

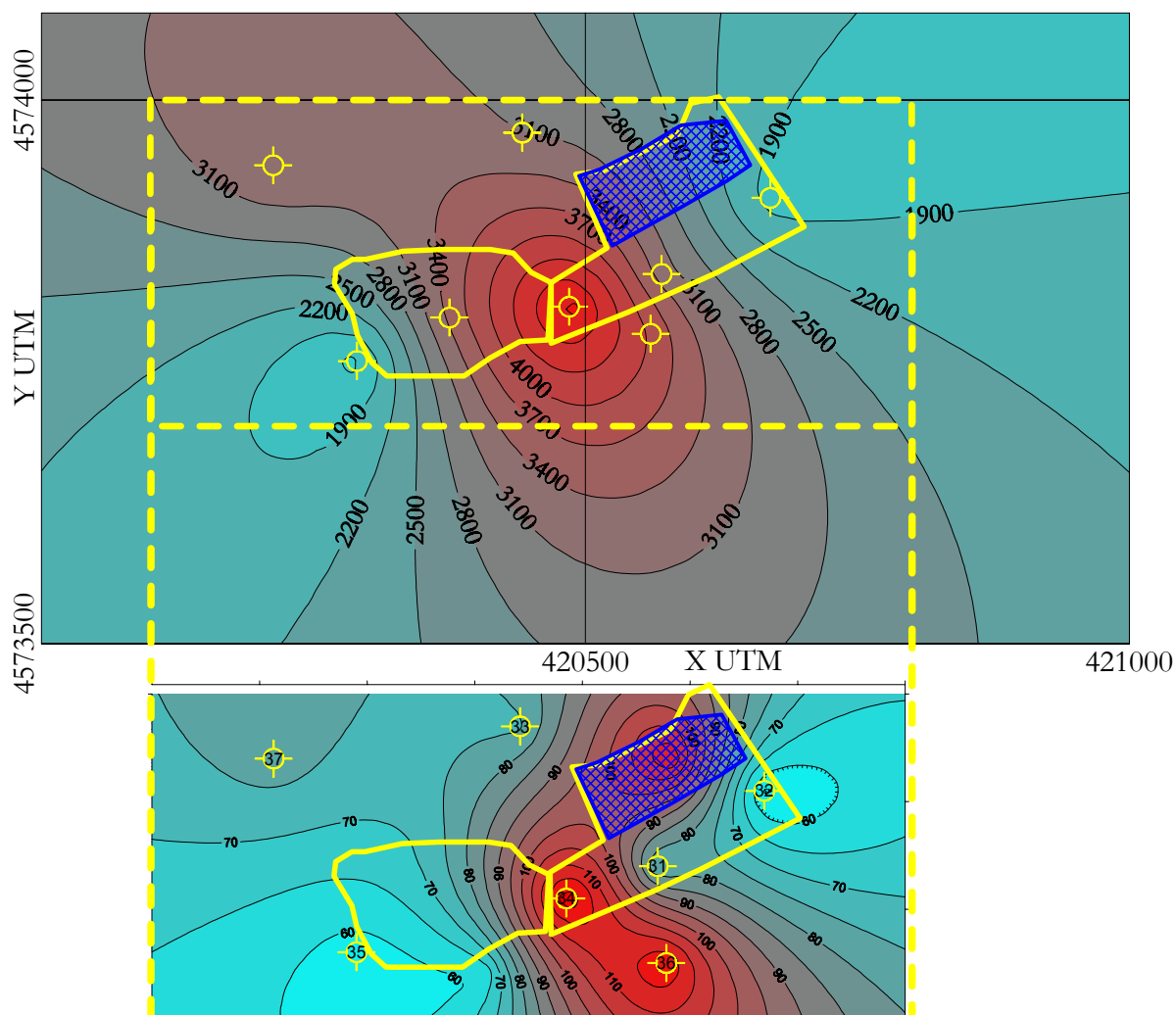


Universitat Autònoma de Barcelona

Departamento de Geología
Unidad de Petrología y Geoquímica

Caracterización de zonas contaminadas por métodos geoquímicos:

Àrea de Gavà – Viladecans (Delta del Llobregat)



Tesis Doctoral

José Felipe Noguera Cáceres

Directores:

Dr. Xavier Font Cisteró y Dr. Francisco J. Martínez

Bellaterra, 2003

Para ti, Marisa

Una inundación fue producida por U Qux Cah (El Corazón del Cielo); un gran diluvio se formó, que cayó sobre las cabezas de los hombres de palo.

POPOL VUH
(Libro sagrado de los antiguos Maya – Quiché)

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mis dos directores de trabajo:

Al Dr. Xavier Font Cisteró quien con mucha paciencia ha compartido conmigo las largas jornadas de trabajo en el campo y en las aulas y que además ha dedicado muchas de sus horas para acabar los artículos y el ejemplar de la tesis.

Al Dr. Francisco J. Martínez por el soporte y orientaciones en la elaboración de este trabajo.

Agradezco la ayuda completamente desinteresada del Dr. Gour-Tsyh Yeh del Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental de la Universidad del Estado de Pennsylvania (Penn State University) bajo cuya tutela pude comprender y aplicar el modelo de flujo y de transporte a la zona de estudio. De la misma manera al Dr. Ming-Hsu Li que facilitó mi estancia en dicha Universidad y resolvió los problemas para utilizar el modelo con los datos de la zona de estudio.

Por otra parte agradezco a la Dra. Ana Payá Pérez y al Dr. Giovanni Bidoglio del Instituto del Medio Ambiente, Unidad del Suelo, Agua y Residuos del Centro Común de Investigaciones de la Comunidad Europea en Ispra (Italia) por permitir mi estancia en ese centro donde pude iniciar la preparación y el análisis de los datos utilizados en los modelos de flujo. Con mucho aprecio agradezco a la Sra. Graziella Leroy y a todos los compañeros de la Unidad por sus atenciones y amabilidad.

Gracias a la Dra. Amparo Cortés Lucas, ya que sin su ayuda hubiese sido imposible mi estancia en el CCR de Ispra.

Gracias al Dr. Lluís Rivero i Marginedas con quien pasamos agotadoras jornadas veraniegas realizando las campañas de prospección geofísica y por la resolución de todas las dudas referentes al tratamiento e interpretación de los datos.

Particularmente agradezco a mis compañeros del Departamento de Geología de la Universidad Autónoma de Barcelona por su soporte y ánimos en los momentos difíciles.

He de mencionar especialmente a:

- Sr. Joan Feliubadaló por su colaboración en la búsqueda de información en los archivos de la Entidad Metropolitana de Barcelona.
- Sr. Miquel Mestres i Palou por su disposición a “perder” el agua de riego de su pozo para muestrearla (en la zona de Cal Dimoni) y quien siempre tuvo un gesto amable cuando le visitamos.
- A todos los que permitieron el acceso a sus pozos en la zona de muestreo.

Gracias a Jesús Ramos que siempre ha estado dispuesto a ayudar y que aguantó muchas de las campañas de muestreo en el delta del Llobregat.

Gracias a Marisa, por su soporte durante todos estos años y que siempre me ha animado a presentar el trabajo que hoy acabo.

Este trabajo ha sido elaborado gracias a la beca FP95 47726297 integrada y financiada dentro del proyecto “Instalación y perfeccionamiento del software útil en la modelización petrogenética” perteneciente al Programa Sectorial de Promoción General del Conocimiento de la DGICYT con el número PB94-0684-Co2-01.

Resumen

Durante el final de la década de los años 70 y principios de los 80 del siglo pasado, las zonas de los alrededores de la ciudad de Barcelona se convirtieron en receptoras de grandes cantidades de residuos por la clausura del vertedero de Montjuïc.

La antigua carretera de Barcelona a Valencia (actuales B-204 y B-210) se convirtió en el eje de uno de los lugares de vertido más importantes, ya que a lo largo de ella se generaron muchos agujeros por la explotación de áridos naturales. Estos agujeros se rellenaron con toda clase de residuos, desde municipales hasta industriales y químicos. Por todo ello en este estudio se ha recopilado la información necesaria para determinar las características de la zona, tanto desde el punto de vista socioeconómico como de la hidrogeología del delta del Llobregat.

La revisión de los archivos de las instituciones municipales y el estudio de la zona por medio de fotografías aéreas han permitido obtener una visión de conjunto de la zona y establecer la evolución temporal de las actividades de extracción-relleno.

A nivel de detalle el inventario de los puntos de aguas subterráneas ha proporcionado los lugares idóneos para recoger y analizar muestras de manera sistemática. Estos datos han permitido caracterizar geoquímicamente las aguas subterráneas y delimitar las zonas afectadas por la contaminación generada.

Como complemento al análisis de las muestras de aguas subterráneas se han escogido puntos de muestreo de suelos con el fin de establecer los cambios que han sufrido como consecuencia de las actividades de extracción-relleno.

Los resultados obtenidos muestran la existencia de una mezcla entre las aguas subterráneas y los lixiviados generados en las zonas de extracción-relleno ya que se ven afectados diversos parámetros como la conductividad, el pH y el potencial de óxido-reducción. También cambian las composiciones originales de la zona aumentando sus concentraciones en iones mayores y elementos traza.

Los modelos geoquímicos constituyen las herramientas más utilizadas en los últimos años para caracterizar zonas contaminadas, por este motivo han sido aplicados a los datos con el fin de determinar relaciones entre las aguas, los componentes de los suelos y los contaminantes.

Se han utilizado principalmente los modelos de especiación geoquímica que permiten calcular los índices de saturación de determinados minerales (familia de programas WATEQ) y los modelos de flujo y transporte (LEHGC 2.0) que han permitido simular el comportamiento de la pluma contaminante.

Por último se ha realizado en la zona de Cal Dimoni un estudio de prospección geofísica con métodos electromagnéticos que, además de corroborar los resultados obtenidos con los parámetros geoquímicos, ha proporcionado una visión tridimensional del comportamiento de los contaminantes y de su migración en función del flujo dominante en la zona. Esta utilización conjunta de métodos geoquímicos y geofísicos también ha permitido optimizar los recursos para la detección y diagnóstico de los focos contaminantes asociados a las zonas de relleno, paso previo a las labores de remediación de emplazamientos contaminados.

Abstract

In the early 1970's, a period of sand and gravel exploitation started that lasted up to the late 1980's. After the closure of Barcelona's major landfill at Montjuïc Mountain these exploitation sites were abandoned and refilled in a non-controlled way by a variety of waste materials including industrial, chemical and urban wastes, developing a major threat for groundwater and soils at such sites.

At the study area, there is an evident alignment of non controlled landfills on both sides of the motorway between Gavà and Viladecans areas. This can be explained because since 1960 the old road from Barcelona to Valencia (actual B-204 and B-210 routes) developed as the principal axis of refilling processes because all exploitation sites were aligned to it. This study has determined the socio economical and hydro geochemical characteristics of Llobregat delta.

The principal aim has been to obtain a broad vision of the entire zone using the data obtained by studying and consulting the "Corporació Metropolitana de Barcelona" municipal files. Also it was made a time and spatial evolution for the exploitation and refilled zones using aerial photograph interpretation.

An upper shallow aquifer sampling wells inventory was made and a systematic groundwater sampling was carried out to characterise and determine the evolution of the Llobregat delta upper shallow aquifer. At local scale, 6 sampling wells were drilled and allowed for subsoil structure to be determined, and also were used as sampling wells. Temperature ($^{\circ}\text{C}$), platinum electrode potential (mV), specific conductance (μScm^{-1}) and pH for each sample were measured in the field. By other side, the Scientific and Technical Survey of the *Universitat de Barcelona* performed the analysis for major cations, major anions, trace elements and total organic carbon (TOC). Principal results clearly have shown the leachates – groundwater interaction by changes in sample's pH and redox potential. An increasing for major ions and trace elements content were also obtained.

Soil sampling was also performed to establish soil – groundwater interactions and to determine contamination extent due to exploitation – refilling process.

Geochemical models were used to determine relationships between groundwater, soil components and contaminants. These models, especially Wateq family, were used to determine mineral saturation index and to observe spatial evolution through experimental flow lines determined by field data.

One objective was to establish a contamination plume flow and transport model using LEHGC 2.0 (**L**agrangian **E**ulerian finite element **H**ydro **G**eochemical version 2). It was used chloride data as a conservative component to obtain 3 scenarios to explain contaminant plume. Model results showed that refilled areas with chloride concentration similar to the ones we expected on a sanitary landfill are on the same range of field data.

Finally this work has combined geochemical and geophysical methods to obtain a three-dimensional vision of contaminant plume. These methods have shown similar results for locating groundwater contamination sources and determining leachates generation mechanisms and flow paths. This is the previous step on a remediation and cleaning work for the study area.

This work also presents some solutions to improve the quality of groundwater and soils close to refilled areas.

Índice General	I
Índice de Anexos	III
Índice de figuras	IV
Índice de tablas	VII

Índice General

1.- Introducción	1
<i>1.1.- Objetivos</i>	<i>1</i>
<i>1.2.- Marco geográfico y socioeconómico</i>	<i>3</i>
1.2.1.- Orígenes	3
1.2.2.- La agricultura	4
1.2.3.- Desarrollo industrial	6
1.2.4.- Valor ecológico	14
1.2.5.- El futuro del delta del Llobregat	15
<i>1.3.- Antecedentes</i>	<i>17</i>
<i>1.4.- Metodología</i>	<i>21</i>
2.- Las extracciones de áridos en el delta	23
<i>2.1.- Definición del problema y condiciones de elección de la zona</i>	<i>23</i>
<i>2.2.- Evolución temporal de las zonas de extracción de áridos por fotointerpretación.</i>	<i>23</i>
<i>2.3.- Trabajos previos en la zona de estudio</i>	<i>29</i>
<i>2.4.- Comparación con otras zonas de características similares</i>	<i>34</i>
2.4.1.- La zona del canal Love (Niágara, EUA) como ejemplo de contaminación	35
<i>2.5.- Síntesis y conclusiones del capítulo</i>	<i>38</i>
3.- Síntesis Hidrogeológica	39
<i>3.1.- Geología del delta</i>	<i>39</i>
<i>3.2.- Contexto geológico de las zonas de estudio</i>	<i>46</i>
3.2.1.- Zona de Can Rovira – Can Sabadell	46
3.2.2.- Zona de Cal Dimoni	48
<i>3.3.- Acuíferos</i>	<i>51</i>
3.3.1.- Acuífero profundo	51
3.3.2.- Acuífero superficial	52
<i>3.4.- Funcionamiento hidráulico y balance hídrico</i>	<i>53</i>
<i>3.5.- Síntesis y conclusiones del capítulo</i>	<i>58</i>

4. Hidrogeoquímica del acuífero superficial	59
<i>4.1.- Inventario de puntos de agua.</i>	<i>59</i>
<i>4.2.- Campañas de muestreo sistemático de aguas subterráneas</i>	<i>61</i>
4.2.1.- Toma de muestras	62
4.2.2.- Determinaciones en el campo	64
4.2.3.- Análisis químicos. Métodos analíticos	65
<i>4.3.- Resultados obtenidos</i>	<i>67</i>
<i>4.4.- Características generales. Composición de las aguas subterráneas.</i>	<i>69</i>
4.4.1.- Zona de Can Rovira–Can Sabadell	69
4.4.2.- Zona de Cal Dimoni	70
<i>4.5.- Tratamiento de los datos</i>	<i>71</i>
4.5.1.- Variación de los valores de conductividad	71
4.5.2.- Variación en la composición química de las aguas subterráneas	75
4.5.3.- Variaciones en los valores de pH	79
4.5.4.- Variación en los valores de Eh	82
4.5.5.- Clasificación de las muestras de agua subterránea	85
4.5.6.- Contenidos en elementos traza	96
<i>4.6.- Síntesis y conclusiones del capítulo</i>	<i>112</i>
5.- Modelización de la contaminación. Aplicación de modelos geoquímicos a los resultados analíticos	115
<i>5.1.- Variación en el nivel piezométrico</i>	<i>115</i>
<i>5.2.- Antecedentes de los modelos geoquímicos</i>	<i>117</i>
<i>5.3.- Estructura de los modelos y ecuaciones principales</i>	<i>118</i>
<i>5.4.- Problema Inverso y problema directo</i>	<i>121</i>
<i>5.5.- Modelos de especiación geoquímica: Familia WATEQ (WATer</i> <i>Equilibria)</i>	<i>123</i>
5.5.1.- Resultados de la aplicación del programa WATEQ a los análisis de aguas subterráneas	126
<i>5.6.- Modelos de elementos finitos para transporte (LEHGC 2.0</i> <i>Lagrangian Eulerian finite element model of HydroGeoChemical</i> <i>transport through saturated–unsaturated media</i>	<i>133</i>
5.6.1.- Formulació matemàtica	134
5.6.2.- Datos de entrada	145
<i>5.7.- Síntesis y conclusiones del capítulo.</i>	<i>154</i>

6.- Localización y delimitación de los focos de contaminación	157
<i>6.1.- Muestreo de suelos</i>	157
6.1.1.- Definición de suelo y características principales del suelo	157
6.1.2.- Toma de muestras	159
<i>6.2.- Resultados obtenidos y tratamiento de los datos</i>	162
6.2.1.- Zona de Can Rovira – Can Sabadell	165
6.2.2.- Zona de Cal Dimoni	167
<i>6.3.- Métodos Geofísicos</i>	169
6.3.1.- Prospección electromagnética	169
<i>6.4.- Síntesis y conclusiones del capítulo</i>	179
7.- Impacto y propuesta de medidas correctoras	181
<i>7.1.- Impacto en las aguas subterráneas</i>	181
7.1.1.- Impactos primarios o directos	181
7.1.2.- Impactos secundarios o inducidos	182
<i>7.2.- Impacto en los suelos</i>	183
7.2.1.- Impactos primarios o directos	183
7.2.2.- Impactos secundarios o inducidos	183
<i>7.3.- Propuesta de medidas correctoras</i>	184
7.3.1.- Métodos “on site”	185
7.3.2.- Métodos “off site”	187
8.- Conclusiones	191
9.- Bibliografía	197

Índice de Anexos

A.1: Inventario de puntos de agua	213
A.2: Sitios caracterizados por la CMB	215
A.3: Análisis de aguas subterráneas	218
A.4: Cálculos estadísticos	CD adjunto
A.5: Diagramas de Stiff	221
A.6: Clasificación de las muestras por tipos de agua	CD adjunto
A.7: Diagramas de Piper-Hill-Langelier. Zona de Can Rovira-Can Sabadell	CD adjunto
A.8: Índices de saturación y formato de entrada y salida de WATEQ	CD adjunto
A.9: Reacciones de LEHGC 2.0	CD adjunto
A.10: Formato de archivo de entrada para LEHGC 2.0	225
A.11: Archivo de salida de LEHGC 2.0 y animaciones realizadas	CD adjunto
A.12: Análisis de muestras de suelos	228

Índice de Figuras

Figura 1.1.- Mortalidad por paludismo (1875–86) y tifus (1875–1903) en El Prat de Llobregat	5
Figura 1.2.- Mapa del Servei Cartogràfic de la Mancomunitat (1924)	8
Figura 1.3.- Evolución de la población del Baix Llobregat.	10
Figura 1.4.- Situación actual del delta del Llobregat.	13
Figura 2.1.- Fotografía aérea de octubre de 1956.	24
Figura 2.2.- Fotografía aérea en la que se destaca las actividades extractivas entre septiembre de 1968 y septiembre de 1972.	25
Figura 2.3.- Fotografía aérea que resume la actividad en septiembre de 1984 y marzo de 1986.	26
Figura 2.4.- Ortofotomapa en blanco y negro del área de estudio correspondiente a 1990 y 1993.	27
Figura 2.5.- Ortofotomapa en color en donde se muestra la evolución temporal de las actividades extractivas desde octubre de 1956 hasta septiembre de 1993.	28
Figura 2.6.- Información obtenida del inventario de las actividades extractivas para la zona de estudio (CMB, 1982)	31
Figura 2.7.- Mapa de localización de la zona de estudio que incluye los tres sitios de vertido identificados: 1.- Camí Ral–El Rourell, 2.- Les Marines, 3.- RENFE (B–204)	33
Figura 2.8.- Fotografía aérea de infrarrojos del Canal Love tomada en la primavera de 1978.	37
Figura 3.1.- Etapas de desarrollo de la llanura deltaica y posición de las líneas de costa.	41
Figura 3.2.- Mapa geológico de los alrededores de Barcelona y el delta del Llobregat.	42
Figura 3.3.- Disposición en profundidad de los dos niveles que se han identificado como acuíferos y que corresponden a los niveles de gravas datados como cuaternarios y separados por una cuña de arcillas y limos.	45
Figura 3.4(a).- Localización de las columnas estratigráficas para la zona Can Rovira–Can Sabadell.	46
Figura 3.4(b).- Relación estratigráfica entre las columnas C–1 y C–2.	47
Figura 3.4(c).- Relación estratigráfica entre las columnas C–3 , C–4 y C–5.	47
Figura 3.5.- Mapa de localización de sondeos, (31, 32, 34, 35 y 36), puntos de muestreo de aguas subterráneas (37 y 38) y muestra de la laguna de Cal Dimoni.	48
Figura 3.6.- Estructura local a partir de los datos de los sondeos.	50
Figura 3.7.- Posición del nivel freático para el acuífero superficial del delta para los años 1983 y 1991.	54
Figura 3.8.- Funcionamiento y balance hídrico de los acuíferos del Baix Llobregat.	57
Figura 4.1.- Localización de los puntos de muestreo del acuífero superficial de la zona de Can Rovira–Can Sabadell (A) y de Cal Dimoni (B).	60
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.	63
Figura 4.3.- Gráfico de precipitación-conductividad para la zona de estudio.	72
Figura 4.4.- Mapas de isoconductividades en $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la zona de Can Rovira–Can Sabadell.	73

<i>Figura 4.5.- Mapas de isoconductividades en $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la zona de Cal Dimoni.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.6.- Diagramas de Stiff modificados para la zona de estudio Can Rovira–Can Sabadell en el invierno de 1998.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.7.- Diagramas Stiff modificados para la Zona de Cal Dimoni en el invierno de 1999.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.8.- Almacén de estiércol situado encima de la zona de extracción-relleno de Cal Dimoni.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.9.- Variación de los valores de pH de las muestras de agua subterránea de la zona de Can Rovira–Can Sabadell.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.10.- Variación en los valores de pH de las muestras de aguas subterráneas de la zona de Cal Dimoni.</i>	<i>81</i>
<i>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.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.12.- Variaciones de los valores de potencial de óxido-reducción (Eh) en la zona de Cal Dimoni.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.13.- Diagrama de Piper–Hill–Langelier para las muestras del Invierno 1997.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4.14.- Distribución de los cationes para la zona de Can Rovira–Can Sabadell.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 4.15.- Distribución de los aniones dominantes para la zona de Can Rovira–Can Sabadell.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 4.16.- Diagrama de Piper–Hill–Langelier para las muestras de agua subterránea de la zona de Cal Dimoni.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4.17.- Variación en la composición de cationes para las muestras de aguas subterráneas de la zona de Cal Dimoni.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 4.18.- Variación en la composición de aniones para las muestras de aguas subterráneas de la zona de Cal Dimoni.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4.19.- Valores de concentración de arsénico para la campaña de invierno de 1998.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4.20.- Distribución de los contenidos de boro en $\mu\text{g}/\text{l}$ para las campañas de invierno y verano de 1997.</i>	<i>100</i>
<i>Figura 4.21.- Distribución de las concentraciones de cadmio para las campañas de verano de 1997 e invierno de 1998.</i>	<i>101</i>
<i>Figura 4.22.- Distribución de los contenidos de hierro para las campañas de invierno y verano de 1997.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 4.23.- Distribución de las concentraciones de manganeso para la campaña de invierno de 1998.</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4.24.- Distribución de las concentraciones de molibdeno para las campañas de verano de 1997 e invierno de 1998.</i>	<i>104</i>
<i>Figura 4.25.- Distribución de las concentraciones de plomo para la campaña de invierno de 1998.</i>	<i>105</i>
<i>Figura 4.26.- Distribución de las concentraciones de selenio para el verano de 1997 y el invierno de 1998.</i>	<i>106</i>
<i>Figura 4.27.- Distribución de las concentraciones de boro en la zona de Cal Dimoni para todas las campañas de muestreo.</i>	<i>108</i>
<i>Figura 4.28.- Distribución de las concentraciones de fósforo para las campañas del verano de 1998 y de 1999.</i>	<i>109</i>
<i>Figura 4.29.- Distribución de los contenidos de hierro para las campañas de verano de 1997 e invierno de 1998.</i>	<i>110</i>
<i>Figura 4.30.- Distribución de las concentraciones de manganeso para las campañas de invierno y verano de 1999.</i>	<i>110</i>
<i>Figura 4.31.- Distribución de las concentraciones de plomo para las campañas de invierno y verano de 1999.</i>	<i>111</i>

<i>Figura 5.1.- Evolución del nivel freático a lo largo de las campañas de muestreo para la zona de Can Rovira–Can Sabadell.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 5.2.- Diagrama de flujo para establecer la idoneidad en la elección del tipo de modelo a utilizar.</i>	<i>122</i>
<i>Figura 5.3.- Perfiles Geoquímicos: Líneas de flujo perpendiculares a las isopiezas y siguiendo la orientación de los pozos.</i>	<i>127</i>
<i>Figura 5.4.- Evolución temporal de los índices de saturación (IS) de los minerales de interés A = calcita, B = dolomita y C = siderita para la línea de flujo principal de la zona de Can Rovira-Can Sabadell.</i>	<i>129-130</i>
<i>Figura 5.5.- Evolución temporal de los índices de saturación (IS) de los minerales de interés A = calcita, B = dolomita y C = siderita para la línea de flujo principal de la zona de Cal Dimoni.</i>	<i>131-132</i>
<i>Figura 5.5.- Resultado de la modelización de la variación del nivel freático en la zona de estudio.</i>	<i>146</i>
<i>Figura 5.6.- Evolución a lo largo de 1 año de la concentración del ión cloruro en la línea de flujo número 1 (pozos 8 a 9) Zona de Can Rovira-Can Sabadell. Sin influencia de factores externos y durante 2 años</i>	<i>148-149</i>
<i>Figura 5.7.- Evolución de la concentración del ión cloruro en la línea de flujo número 1 (pozos 8 a 9) Zona de Can Rovira-Can Sabadell. En este caso se ha añadido una zona de extracción-relleno que aporta unos contenidos de ión cloruro de 3 veces el contenido original.</i>	<i>150-151</i>
<i>Figura 5.8.- Evolución de la concentración del ión cloruro en la línea de flujo número 1 (pozos 8 a 9) Zona de Can Rovira-Can Sabadell. En este caso la zona de vertido posee valores de cloruro aproximadamente de la misma composición que los lixiviados generados en un vertedero municipal.</i>	<i>152-153</i>
<i>Figura 6.1.- Localización de las muestras de suelos.</i>	<i>160</i>
<i>Figura 6.2.- Evolución del contenido en metales pesados (Can Sabadell punto de muestreo 8)</i>	<i>166</i>
<i>Figura 6.3.- Evolución del contenido en metales pesados (Can Simó punto de muestreo 27)</i>	<i>166</i>
<i>Figura 6.4.- Evolución del contenido en metales pesados (Cal Dimoni-piezómetro 2)</i>	<i>168</i>
<i>Figura 6.5.- Evolución del contenido en metales pesados (Cal Dimoni - piezómetro 6)</i>	<i>168</i>
<i>Figura 6.6.- Localización de las zonas de prospección geofísica con EM–31 y EM–34.</i>	<i>171</i>
<i>Figura 6.7.- Resultados de la prospección electromagnética con EM–31.</i>	<i>173-174</i>
<i>Figura 6.8.- Mapa de los resultados de la prospección electromagnética de la zona de Cal Dimoni con EM–31 y EM-34</i>	<i>175</i>
<i>Figura 6.9.- Comparación de los datos geoquímicos con los de la prospección electromagnética.</i>	<i>177</i>
<i>Figura 6.10.- Distribución de los principales aniones para las muestras de aguas subterráneas del Verano de 1998 y su comparación con los valores de prospección electromagnética.</i>	<i>178</i>
<i>Figura 7.1.- Zonas de extracción-relleno cubiertas de arcillas para impedir la infiltración del agua de lluvia.</i>	<i>186</i>

Índice de Tablas

Tabla 1.1.- Número de “mujades” regadas en El Prat de Llobregat.	6
Tabla 1.2.- Primeras industrias en el delta del Llobregat.	7
Tabla 1.3.- Disminución de la superficie agraria (tierras labradas) en hectáreas.	9
Tabla 1.4.- PIB por habitante.	10
Tabla 1.5.- Población ocupada por sectores en porcentaje.	12
Tabla 2.1.- Definición del grado de peligrosidad como la suma de los porcentajes de chatarra, residuos industriales y residuos químicos	32
Tabla 3.1.- Balance medio para el período de 1966–1983 en hm ³ /año.	56
Tabla 4.1.- Número de muestras de agua subterránea recogidas y analizadas en cada campaña.	61
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.	66
Tabla 4.3.- Resultados analíticos de las diferentes muestras en la zona de Cal Dimoni (julio de 1999).	94
Tabla 4.4.- Concentraciones en µg/l de los elementos traza para el verano de 1997.	97
Tabla 4.5.- Concentraciones en µg/l de los elementos traza para el invierno de 1998.	98
Tabla 4.6.- Resultados analíticos de las diferentes muestras para los contenidos en elementos traza en la zona de Cal Dimoni.(julio de 1999).	107
Tabla 5.1.- Parámetros de la ecuación de Debye Hückel utilizados por WATEQ4F.	124
Tabla 6.1.- Localización y descripción de la profundidad de cada una de las 15 muestras escogidas para este estudio	161
Tabla 6.2.- Resultados de los análisis de las muestras de suelos de la zona estudiada.	163
Tabla 6.3.- Comparación de los valores obtenidos en los análisis de las muestras de suelo en la zona estudiada con los valores de referencia de Cataluña.	164
Tabla 6.4.- Profundidades de medición de conductividad en función de la frecuencia y del instrumento utilizado.	171
Tabla 7.1.- Principales parámetros que se ven afectados como consecuencia de la interacción entre lixiviados y aguas subterráneas.	182

Capítulo 1

Introducción

Para establecer una caracterización de las zonas contaminadas por relleno de antiguas explotaciones de áridos en el acuífero superficial del delta del Llobregat se han planteado los siguientes

1.1.- Objetivos

- Definir el modelo conceptual del acuífero superficial del delta del Llobregat, dando un énfasis especial al análisis de los datos socioeconómicos, la síntesis geológica e hidrogeológica del mismo y su caracterización hidroquímica.
- Inventariar y delimitar las zonas de extracción de áridos, así como determinar su evolución espacial y temporal.
- Caracterizar hidrogeoquímicamente las aguas en el entorno de las zonas de relleno, estableciendo la marca geoquímica producida por los residuos enterrados.
- Aplicar modelos de especiación geoquímica para determinar el comportamiento de los elementos mayoritarios y traza en el acuífero superficial.
- Determinar los mecanismos de migración de los elementos contaminantes a partir de los rellenos.
- Utilizar un modelo de flujo y transporte para modelar el comportamiento de las interacciones entre aguas subterráneas y zonas de relleno.

- Establecer simulaciones sobre el comportamiento de estas interacciones en la actualidad así como en escenarios futuros.
- Delimitar por medio de métodos geofísicos no destructivos la extensión y el comportamiento de la pluma de contaminación producida por los lixiviados generados en las zonas de relleno.
- Definir propuestas de control y vigilancia de puntos representativos de las zonas contaminadas.
- Avanzar una propuesta de medidas de gestión de estas zonas para minimizar los efectos de los rellenos sobre las aguas subterráneas y los suelos.

1.2.- Marco geográfico y socioeconómico

El delta del Llobregat está situado en la provincia de Barcelona, abarca una pequeña parte de la comarca del Barcelonès y casi un tercio de la del Baix Llobregat.

La comarca del Baix Llobregat ocupa una posición central dentro de la región metropolitana de Barcelona. Al sur de ésta, dentro de la primera corona metropolitana que rodea Barcelona, se encuentran las llanuras aluviales del delta y del valle inferior del río Llobregat.

Este territorio forma parte de 14 municipios que suman unos 730.000 habitantes de los más de 4 millones de la región metropolitana.

1.2.1.- Orígenes

Durante muchos siglos, el delta del Llobregat fue una tierra inhóspita y prácticamente despoblada. Grandes extensiones de humedales litorales, frondosos bosques de ribera en las orillas del río y playas con enormes campos de dunas formaban su paisaje natural.

Hasta el siglo X no se encuentran documentados la mayoría de los pueblos del Baix Llobregat. A partir de este siglo se empieza a encontrar en diversos documentos la mención “*plana del Llobregat*”.

Los diferentes factores que explican la dificultad para la ocupación humana se encuentran siempre relacionados con la presencia del río Llobregat, y sus frecuentes riadas, y con la existencia de marismas inundables en el delta.

El estado de insalubridad general que existía en el delta estaba relacionado con la falta de agua potable y unas condiciones higiénicas deficientes que, junto con la existencia de humedales con aguas estancadas favorecían la propagación de enfermedades como el paludismo, el tifus y la disentería.

Las comunicaciones eran precarias con caminos que desaparecían con la lluvia y las inundaciones. El poblamiento estable se limitaba a las tierras más seguras, lejos del mar y de las zonas inundadas y a salvo de las avenidas del río.

Esta situación precaria, de dominio total del medio sobre la ocupación humana, comienza a modificarse lentamente a partir del siglo XV con la roturación de nuevas tierras y el cultivo de nuevos productos.

1.2.2.- La agricultura

La primera gran transformación del territorio se produce cuando se empiezan a desecar las marismas para convertirlas en tierras de cultivo por medio de campañas de saneamiento y roturación de tierras. Se produce entonces un avance lento de la agricultura en detrimento de los humedales, lo que lleva a que la superficie cultivada a principios del siglo XVI sea ya una cuarta parte del territorio deltaico. La agricultura tradicional que se practicaba era de secano, extensiva y de bajo rendimiento, cultivándose, entre otros, el trigo, el maíz, la avena, el centeno y la viña (Esteban *et al.*, 1996). Las tierras dedicadas a pastos continuaban ocupando una superficie importante.

La incomunicación de los habitantes del delta sigue siendo una constante hasta finales del siglo XIX con la construcción del primer puente sobre el río Llobregat, el puente de Ferran Puig. Los caminos siguen siendo muy malos y el aislamiento todavía es frecuente durante muchas épocas del año.

El estado de insalubridad continúa en el delta (ver figura 1.1) , pero el incremento demográfico favorece la llegada de nuevos pobladores. Hasta la mitad del siglo XVIII sólo Sant Boi tenía una población de alrededor del millar de habitantes, pero a partir de este momento el panorama demográfico varía. Todas las localidades crecen, algunas de ellas multiplicando por tres o por cuatro sus habitantes gracias a la proximidad de Barcelona que posibilitó el desarrollo de actividades económicas.

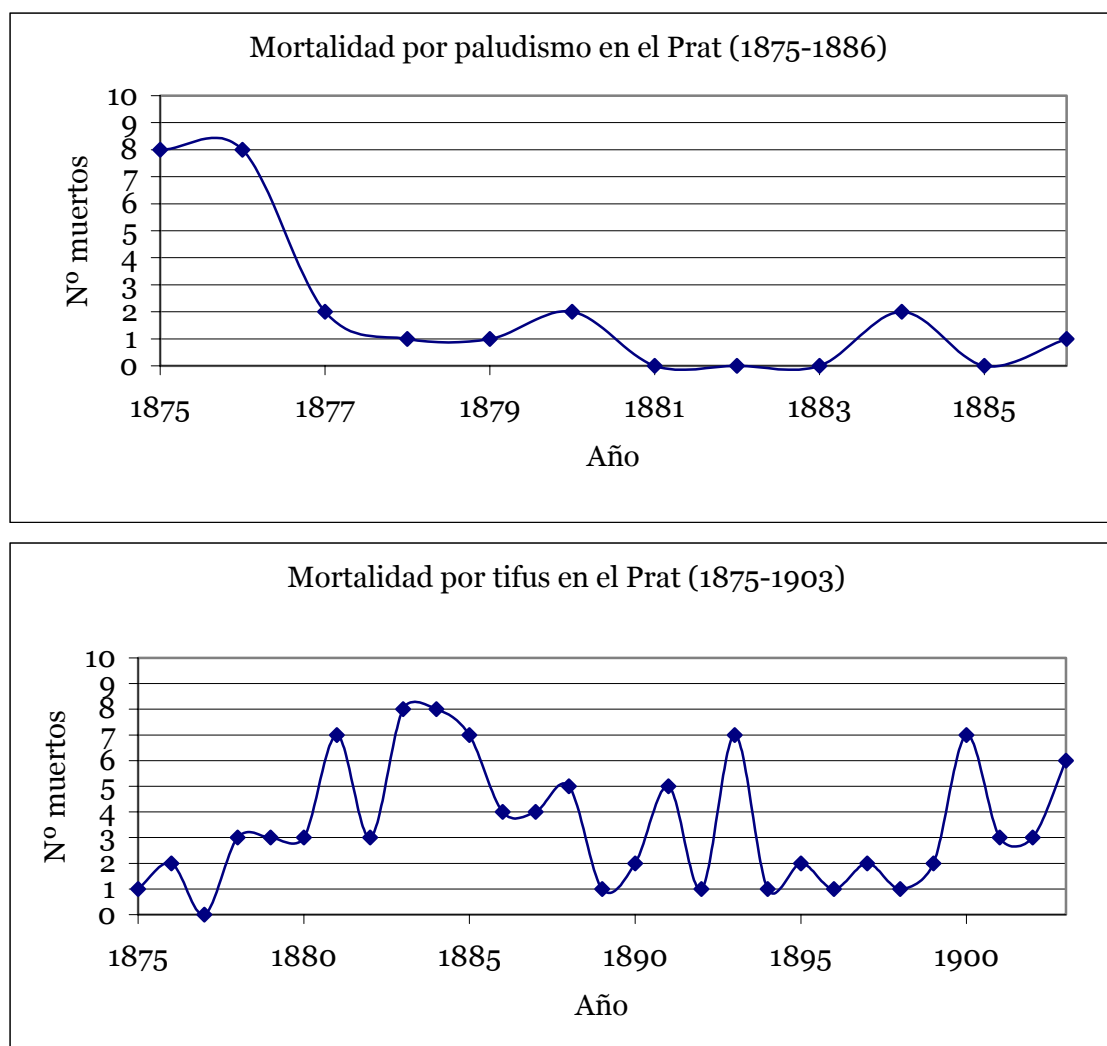


Figura 1.1.- Mortalidad por paludismo (1875–86) y tifus (1875–1903) en El Prat de Llobregat. Nótese que los habitantes del Prat en 1875 eran 1783 (Codina, 1971).

Durante la segunda mitad del siglo XIX tiene lugar un importante avance gracias al desarrollo de diferentes sistemas de obtención de agua. En 1890 se descubre, en la parte central del delta, la existencia del acuífero inferior y se realizan las primeras perforaciones de pozos (el primero en 1894) para explotar el “inmenso lago subterráneo del delta”. Estos pozos siguen siendo denominados “artesianos” en la actualidad, a pesar de haber perdido su natural surgencia. Con estos pozos y la construcción de los canales de riego paralelos al río (Canal de la Infanta Carlota, en el delta oriental y el Canal de la Dreta del Llobregat, en el occidental), se hace posible la implantación de una agricultura de regadío con el consiguiente desarrollo económico y social. En la tabla 1.1. se observa el notable incremento de las tierras regadas en sólo cinco años.

Tabla 1.1.- Número de *mujades*¹ regadas en El Prat de Llobregat (Codina, 1971)

Año	Nº de <i>mujades</i>
1858	0
1859	De 100 a 200
1860	De 470 a 490
1861	De 530 a 560
1862	De 740 a 800
1863	De 1.100 a 1.200

Los cultivos fundamentales de aquella primera época eran las hortalizas (principalmente alcachofas, lechugas y melones), los forrajes y los cereales (Marquès, 1984). El delta se convirtió en el principal proveedor de verduras y hortalizas de la ciudad de Barcelona y, en el primer tercio del siglo XX, su producción llega a los mercados europeos.

Actualmente la agricultura ha disminuido, aunque todavía se comercializan algunos cultivos y animales de granja (pollos, conejos, etc.). Algunos de estos productos son reconocidos por su alta calidad, como la alcachofa del Prat y las cerezas de Sant Climent. Además, los pollos con denominación de origen *Pota Blava*, reconocida por la Unión Europea, se continúan criando tal como se hacía a principios del siglo XX, a base de harinas de alfalfa, soja y girasol.

1.2.3.- Desarrollo industrial

Con respecto a la evolución histórica del desarrollo industrial de la zona, existen algunos datos básicos para explicarla:

En 1854 el ferrocarril se abre camino entre Barcelona y Molins de Rei, más tarde continúa hasta Martorell y comienza la expansión industrial.

Con el descubrimiento del acuífero inferior del delta y su explotación mediante pozos artesianos comienza la utilización del agua para convertirla en vapor. En 1891

¹ **Mujada (cat. pl. mujades):** medida agraria equivalente al trozo de tierra que pueden labrar un par de bueyes en un día.

la colonia Güell estrena las instalaciones construidas por la Maquinista Terrestre y Marítima.

La llegada de las primeras industrias a la ciudad de El Prat se produce a principios del siglo XX (ver tabla 1.2). En la figura 1.2. se puede observar la realidad del delta antes del desarrollo industrial y urbanístico. La agricultura cede espacio a la instalación de polígonos industriales, sin ninguna planificación ni ordenación previa, y el cemento cubre poco a poco las tierras del delta, de manera que además de los impactos ambientales derivados de las diferentes actividades industriales (contaminación atmosférica, acústica, hídrica, etc.) se reduce cada vez más la superficie que permite la infiltración de aguas hacia los acuíferos (Esteban *et al.*, 1996).

En 1910 se electrifica L'Hospitalet de Llobregat con la instalación de la Compañía Barcelonesa de Electricidad.

Tabla 1.2.- Primeras industrias en el delta del Llobregat (Codina, 1971)

Año	Empresa	Ramo	Ubicación
1903	“Jaime Trías y Cía.”	Textil	Marina de L'Hospitalet
1914	“Compañía Roca”	Sanitarios	Gavà
1917	“La Papelera Española”	Papel	El Prat
1925	“La Seda de Barcelona”	Textil	El Prat

Paralelamente a la implantación de las nuevas actividades se produce una demanda creciente de mano de obra no cualificada que provocará un intenso fenómeno de inmigración. En el primer tercio del siglo XX tiene lugar un notable crecimiento demográfico como consecuencia de las diversas oleadas migratorias, atraídas por una agricultura próspera, por la demanda industrial y por las grandes obras de Barcelona, como el metro y la Exposición Universal de 1929. Los núcleos del delta verán como su población se multiplica en pocos años. Este proceso tiene como consecuencia directa el crecimiento urbanístico desmesurado y caótico de las ciudades.



Figura 1.2.- Mapa del Servei Cartogràfic de la Mancomunitat (1924). Nótese la poca extensió de las ciudades así como la localización de las diferentes lagunas.

En esta etapa se produce, además de la profunda transformación del paisaje, una notable degradación del estado de conservación del medio ambiente en el delta y, muy especialmente, del medio acuático en todas sus manifestaciones, el acuífero superficial y profundo, el río, las aguas marinas y las lagunas.

En la segunda mitad del siglo XX, y a causa de la proximidad del delta a la ciudad de Barcelona, la industria en esta zona sufre un incremento enorme en detrimento de la agricultura (tabla 1.3)

Tabla 1.3.- Disminución de la superficie agraria (tierras labradas) en hectáreas. Fuente: Institut d'Estadística de Catalunya (Idescat).

	1982	1989	1999
Cataluña	936.725	837.000	817.031
Baix Llobregat	10.252	7.260	4.350
Castelldefels	192	37	24
Cornellà de Llobregat	187	41	14
Gavà	456	437	287
L'Hospitalet de Llobregat	173	54	25
El Prat de Llobregat	905	739	268
Sant Boi de Llobregat	1.046	845	534
Viladecans	553	559	408

Este hecho afecta de manera extraordinaria a las poblaciones que se asientan en el delta. Por una parte se establecen nuevas industrias y por otra aumenta la población, especialmente del 1960 al 1975 (ver figura 1.3), época en que tiene lugar un crecimiento demográfico explosivo, debido a las altísimas tasas de inmigración que buscaban las posibilidades de trabajo que ofrecía la comarca con una industria en expansión y una agricultura que también pedía mano de obra. Los barrios de nueva creación alrededor de las poblaciones con bloques de pisos de baja calidad, con viviendas de autoconstrucción, y los grandes y populosos polígonos de viviendas son un símbolo de la época. Estas corrientes migratorias masivas se pararon con la crisis económica mundial del 1973 que tuvo sus efectos en Cataluña a partir del año 1975.

En los años siguientes tiene lugar un arranque económico tal como se observa en la tabla 1.4 en la que se muestra el incremento del producto interior bruto (PIB), este arranque comporta una nueva oleada de inmigración de trabajadores de países no comunitarios. El aumento de población afecta no sólo al delta sino también a la comarca del Baix Llobregat, como se puede ver en las curvas de población (figura 1.3).

Tabla 1.4.- PIB por habitante (Idescat).

	Miles de PTA		Índice de Catalunya=100	
	1991	1996	1991	1996
Catalunya	1.771,32	2.426,18	100,00	100,00
Baix Llobregat	1.430,75	2.076,58	80,77	85,59
Castelldefels	1.016,13	1.274,38	57,37	52,53
Cornellà	1.118,81	1.678,39	63,16	69,18
Gavà	1.312,58	1.879,89	74,10	77,48
L'Hospitalet	1.027,49	1.349,58	58,01	55,63
El Prat	1.682,91	2.645,68	95,01	109,05
Sant Boi	1.010,29	1.393,97	57,04	57,46
Viladecans	931,88	1.265,69	52,61	52,17

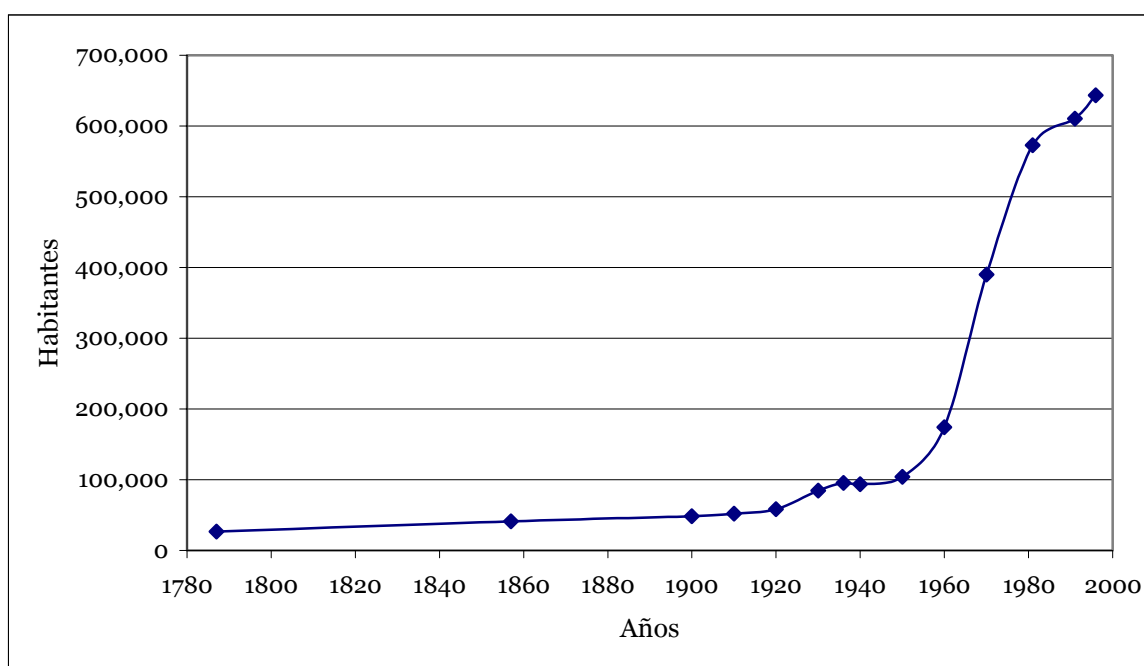


Figura 1.3.- Evolución de la población del Baix Llobregat. (Idescat).

En el delta se produce, por tanto, una verdadera expansión que puede localizarse en tres zonas:

- a) Zona Franca
- b) El Prat y l'Hospitalet
- c) Gavà – Viladecans – Sant Boi.

En la Zona Franca tiene lugar un desarrollo puramente industrial, mientras que en el resto se produce, además de la expansión industrial, un aumento demográfico y de construcciones urbanas a causa del incremento de lugares de trabajo tanto en ellas como en las localidades vecinas (Zona Franca, Barcelona, etc.).

Esta industrialización es muy diversificada, destacándose el sector químico (papel, seda, fibras sintéticas, etc.), el metalúrgico (automóviles, laminados metálicos, construcciones metálicas, etc.), el de la construcción (tanto de explotación de materias primas –arena y grava– como de elaboración en diversos grados –hormigón y piezas prefabricadas–) y el de alimentación.

Finalmente, se puede agregar una cuarta zona de desarrollo: Castelldefels, cuya expansión responde a causas totalmente diferentes a las mencionadas: torres de veraneo, turismo e industrias subsidiarias (Marquès, 1984).

Toda la expansión industrial y urbana se ha hecho a costa del aprovechamiento de los recursos hídricos, principalmente se han explotado los acuíferos del Baix Llobregat, tanto el de “primeras aguas” (acuífero libre superficial) como el “artesiano” (acuífero profundo). Su uso ha sido casi continuo desde finales del siglo pasado para abastecimiento rural y urbano. También han constituido una base importante del suministro de agua potable de Barcelona; ya que, están situados a tan sólo algunos kilómetros al oeste de Barcelona. En el presente, la ciudad ha resuelto sus problemas de agua con los embalses y la mezcla de las aguas provenientes de los ríos Ter y Llobregat.

Actualmente el delta ha adquirido una posición estratégica al constituir un área logística y de comunicaciones muy importante (aeropuerto, puerto, carretera,

ferrocarril, acueductos, gasoductos) y de gran actividad humana, primero agrícola y luego industrial y de servicios (ver tabla 1.5).

Tabla 1.5.- Población ocupada por sectores en porcentaje (Idescat).

	agrícola			Industria			construcción			servicios		
	1986	1991	1996	1986	1991	1996	1986	1991	1996	1986	1991	1996
Cataluña	4,91	3,68	3,22	35,73	36,06	32,08	5,25	8,23	6,97	45,62	52,03	57,73
Baix Llobregat	1,66	1,16	1,03	46,96	42,66	37,03	6,21	9,74	7,78	41,04	46,44	54,16
Castelldefels	2,34	0,84	0,79	27,24	26,41	24,10	9,97	11,80	8,24	48,57	60,95	66,87
Cornellà	0,35	0,38	0,41	49,33	43,13	37,43	5,90	9,57	7,92	41,38	46,92	54,25
Gavà	2,47	1,62	1,94	43,37	40,31	34,80	6,36	11,11	8,97	37,87	46,96	54,29
L'Hospitalet	0,41	0,35	0,46	43,53	39,46	33,09	4,74	7,21	6,06	48,17	52,99	60,39
El Prat	2,71	1,48	1,16	45,65	40,41	34,91	4,89	8,16	6,47	42,88	49,95	57,46
Sant Boi	1,65	1,20	1,04	48,84	44,06	39,45	7,14	10,98	8,54	40,39	43,75	50,97
Viladecans	2,25	1,82	1,52	47,40	41,46	36,62	8,26	12,82	10,45	38,55	43,91	51,41

Aunque la explotación significativa de estos acuíferos se inició a finales del siglo XIX para usos de abastecimiento, la primera instalación industrial importante en cuanto a extracciones de agua es de principios del siglo XX (década de los años 20), el desarrollo intensivo se realizó en la década de los 40 en zonas marginales del delta, y en la década de los 50 en el propio delta. A mediados de la década de los 70 se llegó a un máximo de extracciones, con un promedio de 4,5 m³/s, valor muy elevado si se considera que la superficie total, incluyendo el valle inferior, es de 90 km² (Iribar, 1992).

Actualmente, la polémica sobre la presión que se ejerce sobre el delta continúa con los estudios acerca del impacto ambiental de la tercera pista del aeropuerto y el desvío del curso del río. En la figura 1.4 se observa el enorme crecimiento de los pueblos de los alrededores del delta, en comparación con la figura 1.2, y se señalan las principales vías de comunicación.



Figura 1.4.- Situación actual del delta del Llobregat, nótese el aumento de tamaño de las poblaciones (en comparación con la figura 1.2), la localización del aeropuerto, las principales vías de comunicación y el curso previsto del desvío del río.

1.2.4.- Valor ecológico

Debido a sus características naturales el delta posee un gran valor ecológico. Es uno de los tres últimos humedales significativos de Cataluña donde se han detectado múltiples especies de aves, algunas de importancia internacional en cuanto a su nidificación como el avetorillo o el chorlito patinegro, especies vegetales propias de este ecosistema como la *trencadella*, *espartina*, lirio amarillo, etc. , además de reptiles, anfibios y peces. Como especie simbólica, cabe citar la nutria, extinguida a finales de los años 50. Incluye además la reserva de agua subterránea más grande del entorno barcelonés (Esteban *et al.*, 1996). Por todo ello y desde el punto de vista de la protección de los valores naturales del delta hay que remarcar tres hechos:

- La declaración de dos espacios de protección especial, las reservas naturales parciales de la Ricarda–ca l’Arana y del Remolar–Filipines y sus respectivas zonas de influencia, de 496 hectáreas en total, mediante decreto promulgado por la *Generalitat de Catalunya* el año 1988. La gestión de estos espacios corresponde al *Departament d’Agricultura, Ramaderia i Pesca*.
- La aprobación del *Pla d’Espais d’Interès Natural* el año 1992 por parte de la *Generalitat de Catalunya*, que incluye el delta del Llobregat en su relación, con tres espacios: las reservas naturales de la Ricarda–ca l’Arana y del Remolar–Filipines y el estanque de la Murtra, con 527 hectáreas.
- La declaración de diversos espacios del delta (la Ricarda–ca l’Arana, el Remolar–Filipines, el litoral del Prat, els Reguerons y la Murtra), en total 573 hectáreas, como zona de especial protección para las aves (ZEPA), según comunicación del Estado español en junio de 1994 a la Unión Europea.

1.2.5.- El futuro del delta del Llobregat

El Plan de Infraestructuras del delta del Llobregat, Plan Delta, es un proyecto de reforma de la desembocadura del río Llobregat. Consiste en la ejecución de actuaciones en el puerto, aeropuerto, autopistas y en el propio río con una afectación global en los ecosistemas del delta. Este plan fue firmado en Abril de 1994 por parte del Ayuntamiento del Prat de Llobregat, el *Consell Comarcal* del Baix Llobregat, el Área Metropolitana, La *Generalitat* y el Ministerio de Fomento, antiguo MOPTMA.

El Plan del delta del Llobregat consta de las siguientes actuaciones:

Desvío del río. Quizás es una de las actuaciones más discutidas socialmente ya que repercute directamente en el trazado del río, sufriendo su tramo final un desvío hacia el sur de aproximadamente 3 kilómetros, entrando en parte de La Reserva Natural de "La Ricarda". Contempla también la creación de nuevas lagunas para completar los humedales del delta, incorporando de nuevo el río al delta. En este sentido, el ministerio de Medio Ambiente adjudicó las obras de canalización del río a una entidad formada por FCC, Copisa y Comapa, con un presupuesto total de 54 millones de euros.

Ampliación del puerto. Consiste esta ampliación en la potenciación de la principal actividad económica del Puerto; la logística y el tráfico de mercancías mediante la ampliación de la llamada Zona de Actividades Logísticas, ZAL, que debe construirse en el espacio comprendido entre el actual y el futuro tramo final del Llobregat. De este modo se dotará al puerto de 352 hectáreas de agua abrigada, 3.900 metros de línea de muelle nuevos y 365 hectáreas de superficie terrestre, todo ello para alcanzar en el año 2.030 los 30 millones de toneladas de mercancías en contenedores, 14 millones de toneladas de graneles, más de un millón de automóviles, 3.350 escalas de líneas regulares de pasaje y 735 de cruceros. Este plan está en desarrollo.

Ampliación del aeropuerto. Se prevé la construcción de una tercera pista a 1.350 metros de la principal, desactivando la actual pista transversal, que es el principal origen de contaminación acústica en el municipio de El Prat de Llobregat.

Además, se construirán zonas logísticas para el tráfico de mercancías y zonas modulares de soporte aeronáutico.

Pata Sur. Es una carretera que accede rápidamente al Aeropuerto desde las Rondas de Dalt y Litoral y la autopista del Garraf. Para facilitar el desagüe de la zona agrícola de la Ribera y evitar las inundaciones, se ha construido un canal paralelo a la carretera y dos balsas, en donde se acumulará el agua de lluvia. El canal se revegetará con especies autóctonas con el objetivo de paliar el efecto de la nueva carretera en el entorno agrícola y reconstruir una parte de los paisajes perdidos del delta.

Construcción de una **depuradora**, con una inversión de casi 241 millones de euros, aportados por la *Generalitat de Catalunya*, el ministerio de Medio Ambiente y fondos de cohesión de la Unión Europea. Su ubicación se encuentra en la zona final del río y está destinada a tratar las aguas residuales de varios municipios, tanto urbanas como industriales, que actualmente se vierten directamente al río, cubriendo una población total de dos millones de habitantes. En una segunda etapa, se prevé un tratamiento posterior para reutilizar el agua en la industria, para regar o para mantener el caudal del río y de los humedales del delta, facilitando la recuperación de los acuíferos. La **Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR)** comenzó a operar a principios de 2003, enviando las aguas depuradas al mar a través de un emisario de 3 kilómetros de longitud.

Parque del Litoral. Será la actuación encaminada a devolver al entorno su estado natural después de tanta modificación. Se ubicará en una franja que, desde la playa, tiene unos 450 metros de ancho y 3 kilómetros de largo. Incluye el trozo de pineda litoral mejor conservada del delta del Llobregat y un tramo de playa.

Con todas estas actuaciones se pretende aprovechar mejor el espacio existente en la zona lúdica para actividades de índole económica, industrial y lúdica, al mismo tiempo que se recupera y protege la desembocadura del río con su delta incorporado, mejorando la calidad del agua y del entorno.

1.3.- Antecedentes

El delta del Llobregat ha sido extensamente estudiado a lo largo de los años debido, por una parte, a la necesidad de conocimiento que requiere la planificación hidrológica y por otra, al hecho de que los diversos organismos implicados en la gestión de la zona (Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas) han potenciado la realización de estudios cuyo fin principal ha sido la evaluación de los recursos (Llamas y Molist, 1967; MOP, 1964 y 1966; REPO, 1971), los cuales constituyen los primeros estudios hidrogeológicos globales rigurosos de la zona.

Los trabajos desarrollados para la realización de dichos estudios -fundamentalmente los trabajos de campo tales como la realización de inventarios de puntos de agua, muestreos para análisis químicos e isotópicos y perforación de sondeos para la instalación de piezómetros- pusieron de manifiesto la existencia de innumerables aspectos del funcionamiento de los acuíferos del delta poco conocidos, así como la existencia de serios problemas de calidad que requerían estudios específicos por sí mismos.

Numerosos trabajos tuvieron así por objeto casos concretos de contaminación de aguas subterráneas por vertidos de origen industrial, como es el caso de la contaminación puntual por cromo, boro y otras sustancias nocivas procedentes de vertidos de efluentes industriales o del relleno de hoyos de extracción de áridos con residuos sólidos del mismo origen, en zonas del delta y del valle inferior (Candela, 1980; Candela y Masich, 1984; Custodio, 1982a; Custodio y Galofré, 1979; Custodio *et al.*, 1983; Guardiola, 1982; Guardiola *et al.*, 1975; Isamat *et al.*, 1976; Molist *et al.*, 1979; Subirana, 1983; Vilaró, 1977)

También se estudió la contaminación salina del acuífero del valle inferior y acuífero superficial del delta por vertidos al río de aguas procedentes de las explotaciones de sales de la cuenca potásica catalana (Cardona y Súrria a través del río Cardener, Balsareny y Sallent directamente al Llobregat), iniciadas de forma industrial en 1923 y que en 1931 ya habían obligado a la creación de una comisión de estudios de la salinidad del río (Custodio y Queralt, 1982; Díaz *et al.*, 1978; SGAB, 1986).

Asimismo, se detectó y comenzó a estudiar la contaminación salina del acuífero profundo del delta por intrusión en el mismo de agua marina, proceso ocasionado por el descenso generalizado del nivel piezométrico del acuífero hasta situarse por debajo del nivel del mar, debido a la intensiva explotación que se venía haciendo ya desde finales de la década de 1950. En los más antiguos de estos trabajos se describe y caracteriza hidroquímicamente una situación detectada pocos años antes, en los siguientes se pone al día el estado general de la intrusión y se intenta explicar su origen y mecanismos. (Ayuntamiento de El Prat de Llobregat, 1976 y 1980; Custodio, 1967 y 1981; Custodio *et al.*, 1976; Ferret, 1985).

Los trabajos de hidrogeoquímica general, así como los referentes a temas más específicos contribuyeron en gran medida a mejorar el conocimiento sobre la dinámica del sistema, proporcionando datos sobre la edad de las aguas de los acuíferos y acuitardo, estos datos ayudaron significativamente a establecer los mecanismos que ocasionan la contaminación salina en distintas partes del delta por:

- Entrada directa de agua de mar en el acuífero profundo a través de su afloramiento submarino en lo que se refiere a los sectores central y oriental del delta
- Atrapamiento en los poros de los materiales de agua marina congénita en lo que se refiere al borde occidental del delta y al acuitardo
- Contaminación por sales potásicas procedentes del río en lo que se refiere al borde occidental del delta y al acuitardo
- Contaminación por sales potásicas procedentes del río en lo que se refiere a los acuíferos del valle inferior, superficial del delta y cabecera del acuífero profundo (Custodio, 1968; Custodio, 1982b; Custodio *et al.*, 1971; Peláez, 1983).

Estos trabajos permitieron tanto perfilar el modelo conceptual del sistema en conjunto como profundizar en algunos detalles. Entre ellos se encuentran las reacciones hidrogeoquímicas que ocurren durante la mezcla de agua dulce y agua salada. Estas reacciones producen un endurecimiento del agua durante la intrusión de agua marina en materiales previamente ocupados por agua dulce, y un ablandamiento y enriquecimiento en sales (Cl^- y Na^+) durante el reemplazamiento de agua salina por agua dulce.

Los acuíferos del delta, especialmente el inferior, han constituido una reserva importante de agua para la ciudad de Barcelona. Desde la mitad del siglo pasado (1954) se empezó a potenciar su recarga artificial gracias al elevado nivel de conocimiento que se tenía del sistema. La recarga favoreció las condiciones naturales de infiltración del agua del río en el tramo correspondiente al valle inferior situado entre Pallejà y Molins de Rei.

Años más tarde (1969) a esta recarga se le sumó un proceso de inyección de excedentes de agua del río –tratada- en el acuífero a través de un ingenioso sistema de pozos preparados tanto para la inyección de agua limpia en el terreno como para la propia autolimpieza de la instalación (THIO, 1968). Ambas acciones, iniciadas y continuadas con éxito hasta la actualidad por la Sociedad General de Aguas de Barcelona, dieron lugar a varios trabajos que también contribuyeron al mejor conocimiento del sistema acuífero, a la vez que dieron a conocer la experiencia barcelonesa en recarga artificial a todo el mundo en un momento en que varios países se disponían a investigar sobre este tema (Azcón y Dolz, 1978; Custodio, 1986; Custodio *et al.*, 1977; Miralles y Cantó, 1984)

Finalmente y como respuesta a la necesidad de gestión del recurso agua en la zona, a lo largo de los años se han construido varios modelos de simulación del sistema cada vez más fiables y versátiles: Anguita (1971), modelo analógico bicapa R-C (resistencias–capacidades); Cacho *et al.* (1977); Cuenca y Custodio (1971), REPO (1971) y, modelo matemático bicapa de malla poligonal; Iribar (1985) y PHPO (1985), modelo matemático de diferencias finitas, basado en Trescott (1975) pero con sustanciales modificaciones, de malla rectangular variable, modelo bicapa de elementos finitos creado con el programa TRANSIN II (Medina *et al.*, 1989), capaz tanto de hacer simulaciones de los procesos de flujo y transporte como de resolver el problema inverso para ambos.

Como consecuencia de la obtención de una gran cantidad de resultados, tanto cualitativos como cuantitativos, a la existencia de una red activa de observación hidrogeológica (piezométrica e hidroquímica) y a su buena accesibilidad geográfica, el delta se convirtió, desde comienzos de la década de los 80, en uno de los sistemas mejor conocidos y controlados a escala mundial.

Algunos trabajos realizados o en vías de realización en distintas zonas del delta y valle inferior aportan nuevos datos sobre la calidad y el origen de las aguas subterráneas de la zona, ayudando de esta forma al continuo perfeccionamiento del modelo de flujo del sistema. Tal es el caso de los trabajos realizados para los estudios hidrogeológicos previos a la construcción del canal olímpico de remo en el área occidental del delta, los cuales han puesto de manifiesto la existencia, distribución e incidencia sobre la calidad de las aguas del acuífero superficial, de varios depósitos de residuos de construcción y urbanos que rellenan antiguos huecos de extracción de áridos.

1.4.- Metodología

En el área de estudio se ha realizado un inventario de pozos del acuífero libre superficial. El objetivo principal de este inventario es determinar las características de este acuífero, tanto aguas arriba como aguas abajo de la zona de extracción–relleno.

Se han localizado e inventariado 31 pozos, desde Can Rovira a Can Sabadell y cinco piezómetros y dos pozos en la zona de Cal Dimoni, tal como se observa en el anexo A.1.

En base a este inventario, se ha realizado el muestreo sistemático de pozos de aguas subterráneas desde el verano de 1996 hasta el invierno de 1998 para la zona de Can Panyella–Can Sabadell y desde el verano de 1997 hasta el verano de 1999 para la zona de Cal Dimoni.

Para la realización del muestreo se han seguido las directrices marcadas por varios autores, principalmente Appelo y Postma (1996) y Custodio y Llamas (1983). En cada campaña de campo se han medido los siguientes parámetros para cada muestra: pH, conductividad eléctrica, potencial de óxido–reducción (Eh) y temperatura. En el laboratorio las muestras han sido analizadas para obtener las concentraciones de los aniones y cationes principales. Al mismo tiempo, también se ha medido el contenido de elementos traza por su importancia a la hora de caracterizar las zonas influenciadas por los lixiviados generados por las áreas de vertido incontrolado.

Las muestras se han clasificado, utilizando los resultados de los análisis, en función del cálculo de tipo de agua subterránea según la concentración de los iones mayores y empleando los diagramas hidroquímicos de Piper–Hill–Langelier y de Stiff modificado. Todo lo anterior se ha completado estableciendo la posible variación temporal estacional para cada muestra comparando con los datos de las precipitaciones para el período de muestreo.

Con los resultados analíticos también se han elaborado diferentes mapas para cada localidad y época de muestreo. En ellos se han determinado los isocontenidos de iones mayores y elementos traza, las conductividades, las variaciones del pH y del Eh o de la temperatura. Estos mapas han permitido completar la caracterización geoquímica de cada zona y han determinado la posible extensión de los principales contaminantes.

Para el presente estudio se ha efectuado un muestreo de suelos en las localidades escogidas como representativas. Este muestreo ha permitido determinar la composición y se ha relacionado con las concentraciones de los principales iones y elementos traza presentes en las aguas subterráneas. Al comparar los valores se ha cuantificado la interrelación entre los lixiviados generados en las zonas rellenadas y las aguas subterráneas.

Para poder interpretar correctamente los resultados de los análisis de las diferentes muestras se han realizado una serie de modificaciones para poderlos introducir en diferentes modelos de especiación geoquímica, principalmente los programas de la familia del *Wateq*. Así se han obtenido las actividades y los estados de saturación de diferentes minerales que se han colocado sobre las líneas de flujo para su interpretación.

A continuación se han adaptado los resultados de los análisis así como también las principales características del acuífero para utilizar modelos con programas de flujo y transporte (LEHGC 2.0). En nuestro estudio se ha caracterizado geoquímicamente la zona y se ha realizado el estudio del flujo y del transporte de los contaminantes.

En lo que respecta a los métodos geofísicos en el presente estudio se han realizado campañas de prospección electromagnética para determinar la respuesta del subsuelo a los estímulos de los campos magnéticos y eléctricos y obtener la conductividad aparente del terreno. Con los datos obtenidos se han realizado mapas de conductividad aparente para relacionarlos y compararlos con los obtenidos por la caracterización geoquímica.

Capítulo 2

Las extracciones de áridos en el delta

2.1.- Definición del problema y condiciones de elección de la zona

El delta del Llobregat, tal como se describe en el apartado de antecedentes, ha sido motivo de extensos trabajos que se han centrado en los problemas de contaminación. En nuestro caso, el análisis de la evolución temporal de las zonas de extracción de áridos por fotointerpretación ha permitido comprobar el incremento de zonas de explotación de áridos y su posterior rellenado. La revisión de los archivos institucionales nos ha confirmado el hecho de que las zonas de vertido han sido, en su mayor parte, de tipo incontrolado. Para caracterizar dichas zonas se ha realizado el inventario de pozos del acuífero libre superficial con el objetivo de determinar su utilidad en la realización de los muestreos sistemáticos y poder establecer las comparaciones adecuadas con otras zonas de características similares.

2.2.- Evolución temporal de las zonas de extracción de áridos por fotointerpretación.

A continuación se presenta el resultado del estudio de la evolución temporal de las zonas de extracción–relleno obtenido por medio del análisis de las fotografías aéreas de la zona. Debido a que la zona de estudio se encuentra en las cercanías de Barcelona y de su aeropuerto, se ha podido trabajar con varios juegos de fotografías aéreas de diferentes años: 1956, 1968, 1972, 1984, 1986, 1990 y 1993.

La metodología empleada se ha basado en la observación estereoscópica de cada juego de fotografías aéreas con lo que se ha podido diferenciar claramente entre los campos y las zonas excavadas que han sido marcadas (ver figuras 2.1 a 2.5).

Posteriormente se ha determinado cuál es la diferencia entre dos fotografías aéreas sucesivas. Se ha supuesto que las zonas que anteriormente constituían áreas de extracción y, que en la foto más moderna no aparecen como tal, han sido rellenadas.

En la fotografía de la figura 2.1, representativa del inicio de las explotaciones (año 1956), destaca la práctica ausencia de las mismas. Se observan sólo un par de zonas que constituyen actividades extractivas o huecos¹ (en la fotografía en color amarillo). También destaca la antigua carretera de Barcelona a Valencia que es prácticamente una línea recta, lo que facilita su identificación (señalada en color azul).



Figura 2.1.- Fotografía aérea de octubre de 1956. En color azul está marcada la carretera Barcelona-Valencia (actuales B-204 y B-210) y en amarillo se han destacado las explotaciones de áridos. La pista del aeropuerto aparece en la parte inferior derecha.

Los siguientes juegos de fotos aéreas ilustran el inicio de las actividades extractivas de manera más generalizada. Se tiene registro de dos vuelos: septiembre de 1968 y septiembre de 1972. En la figura 2.2 se resume la actividad entre estos años por medio de la evolución de las canteras de extracción. Su localización está marcada en color naranja. Comparando con el año 1956 se puede destacar el aumento de explotaciones (de dos a catorce) y que éstas se realizan en los terrenos adyacentes a los que ya se han explotado y rellenado. También se observa que prácticamente todas las zonas de extracción se encuentran alineadas con la carretera de Barcelona a Valencia (actuales carreteras B-204 y B-210), por lo que se favorecen las explotaciones por la facilidad de acceso y de transporte.

¹ **Huecos:** zonas de actividades extractivas de arenas y gravas en el delta del Llobregat. Dichas zonas han sido posteriormente rellenadas, en adelante se tratarán como zonas de extracción-relleno.



Figura 2.2.- Fotografía aérea en la que se destacan las actividades extractivas (en naranja) entre septiembre de 1968 y septiembre de 1972. La carretera Barcelona-Valencia (actuales B-204 y B-210) se ha marcado en azul. En esta fotografía ya se aprecia la línea férrea que enlaza con el aeropuerto así como la pista en la parte inferior derecha.

En la figura 2.3. se aprecia la aparición de las nuevas zonas de extracción, en color rojo para 1984 y en color verde para las aparecidas en 1986. También se hace patente la desaparición de las anteriores que ya han sido abandonadas y rellenadas.

Por último en la figura 2.4. se han señalado las zonas de extracción aparecidas en los años 1990 y 1993 en color azul-celeste. Se debe destacar que prácticamente no existe ningún espacio sin explotar a ambos lados de la carretera y se inician las nuevas explotaciones en la red de caminos secundarios, perpendiculares a esta carretera.

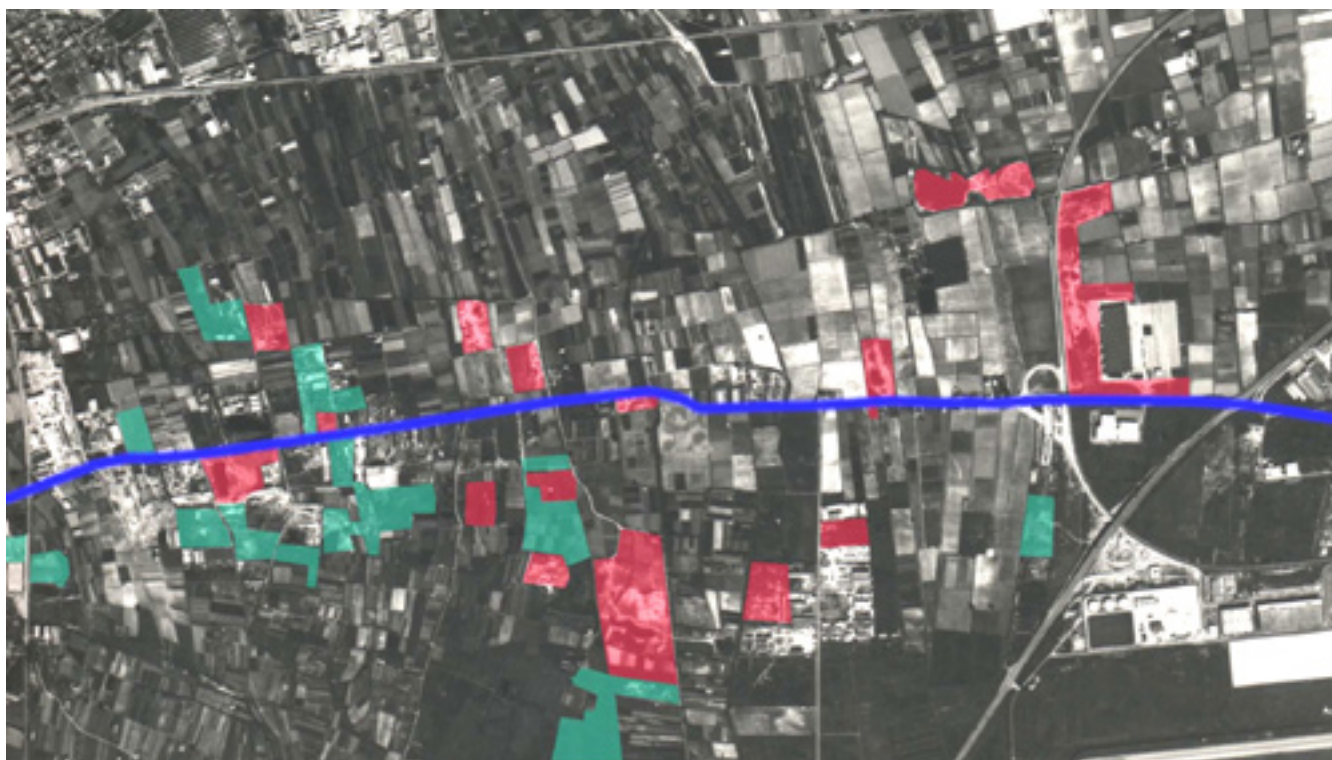


Figura 2.3.- Fotografía aérea que resume la actividad en septiembre de 1984 (canteras señaladas en verde) y marzo de 1986 (canteras señaladas en rojo). La carretera Barcelona–Valencia en color azul. También destacan los depósitos de combustible del aeropuerto y una de las pistas en la parte inferior derecha.

En la figura 2.5. se puede observar un resumen de la evolución temporal de las extracciones en la zona. Se muestra claramente cómo comienza la actividad extractiva de manera intensiva a principios de los años 70 del siglo XX y no se detiene prácticamente hasta la actualidad. Las zonas de extracción que desaparecen entre dos fotografías se supone que se han rellenado con materiales diversos, desde escombros hasta residuos sólidos urbanos, pasando por los desechos industriales y químicos. Esta suposición se basa en la consulta de los archivos institucionales y las entrevistas con las personas del lugar.

2. Las extracciones de áridos en el delta



Figura 2.5.- Ortofotomapa en color en donde se muestra la evolución temporal de las actividades extractivas desde octubre de 1956 hasta septiembre de 1993. Los colores de las canteras son los mismos que en las figuras de sus respectivos años (figuras. 2.1 a 2.4). La carretera se destaca en azul, también se observa el aeropuerto y la parte final de la laguna del Remolar.

2.3.- Trabajos previos en la zona de estudio

En la zona de estudio del presente trabajo son de destacar los trabajos previos realizados por Isamat y otros en 1976 que explican la contaminación del acuífero superficial del valle inferior del Llobregat por la alta presencia de hierro y magnesio en los pozos cerca de Sant Feliu de Llobregat.

Entre Sant Joan d’Espí y la autopista A-2 se han localizado focos de contaminación de metales pesados (cromo, cinc, cobre y plomo) relacionados con el relleno con residuos de los huecos de explotación de gravas (Subirana, 1983).

En la parte derecha del delta, cerca de Castelldefels también se caracterizó la presencia anómala de boro en las aguas subterráneas del acuífero superficial del delta (Candela, 1980; Candela *et al.*, 1980; Custodio y Galofré, 1979).

Al realizarse los estudios previos a la construcción del canal olímpico de remo se observó asimismo la existencia de altas concentraciones de nitrógeno total y de hierro como consecuencia de la interacción de los lixiviados de los vertidos incontrolados con el acuífero (CIHS, 1989).

Por otro lado, el estudio del impacto del vertedero del Garraf sobre la calidad de las aguas subterráneas también ha aportado interesantes datos sobre contaminación del acuífero en la zona más occidental (Custodio, 1981).

Recientemente, la caracterización de las zonas de relleno y su interacción con las aguas subterráneas por medio de métodos geofísicos ha ayudado a perfilar los conocimientos del proceso de interacción y a localizar el avance de la pluma contaminante (Busquet, 1994).

Para determinar la naturaleza del relleno de las zonas de extracción del área de estudio se han consultado los archivos de la *Mancomunitat de Municipis de l’Àrea Metropolitana de Barcelona* en los que se ha encontrado información acerca de los vertidos incontrolados realizados en el ámbito de la mancomunidad. Dichas consultas han permitido determinar que muchos de los sitios de vertido

incontrolado fueron, en su momento, zonas de extracción. Es decir, una vez realizadas las explotaciones, los huecos abiertos eran rellenados (con o sin autorización de la empresa explotadora) con cualquier tipo de desecho. Normalmente las actividades de vertido se realizaban de noche o en ausencia de testigos. Son de destacar los constantes incendios (por combustión espontánea o provocada) en los lugares de vertido. Las personas del lugar relatan que su duración era de días e incluso semanas.

Los primeros vertidos importantes se realizaron en la década de 1960 y entre 1969 y 1973 esta actividad en las zonas de extracción-relleno fue muy abundante. Este periodo de tiempo coincide con el intervalo de cierre del vertedero de Montjuïc y la autorización de operación y apertura del vertedero del Garraf. En esta zona se depositaron los residuos sólidos urbanos de Barcelona y de otros municipios cercanos, asimismo se incorporaron residuos industriales diversos entre los que se pueden mencionar los residuos sólidos que se obtienen al fabricar ácido crómico. En algún caso se produjeron enterramientos masivos de animales muertos.

En estos años, la relativa falta de interés por los temas medioambientales no favoreció la realización de estudios sobre las consecuencias de la contaminación. Se disponía únicamente de los datos orales ya comentados. Se realizaron, sin embargo, algunos estudios de detalle (Candela *et al.*, 1980; Custodio y Galofré, 1979; Molist, Gonzalvo y Alonso, 1979) que mostraron un aumento notable de la mineralización del agua, la creación de un ambiente reductor y la consecuente solubilización de hierro y manganeso, aumento de la corrosividad, y presencia de color y olor (de putrefacción). Todo lo anterior explicaba el frecuente abandono de los pozos del acuífero superficial del delta (Custodio, 1981).

En 1982 la Corporación Metropolitana de Barcelona realiza el “Estudio sobre la regulación de las actividades extractivas en los terrenos rústicos de los márgenes y delta del Llobregat de los municipios comprendidos en el ámbito de la CMB”. En él se intentan “controlar” los vertederos conocidos, se realiza un inventario y se sugieren medidas de solución para los mismos (figura 2.6).

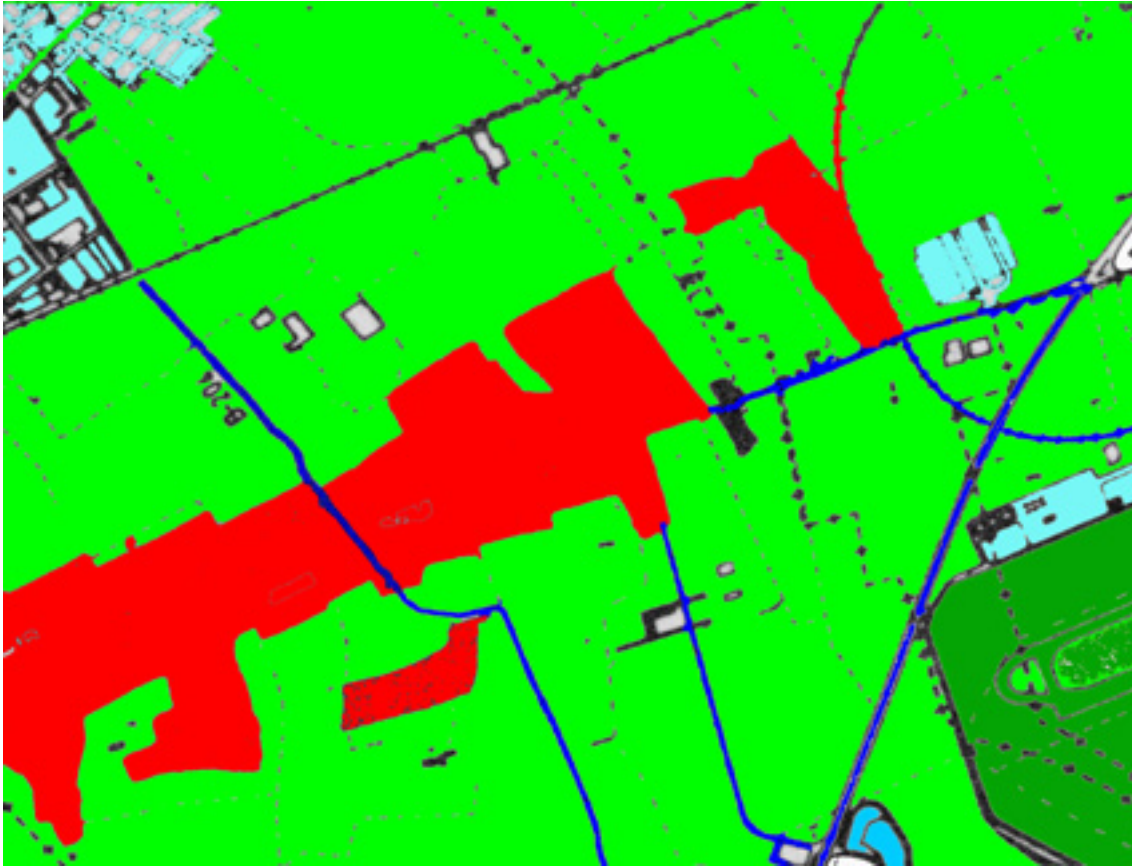


Figura 2.6.- Información obtenida del inventario de las actividades extractivas para la zona de estudio (CMB, 1982). Ver anexo A.2.

En esta figura las áreas en rojo señalan las zonas de extracción-relleno. Nótese el paralelismo de las explotaciones con las actuales carreteras B-204 y B-210. También es de destacar que prácticamente no existe un espacio libre a lo largo de la carretera. En el estudio de las fotografías aéreas (figura 2.5) se observa el cambio de esta tendencia y el inicio de las explotaciones en los caminos secundarios perpendiculares a la mencionada carretera (años 1984-1993).

Basándose en el criterio de **grado de peligrosidad** se establece una serie de valores entre el 0 y el 4 (Tabla 2.1)

Tabla 2.1.- Definición del grado de peligrosidad como la suma de los porcentajes de chatarra, residuos industriales y residuos químicos

Grado de peligrosidad	Rango en %
0	0%
1	0 – 25%
2	26 – 50%
3	51 – 75%
4	76 – 100%

De aquí se obtiene que, dentro de la zona de estudio, existen tres sitios de vertido “identificados”: Camí Ral-El Rourell, Les Marines y RENFE (B-204) (ver figura 2.7). Sus principales características se adjuntan en el Anexo A.2.

En base a los datos anteriores se ha obtenido una primera aproximación sobre los materiales que rellenan las zonas de extracción–relleno, es decir las antiguas graveras de extracción de áridos: chatarra, residuos químicos e industriales, plásticos, materia orgánica y escombros en diferentes proporciones.

Por otro lado se han realizado entrevistas a las personas que han permitido el acceso a sus pozos (puntos de muestreo de agua subterránea) en la zona de estudio. En ellas aparece la idea generalizada de que prácticamente se extrajo material a lo largo de toda la carretera (ver evolución por foto interpretación, figura 2.5 y figura 2.6) y posteriormente se rellenaron los agujeros con todo tipo de material.

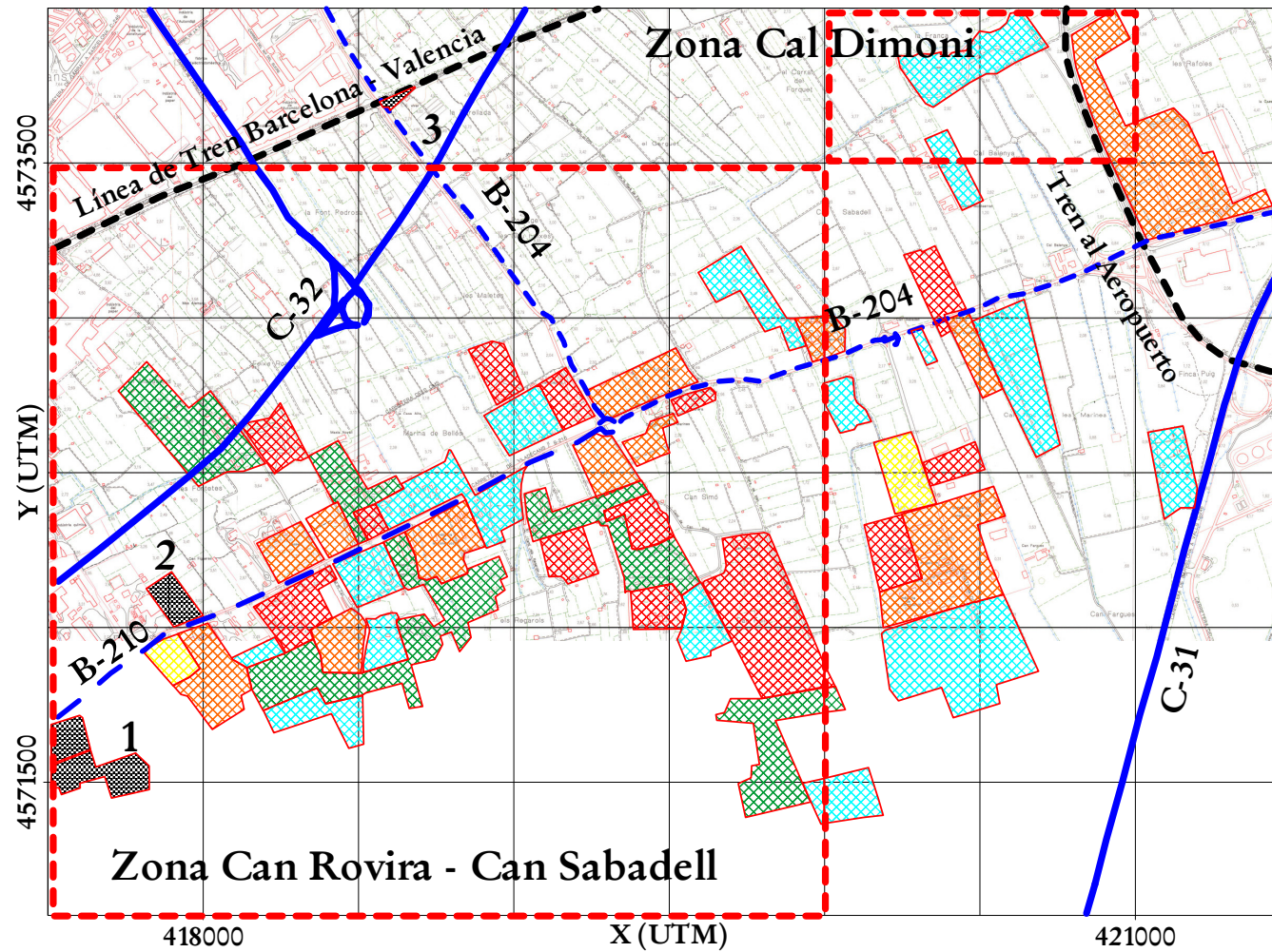


Figura 2.7.- Mapa de localización de la zona de estudio que incluye los tres sitios de vertido identificados: 1.- Camí Ral-El Rourell, 2.- Les Marines, 3.- RENFE (B-204). Las zonas coloreadas corresponden a los diferentes años que han servido para caracterizarlas: amarillo = 1956; naranja = 1972; rojo = 1984; verde = 1986 y azul = 1990 - 93.

2.4.- Comparación con otras zonas de características similares.

El presente estudio se ha basado en la metodología empleada en otras zonas con problemas semejantes. Los principales ejemplos a seguir han sido los estudios de la zona de vertidos en Wilmington, Delaware, EE.UU. (Baedecker y Back, 1979) en donde se llegó a caracterizar la influencia de los lixiviados en las aguas subterráneas, principalmente a partir de los estudios de las condiciones de pH y redox. En Borden, Ontario, Canadá, se caracterizó el flujo de las aguas subterráneas y se delimitó la pluma contaminante (MacFarlane *et al.*, 1983) y se realizó un estudio hidrogeoquímico detallado (Nicholson *et al.*, 1983) permitiendo establecer el alcance de la contaminación por los lixiviados derivados del vertedero abandonado.

En lo que respecta a la influencia de la presencia de metales pesados en los lixiviados y su posible migración a las aguas subterráneas, se han revisado los estudios realizados en un vertedero de Sarnia, Ontario, Canadá, en donde las interpretaciones químicas y la evaluación de las condiciones termodinámicas han demostrado la importancia de los procesos de complejación (Yanful y Quigley, 1986, Yanful *et al.*, 1988). En el segundo simposio internacional de vertederos que se celebró en Cerdeña en 1989, se unificaron por primera vez los criterios de conocimiento, tratamiento, aspectos legales y manipulación de los lixiviados. Cabe destacar también el “vade-mecum” presentado por la Asociación General de Higienistas y Técnicos Municipales y la Compañía General de las Aguas de Francia (Leroy, 1989).

A partir del inicio de la década de los noventa del siglo XX, comenzó una extensa publicación de trabajos acerca del impacto ambiental de los vertederos (tanto controlados como incontrolados) en los suelos y aguas subterráneas de Cataluña y España, entre los que podemos destacar los trabajos de Adarve y Rebollo, 1993; Feliubadaló *et al.*, 1989; Montserrat, 1991; Morales *et al.*, 1994; y Termino y Rebollo, 1994, entre otros.

En los últimos años, el interés creciente en los problemas derivados de la gestión de los residuos ha hecho que los estudios de su impacto en el medio sean tema de numerosos trabajos, desde la modelización de los procesos geoquímicos a pequeña

escala (Yeh *et al.*, 1995) hasta el estudio de las posibles alternativas de remediación (Hahn, 1996).

2.4.1.- La zona del canal Love (Niágara, EUA) como ejemplo de contaminación

La zona de estudio guarda una cierta semejanza con el caso más famoso sobre contaminación por residuos enterrados: El canal de Love, Niágara, EUA.

En 1892 William T. Love comenzó la excavación de un canal entre el río Niágara y el lago Ontario, con la idea de producir energía hidroeléctrica para un nuevo centro industrial. La falta de financiación, el inicio de un período de recesión económica y el descubrimiento de la corriente alterna (que permitía a las industrias estar localizadas lejos de la fuente generadora) hizo que el proyecto del canal se abandonara quedando únicamente como zona lúdica.

En 1920 el canal Love se vendió en subasta pública y se le encontró utilidad al considerarlo como un sitio conveniente para verter residuos. Desde 1942 hasta 1953, se vertieron allí más de 80 sustancias químicas diferentes por parte de la compañía *Hooker Chemical*. Casi 21.000 toneladas de residuos químicos y residuos sólidos urbanos de la ciudad de Niágara fueron depositados en el canal.

Finalmente, en 1953 la compañía vendió los terrenos del vertedero, completamente lleno, a la sección de Educación del pueblo de Niágara por el precio simbólico de 1 dólar; los acabó de rellenar con capas de residuos e incluyó en la venta una advertencia sobre la presencia de residuos químicos enterrados y una cláusula de absolución de responsabilidad por los posibles efectos que pudiesen tener los mismos en el futuro.

Con el paso de los años, se construyeron algunos cientos de casas alrededor de la escuela, edificada justo encima del antiguo canal. Las fuertes lluvias y nevadas en el invierno de 1976/77 terminaron por desencadenar los eventos que hicieron al canal Love ser famoso en el mundo entero: árboles muertos, continuas emisiones de malos olores y problemas con los sistemas de drenaje, inundaciones de los sótanos

de las casas con “líquidos apestosos”, hundimiento de piscinas en los residuos, abortos, enfermedades de la sangre y del hígado, defectos congénitos y daños en los cromosomas muy por encima de lo normal.

Se identificaron una serie de sustancias químicas presentes –entre ellas benceno, dioxinas, dicloroetileno y cloroformo– de las que se sospechaba que eran carcinogénicas. Un estudio de las autoridades sanitarias del estado de Nueva York sugirió que no se podía establecer de forma absoluta que las enfermedades fueran causadas por los productos químicos. Pero a partir de la primavera de 1978 hasta el verano del mismo año se realizaron una serie de muestreos de suelo, gases y control sanitario de 239 familias que vivían en la zona. En vista de los resultados el 2 de agosto de 1978 se declaró el estado de emergencia sanitaria, se cerró la escuela y se recomendó a las mujeres embarazadas y a los niños menores a 2 años que abandonaran la zona. El 7 de agosto de 1978 el canal Love fue declarado zona de emergencia federal (ver figura 2.8).

A partir de este momento, se inició el proceso de limpieza del canal. El método utilizado para minimizar la presencia y migración de contaminantes fue cubrir el lugar de vertido y las áreas adyacentes con una capa de arcilla compactada de 1 m de grosor y con plástico de polietileno para reducir la infiltración de aguas superficiales y de lluvia. El movimiento lateral del agua se inhibió con la utilización de tubos perforados especiales para el drenaje. Estos procedimientos redujeron en gran medida el movimiento del agua a través del lugar, y el agua que se recuperaba del canal se pudo separar y tratar.

A inicio de los años 90 la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) consideraba limpias algunas partes de la zona y se inició la venta de algunas casas a pesar de la reputación del área. A principios de 1995, el mantenimiento y la gestión fueron transferidos por parte del estado de Nueva York a una compañía consultora que continuaría el muestreo y el control a largo plazo. El sitio se convirtió en una palabra familiar en todo el mundo relacionada con los residuos tóxicos.



Figura 2.8.- Fotografía aérea de infrarrojos tomada en la primavera de 1978. En el centro se observa la escuela primaria de la calle 99. También se pueden ver dos anillos de casas que bordean la zona del vertido. Las zonas blanquecinas muestran el lugar en donde la vegetación ya no crece como consecuencia de su posible interacción con los contaminantes del subsuelo (Keller, 1996).

2.5.- Síntesis y conclusiones del capítulo

La zona de estudio se localiza en el margen derecho del delta del Llobregat, considerando como tal a la región que se extiende desde el cauce del río hasta las costas del Garraf. En concreto la zona que queda a la derecha de la desembocadura. La principal actividad en esta zona a lo largo de la historia ha sido la agricultura, hasta que, en la segunda mitad del siglo XX, comenzó el auge de la industria por la proximidad a la ciudad de Barcelona.

Deben destacarse las explotaciones a cielo abierto para extracción de áridos que surgieron a lo largo de la antigua carretera Barcelona–Valencia a partir de la primera mitad de los años 70 (del siglo XX) por constituir los huecos y posterior relleno con residuos de dichas graveras el principal objeto de este estudio.

Se ha escogido, precisamente, la zona de mayor concentración de explotaciones que se encuentra dentro de los términos municipales de Gavà y Viladecans y está comprendida entre las carreteras B–204 y B–210, ocupando una extensión aproximada de 10 km². Con respecto a estas zonas de relleno deben considerarse los siguientes aspectos:

- 1) Desde los años 50 (del siglo XX) ha sido el núcleo más importante de extracción de áridos para la construcción, principalmente arenas y gravas, en esta parte del delta.
- 2) Después del cierre del vertedero de Montjuïc a finales de la década de los años 70 y principios de los años 80, constituyó el lugar “ideal” para el vertido incontrolado de toda clase de residuos en las explotaciones abiertas, incluso los residuos urbanos de la propia ciudad de Barcelona.
- 3) Esta actividad extractiva y las actividades agrícolas han afectado el acuífero superficial libre de esta zona o de “primeras aguas”, llamado así por la gente del lugar, por lo que los usuarios se han visto forzados a dejar de utilizarlo o buscar fuentes alternativas como por ejemplo el acuífero profundo o aguas residuales depuradas.

Capítulo 3

Síntesis Hidrogeológica

3.1.- Geología del delta

El delta del Llobregat se destaca en la costa de Barcelona con unos 97 km² de superficie siendo del tipo redondeado con un solo distributario. (Solé Sabarís, 1968). Es característica su extrema horizontalidad, con un promedio de 0,1% de pendiente, que se ve interrumpida solamente por las cadenas de dunas costeras. Esta horizontalidad se destaca notablemente por el hecho de estar enmarcada por una serie de relieves relativamente elevados como el macizo del Garraf, la Sierra de Collserola o Montjuïc. Sin embargo, entre Montjuïc y Collserola existe una zona deprimida que, por la parte NW (Cornellà y l'Hospitalet), forma un talud de unos 15 m que se eleva sobre la llanura deltaica (Marquès, 1984).

Desde una posición elevada, por ejemplo desde Montjuïc, se puede observar la forma de embudo del delta, abierto generosamente hacia el mar. Su formación es, geológicamente hablando, reciente. En concreto, el delta se comenzó a formar después del último período glacial, es decir, hace unos 18.000 años. Durante esa época, el río acababa su curso en los alrededores de Molins de Rei, por lo que el Mediterráneo se adentraba entre el Garraf y Collserola formando una especie de estuario.

Para comprender el desarrollo de la superficie deltaica, se puede hacer mención a la variación de la línea de costa desde la época romana, cuya evolución ha sido reconstruida por Marquès (1984) a partir del estudio de los taludes generados por las explotaciones de áridos que se encuentran alineados a lo largo de la antigua carretera de Barcelona a Valencia o Camí Ral a Valencia, actuales carreteras B-204 y B-210 y que constituyen el principal objeto del presente estudio.

En dichas explotaciones, debido a la realización de perfiles, estudios sedimentológicos y a que se han encontrado piezas arqueológicas, la mencionada autora dedujo el medio de deposición de los materiales como correspondiente a una

playa, y por tanto, a una primera línea de costa correspondiente a la época romana (sobre el **siglo I**). Esta línea de costa tiene un interés particular ya que se encuentra a unos tres kilómetros tierra adentro de la costa actual, por lo que el desarrollo de la llanura deltaica es muy reciente.

El hecho que precisamente pase un camino por esta línea de costa se puede explicar al considerar que actualmente es en la zona de las dunas donde, por ser topográficamente más elevadas, se construyen las vías de comunicación.

Utilizando ese mismo criterio la segunda línea de costa se ha localizado entre la antigua laguna de la Murtrassa y el actual estanque de la Murtra. Su edad no se ha determinado, pero su utilización como camino ya se observa en los mapas posteriores al año 1590.

La tercera línea de costa, que fuera la causante de la formación de las lagunas de la Murtra y del Remolar, probablemente se extendía desde la desembocadura actual de estas lagunas hasta la parte superior del complejo lagunar de l'Illa–Ricarda–Magarola. Teniendo en cuenta los documentos históricos que citan por primera vez el Remolar en el siglo XI, se puede datar esta línea de costa como anterior a la fecha mencionada.

Por último, la cuarta línea de costa que debió ser la causante de la formación del complejo lagunar de l'Illa–Ricarda–Magarola, probablemente se extendía desde la actual desembocadura de estas lagunas hasta el curso del Llobregat, con una dirección aproximada NE. En cuanto a su edad, debe ser posterior al siglo XI y anterior al XVIII. En la figura 3.1 se puede observar la localización de las diferentes lagunas y la evolución de las líneas de costa.

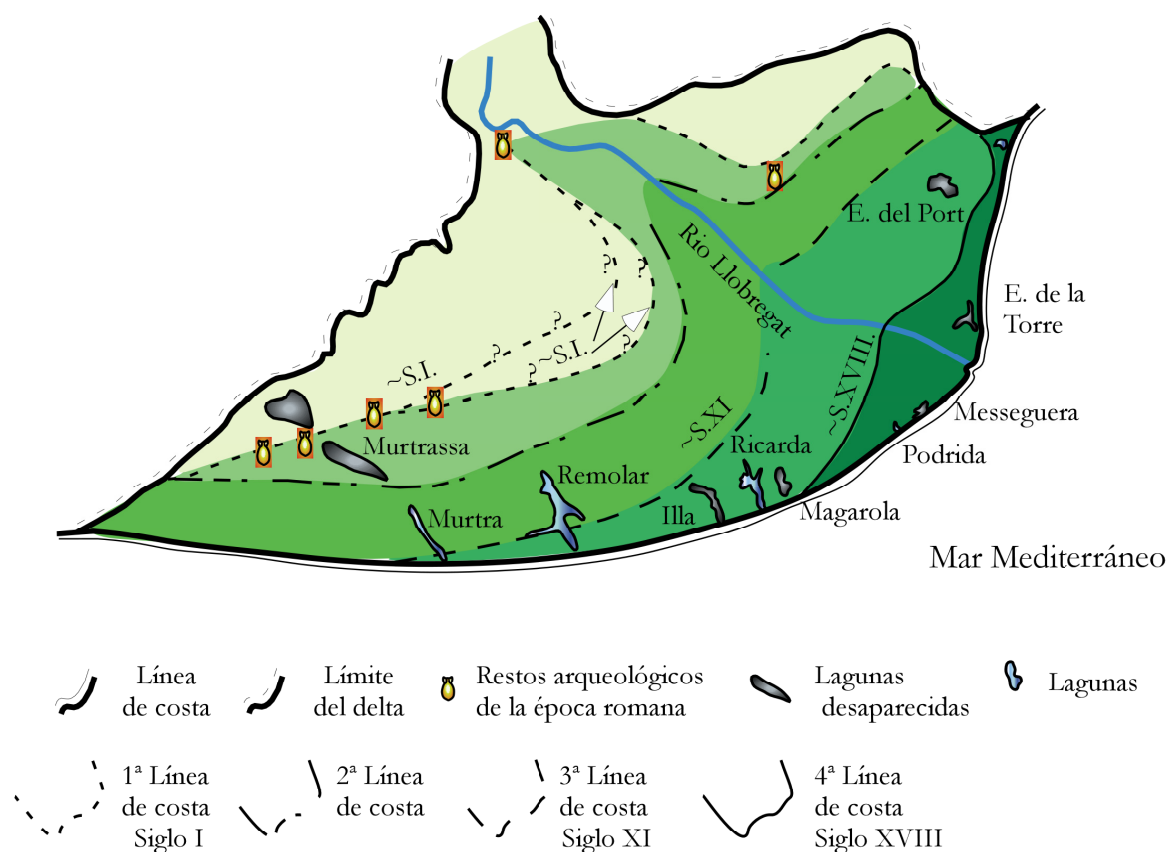


Figura 3.1.- Etapas de desarrollo de la llanura deltaica y posición de las líneas de costa. Modificado de Marquès (1984). Nótese principalmente la alineación correspondiente a la época romana (siglo I) que coincide con la posición actual de la carretera B-204 / B-210 en donde se alinean las zonas de extracción de áridos y posterior relleno.

En lo que se refiere a la geología del delta del Llobregat se han realizado muchos estudios generales y de detalle a lo largo de los años. Dichos estudios constituyen la base de la información geológica de la zona y han ayudado a perfilar sus principales características.

En la figura 3.2 se observa el mapa geológico de los alrededores de Barcelona. En él se ha localizado la zona de estudio y se destacan los principales materiales que constituyen el área fuente para el aporte de los sedimentos que llegan finalmente a depositarse en el delta.

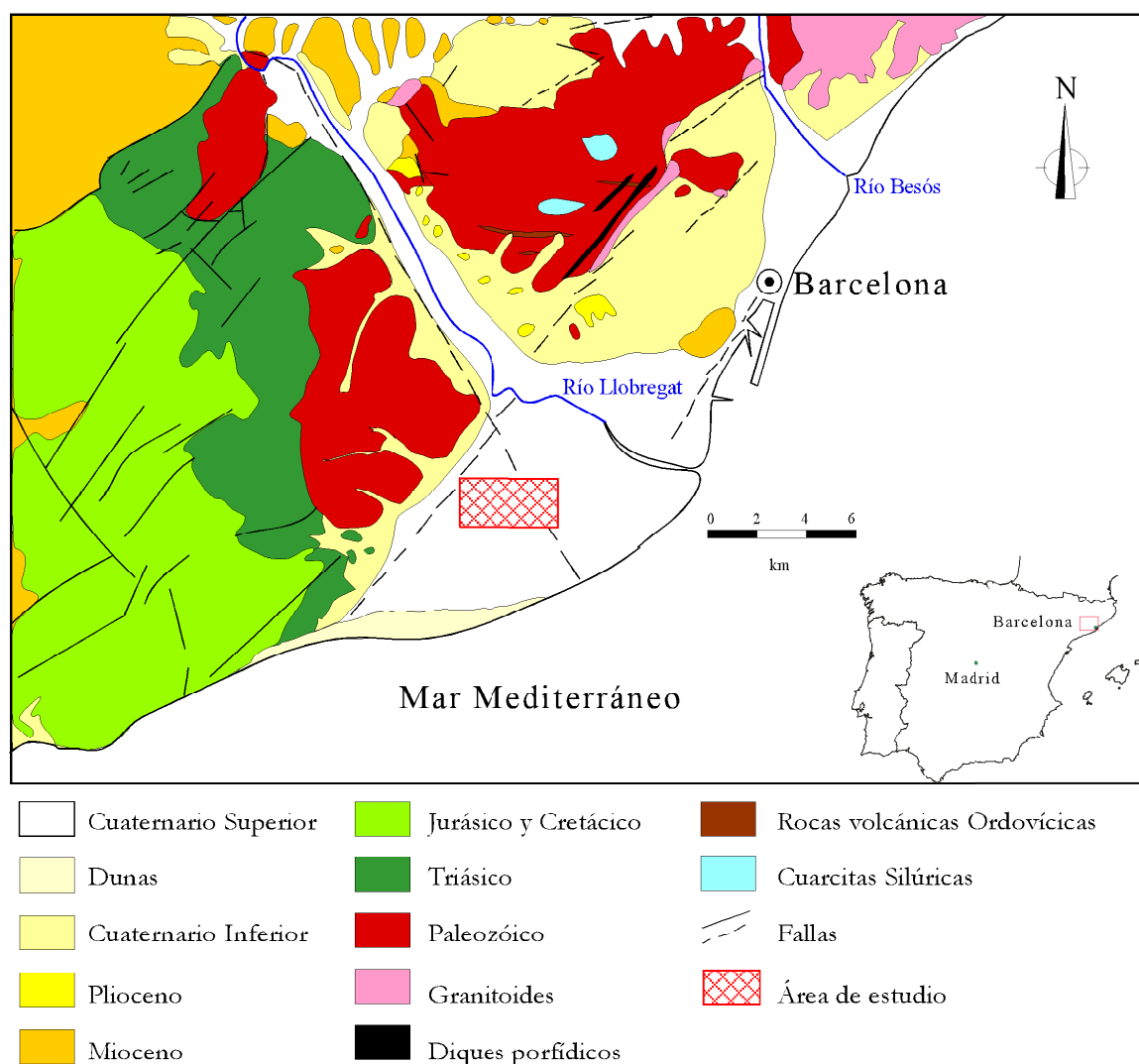


Figura 3.2.- Mapa geológico de los alrededores de Barcelona y el delta del Llobregat (Modificado de Almera, 1891)

Los materiales son esencialmente de edad cuaternaria, se apoyan fundamentalmente sobre el Plioceno y forman un conjunto en forma de cuña, típico en los deltas de la zona del Mediterráneo como el del Ebro o del Ródano.

De este conjunto se han diferenciado los denominados: *complejo detrítico inferior* y *complejo deltaico*. El límite entre ambos es un nivel de gravas que recibe la denominación de gravas fluviales de relleno post glacial o de depósito aluvial post glacial. Este límite es muy constante en todo el delta y también se encuentra en los deltas mediterráneos ya mencionados. (Marquès, 1984; Oomekens, 1970).

Los materiales del *complejo detrítico inferior* llenan tres depresiones formadas sobre los materiales pliocénicos y separadas por pequeños umbrales más o menos paralelos al valle del río. Se caracterizan por la presencia de dos niveles muy constantes de color amarillo, de material fino en la parte central del delta y detríticos en las orillas. Están separados por niveles rojos que pasan lateralmente a conglomerados o arenas. Entre los materiales rojos y amarillos se presentan también tramos detríticos, generalmente de grano grueso, de influencia fluvial. Su límite superior se sitúa en un nivel de gravas muy constante en todo el delta del Llobregat y en los otros del Mediterráneo. Este límite queda muy bien señalado porque constituye el acuífero profundo del delta (Iribar, 1992; Manzano *et al.*, 1986–7 y Marquès, 1984;).

El *complejo deltaico*, con un grosor aproximado de 60 m, comprende desde la última secuencia transgresiva, datada en 10.900 +/- 140 A.P. por Marquès en 1984, hasta los niveles superficiales de la llanura deltaica. Presenta la estructura clásica de cuña, con el prodelta, frente deltaico y llanura deltaica característicos. Sus materiales se depositan sobre la superficie formada por el techo del *complejo detrítico inferior* y sus características más importantes son la existencia de dos cubetas muy poco acusadas, separadas por una ondulación que se extiende desde Gavà–Viladecans hacia la costa, en la zona del aeropuerto. Esta formado por:

- a) El tramo inferior, con los niveles salobres y las arenas litorales como primeros episodios transgresivos.
- b) El tramo intermedio o cuña fluvio–marina, que incluye parte de las secuencias de recubrimiento expansivo en la base y de recubrimiento retroactivo en la parte superior. Separa los dos acuíferos presentes en la zona y está formado por arcillas limosas y limos arcillosos con porcentajes bajos de arena. Del análisis de sus características se puede deducir que los sedimentos de este tramo son materiales transportados en suspensión que fundamentalmente provienen del río y que han sido depositados en un ambiente marino.

- c) El tramo superior comprende los niveles de frente deltaico y de la llanura deltaica. Corresponde en general a la fase final de la secuencia de recubrimiento retroactivo a causa de la progradación del delta. Acusa una serie de pulsaciones que complican esta parte de la secuencia deltaica y constituye el acuífero libre superficial del delta (Manzano *et al*, 1986-7; Marquès, 1984).

La estructura general del delta se puede observar en el corte de la figura 3.3.

El conjunto de materiales actúa como un acuífero multicapa, en el que tienen conexión los diferentes niveles acuíferos que lo integran y tal como se ha explicado, se pueden distinguir dos acuíferos principales:

- a) Acuífero superficial libre: formado por arenas, con permeabilidad del orden de 10 m/día y un espesor saturado promedio de aproximadamente 6 m.
- b) Acuífero inferior semiconfinado: compuesto por diferentes niveles de arenas y gravas, su permeabilidad varía entre 10 y 35 m/día y su espesor es variable.

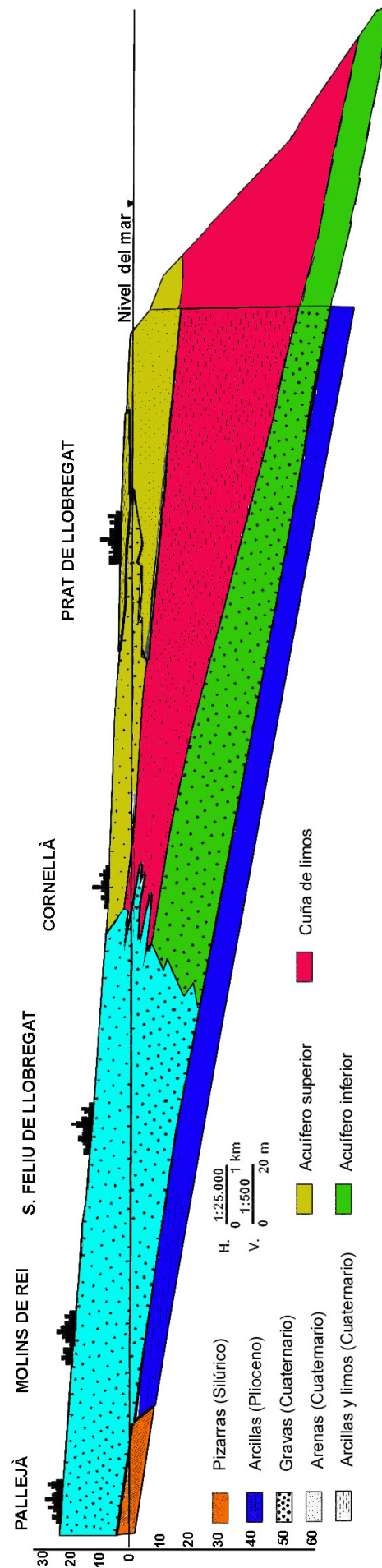


Figura 3.3.- Disposición en profundidad de los dos niveles que se han identificado como acuíferos y que corresponden a los niveles de gravas datados como cuaternarios y separados por una cuña de arcillas y limos (Modificado de MOP, 1966)