y las 5 campañas de muestreo de la Zona de Cal Dimoni. A continuación se describen los principales resultados:

4.5.1.- Variación de los valores de conductividad

Con respecto a la conductividad medida en el campo se han obtenido los resultados que resumen las figuras 4.3 y 4.4 (Zona de Can Rovira–Can Sabadell) y 4.5 (Zona de Cal Dimoni).

La variación estacional no es muy marcada, aunque existe un leve aumento de la conductividad en las campañas de invierno. Para explicar este hecho se ha realizado el análisis de la precipitación de la zona con respecto a los valores de conductividad en tres localidades, una aguas arriba (muestra 8), otra aguas abajo de las zonas de extracción-relleno (muestra 12) y otra muestra de agua del canal de riego (figura 4.3). Las muestras del canal de riego, que son aguas más directamente influenciadas por las precipitaciones y que sirven de recarga al acuífero superficial, muestran una tendencia general hacia la disminución de la conductividad, especialmente después de precipitaciones importantes.

Con respecto a las muestras de las aguas subterráneas, al aumentar las precipitaciones en invierno sube el nivel freático del acuífero superior y se generan más lixiviados. Éstos afectan las muestras aguas abajo de las zonas de extracción-relleno (muestra 12) que en general presentan valores más altos que las muestras aguas arriba (muestra 8).

En base a lo anterior no se puede afirmar que exista ningún fenómeno de dilución por la estacionalidad.

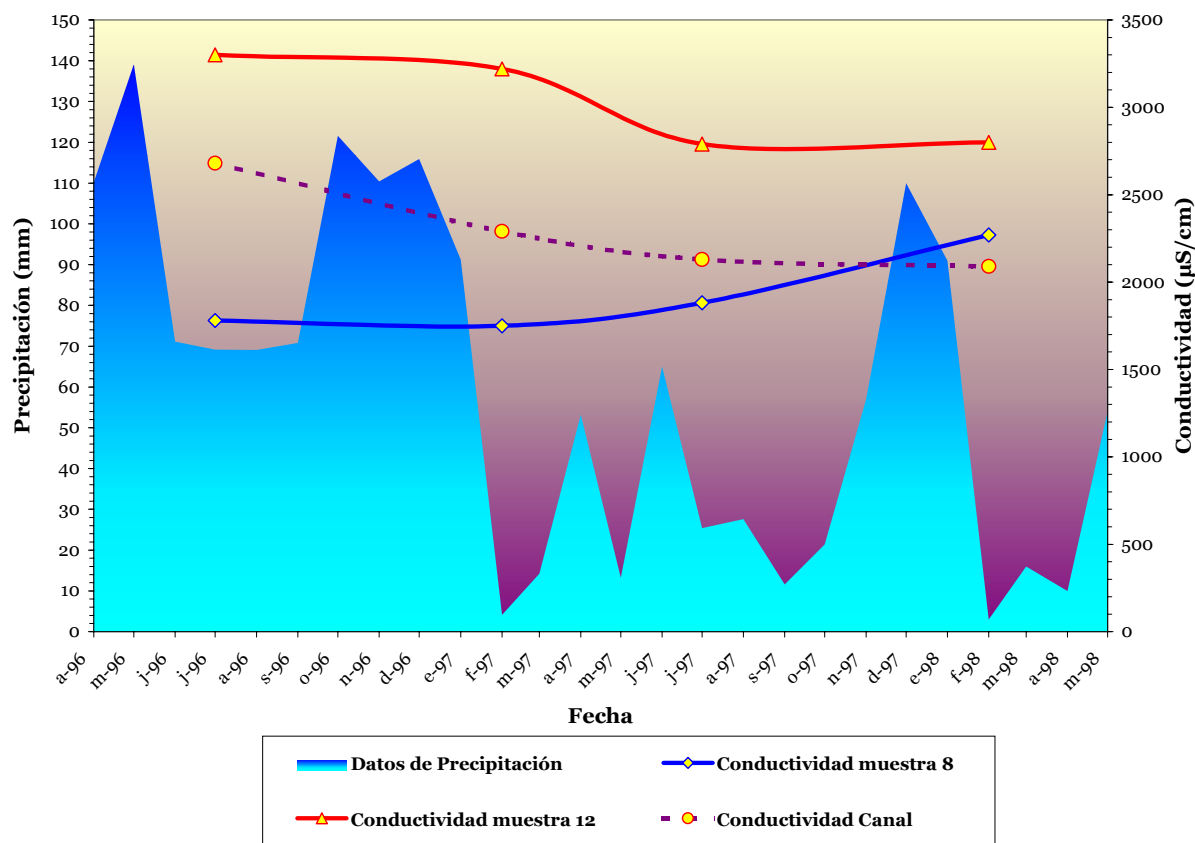


Figura 4.3.- Gráfico de precipitación-conductividad para la zona de estudio. Nótese que las aguas superficiales (Canal) muestran una evolución marcada por la disminución de la conductividad respecto del aumento de precipitación en el invierno. Las muestras de agua subterránea aguas arriba de las zonas de extracción-relleno (muestra 8) poseen conductividades menores que las muestras aguas abajo (muestra 12) y ambas no parecen verse afectadas por efectos de dilución (disminución de la conductividad) en invierno.

Si se analiza la totalidad de los datos y campañas de muestreo en la zona de Can Rovira-Can Sabadell se puede observar una tendencia general hacia el aumento de la conductividad en la dirección aguas abajo de la zona de extracción-relleno para las cuatro campañas (figura 4.4). Sin embargo, en estos mapas existen algunas zonas que no siguen esta tendencia general coincidiendo sus valores con los regionales determinados por otros estudios (Custodio y Llamas, 1983; Custodio, 1991; Iribar, 1992) y que corresponden aproximadamente al valor que se admite como valor de fondo (entre 1.900 y 2.000 µS/cm).

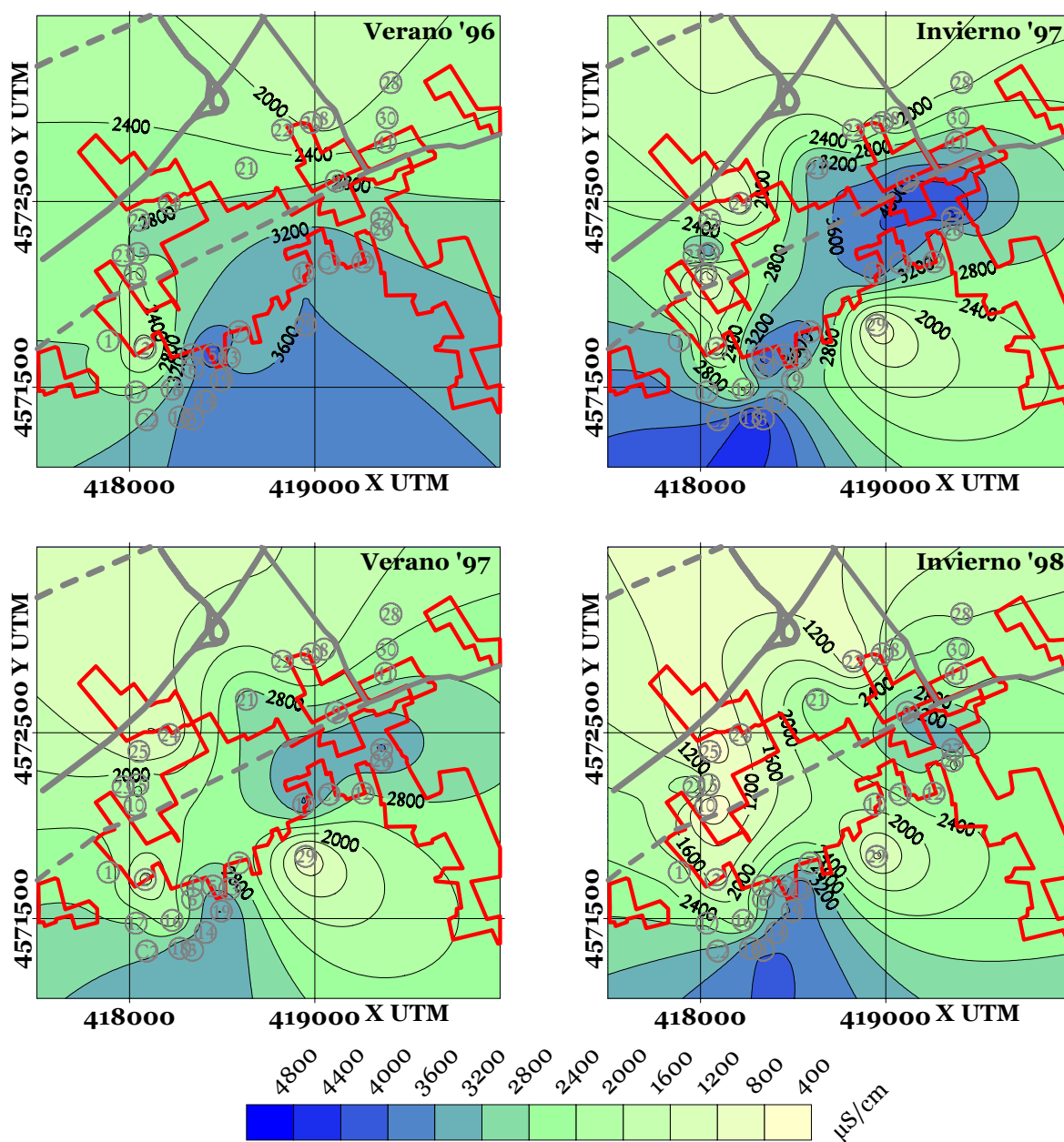


Figura 4.4.- Mapas de isoconductividades en $\mu\text{S/cm}$ para la zona de Can Rovira-Can Sabadell. Nótese el progresivo incremento aguas abajo de las zonas de extracción-relleno (delimitadas con las líneas de color rojo) excepto en algunas zonas donde predomina el valor regional ($\sim 2.000 \mu\text{S/cm}$).

En la Zona de Cal Dimoni (figura 4.5) las zonas con máxima conductividad coinciden con la localización de las zonas de extracción–relleno, además se observa la tendencia general alargada en dirección NW–SE que corresponde a la alteración que sufre el flujo natural de las aguas subterráneas cuando se produce el bombeo del pozo número 33 (38) que es uno de los que se emplean para regar en la zona.

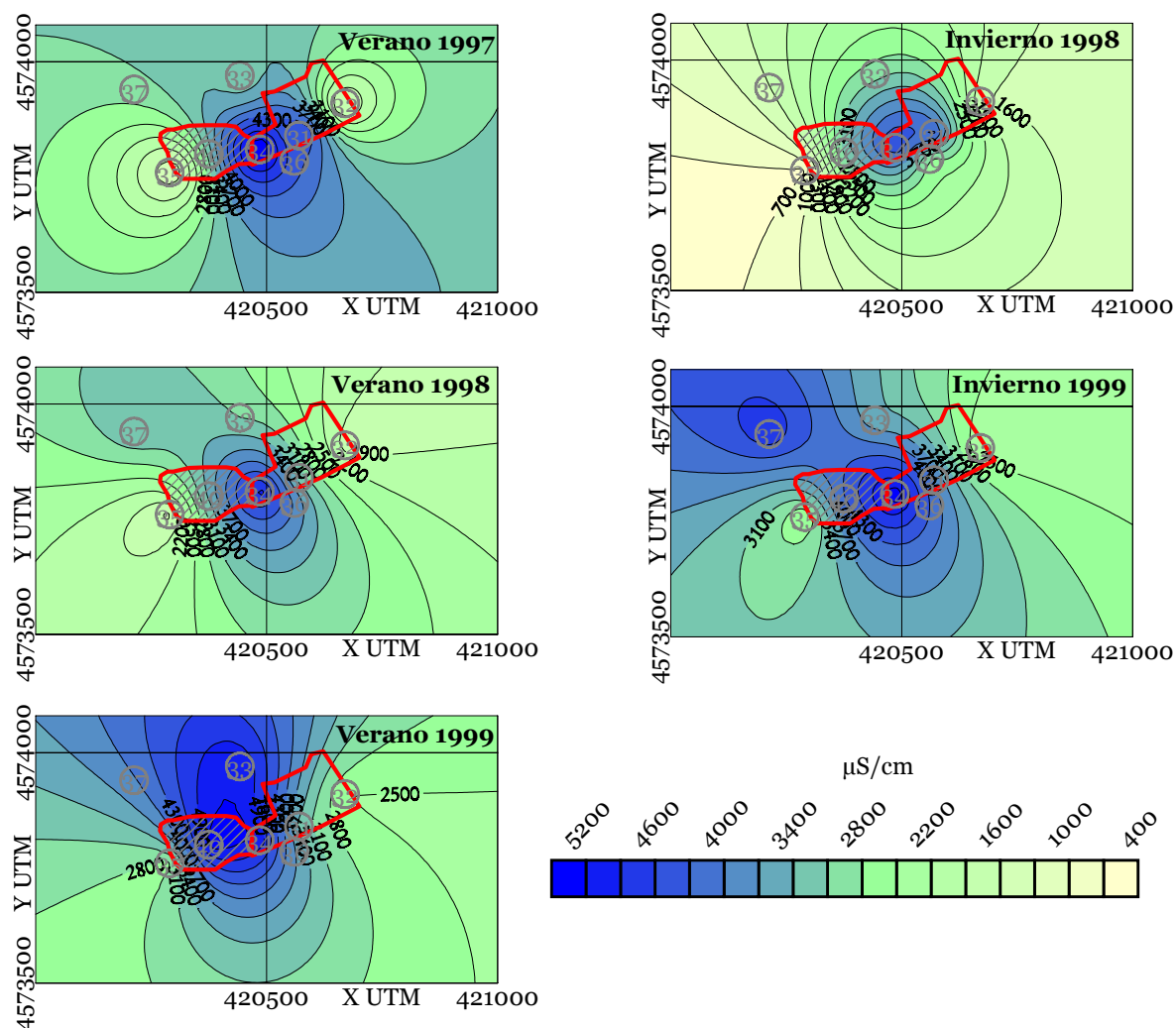


Figura 4.5.- Mapas de isoconductividades en $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la zona de Cal Dimoni. Los máximos coinciden con las zonas que se encuentran justo por debajo de la zona de extracción–relleno (delimitada en rojo) y la laguna (con trama gris).

4.5.2.- Variación en la composición química de las aguas subterráneas

Los diagramas de Stiff modificados para cada muestra permiten realizar una primera caracterización de la composición química de las aguas subterráneas. Además, al localizarlos en la posición de cada punto de muestreo, se obtiene una imagen de la extensión de la interacción entre los lixiviados de las zonas de extracción–relleno y las aguas subterráneas.

La figura 4.6 permite la observación de la evolución de esa interacción que sigue claramente la línea de flujo regional, donde puede observarse el progresivo aumento del contenido de los iones principales a medida que se avanza aguas abajo de las zonas de extracción–relleno en la zona de Can Rovira–Can Sabadell.

La campaña del invierno de 1998 se ha escogido como representativa de las 4 que se han realizado en esta zona ya que, aparte de mostrar visualmente el aumento de la concentración de los iones mayores aguas abajo, ha sido una de las campañas con mayor número de muestras analizadas.

El resto de los diagramas de Stiff para las otras campañas se adjunta en el anexo A.5. Del análisis de estas figuras se puede deducir la ausencia de mecanismos de dilución, corroborando lo que se ha obtenido por medio del análisis de los datos de precipitación. Por tanto la influencia estacional puede explicarse como un incremento de la altura del nivel freático que implica una génesis extra de lixiviados y que incrementa las concentraciones de los iones mayores, principalmente en invierno.

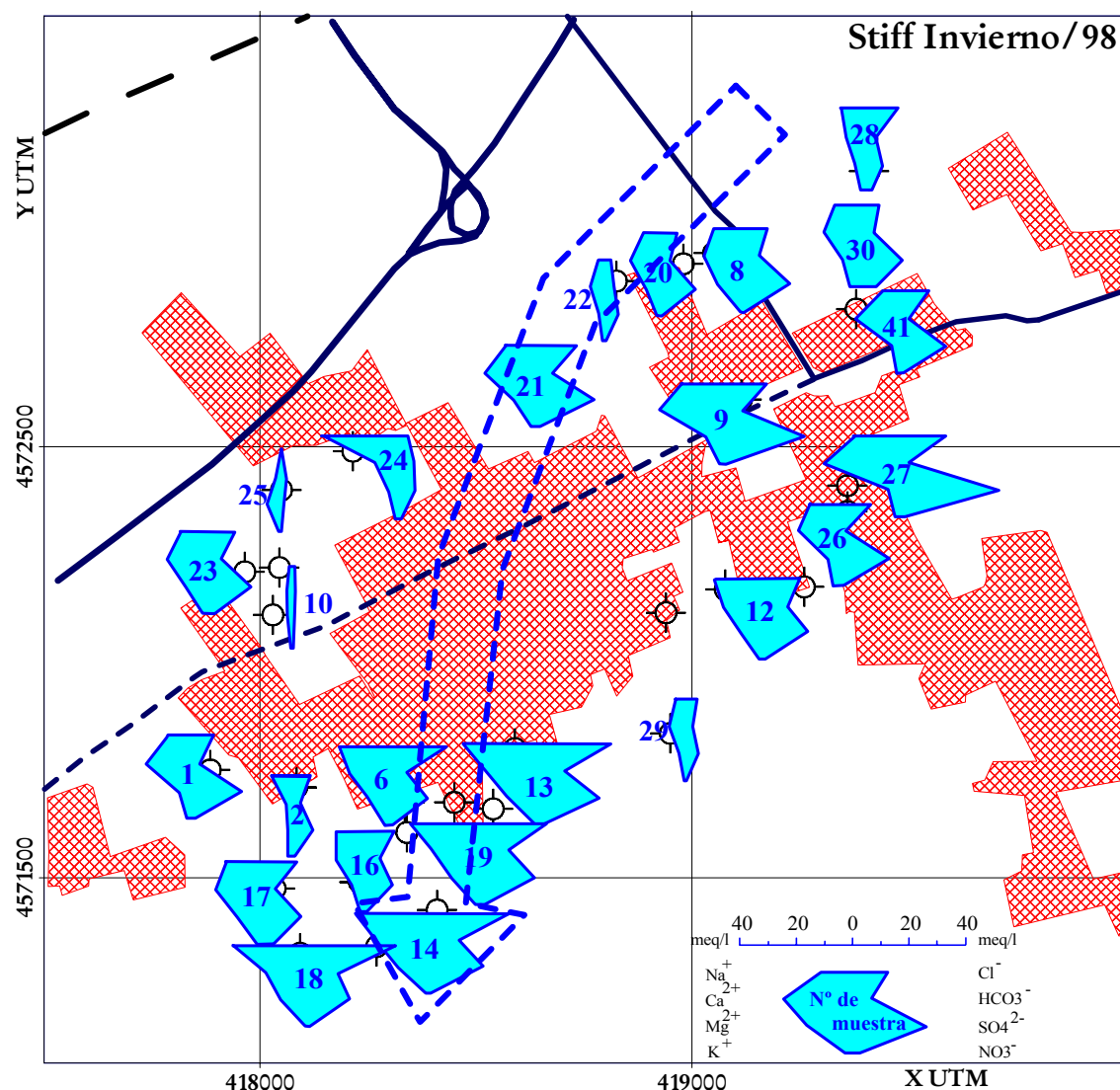


Figura 4.6.- Diagramas de Stiff modificados para la zona de estudio Can Rovira-Can Sabadell en el invierno de 1998. Estos diagramas permiten obtener una primera distribución del contenido de iones de las aguas subterráneas. Nótese el progresivo incremento de este contenido aguas abajo debido a la interacción de los lixiviados generados en la zona de extracción-relleno con las aguas subterráneas. La flecha de trazo discontinuo marca la línea de flujo regional de las aguas subterráneas.

La figura 4.7 representa los diagramas de Stiff modificados para cada punto de muestreo de agua en la zona de Cal Dimoni. En este caso la interacción entre aguas subterráneas y lixiviados sigue la línea de flujo local dirigida hacia la laguna. Se ha escogido la campaña del invierno de 1999 como representativa de todas las otras siguiendo los mismos criterios anteriores.

El resto de los diagramas de Stiff para las otras campañas se adjunta en el anexo A.5. Tal como ocurre con la zona de Can Rovira–Can Sabadell tampoco se puede deducir la existencia de dilución de carácter estacional.

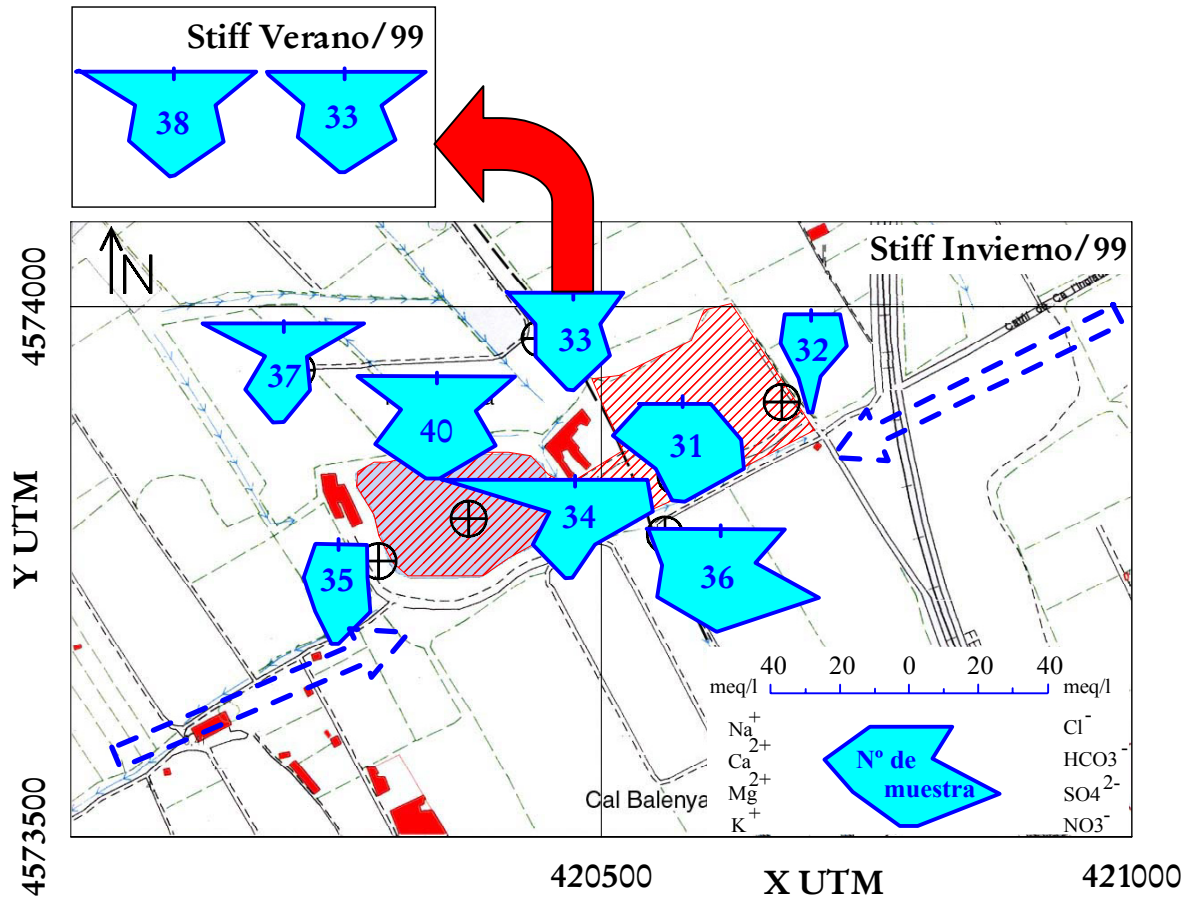


Figura 4.7: Diagramas Stiff modificados para la Zona de Cal Dimoni en el invierno de 1999. En este caso los puntos de muestreo números 32 y 35 se han tomado como los representativos del valor regional ya que en todas las campañas presentan el menor contenido en iones mayores. La flecha roja señala el punto de muestreo número 38 que corresponde al 33 después de una hora de bombeo intensivo para la campaña del verano de 1999, en él puede apreciarse el aumento en concentración de los iones. Es importante hacer notar que el agua del pozo adquiriría un color muy oscuro y un olor putrefacto. Las flechas discontinuas de color azul señalan el sentido de las líneas de flujo local, determinadas por la posición del nivel freático en los diferentes puntos de muestreo.

En el caso del punto de muestreo 33 se pudieron realizar dos recogidas de muestras especiales (verano de 1998 y verano de 1999). Previamente a la realización de la campaña se solicitó al propietario su disposición a realizar un bombeo exhaustivo para muestrear el agua del pozo al inicio y después de 1 hora de bombeo intensivo con el objeto de obtener muestras de agua contaminada por su interacción con los lixiviados. Este hecho se ha corroborado tanto por los aspectos visuales como por los analíticos, ya que la muestra obtenida después de 1 hora de bombeo (muestra número 38) era claramente diferente de la inicial (muestra número 33).

Los aspectos más destacables del cambio en las muestras son: el color, que de incoloro pasa a negruzco, y el olor que de casi inodoro pasa a un fuerte olor a podrido. Por este motivo cada vez que se procede a la utilización de estas aguas como agua de riego se debe preparar un dispositivo que permita almacenar y desechar las aguas “negras” para evitar que entren en contacto con los cultivos y que puedan estropearlos. También destaca el aumento en los contenidos de los iones mayores, tal como se observa en la figura 4.7.

Colindante con la zona de cultivo del punto de muestreo 33 se encuentra una gran acumulación de estiércol en superficie (figura 4.8). Este almacenamiento se mantiene durante todo el año y permite la distribución y la venta a los agricultores. Se encuentra localizado justo encima de la zona de extracción–relleno, al lado de la laguna de Cal Dimoni, por lo que se puede pensar que sea el área fuente de los lixiviados que interaccionan con las aguas subterráneas y que provocan el cambio de sus características: malos olores, color y aumento del contenido en iones. En la sección 6.3 se analizan y comparan los resultados de los datos analíticos con las campañas de geofísica que corroboran esta idea.



Figura 4.8.- Almacén de estiércol situado encima de la zona de extracción-relleno de Cal Dimoni.

4.5.3.- Variaciones en los valores de pH

La variación en los valores de pH es otro parámetro necesario para caracterizar las aguas subterráneas afectadas por la interacción con lixiviados de zonas de extracción-relleno. La figura 4.9 muestra estas variaciones en la zona de Can Rovira–Can Sabadell, en ella se puede observar que los valores evolucionan de predominantemente más ácidos en la primera campaña a más neutros e incluso básicos a medida que pasa el tiempo. Esto es debido a que en las zonas de extracción-relleno se generan lixiviados siguiendo la evolución normal para el caso de los vertederos de residuos sólidos urbanos (Mac Farlane *et al.*, 1983).

Con respecto a la variación de los valores de pH en función de su posición respecto de las zonas de extracción–relleno se puede observar que mantienen una tendencia siguiendo las líneas de flujo definidas por la posición del nivel piezométrico, pasando de valores básicos a valores neutros e incluso ácidos en sentido aguas abajo,

lo que se explica por la interacción de las aguas subterráneas con los lixiviados generados en las zonas de extracción relleno.

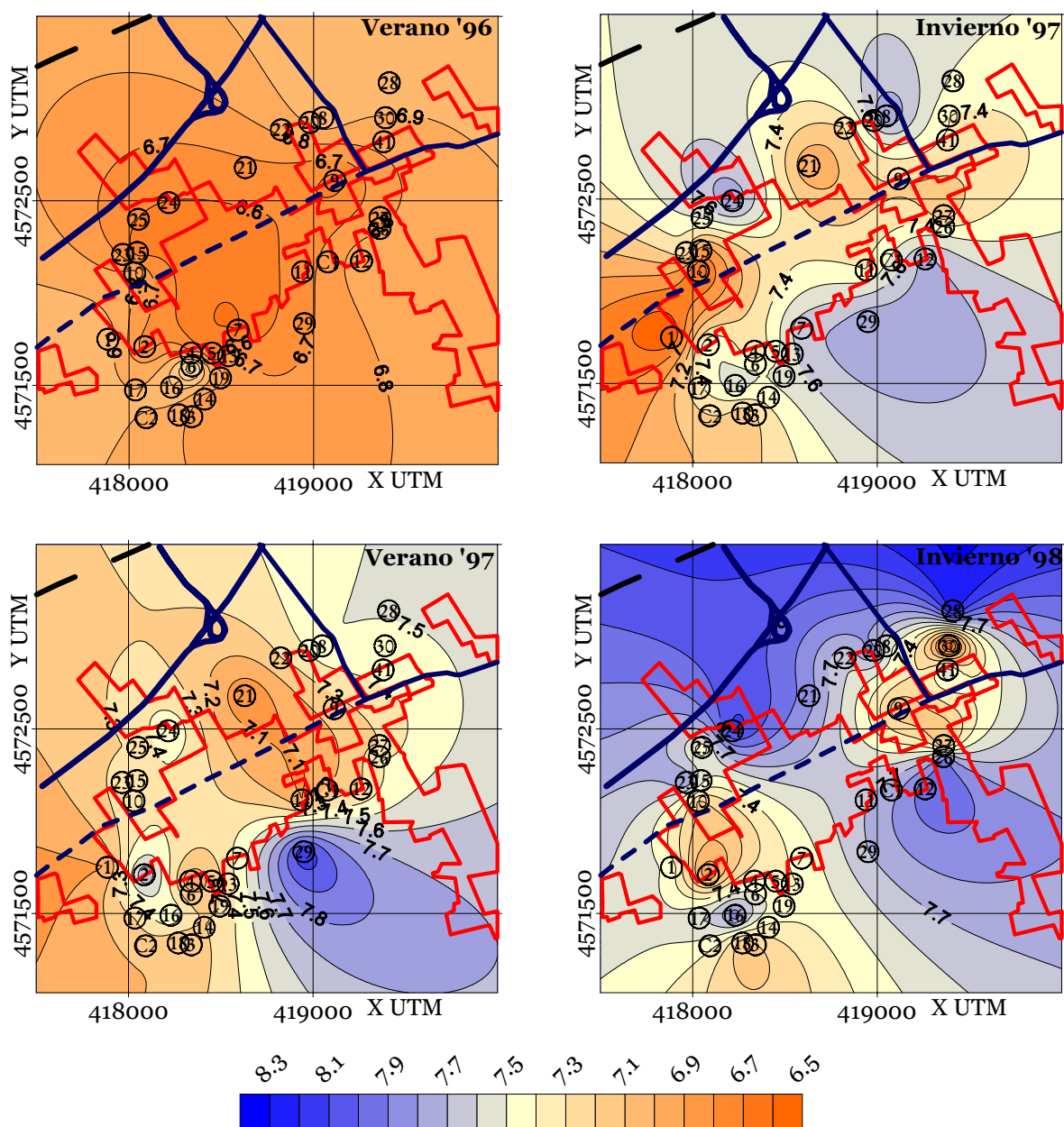


Figura 4.9.- Variación de los valores de pH de las muestras de agua subterránea de la zona de Can Rovira–Can Sabadell. Cabe destacar el progresivo aumento del pH a medida que pasa el tiempo y su disminución hacia las zonas aguas abajo de la línea de flujo principal.

La figura 4.10 muestra la variación de los valores de pH para las aguas subterráneas de la zona de Cal Dimoni que van desde valores neutros a valores básicos, excepto para el invierno de 1998 en que la variación es de valores ácidos a básicos, siempre siguiendo la dirección de la línea de flujo principal, es decir, en dirección a la laguna. La variabilidad estacional muestra una tendencia hacia la neutralidad en verano; ya que en invierno es cuando se alcanzan los valores más básicos. Es de destacar que en esta zona se alcanzan valores más básicos que en la zona de Can Rovira–Can Sabadell. Esta diferencia se debe a que se han vertido materiales muy distintos y también porque actualmente está presente el almacén de estiércol en superficie que aporta nuevos lixiviados.

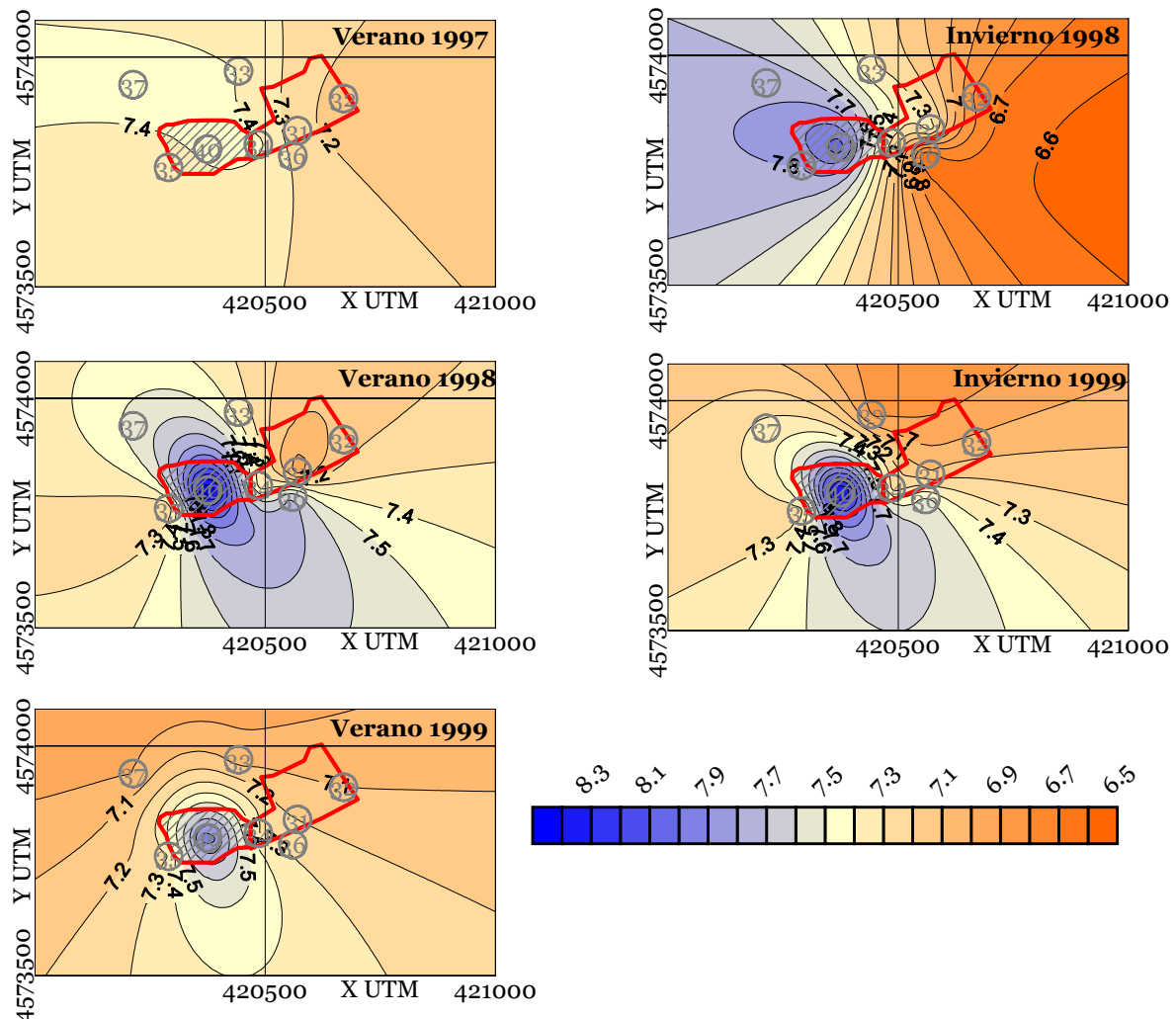


Figura 4.10.- Variación en los valores de pH de las muestras de aguas subterráneas de la zona de Cal Dimoni. Nótese el aumento de los valores en dirección a las zonas de extracción-relleno (delimitadas en rojo).

4.5.4.- Variación en los valores del potencial de óxido–reducción (Eh).

Los valores del potencial de óxido–reducción de las muestras (Eh) proporcionan una estimación acerca de su capacidad para oxidar o reducir. En general los valores positivos se consideran aguas oxidantes y los negativos aguas reductoras. Este parámetro, si se mantiene constante indica que las aguas subterráneas se encuentran en equilibrio con el medio por el cual circulan.

La figura 4.11 muestra los resultados para la zona de Can Rovira–Can Sabadell, en ella se observa que las muestras que se encuentran debajo de las zonas de extracción–relleno presentan valores oxidantes y a medida que se avanza siguiendo la tendencia de las líneas de flujo aguas abajo, las muestras cambian a reductoras.

Debe hacerse notar la alta variabilidad en los valores, por lo que se sospecha que las aguas subterráneas sufren constantes variaciones en su estado de equilibrio con el medio en que se encuentran, este hecho corrobora la idea de que existe una constante interacción entre los lixiviados generados en las zonas de relleno y las aguas subterráneas.

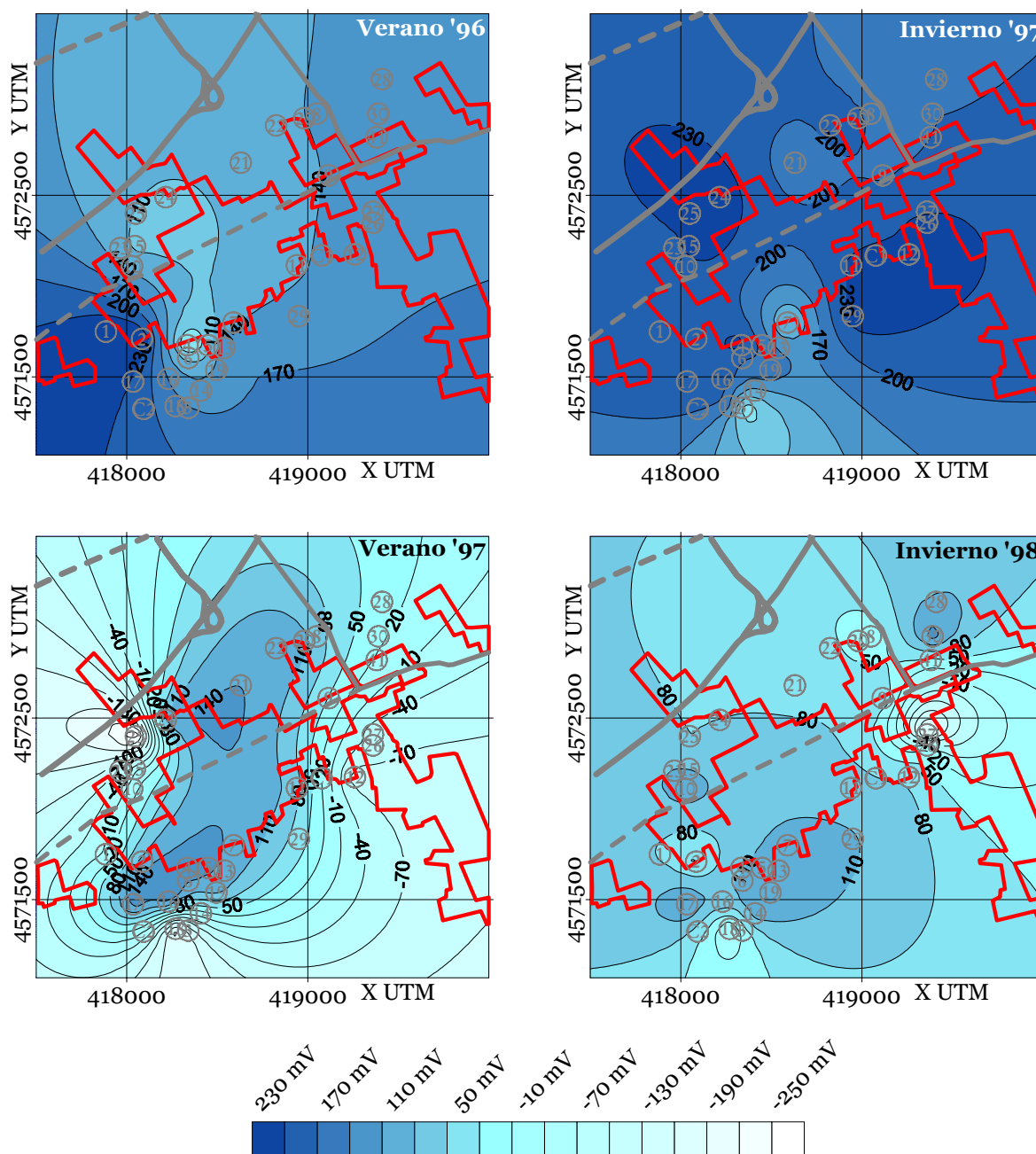


Figura 4.11.- Variación de los valores de potencial de óxido-reducción (Eh) para las muestras de agua de la zona de Can Rovira–Can Sabadell. Se observan grandes diferencias entre campañas y la tendencia general es a tener valores oxidantes debajo de las zonas de relleno que pasan a ser reductores aguas abajo.

La figura 4.12 muestra los resultados para la zona de Cal Dimoni. En este caso, a medida que pasa el tiempo se observa siempre la misma tendencia general, las aguas que se encuentran bajo las zonas de relleno están siempre en condiciones reductoras y van manteniendo esta tendencia aguas abajo según las líneas de flujo, es decir en dirección a la laguna.

Por otro lado, el rango de variación de los valores también hace pensar en la dificultad que tienen las aguas subterráneas para alcanzar el equilibrio con el medio. Así pues, también se puede afirmar que existe una interacción constante con los lixiviados generados en las zonas de relleno.

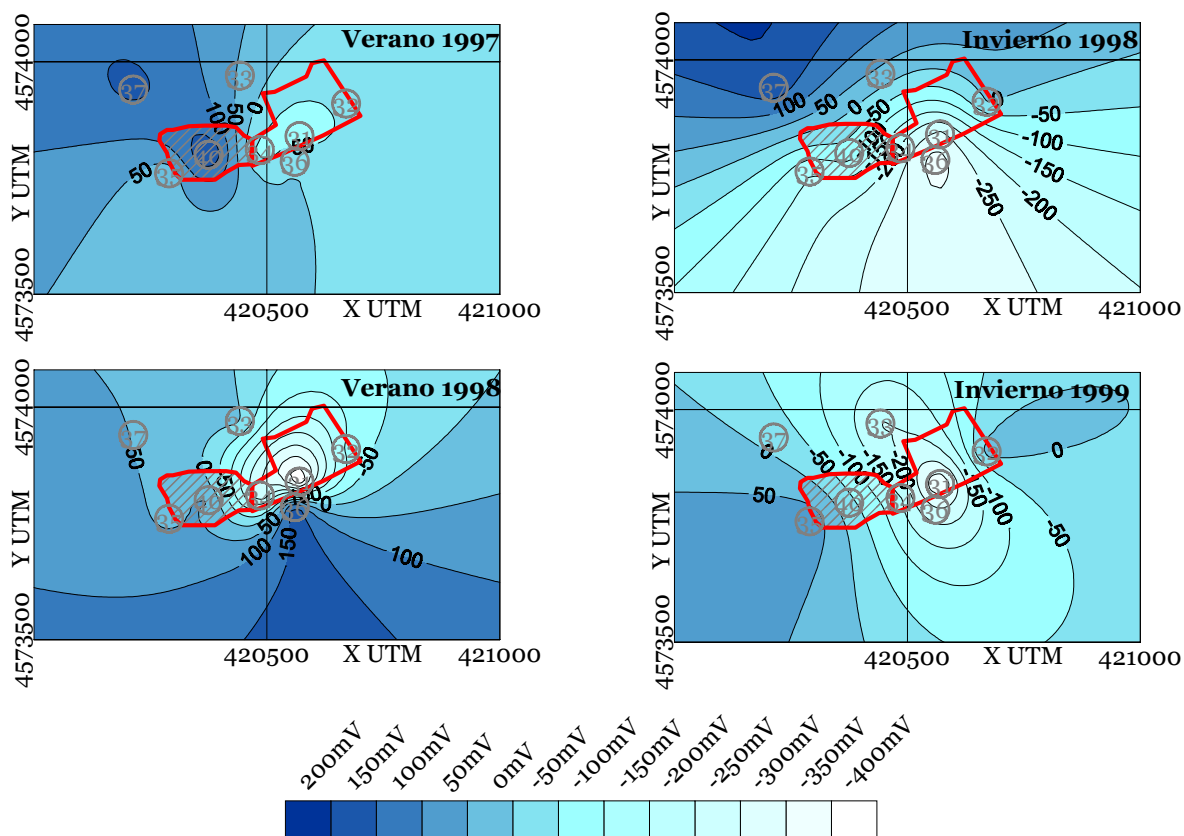


Figura 4.12.- Variaciones de los valores de potencial de óxido-reducción (Eh) en la zona de Cal Dimoni, predominan los valores reductores por debajo de las zonas de extracción–relleno, pero el rango es bastante alto indicando que las aguas difícilmente se estabilizan con el paso del tiempo.

4.5.5.- Clasificación de las muestras de agua subterránea

Utilizando los resultados de los análisis se han clasificado las muestras en función del cálculo de tipo de agua subterránea según la concentración de los iones mayores (ver anexo A.6).

Por otro lado, se ha representado cada muestra en el diagrama doble triangular de Piper–Hill–Langelier para observar la tendencia general de los tipos de agua subterránea y determinar la posible presencia o ausencia de procesos de mezcla entre diferentes tipos de agua.

Zona de Can Rovira – Can Sabadell

La figura 4.13 muestra el diagrama de Piper–Hill–Langelier de las muestras del invierno de 1997 que se ha escogido como representativo para esta zona. Tal como indica este diagrama la mayoría de las muestras se clasifican como del tipo sulfatado–clorurado y cálcico–sódico.

Si se analiza en detalle la evolución de las aguas subterráneas, siguiendo la línea de flujo principal, el diagrama muestra que la concentración de los iones mayoritarios se ve modificada en dirección aguas abajo después de pasar por las zonas de extracción–relleno: de Ca^{2+} a Na^{+} (flecha de color azul).y de SO_4^{-} a Cl^{-} (flecha de color rojo)

De lo anterior se concluye que existen procesos de mezcla de aguas de naturaleza diferente: lixiviados y aguas subterráneas.

El conjunto de los diagramas de Piper–Hill–Langelier para todas las campañas se adjunta en el anexo A.7.

Esta primera caracterización se completa con las figuras 4.14 y 4.15 que muestran la distribución de isocontenidos de cationes y aniones dominantes en la zona.

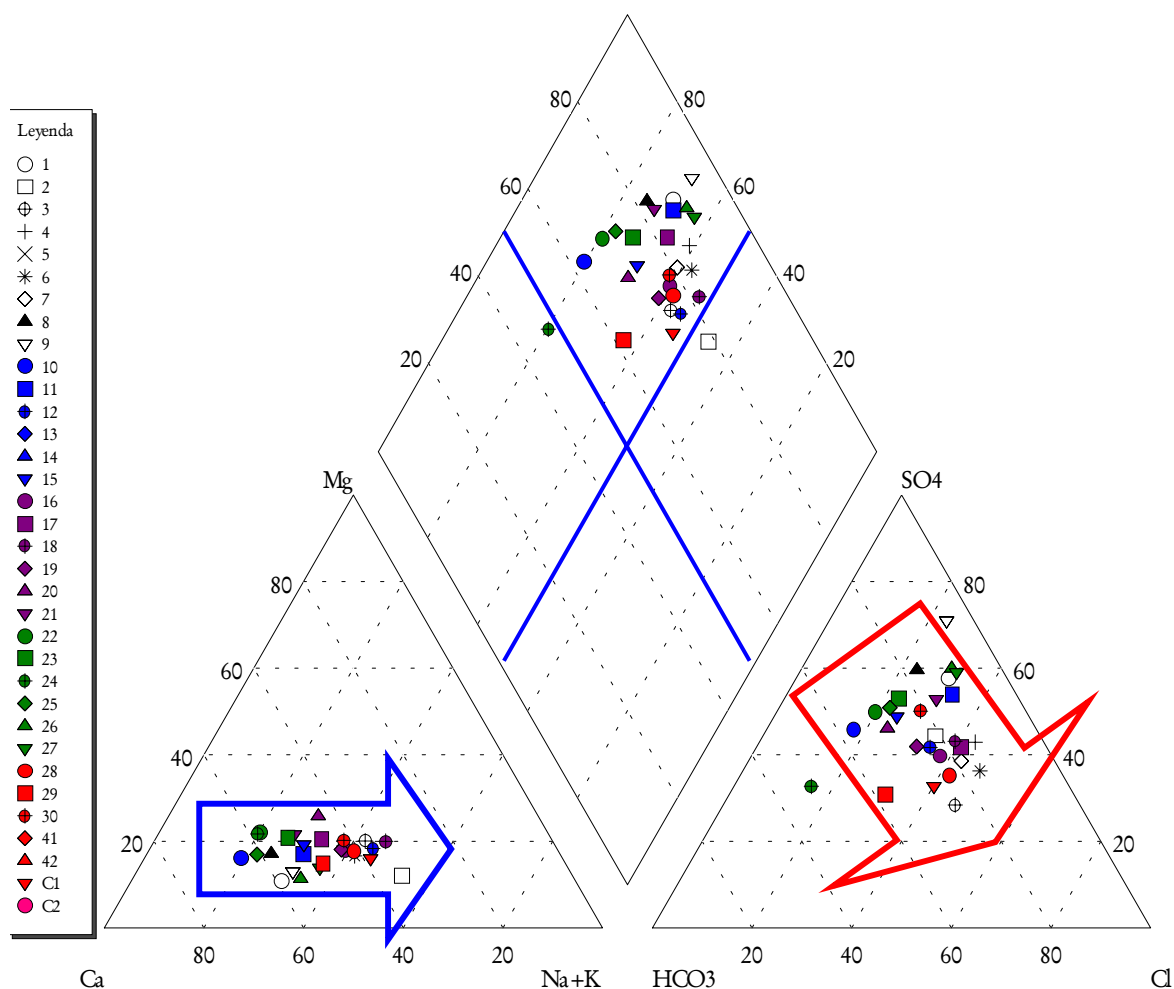


Figura 4.13.- Diagrama de Piper-Hill- Langelier para las muestras del Invierno de 1997. Las flechas indican la evolución de los iones mayores en sentido aguas abajo de las zonas de extracción-relleno.

Respecto a la variación en la composición de las aguas subterráneas según los cationes dominantes (figura 4.14) se observa que principalmente domina el calcio en las aguas que se encuentran por encima de las zonas de extracción-relleno siguiendo la línea de flujo regional y el sodio en las zonas aguas abajo. Esta disminución relativa de los niveles de calcio es debida a los procesos de mezcla con los lixiviados que generan precipitación de calcita (ver apartado 5.5.1).

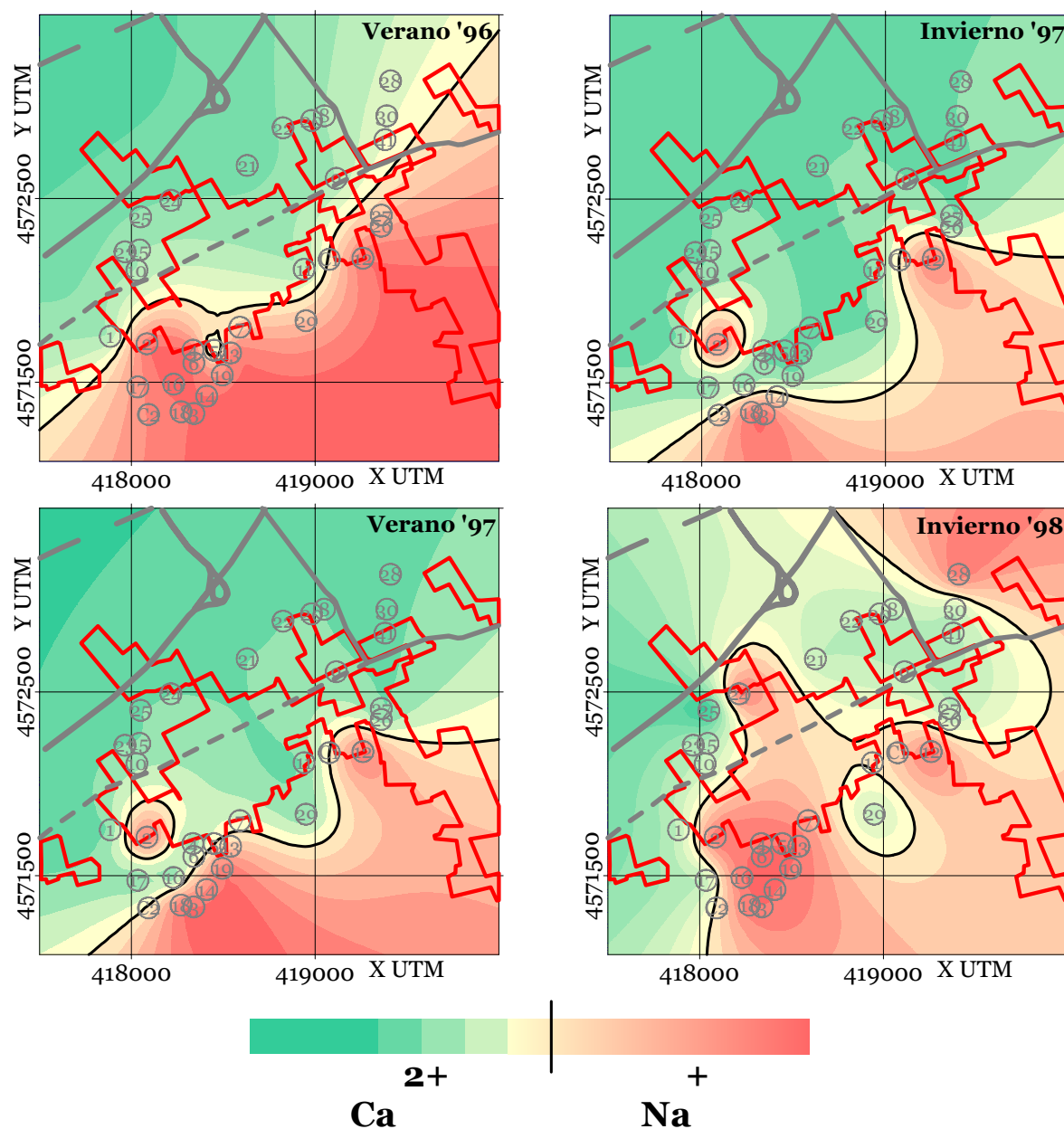


Figura 4.14.- Distribución de los cationes para la zona de Can Rovira-Can Sabadell. El calcio es el catión dominante aguas arriba de las zonas de extracción-relleno y el sodio aguas abajo.

La distribución de los aniones dominantes en las aguas subterráneas de la zona se muestra en la figura 4.15. En este caso la tendencia es a tener principalmente composición sulfatada en las aguas subterráneas que se encuentran aguas arriba de las zonas de extracción-relleno y composición clorurada aguas abajo.

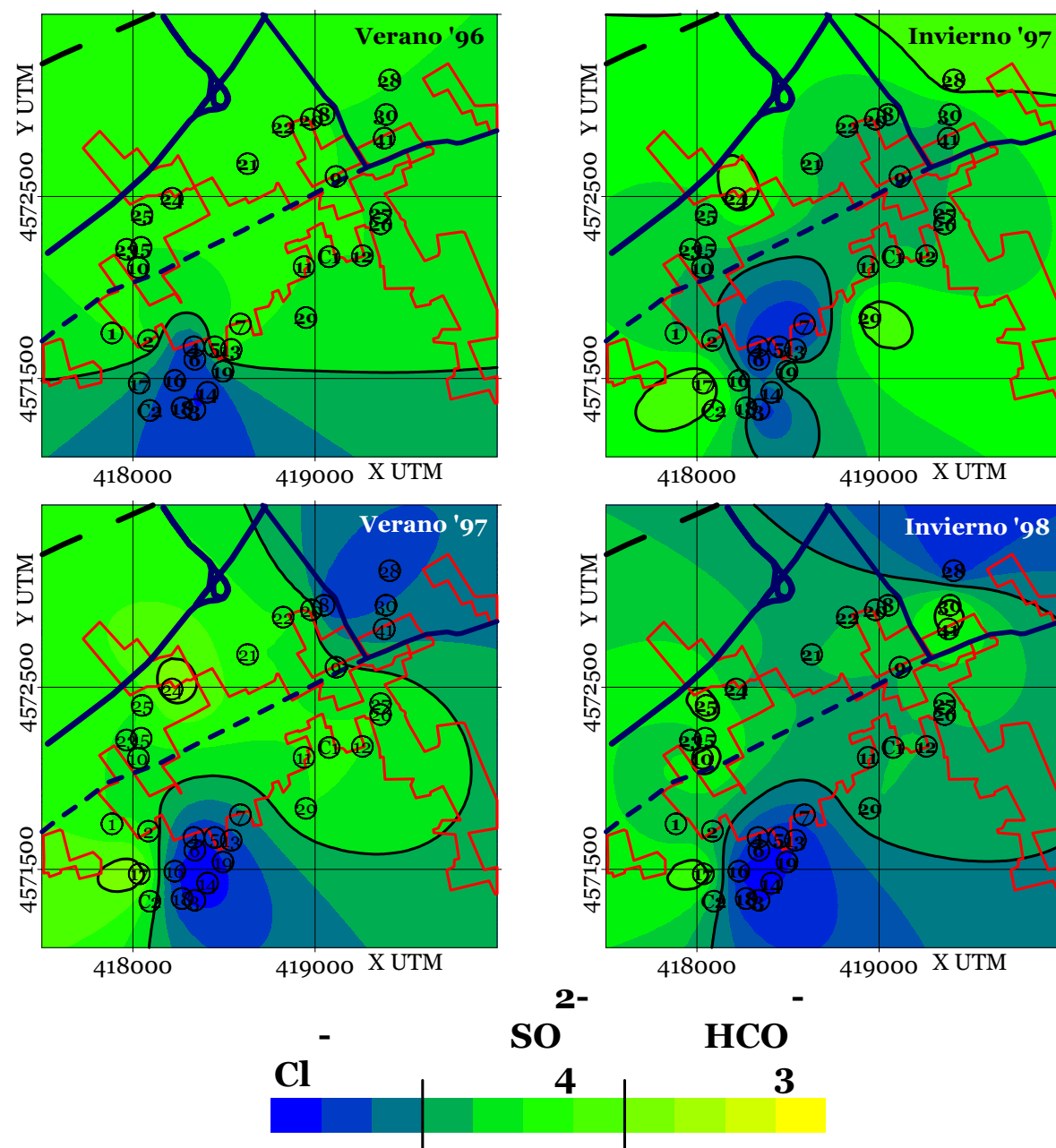


Figura 4.15.- Distribución de los aniones dominantes para la zona de Can Rovira-Can Sabadell. Las aguas subterráneas son principalmente sulfatadas aguas arriba de las zonas de extracción-relleno y cloruradas aguas abajo.

Zona de Cal Dimoni

En esta zona el número de muestras ha permitido observar la evolución temporal en un solo gráfico de Piper–Hill–Langelier (figura 4.16) en el que se observan los cambios en la composición de las aguas subterráneas a lo largo de las diferentes campañas. Este diagrama permite distinguir entre los diferentes tipos de aguas de la zona de Cal Dimoni a partir del quimismo de los iones mayoritarios. Se observa una gran diversidad de composiciones, que abarca desde un polo bicarbonatado cálcico-sódico (muestra 32) hasta un polo sulfatado (muestra 31) y clorurado (muestra 37). Próximas a esta composición clorurada y sulfatada se encuentran las muestras 34 y L1, más cercanas a los rellenos. En el triángulo correspondiente a los cationes se aprecia una tendencia de las muestras a evolucionar hacia el vértice del sodio, es decir a una progresiva salinización. En el triángulo de los aniones esta evolución, es hacia términos más sulfatados y clorurados.

En el anexo A.6. se presenta la tabla con la clasificación de todas las muestras, en ella se puede observar la variación temporal de estos cambios siguiendo los criterios de clasificación de aguas del diagrama de Piper–Hill–Langelier. Tal como se observa tanto en el diagrama de Piper–Hill–Langelier como en la tabla, la concentración de los iones mayoritarios aumenta respecto a los valores originales, por lo que se puede afirmar que en esta zona también ocurren procesos de mezcla de agua debidos a la interacción de las aguas subterráneas con los lixiviados de la zona de extracción–relleno.

Por otra parte se debe hacer notar que la variación en la composición de las aguas, con respecto a los cationes dominantes, va siempre de calcio a sodio (figura 4.17) y con respecto a los aniones, el cambio se produce de bicarbonato a sulfato y a cloruro (figura 4.18).

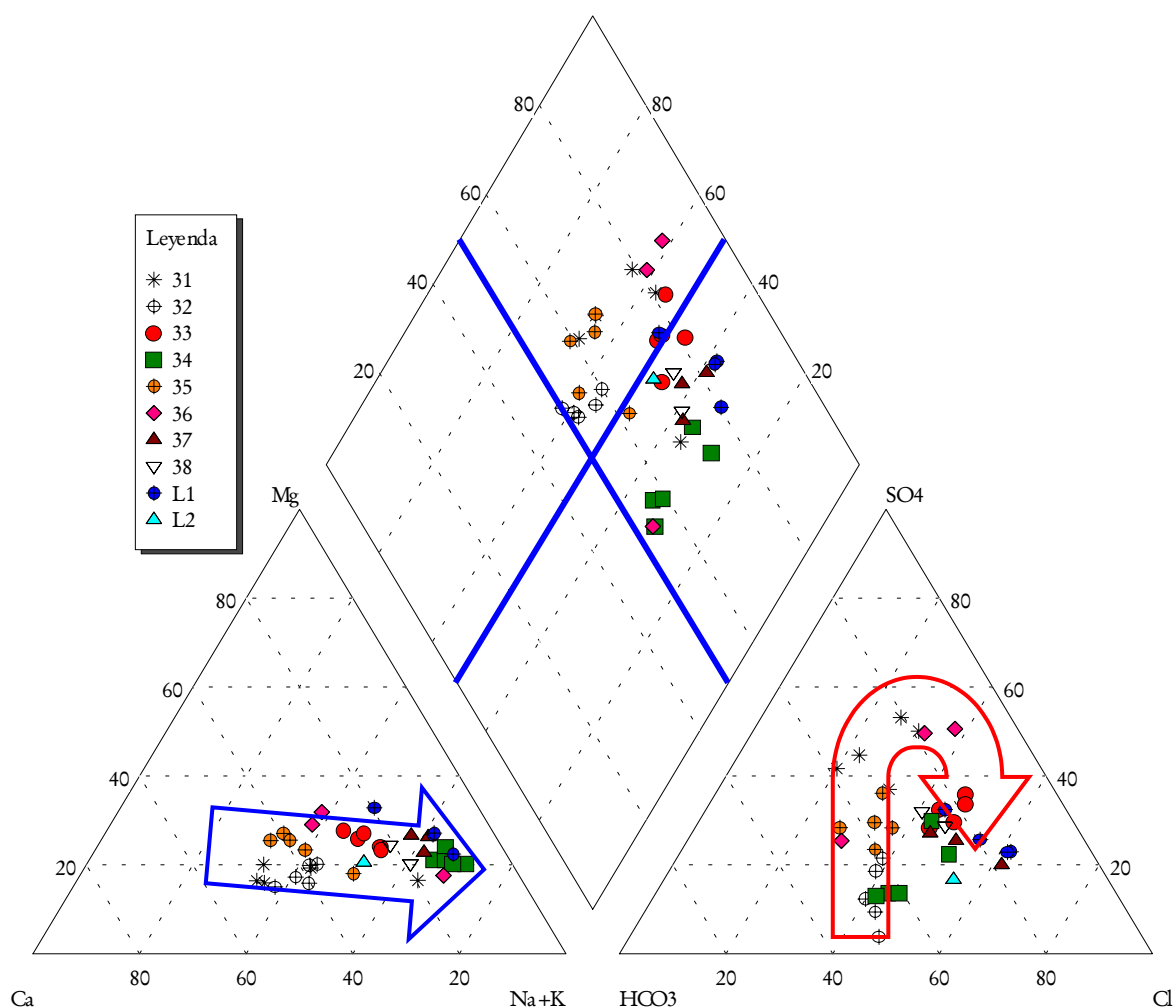


Figura 4.16.- Diagrama de Piper-Hill-Langelier para las muestras de agua subterránea de la zona de Cal Dimoni. Nótese la variación que sufren algunas muestras que pasan de tener composiciones sulfatadas cálcicas a cloruradas sódicas (muestra 31) o que varían de cloruro cálcicas a sulfato cálcicas pasando por bicarbonato cálcicas (muestra 35). Si se siguen las líneas de flujo local, (marcadas por flechas en el gráfico, azul para los cationes, roja para los aniones) ocurre un intercambio Ca^{2+} por Na^+ expresado por un enriquecimiento del contenido de sodio. A nivel de aniones tiene lugar una evolución que va desde el polo del bicarbonato hacia el de sulfato y por último al de cloruro.

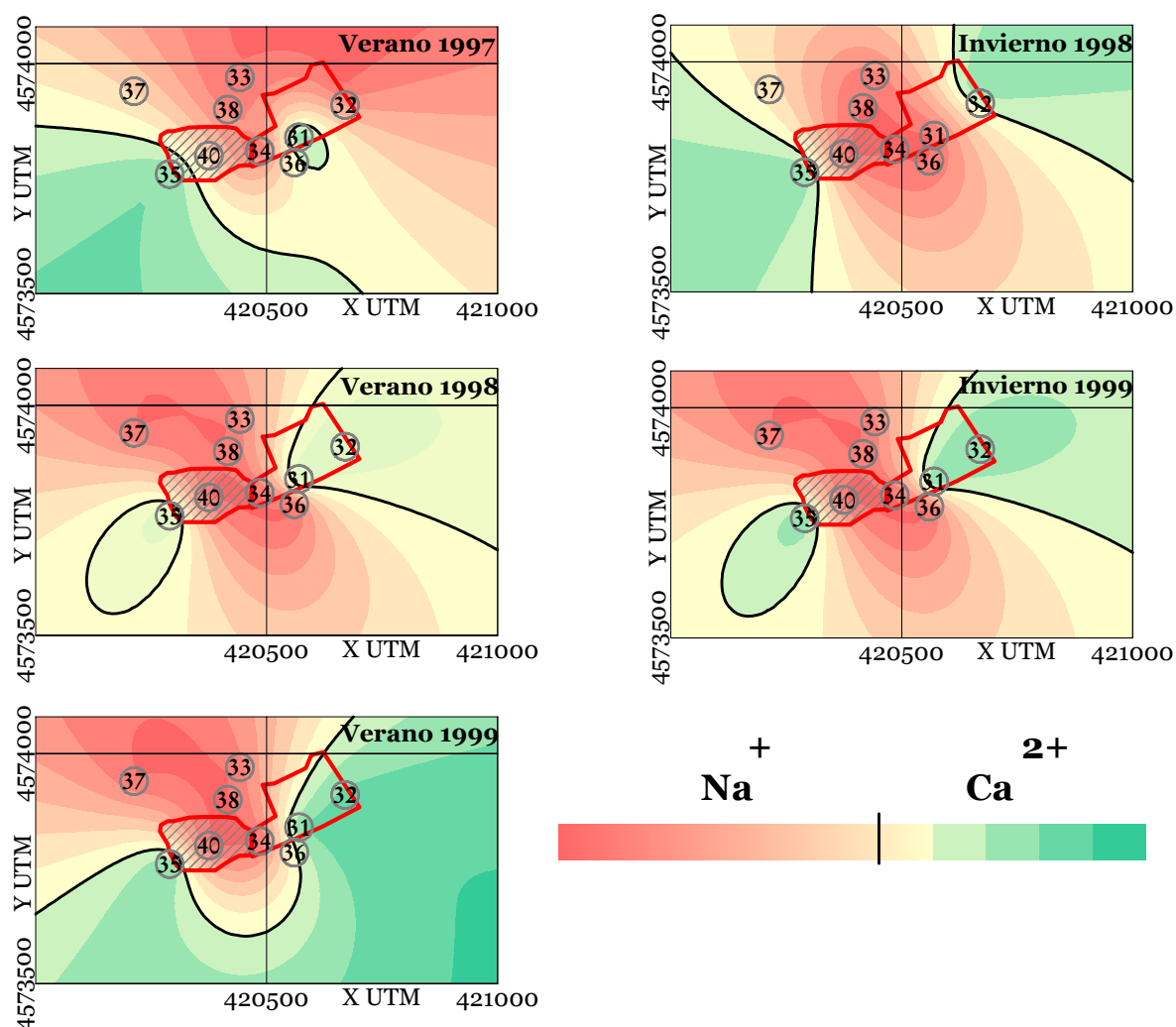


Figura 4.17.- Variación en la composición de cationes para las muestras de aguas subterráneas de la zona de Cal Dimoni. En el verano de 1997 no se observa ninguna alteración de las líneas de flujo regional que van en dirección a la laguna. Durante las dos campañas de invierno se solicitó la explotación de las aguas en el punto de muestreo 33 por lo que se observa una acentuación de los contenidos en Na⁺ hacia el punto de bombeo. Por otro lado, se observa claramente el cambio de composición de cálcico a sódico a medida que se avanza aguas abajo de la zona de extracción-relleno.

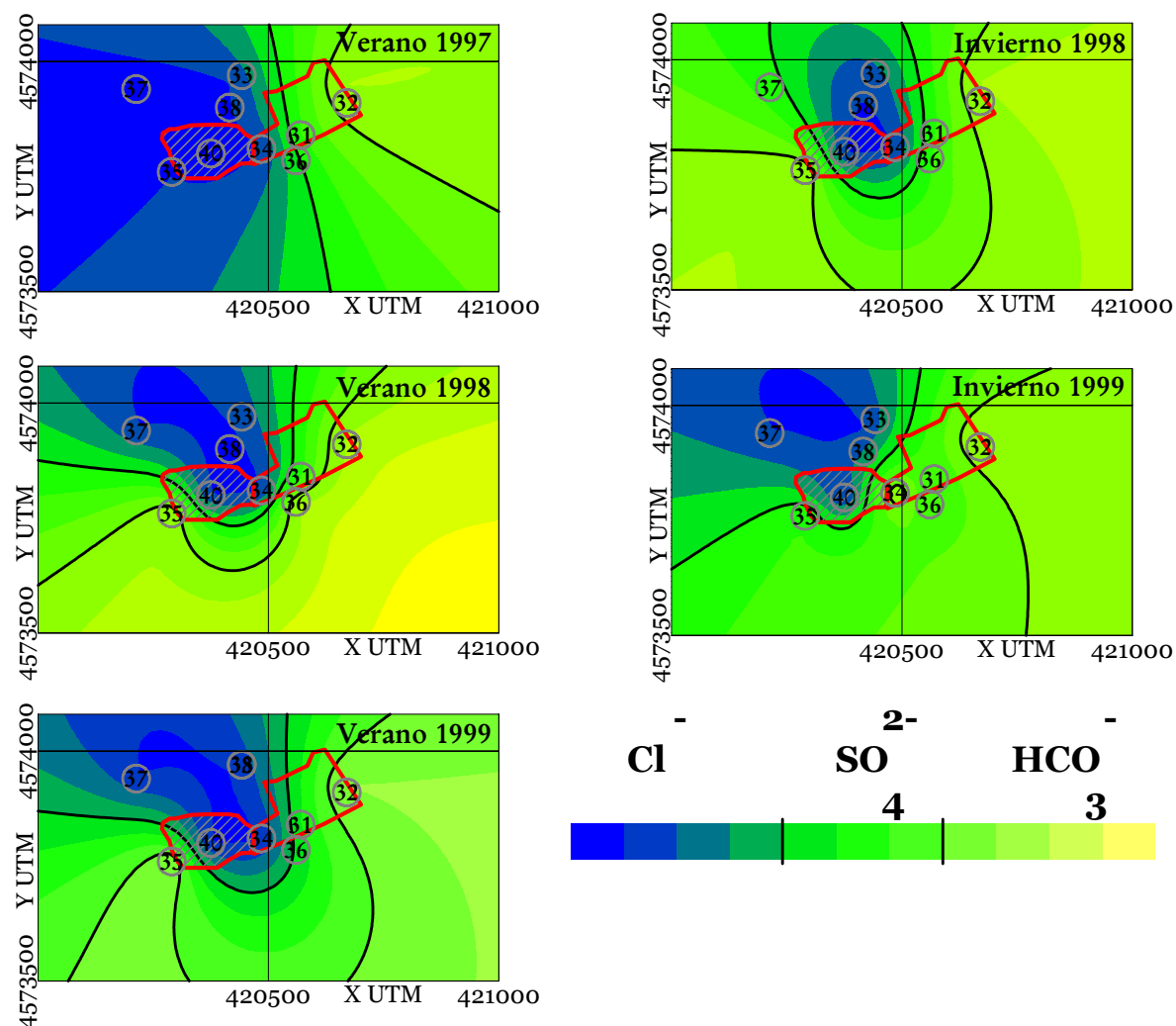


Figura 4.18.- Variación en la composición de aniones para las muestras de aguas subterráneas de la zona de Cal Dimoni. En el verano de 1997 se observa un progresivo aumento en el contenido de cloruros hacia el E. Para los dos veranos siguientes, al pedir que se extrajera agua del punto de muestreo 33, se modifica la tendencia anterior y se observa una clara influencia de este bombeo en la dirección de explotación. Por otro lado, en la campaña del invierno de 1998 se observa la influencia de la zona de extracción–relleno por el aumento en el contenido de cloruros. En la campaña de invierno de 1999, domina tanto el flujo local como la influencia de la extracción de agua.

Los diagramas de aniones y cationes dominantes a lo largo del tiempo permiten observar que existe una constante evolución en estas muestras de aguas, además, sus composiciones indican la modificación que sufre la línea de flujo regional por la explotación de las aguas subterráneas, especialmente en el punto de muestreo 33, que se observa por el alargamiento en dirección NW–SE evidente en las gráficas 4.17 y 4.18. Este alargamiento muestra también la variación espacial de la composición de las aguas subterráneas que varía de bicarbonatadas a sulfatadas y cloruradas a medida que se avanza aguas abajo en esta línea de flujo modificada.

A partir del análisis de las figuras 4.17 y 4.18 así como con otros tratamientos geoquímicos de los resultados analíticos, se han podido diferenciar diversos tipos de aguas en función de su composición química dominante:

1) Aguas bicarbonatadas cálcico-sódicas

Este grupo, que a pesar de no ser el más abundante en el muestreo, representa el tipo de quimismo dominante en el acuífero superficial, correspondería a las aguas iniciales a partir de las cuales han evolucionado las demás debido a todos los procesos de contaminación que les han afectado. Estas aguas están representadas por las muestras 32 y 35, que corresponden a una composición bicarbonatada cálcico-sódica dominante y una mineralización media (conductividad eléctrica aproximadamente de 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). El que se trate de la composición inicial de las aguas de la zona viene corroborado por la distribución en el espacio de estas muestras, situadas en los extremos del área estudiada y fuera de la influencia más evidente de los rellenos.

2) Aguas sulfatadas cálcicas

Estas aguas, que se caracterizan por tener contenidos iónicos altos (conductividades entre 3300 y 3950 $\mu\text{S}/\text{cm}$), representan aguas de composiciones originales bicarbonatadas cálcicas que se han contaminado por mezcla con aguas de lixiviación de los rellenos o por la propia circulación por estos rellenos, hecho que les ha llevado a adquirir su carácter sulfatado. Las muestras que presentan estas características son la 31 y la 36.

3) Aguas cloruradas sódicas

Esta composición química es la mayoritaria en el área de Cal Dimoni. Estas aguas, que se caracterizan por tener contenidos iónicos muy altos (conductividades superiores a 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), corresponden a las muestras más afectadas por los lixiviados procedentes de los rellenos o por el lavado de éstos. Estarían representadas por las muestras 33, 34, 37, 38, L1 y L2.

Se trata de aguas con una mineralización muy elevada, muy reductoras y pH con una cierta tendencia básica (Tabla 4.3). Aparte de su quimismo caracterizado por el dominio, en cuanto a iones mayoritarios, de los cloruros y calcio, destacan también los bajos contenidos en nitratos y sulfatos.

La composición química que define este grupo no puede considerarse como extraordinaria dado el contexto en el que se encuentran, ya que se trata de composiciones químicas habituales en aguas sometidas a procesos de contaminación provocados por vertederos de residuos urbanos.

Tabla 4.3.- Resultados analíticos de las diferentes muestras en la zona de Cal Dimoni.(julio de 1999). Los resultados de las otras campañas se adjuntan en el anexo A.3.

Muestra		31	32	33	38	34	35	37	L1	L2
T ^a	(°C)	19	19	15,6	15,5	18	18	17,4	25	25
Eh	(mV)	-82	-40	-90	-88	-76	18	-0,01	207	
PH		7,20	7,10	7,06	7,25	7,30	7,30	7,00	8,00	7,90
Conductividad	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	3300	2510	5200	4030	5100	2730	3960	5330	2320
CO ₃ ²⁻	ppm						25		33	
HCO ₃ ⁻	ppm	551	659	676	779	1410	553	729	446	280
SO ₄ ²⁻	ppm	1117	40	701	720	375	253	605	509	127
Cl ⁻	ppm	407	363	841	863	921	288	884	1009	305
NO ₃ ⁻	ppm	0,23	8,72	1,47	0,15	0,1	15,3	1,2	0,37	1,02
NO ₂ ⁻	ppm	0,1	1,42	2,04	0,1	2,97	0,1	1,94	0,1	0,1
NH ₄ ⁺	ppm	37	0,1	1,4	22,4	25,9	0,1	0,1	0,1	0,1
Na ⁺	ppm	300	213	519	643	801	194	655	634	210
K ⁺	ppm	90	51	44	44	84	60	21	127	48
Ca ²⁺	ppm	422	263	240	221	134	268	159	112	111

4.5.6.- Contenidos en elementos traza.

Con la finalidad de caracterizar de forma más profunda la contaminación provocada por los rellenos, además de los contenidos y variaciones de los iones mayoritarios, se han estudiado y analizado un amplio espectro de elementos traza, para determinar cuáles de estos elementos pueden asociarse a los procesos de contaminación provocados por los rellenos y así poder caracterizar el verdadero alcance de la misma.

Los resultados de los análisis de muestras de aguas subterráneas para los contenidos en elementos traza se han comprado con los niveles de concentraciones máximas permitidas para las aguas de riego (EPA, 1973) y con los valores de la Reglamentación Técnico-Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de aguas potables de consumo público (Real decreto 1138/1990).

Zona de Can Rovira–Can Sabadell

Se han escogido las últimas campañas de verano e invierno (verano de 1997 e invierno de 1998, ver tablas 4.4 y 4.5) para poder comparar y establecer los posibles criterios de estacionalidad en los contenidos de elementos traza. El resto de los valores para las otras campañas se puede observar en el anexo A.3.

Los valores de las columnas A y B de las tabla 4.4 y 4.5 se definen como:

Columna A: Concentraciones máximas recomendadas para aguas utilizadas de forma continua en todo tipo de suelo.

Columna B: Concentraciones máximas recomendadas para aguas a utilizar hasta 20 años en suelos de textura fina y valores de pH entre 6 y 8,5.

Columna C: Concentración máxima admisible para las aguas potables de consumo público del Real Decreto 1138/1990. Si está entre paréntesis es el nivel guía (valores de los parámetros representativos de los caracteres de potabilidad, correspondientes a una calidad deseable en el agua potable).

Los valores de las muestras destacados en azul representan los que sobrepasan los recomendados por la columna A, los valores destacados en rojo los que sobrepasan los de la columna B y los valores en violeta los que sobrepasan la columna C.

Existen 2 valores especiales: el valor A para el litio representa la concentración máxima recomendada para el riego de cítricos y el valor B del molibdeno sólo es recomendable para suelos ácidos con alto contenido en óxidos de hierro.

Tabla 4.4.- Concentraciones en µg/l de los elemento traza para el **Verano de 1997**. Los valores de A , B y C se explican en el texto.

Elem.	A	B	C	1	2	4	8	11	12	15	16	17	18	19	20	21	22	24	25	26	27	29	canal
Al	5000	20000	2000	358	436	260	141	138	154	256	254	2723	182	209	234	249	158	194	88	218	460	167	300
B	750	2000	(1000)	1436	295	788	287	1065	978	6650	386	629	908	1012	279	582	510	345	779	497	547	146	588
Ba			(100)	226	2362	1311	404	317	397	296	242	1299	150	30	41	9954	482	645	439	244	324	281	842
Cd	10	50	5	2	8		12	6	2	6	19	10	2	4	4	2	8	8	2	6	4	16	10
Cr	100	1000	50	14	2	10	23	9	19	5	6	79	4	16	20	5	4	9	11	32	16	8	12
Cu	200	5000	(100)	41	24	16	8	178	16	92	44	26	15	17	24	21	45	5	24	50	5	8	5
Fe	1000	15000	200 (50)	290	36	65	17	75	1845	376	350	107	4857	50	25	46	55	3	555	626	609	11	463
Li	75 a	2500		81	36	72	54	67	58	116	67	67	59	80	54	80	46	49	38	71	64	32	52
Mo	10	50 b		37	32	14	5	23	14	9	5	32	5	28		9	18	11		55	5		9
Mn	200	10000	50 (20)	1040	75	78	299	847	510	136	40	142	336	332	24	1075	30	18	858	1465	1125	52	818
Ni	200	2000	50	34	61	53	16	58	55	95	90	45	58	13	37	79	111	21	76	21	32	100	8
P			(400)	644	204	678	305	187	287	387	102	475	3470	322	339	322	525	238	797	560	814	339	339
Pb	5000	10000	50	14	52	2	33	65	36	59	105	106	91	96	61	42	78	27	185	139	49	87	144
Se	20	20	10	967	838	1097	450	579	197	191	512	428	642	428	857	1355	1097	1226	708	1226	450	450	579
Sr				3955	939	1642	1545	2577	1733	2003	1145	1575	1656	1754	1129	2754	1793	989	946	2777	4316	420	1836
Zn	2000	10000	5000 (100)	238	60	60	60	102	81	91	80	36	71	102	51	81	212	30	91	245	28	70	70

Tabla 4.5.- Concentraciones en µg/l de los elemento traza para el **Invierno de 1998**. Los valores de A , B y C se explican en el texto.

Elem.	A	B	C	1	2	6	8	9	10	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	41	42	C1	C2
Al	5000	20000	2000	80	132	5	83	106	71	16	68	94	60	37	121	118	108	10	115	182	101	22	37	90	54	124	90	68	285	30	129
As	100	2000	50	578	196	30	528	662	8	345	70	70	518	315	240	350	699	536	410	1025	337	40	120	175	374	97	100	200	362	462	29
B	750	2000	1000	1007	345	1252	504	1282	129	1276	1773	1215	595	907	1244	1513	381	834	399	1752	491	105	516	595	503	222	589	382	504	1068	737
Ba			(100)	57	46	64	70	50	19	69	65	69	46	67	126	39	53	42	42	64	105	30	44	48	66	76	49	59	69	84	142
Cd	10	50	5	25	10	13	8	32	3	20	10	8	27	12	8	22	32	20	40	42	5	1	15	30	13	20	30	20	10	8	10
Cr	100	1000	50	94	7	20	18	40	2	47	12	47	12	19	25	16	25	34	29	19	27	5	5	40	19	7	37	40	24	12	31
Cu	200	5000	(100)	6	20	20	9	18	6	10	18	9	11	20	20	3	30	10	10	10	12	4	7	30	10	20	35	20	4	13	33
Fe	1000	15000	200 (50)	168	92	160	130	90	76	100	20	80	140	150	153	160	100	100	120	100	130	49	140	104	130	180	285	100	140	20	150
Li	75 a	2500		26	20	49	30	63	5	51	49	40	18	30	31	55	16	97	39	55	31	7	35	20	20	20	66	86	107	28	67
Mo	10	50 b		36	17	27	100	8	8	110	48	8	60	70	49	21	98	88	21	60	30	3	100	60	10	40	10	27	64	48	8
Mn	200	10000	50 (20)	27	275	6	381	401	8	210	806	221	31	172	348	214	233	620	11	5	6	36	6	431	37	5	1190	89	86	427	8
Ni	200	2000	50	61	191	58	53	64	4	5	170	138	41	98	115	134	115	50	221	65	204	22	51	111	124	118	25	132	50	88	94
P			(400)	340	179	260	400	882	188	340	220	160	214	484	1171	484	1130	1130	89	297	214	65	89	734	1254	172	1258	561	521	2770	702
Pb	5000	10000	50	201	32	150	55	84	9	185	64	40	117	96	204	70	5	107	20	70	50	25	100	10	100	47	159	61	122	100	50
Se	20	20	10	696	1816	1116	556	1116	196	696	1116	976	513	513	1321	2451	836	1159	1159	836	190	164	1644	2128	190	1805	1805	556	1956	1116	836
Sr				2280	761	1587	1934	3700	172	1597	2100	1714	1097	1612	1779	1752	1167	2535	505	1730	917	185	1668	4675	916	626	2625	3600	5000	1265	2025
Zn	2000	10000	5000 (100)	73	5	10	73	44	28	29	10	117	5	306	15	15	10	40	117	15	15	12	73	30	15	44	189	10	44	5	5

Arsénico

Al realizar un análisis detallado de estos resultados se debe destacar que, con respecto a los valores de arsénico, sólo se han podido determinar valores consistentes en la campaña del invierno de 1998 debido a errores analíticos y a superposición con otros elementos traza. A pesar de ello, los valores obtenidos superan en su mayoría los recomendados por las columnas A y C. La figura 4.19 muestra la distribución de los valores de arsénico para el invierno de 1998, destaca el hecho que los valores de fondo son bastante altos y la disminución aguas abajo con lo que no se puede concluir que su origen se encuentre en las zonas de extracción-relleno estudiadas. Una explicación a estos altos contenidos en arsénico puede estar en el elevado número de industrias químicas situadas al este del punto de muestreo 23 que coinciden con los máximos indicadores del origen puntual de este elemento.

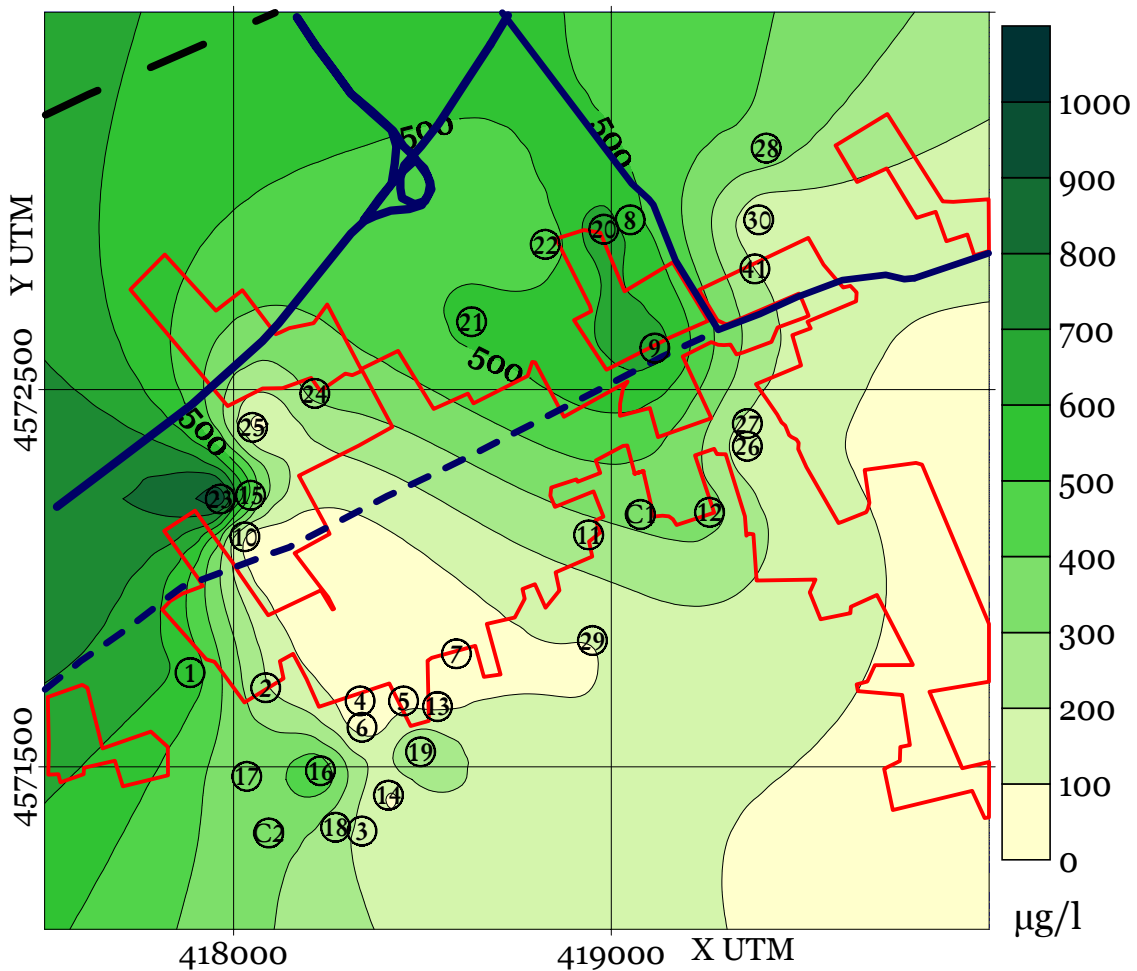


Figura 4.19.- Valores de concentración de arsénico para la campaña de invierno de 1998. Explicación en el texto.

Boro

Tal como se observa en las tablas, los valores de concentración de boro son altos y, aunque no superan los valores recomendados por la columna B, si que superan en algunas muestras los valores de la columna C, pudiendo generar problemas debido a la toxicidad que posee este elemento para ciertas plantas. Además, localmente, este elemento ya se ha identificado con concentraciones muy altas en otros estudios cercanos a la zona (Custodio y Galofré, 1979).

La figura 4.20 muestra la distribución de los contenidos en boro de las aguas subterráneas para las campañas de invierno y verano de 1997. En ella destaca que los valores superiores a 1000 $\mu\text{g/l}$ se encuentran en los puntos de muestreo 10, 15 y 23 cosa que indica el origen puntual de este exceso de boro que se puede relacionar con el alto número de industrias químicas de la zona.

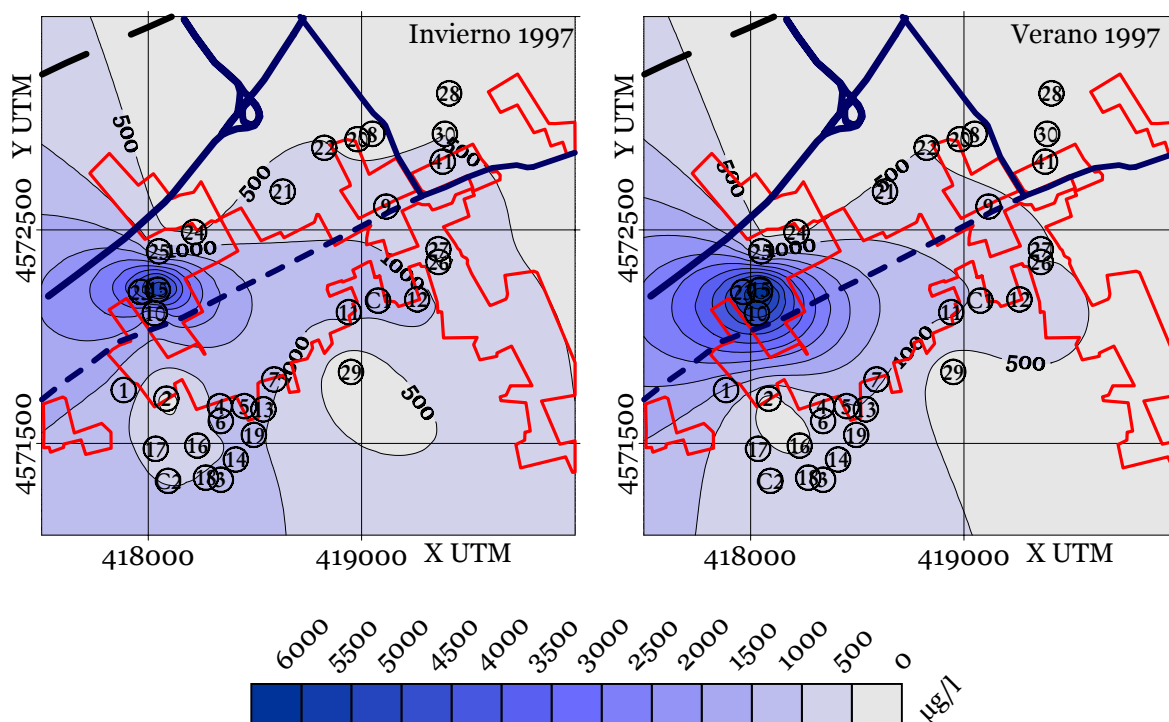


Figura 4.20.- Distribución de los contenidos de boro en $\mu\text{g/l}$ para las campañas de invierno y verano de 1997. Nótese que las muestras con más de 1000 $\mu\text{g/l}$ se encuentran aguas abajo de las zonas de extracción relleno y los máximos marcan el origen puntual de este elemento.

Cadmio

El cadmio es otro elemento que supera en la mayoría de las muestras los valores recomendados por la columna A y la columna C, especialmente en invierno. Éste es un hecho destacable por sus efectos negativos sobre la salud humana: aumento de la presión sanguínea, afecciones hepáticas y del tejido testicular y alteración del número de glóbulos rojos en la sangre (Manahan, 1991).

La figura 4.21 muestra los resultados de las campañas de verano de 1997 e invierno de 1998 para los valores de concentración de cadmio. Los límites de concentración máxima permitida para consumo público, así como los límites de uso de aguas de riego, son superados por la mayoría de las muestras. El hecho que se superen estos límites tanto aguas arriba como aguas abajo de las zonas de extracción-relleno indica que existe un valor de fondo regional bastante elevado.

El incremento de los valores de cadmio en invierno se explica por la interacción de las aguas subterráneas con los lixiviados, procedentes de las zonas de extracción-relleno, al aumentar el nivel freático durante esta estación.

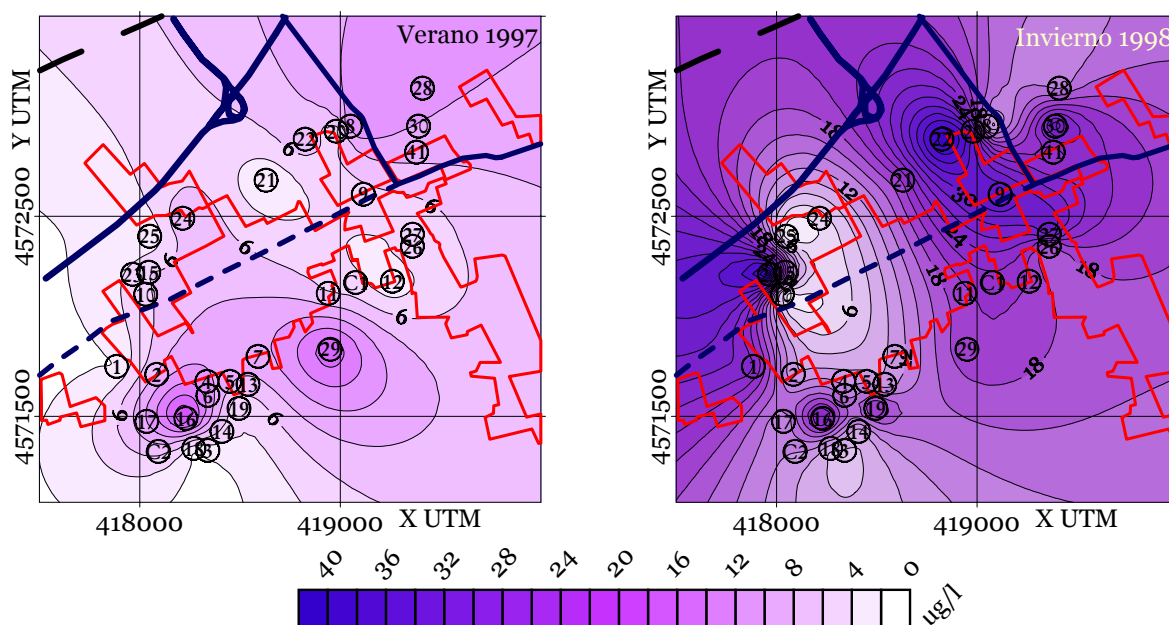


Figura 4.21.- Distribución de las concentraciones de cadmio para las campañas de verano de 1997 e invierno de 1998. En ambas se superan los 5 µg/l y en invierno los valores son significativamente más altos corroborando el aumento de concentración de contaminantes por la subida del nivel freático.

Hierro

Los contenidos de hierro en estas aguas superan en su mayoría los recomendados por la columna C, especialmente en invierno, aunque en verano un par de muestras superan los límites de la columna A. El hierro es un nutriente esencial, componente de la hemoglobina, a pesar de su baja toxicidad sus niveles superan ampliamente los máximos admisibles. En general, su origen puede ser la corrosión de metales, los residuos industriales o, el contacto de minerales de hierro con aguas con un bajo potencial de óxido-reducción (Eh). La figura 4.22 muestra la distribución de los contenidos en hierro para el invierno y verano de 1997. Nótese el claro aumento en dirección aguas abajo de las zonas de extracción-relleno que indica el origen de este elemento en las aguas subterráneas por interacción con los lixiviados, además se puede comprobar que los valores del potencial de óxido-reducción (ver figura 4.11) son bajos, especialmente en verano, hecho que favorece el aumento de contenidos de hierro en las aguas subterráneas.

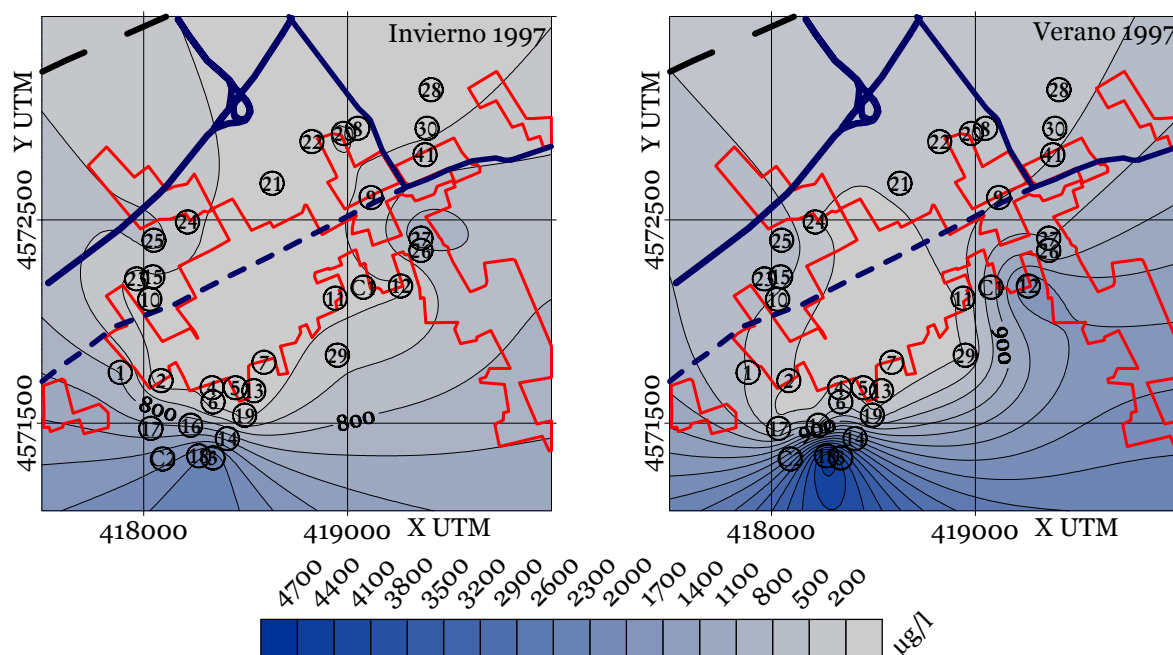


Figura 4.22.- Distribución de los contenidos de hierro para las campañas de invierno y verano de 1997. La concentración de este elemento en las aguas subterráneas aumenta en dirección aguas abajo de las zonas de extracción-relleno que constituyen el área fuente de este elemento. Los máximos coinciden con las zonas con menor potencial de óxido-reducción (ver figura 4.11).

Manganeso

Las muestras analizadas para el manganeso indican un comportamiento similar al del hierro, y aunque no es un elemento tóxico para los humanos o los animales si lo es para las plantas si sus valores son muy altos. En general, su origen se encuentra en los residuos industriales o la acción microbiana en minerales de manganeso en contacto con aguas con un bajo Eh. La figura 4.23 muestra la distribución de los valores de manganeso para el invierno de 1998, destacan valores por encima de las concentraciones máximas admitidas en este elemento para el consumo y para aguas de riego. Por otra parte su distribución sigue la línea de flujo regional y los máximos coinciden con las zonas de extracción-relleno que actúan como área fuente del elemento.

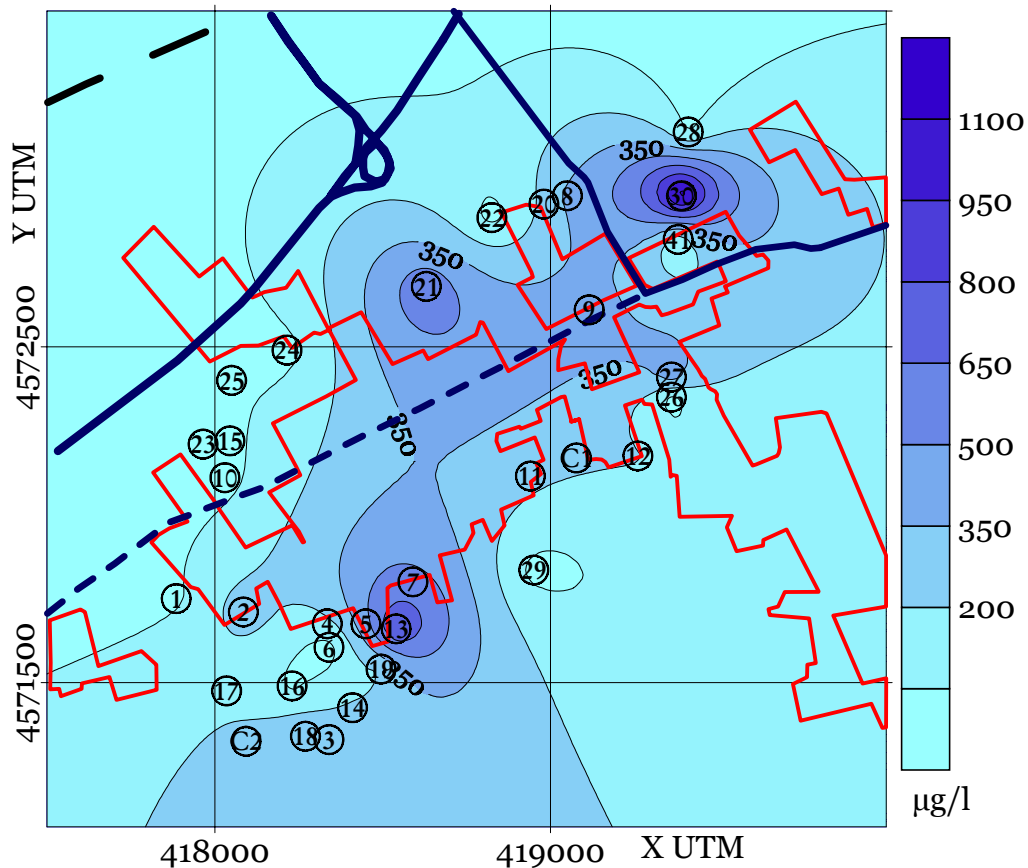


Figura 4.23.- Distribución de las concentraciones de manganeso para la campaña de invierno de 1998. Los valores siguen la tendencia marcada por la línea de flujo regional. Los máximos indican el origen puntual de este elemento en las zonas de extracción-relleno.

Molibdeno

En el caso de los valores de concentración de molibdeno la mayoría de las muestras supera los valores recomendados por la columna A en verano y, en invierno incluso los de la columna B. El problema es su toxicidad que puede surgir cuando es ingerido por animales y humanos ya que este elemento es fijado fácilmente por las plantas. En general, su origen son los desechos industriales. En la figura 4.24 destaca este origen al localizarse los máximos en las cercanías de las zonas de extracción-relleno.

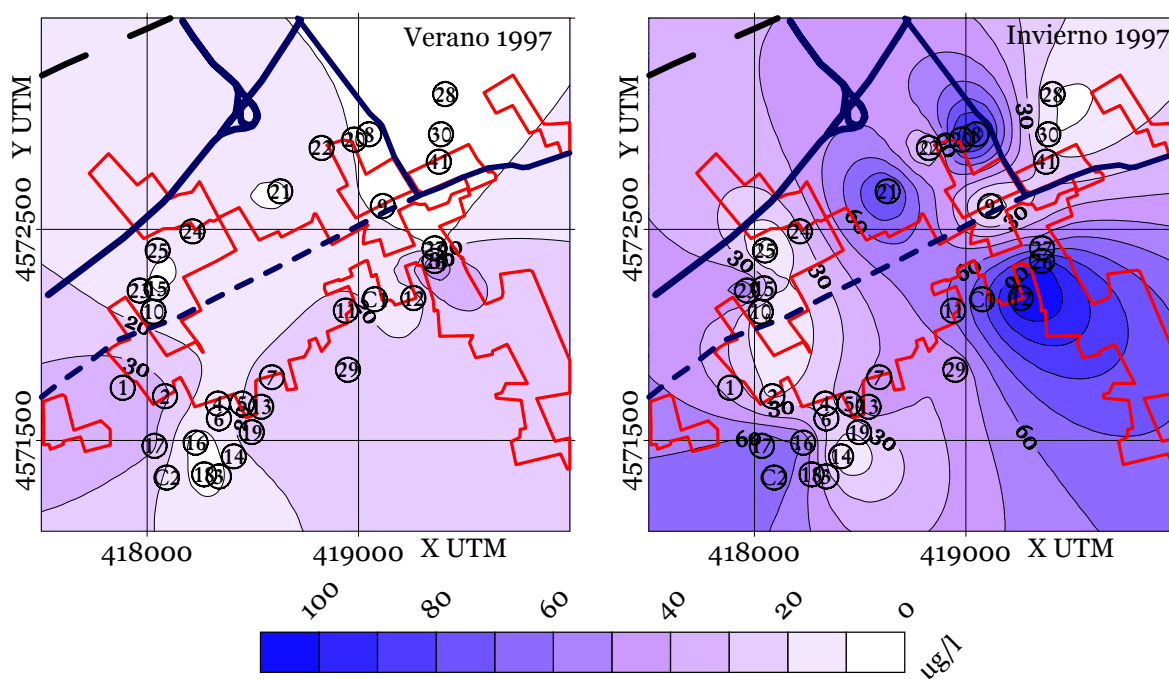


Figura 4.24.- Distribución de las concentraciones de molibdeno para las campañas de verano de 1997 e invierno de 1998. Los máximos localizados en las zonas de extracción-relleno indican el origen de este elemento.

Plomo

Las concentraciones de plomo en las muestras superan ampliamente las de la columna C. Estas concentraciones son preocupantes ya que el plomo es responsable de enfermedades como la anemia, enfermedades del sistema nervioso o del riñón. En general, su origen es diverso y puede provenir de la industria, del uso de cañerías antiguas o de los combustibles. La figura 4.25 muestra la distribución de este elemento para el invierno de 1998. Nótese el incremento en los valores de la concentración siguiendo las líneas de flujo y la localización de los máximos relacionados con las zonas de extracción-relleno.

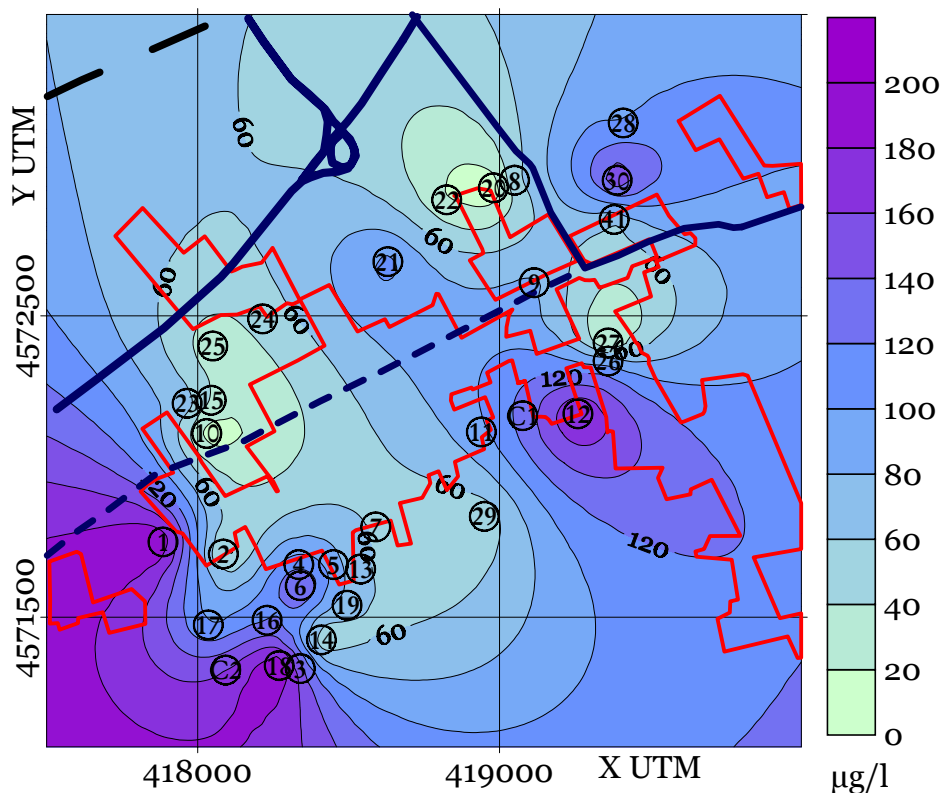


Figura 4.25.- Distribución de las concentraciones de plomo para la campaña de invierno de 1998. En este caso se observa el origen puntual de este elemento principalmente aguas abajo de las zonas de extracción-relleno, excepto para los puntos de muestreo 28 y 30 que se encuentran aguas arriba.

Selenio

El selenio es el último elemento a considerar, en ambas tablas (4.4 y 4.5) se observa que supera los tres valores de referencia. Aunque el selenio es esencial en bajas concentraciones, cuando las supera es muy tóxico causando diversas enfermedades en los animales, además de ser un posible carcinogénico. Su origen principal es natural (Manahan, 1991), pero en la zona de estudio se considera como un elemento contaminante por sus elevadas concentraciones que se dan principalmente aguas abajo de las zonas de extracción-relleno cosa que se observa claramente en la figura 4.26, especialmente para la campaña de invierno de 1998.

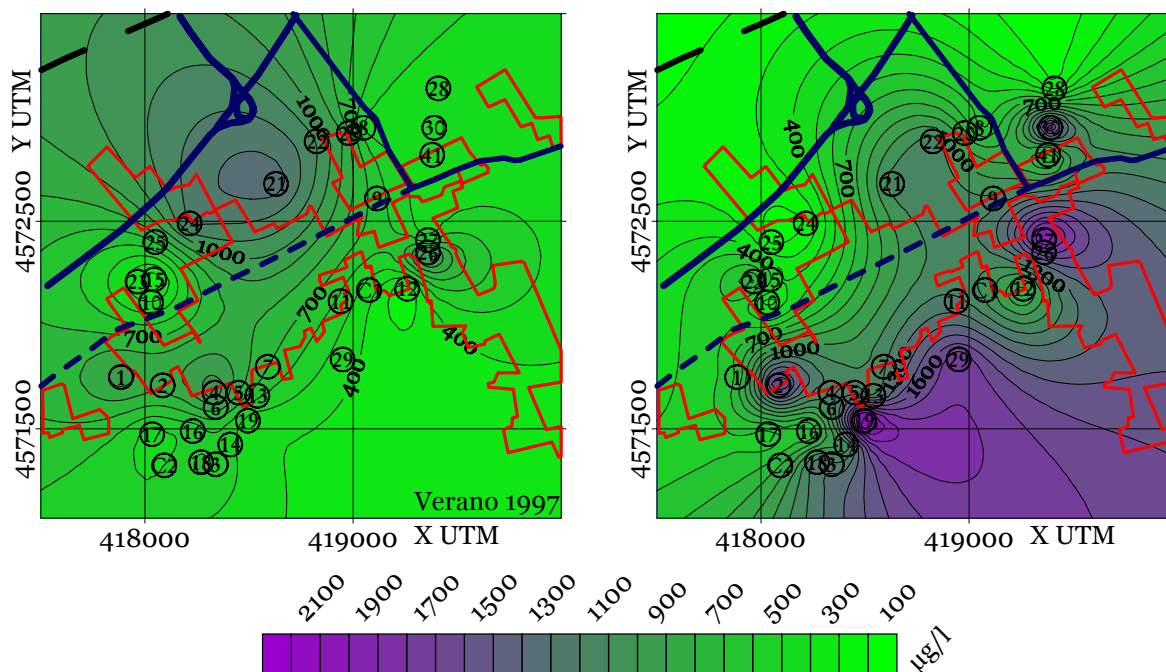


Figura 4.26.- Distribución de las concentraciones de selenio para el verano de 1997 y el invierno de 1998. El máximo en el verano marca el origen puntual de la contaminación y en invierno el incremento en las concentraciones es aguas abajo de las zonas de extracción-relleno.

Zona de Cal Dimoni

En la tabla 4.6 se encuentran los resultados de la determinación de elementos traza en la zona de Cal Dimoni. De todos estos elementos, se deben considerar los siguientes: boro, fósforo, hierro, manganeso y plomo (véase las figuras 4.27-31). Los otros elementos analizados no muestran variaciones significativas entre la zona de relleno y los valores de fondo. Los resultados tienen una explicación semejante a la de la zona de Can Rovira–Can Sabadell desde el punto de vista de su toxicidad y de su origen.

Tabla 4.6.- Resultados analíticos de las diferentes muestras para los contenidos en elementos traza en la zona de Cal Dimoni (julio de 1999). Los valores de las columnas A, B y C como en las tablas 4.4 y 4.5.

Muestra	A	B	C	31	32	33	38	34	35	37	L1	L2
Al	5000	20000	2000	71	67	7	24	24	19	41	73	113
As	100	2000	50	65	37	20	69	44	53	28	84	43
B	750	2000	1000	1682	294	689	1104	7177	289	885	793	198
Ba			(100)	53	372	193	216	208	71	92	157	138
Fe	1000	15000	200	200	250	1230	4700	200	600	500	20	100
Li	75 _a	2500		160	13	51	28	230	48	60	62	18
Mn	200	10000	50 (20)	40	1113	433	239	159	606	255	20	52
P			(400)	103	249	1423	312	608	1747	96	177	222
Pb	5000	10000	50	85	9	52	27	49	22	40	8	64
Se	20	20	10	121	147	166	151	25	112	68	61	125
Sr				7320	3609	4845	4215	4416	3329	2859	2775	1946

Boro

Al igual que en la zona de Can Rovira-Can Sabadell este elemento presenta valores de fondo elevados (figura 4.27) pero en la zona de Cal Dimoni los valores máximos coinciden perfectamente con las zonas de extracción-relleno por lo que se hace patente el origen de este elemento en dichas zonas y su interacción con las aguas subterráneas.

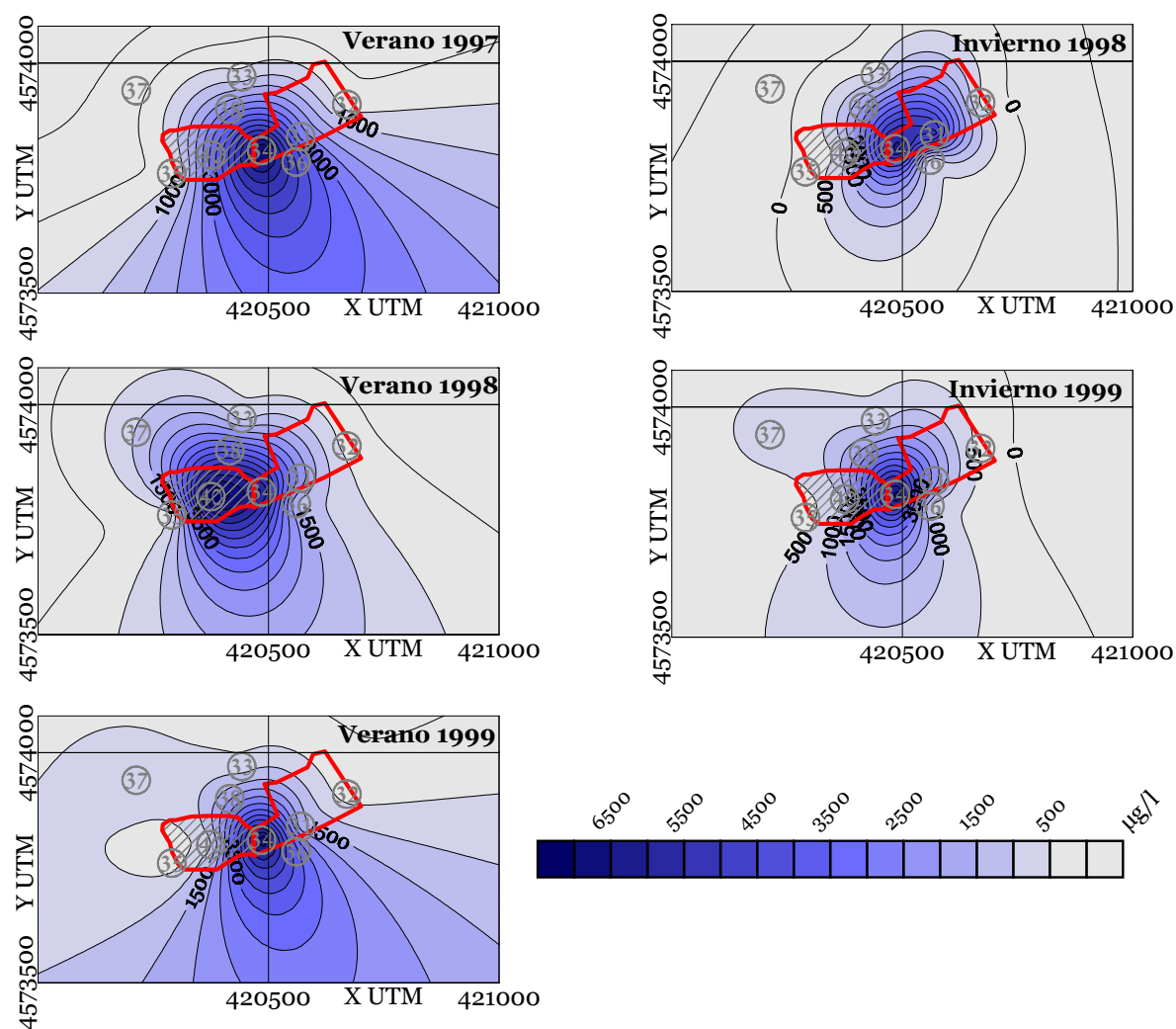


Figura 4.27.- Distribución de las concentraciones de boro en la zona de Cal Dimoni para todas las campañas de muestreo. Es de destacar la posición de los máximos en las zonas de extracción-relleno.

Fósforo

Este elemento tiene en general un origen asociado a la utilización de abonos ya que constituye uno de los tres elementos esenciales de los mismos (juntamente con el nitrógeno y el potasio). En altas concentraciones favorece la eutrofización por lo que en esta zona, por la presencia de la laguna es un elemento determinante. Las concentraciones máximas de fósforo coinciden con las zonas de cultivos adyacentes a las zonas de extracción-relleno (figura 4.28), lo cual indica claramente su origen de tipo agrícola, además, en esta zona existe un almacén de estiércol que constituye el foco puntual de este elemento.

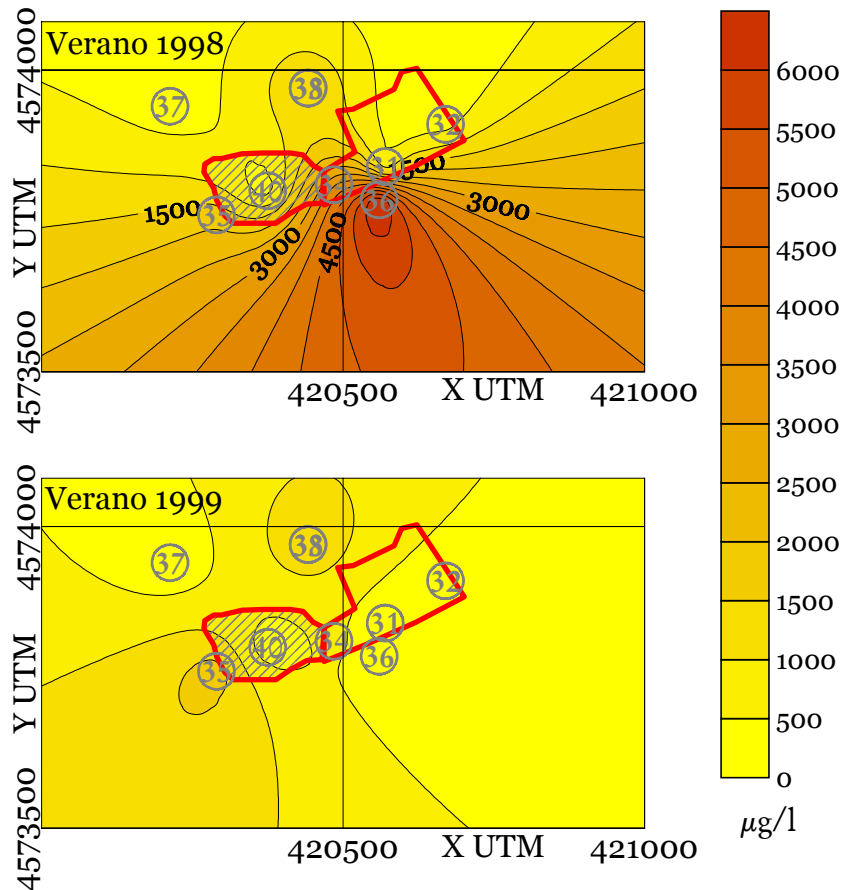


Figura 4.28.- Distribución de las concentraciones de fósforo para las campañas del verano de 1998 y de 1999. Los máximos coinciden con las zonas agrícolas. Las zonas de extracción-relleno poseen los mismos valores que los que se consideran valores de fondo. El máximo en el verano de 1998 es consecuencia del período en el que se ha realizado el muestreo, con génesis de lixiviados casi nula.

Hierro

En esta zona la concentración de hierro en las aguas subterráneas es consecuencia de los valores de potencial de óxido reducción bajos (figuras 4.29 y 4.12).

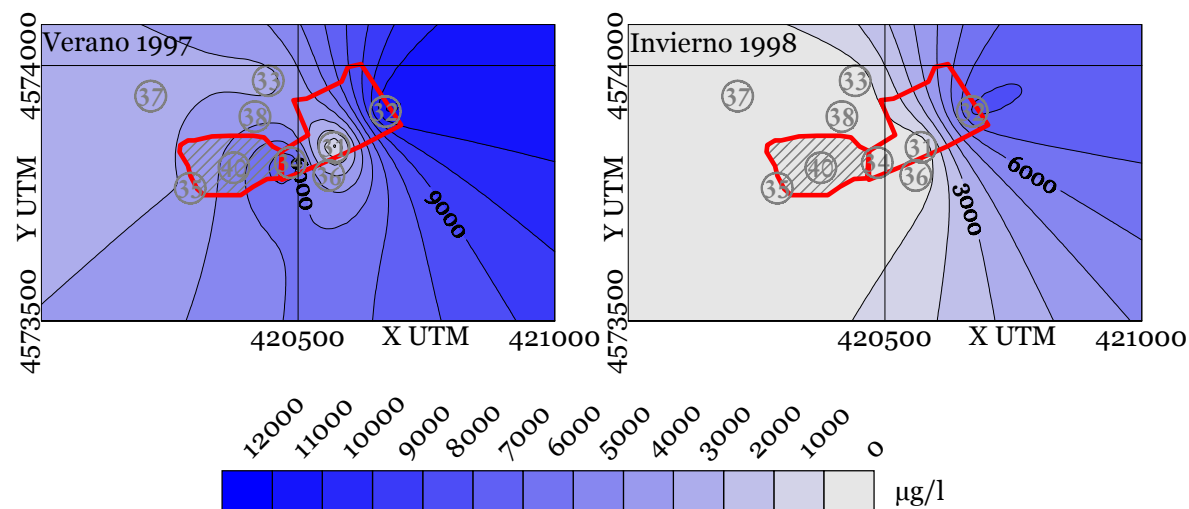


Figura 4.29.- Distribución de los contenidos de hierro para las campañas de verano de 1997 e invierno de 1998. Los valores máximos señalan el origen de este elemento que coinciden con las zonas con menor potencial de óxido-reducción (ver figura 4.12).

Manganeso

El comportamiento de este elemento depende de la distribución del potencial de óxido-reducción (figura 4.30), ya que los valores oxidantes provocan la precipitación de minerales de manganeso.

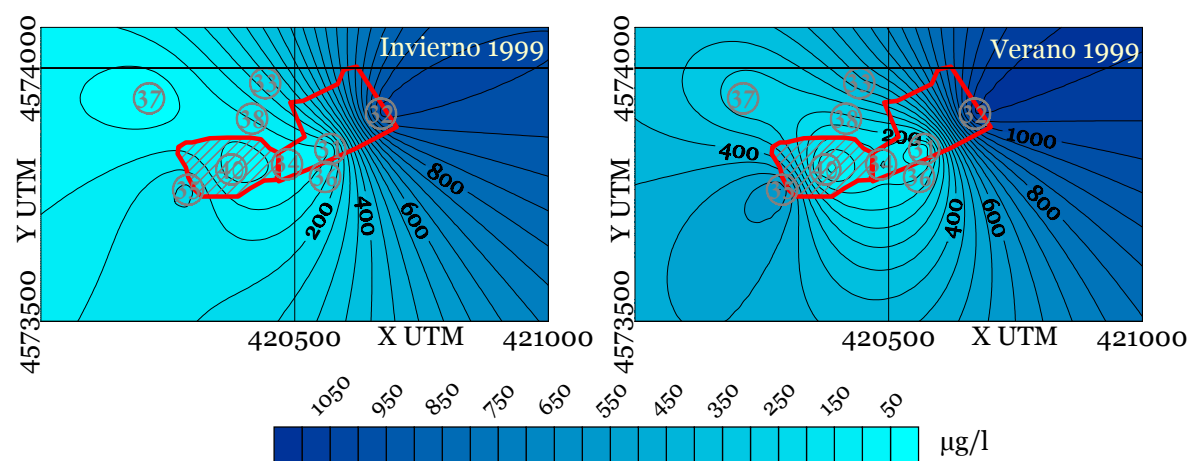


Figura 4.30.- Distribución de las concentraciones de manganeso para las campañas de invierno y verano de 1999. Los valores máximos localizan los puntos de menor potencial de óxido-reducción (ver figura 4.12). Los mínimos quedan justo por debajo de las zonas de extracción-relleno (zonas oxidantes).

